POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Preliminary experimental study on CO2 absorption with novel choline-proline Ionic Liquid to the methane upgrade

Original
Preliminary experimental study on CO2 absorption with novel
choline-proline Ionic Liquid to the methane upgrade / Cannone, S.F., Lanzini, A., Santarelli, M.. - ELETTRONICO. - 1:(2022), pp. 341-347. (XXII CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF - Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana Perugia 7-8 Aprile 2022).

Availability:
This version is available at: 11583/2985075 since: 2024-01-15T10:57:31Z

Publisher:
Morlacchi Editore srl

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

19 November 2026

CIRIAF

Centro Interuniversitario di Ricerca
sull'Inquinamento e sull'Ambiente - "Mauro Felli"

A.D. 1308 unipg
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA



XXII CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF

SVILUPPO SOSTENIBILE,
TUTELA DELL'AMBIENTE E DELLA SALUTE UMANA

Perugia 7/8 aprile 2022

ATTI

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2022.
ISBN 978-88-9392-375-0 (online)

L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su www.morlacchilibri.com.
La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode).
La licenza permette di condividere l'opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.
© 2022 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia

www.morlacchilibri.com

SEGRETERIA

centro.ciriaf@unipg.it
www.ciriaf.it

Tel. 075.585.3717
Fax 075.585.3697

Via G. Duranti, 67
06125 Perugia

CIRIAF - Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente - "Mauro Felli"
Università degli Studi di Perugia

XXII CONGRESSO NAZIONALE CIRIAF
Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana - Atti
Perugia, 7-8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

Perugia: Morlacchi Editore University Press, 2022.
ISBN 978-88-9392-375-0 (online)

Impaginazione e progetto grafico di copertina:
Roberto Fiorella (CIRIAF - Università degli Studi di Perugia)

L'edizione digitale on-line del volume è pubblicata ad accesso aperto su www.morlacchilibri.com.
La presente opera è rilasciata nei termini della licenza Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode). La licenza permette di condividere l'opera, nella sua interezza o in parte, con qualsiasi mezzo e formato, e di modificarla per qualsiasi fine, anche commerciale, a condizione che ne sia menzionata la paternità in modo adeguato, sia indicato se sono state effettuate modifiche e sia fornito un link alla licenza.
© 2022 Morlacchi Editore University Press

Pubblicato da Morlacchi Editore University Press, Piazza Morlacchi 7/9, 06123 Perugia

www.morlacchilibri.com

Temi Congressuali

- Energie rinnovabili e alternative
- Sostenibilità ambientale ed economico-sociale
- Edilizia sostenibile e bioarchitettura
- Modelli di economia circolare e filiere innovative integrate
- Clima e ambiente
- Progetto PRIN Biocheaper
- Progetto PRIN Methane recovery and carbon dioxide disposal in natural gas hydrate reservoirs

Comitato organizzatore

Francesco Asdrubali
Elisa Belloni
Francesco Bianchi
Beatrice Castellani
Valentina Coccia
Michele Goretti
Cristina Piselli
Lorenzo Silvestri

Comitato scientifico

Francesco Asdrubali
Giorgio Baldinelli
Paolina Bongioannini Cerlini
Bruno Brunone
Cinzia Buratti
Pietro Buzzini
Simonetta Cirilli
Franco Cotana
Francesco Fantozzi
Silvia Meniconi
Gino Moncada Lo Giudice
Elisa Moretti
Andrea Nicolini
Anna Laura Pisello
Federico Rossi
Alessandro Toscano

Segreteria Organizzativa

Ilaria Castellini
Roberto Fiorella
Leandro Lunghi
Fabio Meattelli
Maria Angela Polverini

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Indice

Introduzione ..... p. V

Skills creation and retention via impact investment for innovation. ..... p. 1
Andrea Alunni, Lilian Volcan

Emissione di particelle sub-micrometriche da sistemi di riscaldamento residenziali. ..... p. 23
Elisa Caracci, Laura Canale, Giorgio Buonanno, Luca Stabile

Quantificazione degli effetti idro-meccanici prodotti da interventi di Ingegneria Naturalistica e applicazione ad un caso di studio nel centro storico di Deruta. ..... p. 36
Silvia Settembre, Arianna Lupattelli, Erica Cernuto,Diana Salciarini

Comunità Resilienti. Progetto di rigenerazione del Villaggio ENI di Borca di Cadore (Bl). ..... p. 56
Monica Battistoni, Paolo Belardi, Alessandro Melis

On the combination of fluorescence and phosphorescence in light-emitting materials for a longer energy-saving effect within the built environment. ..... p. 69
Chiara Chiatti, Claudia Fabiani, Roberto Bondi, Giulia Zampini, Loredana Latterini, Anna Laura Pisello

Biomimetic envelope: a new strategy for limiting surface overheating in buildings. ..... p. 79
Silvia Cavagnoli, Claudia Fabiani, Franco Cotana, Anna Laura Pisello

Materiali termoisolanti sostenibili: analisi sperimentale delle prestazioni termiche di un sistema di isolamento a cappotto con pannelli in fibra di legno. ..... p. 95
Marta Roncone, Francesco Asdrubali, Paola Marrone, Claudia Guattari

Governance Territoriale Strategica per implementare l'uso energetico delle biomasse boschive in territori fragili. Il caso studio del Sud Ovest Orvietano. ..... p. 114
Luca Fondacci, Andrea Nicolini, Franco Cotana, Tommaso Giannoni, Giacomo Fabrizi, Laura Maria Becchetti, Leandro Lunghi

Realizzazione e sperimentazione di un sistema innovativo per il controllo e la riduzione delle polveri sottili in caldaie a pellet di piccola taglia. ..... p. 143
Franco Cotana, Ramoon Barros Lovate Temporim, Alessandro Petrozzi, Silvia Garlatti, Valentina Coccia, Andrea Nicolini, Leandro Lunghi, Giacomo Fabbrizi, Tommaso Giannoni

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Legno e stampa 3D per la regolazione passiva del comfort igrometrico. Valutazione delle deformazioni igroscopiche attraverso l'analisi per immagini. ..... p. 154
Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Giulia Pelliccia

Exploring the Influencing factors of a sustainable Urban green Renewal. ..... p. 163
Elena Tarpani, Lisa Bitossi, Roberta Cureau, Ilaria Pigliautile, Anna Laura Pisello, Chiara Biscarini

Potenzialità di produzione energetica da biomasse ligno-cellulosiche da frutticultura. ..... p. 180
Filippo Cardelli, Giacomo Fabbrizi, Franco Cotana

Green hydrogen for RES energy storage and natural gas system decarbonization: a case study in central-southern Italy. ..... p. 196
Fausto Arpino, Carmelo Fallone, Michele Bertone, Christian Canale, Gino Cortellessa, Marco Dell'Isola, Giorgio Grossi, Giorgio Ficco, Linda Moretti

Insights into the effect of light pollution on mental health. ..... p. 208
Federica Cirimbilli, Giulia Menculini, Anastasia Grazia Chieppa, Pierfrancesco Maria Balducci, Luigi Attademo, Francesco Bernardini, Tiziana Sciarma, Patrizia Moretti, Alfonso Tortorella

Integrated and innovative approach for the recovery of by-products of the brewing industry. p. 221
Ilary Belardi, Ombretta Marconi, Assunta Marrocchi, Marco Paolantoni

Impatti di ciclo di vita delle biomasse: un caso studio sulla produzione di cippato forestale. .. p. 233
Grazia Barberio, Laura Cutaia, Caterina Rinaldi, Flavio Scrucca

KID: dalla sostenibilità all'Internet of Bike. ..... p. 246
Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Filippo Cornacchini, Andrea Parisi, Giulia Pelliccia, Marco Seccaroni

Use of biomass ashes for the treatment of expansive clayey soils. ..... p. 256
Paola Comodi, Costanza Cambi, Maximiliano Fastelli, Elia Pandolfi Balbi, Paola Sassi, Leonardi Pioppi, Azzurra Zucchini, Gianluca Cavalaglio, Franco Cotana

Energy Transition: Solar and Wind Energy based Combined Heat and Power system Model for small communities. ..... p. 269
Eid Gul, Giorgio Baldinelli

Cooling effects in a coastal city in Italy. ..... p. 277
Roberta Jacoby Cureau Ilaria Pigliautile, Anna Laura Pisello

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Green books ad alta voce per una transizione ecologica e culturale. ..... p. 289
Maria Ermelinda De Carlo

Three-dimensional model of bifacial photovoltaic systems, experimental validation, and evaluation of temperature, albedo and perimeter effects. ..... p. 309
Roberto Corso, Marco Leonardi, Andrea Scuto, Gabriella Milazzo, Marina Foti, Cosimo Gerardi, Fabrizio Bizzarri, Stefania M. Privitera, Salvatore A. Lombardo

Le comunità energetiche rinnovabili come modello innovativo di gestione dell'energia: aspetti normativi, benefici e analisi tecnico-economica per un caso di studio. ..... p. 315
Luca Brunelli, Elisa Moretti, Benedetta Pioppi, Anna Laura Pisello, Silvia Bini, Luciano Zepparelli, Franco Cotana

Raman and SEM remarks of CO_2 and CH_4 gas hydrates. ..... p. 333
Rita Giovannetti, Andrea Rossi, Marco Minicucci, Marco Zannotti

Preliminary experimental study on CO_2 absorption with novel choline-proline Ionic Liquid to the methane upgrade. ..... p. 341
Salvatore Cannone, Andrea Lanzini, Massimo Santarelli

Wood 4 Green Umbria. Il legno per la Next Generation. ..... p. 348
Fabio Bianconi, Marco Filippucci, Simona Ceccaroni

Improved utilization of Trasimeno undervalued fish towards a valuable food. ..... p. 366
Raffaella Franceschini, David Ranucci, Rossana Roila, Andrea Valiani, Naceur Haouet, Marisa Framboas, Caterina Altissimi, Raffaella Branciari

In detail description of a new lab-scale experimental apparatus, designed to investigate clathrate hydrate formation and CO_2-CH_4 replacement. ..... p. 372
Beatrice Castellani, Federico Rossi, Alberto Maria Gambelli, Andrea Nicolini, Mirko Filipponi

Production of small scale CO_2-CH_4 hydrate samples, simulating natural deposits after replacement processes and used for Raman analyses. ..... p. 380
Beatrice Castellani, Federico Rossi, Alberto Maria Gambelli, Mirko Filipponi, Giorgio Minelli, Andrea Nicolini

Goldfish as a bioindicator of the water quality and health of Trasimeno Lake ecosystem. ..... p. 388
Francesco Agnetti, Arianna Piersanti, Rossana Roila, Andrea Valiani, David Ranucci, Tamara Tavoloni, Raffaella Franceschini, Raffaella Branciari

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Micro interventi rigenerativi dello spazio pubblico Vision, interscalarità, interdisciplinarietà. Il caso di piazza Sant'Angela a Foligno. ..... p. 394
Paolo Verducci, Elisa Moretti, Valerio Palini, Francesco Demma

Life Cycle Assessment della filiera di trattamento di biomasse residuali: un caso studio. ..... p. 404
Alberto Brunetti, Maurizio Cellura, Francesco Guarino, Sonia Longo, Simona Rosaria La Mantia, Roberta Rincione

La diagnosi energetica della sede di Arpa UMBRIA a Perugia: analisi dei consumi energetici e delle prestazioni dell'edificio e valutazione di interventi di ottimizzazione dell'uso dell'energia. ..... p. 412
Maria Giulia Proietti, Ettore Stamponi, Andrea Nicolini, Emanuele Montenovo, Cristiana Simoncini, Francesco Longhi, Elisa Moretti

Fermentable sugars production from cherry tree pruning: Response surface model optimization of EtOH organosolv pre-treatment. ..... p. 432
F. Spaccini, T. Giannoni, E. Belloni, S. Mateo, A.J. Moya, C. Buratti

Natural extract exerting antimicrobial activity against food-borne pathogen: a 'green' strategy as processing aid treatment to ensure the hygiene and safety food industry. ..... p. 444
Rossana Roila, David Ranucci, Sara Primavilla, Caterina Altissimi, Domenico Pettas, Andrea Valiani, Raffaella Branciari

Energy Analysis of a Biomass-Based Combined Cooling, Heating, and Power System. ..... p. 451
Franco Cotana, Simona Di Fraia, Musannif Shah, Andrea Nicolini, Alessandro Petrozzi, Laura Vanoli

Thermo-acoustic characterization and porosity evaluation of concrete composite materials based on cement and excavated earth. ..... p. 461
Carolina Santini, Claudia Fabiani, Franco Cotana, Anna Laura Pisello

Due applicazioni dell'uso dell'idrogeno: un sistema per la produzione elettrolitica da fonte rinnovabile e riconversione in energia elettrica in fuel cell ed un prototipo di drone per volo in alta atmosfera alimentato a fuel cell. ..... p. 474
Concettina Marino, Antonino Nucara, M.F. Panzera, Matilde Pietrafesa

i-REXFO LIFE: an innovative business model to reduce food waste. ..... p. 499
Pietro Bartocci, Gianni Bidini, Sara Massoli, Mauro Zampilli, Katarzyna Luiza Slopiecka, Silvia Garlatti, Giulio Buia, Francesco Fantozzi

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Introduzione

Il Congresso Nazionale CIRIAF 2022 "SVILUPPO SOSTENIBILE, TUTELA DELL'AMBIENTE E DELLA SALUTE UMANA", giunto alla XXII edizione, si è tenuto presso il Polo di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia, nei giorni 7 e 8 aprile 2022. Dopo due edizioni tenutesi in modalità telematica a causa della pandemia da COVID-19, il congresso è tornato a tenersi in presenza, con una significativa partecipazione.

Il CIRIAF (Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli"), a cui afferiscono oltre 100 docenti universitari di 14 diversi Atenei, promuove da anni attività di ricerca interdisciplinare sui temi dell'inquinamento ambientale, dello sviluppo sostenibile, delle fonti energetiche rinnovabili e alternative, della pianificazione energetica, della mobilità sostenibile, degli effetti sanitari e socio-economici dell'inquinamento ambientale.

Il Congresso Nazionale CIRIAF, giunto alla ventiduesima edizione, è un importante appuntamento annuale per le ricerche in materia di energia e ambiente che ha visto negli anni crescere la partecipazione di ricercatori che orientano i propri studi verso un approccio interdisciplinare alla sostenibilità.

Oltre alle Sessioni orali sui temi che tradizionalmente hanno caratterizzato il Congresso CIRIAF, sono state organizzate Sessioni strutturate e Tavole rotonde per la divulgazione dei risultati di progetti di ricerca internazionali e nazionali ed in particolare:

- Energie rinnovabili e alternative;
- Sostenibilità ambientale ed economico-sociale;
- Edilizia sostenibile e bioarchitettura;
- Modelli di economia circolare e filiere innovative integrate;
- Clima e ambiente;
- Progetto PRIN Biocheaper;
- Progetto PRIN Methane recovery and carbon dioxide disposal in natural gas hydrate reservoirs.

Il Congresso ha pertanto rappresentato un'importante occasione per la divulgazione dei risultati dei progetti menzionati e per un dibattito tra le varie unità operative.

Sono pervenuti complessivamente 39 lavori, tutti di buona qualità, di cui il presente volume di Atti rappresenta il compendio.

Il Presidente del Comitato Scientifico *Prof. Franco Cotana*

Il Presidente del Comitato Organizzatore *Prof. Francesco Asdrubali*

Il Direttore del CIRIAF *Prof. Bruno Brunone*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

ARTICOLI SCIENTIFICI

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Skills creation and retention via impact investment for innovation

Andrea Alunni [1]*, Lilian Volcan [2]

[1] C.I.R.I.A.F. – SSTAM, Via Duranti, 63 – 06125 – Perugia, Italy

[2] International Gender Studies (IGS) Centre at the Lady Margaret Hall of the University of Oxford, UK

* Autore di riferimento. E-Mail: andrea.alunni@hotmail.com

Abstract: This work was developed to offer an overview about impact investment and skills creation in the innovation arena, illustrating how impact investing can be instrumental in the skills creation process. It starts with a brief examination of the main features of impact investment and its chronological development to then characterize some existing initiatives at European level that represent examples of good and innovative practices in investments with impact. It also explores in detail what new initiatives and instruments for impact investment in skills creation for innovation could be applied. In particular, it takes into account the ongoing debate about impact investment, which appears to be limited, and the need for developing new instruments (both financial and educational ones) to encourage and stimulate impact investment in order to ensure the sustainability in the skills creation and retention process, that eventually could result in reducing the brain drain and supporting the creation of high value-added jobs within the innovation ecosystem. To achieve the objectives of the present study, the author complemented his existing knowledge with a literature review and consultations with experts, including policy officers at various European Commission services, experts from United Nations and members states administrations. The author acknowledges that, given the far-reaching extent of the analysis, the conclusions only provide some initial thoughts and considerations to aid policy development. Further studies in future academic papers will be welcome to provide guidance on additional questions, such as how impact investment programs can be designed for best results in skills creation, and how to set up the key performance indicators of such programs.

Keywords: Impact investment; instruments for impact investment; skills creation; Skills retention; innovation; brain drain; high value-added jobs; Southern Europe; SMEs; policy development.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

The creation and growth of an innovation-driven ecosystem in Southern Europe (SE) suffers from lack of skills and capacities as a major obstacle for innovation. Moreover, there is a persistent brain drain in the region, exacerbated by the absence of incentives for investment in human capital [1-2]. Considering that skills related to innovation have a potential to boost entrepreneurship, job creation, and sustainable development, to address the brain drain challenge it is instrumental to invest in skills creation so as to boost employability and create opportunities that ultimately will stop emigration from the region. In this light, the aim of this research is to explore how to fill the existing skills gap in the SE region by redirecting (or reinforcing) investment in the small and medium sized enterprises (SMEs) sector through impact investing. For this purpose, a diagnostic analysis was conducted on how impact investment is used in leading European innovation systems to support skills development, in order to propose best practices and examples for the SE region. Over the years, impact investing has been endorsed by various public institutions. The European Union (EU), for example, has firmly embedded it in its policies and funding programmes, being the most recent the Green Deal and InvestEU. This research maps key existing EU initiatives, and proposes adapted financial instruments, enabling conditions, complementary measures, and modalities for impact investment in innovation skills, with a focus on Southern Europe. It is worth noting that the description of the programmes in selected European economies and the examples here provided are not exhaustive, but rather the result of a deliberate choice that best fit the purpose of this research. The research begins with a brief description as to why the literature highlights lack of relevant skills and capacities as a major obstacle to innovation in the SE region and in particular to the creation and growth of innovation driven SMEs. It then focuses on the emergence of impact investing in the community development arena and explains its principles and defining features for it. It presents a selection of products, projects, and case studies that illustrate its structure and potential in relation between investment actions of the European Union to support directly or indirectly skills creation that potentially will strengthen innovation. Specifically, the research is focused on impact investing as a partnership between private investors working in partnership with public institutions of the European Union. The research then explores the current situation with impact investment and skills for innovation in the SE region, ending with proposals for instruments and activities that can help build sustainable skills development programmes and initiatives while taking into account the specific environment and potential challenges which may constrain the replicability of the best practices. Findings indicate that the discussion and awareness about impact investment in the SE region is highly limited and that there is an urgent need for developing new instruments (both financial and capacity building ones) to promote and spur impact investment programmes and initiatives that ensure the sustainability in the skills creation and brain retention process. Similar to other Southern EU Members States, Italy needs to further build and enhance relevant skills and competences for a twin green and digital transition and to recover from COVID 19's economic consequences. In this context, impact investing in Italy, for example, has a promising potential to support skills creation, as it assigns to financial actors a mission in society. First of all, the objective of investments is to generate monetary gains along with other non-financial values, typically positive

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

social and environmental impacts. Secondly, such generated values are due to be shared (by design) with the other stakeholders and the community as a whole. At the same time, there is a need for the third sector involved in skills development (such as NGOs, training providers, impact investing specialists and social economy organizations) to improve entrepreneurial capabilities and their ability to attract private investment. This can be coupled with direct matched funding of innovative projects/social enterprises. This research can be used by different types of organisations, both governmental and non-governmental, including International Financial Institutions (IFIs), to: i) design new or amend/supplement the existing financial instruments for impact investment with an aim to support skills development for innovation and ii) to propose or implement capacity building activities in the region, in order to create or foster local innovation ecosystem for impact investment.

2. Impact Investing in the journey towards smart specialisation in Europe

In this research an analysis was conducted on 'how impact investment is used in leading European innovation systems to support skills development' in order to propose best practices and examples for the Southern Europe (SE) region where lack of skills and capacities is considered a major obstacle for innovation. The need for this analysis was founded by the fact that over the years impact investing has been endorsed by various public institutions [3-4], starting with the European Union (EU) - which has firmly embedded it in its policies and funding programmes, and yet in the Southern Europe (SE) persistent brain drain — in particular among youth — have led to a shrink of the skills pool in the region [5]. In the following session this research briefly puts into a framework the brain drain challenge affecting Southern Europe to then embrace reasons why impact investment could be an effective option to address this challenge.

2.1. The lack of skills and capacities for innovation in Southern Europe

There is a growing innovation gap between European regions, and productivity development is lagging behind in some countries and regions. In addition, businesses on the global frontier have become more productive both in the manufacturing and service sectors. This warns that a greater emphasis on knowledge and the diffusion of technology on behalf of major companies and research organizations is necessary to enable less productive enterprises in both advanced and less advanced countries of Europe [6].

The lack of relevant skills and capacities is a major obstacle to innovation in the Southern Europe (SE), in particular to the creation and growth of innovation driven SMEs, due to aging populations, long years of unemployment for large population groups, inactivity, underemployment and engagement in low productivity–low value-added economic activities [7]. This, together with the persistent brain drain — in particular among youth, has led to a shrink of the skills pool in the SE region [8-9]. According to OECD, the absence of incentives for investment in human capital further exacerbates the above problematic and creates obstacles in inclusive skills development that can support innovation [10]. This is particularly relevant when the SMEs struggle to 'combine different types of innovation' and access to strategic resources (such as skills, finance and knowledge), as it becomes an obstacle to efficient

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

innovation diffusion. Conversely, it is considered that skills, and especially innovation-related skills, have the potential to boost entrepreneurship, job creation and also drive sustainable investment on a national and regional level in Southern Europe.

In fact, the small and medium sized enterprises (SMEs) sector is considered the backbone of faster growing economies and ensuring support to innovative SMEs is key to boost economic growth, innovation, social integration and, perhaps most importantly, jobs creation. For instance, today SMEs employ between 60% and 80% of the active population in Europe [11].

The Southern European region therefore still require a certain degree of human capital capable to provide the necessary technological, managerial, and marketing capabilities to boost the production processes and products of these enterprises — which entails bringing together market players to create a toolbox of experience to face new challenges. Productivity challenges require in turn that skills creation adapts to the changing skills demand. In some countries this is driven by different policies, including smart specialisation strategies, education and research policies, and inclusive skills creation (using both formal and non-formal learning). In fact, currently employability in SE region is heavily dependent on modernised qualifications, entrepreneurial learning, and workplace training among other elements of human capital development [12], which together with digital skills are of high importance for the innovation capacity of local SMEs ecosystem.

For example, increasing training in digitalisation together with gender inclusion could be a way to promote digital skills as a transversal skill for innovation. According to the University of Alicante-Spain, the digital literacy provided by its Technology Transfer Office (TTO) has been instrumental to help young scientists and entrepreneurs to establish innovative SMEs in Spain and gain commercial expansion while settling in and contributing to their local innovation ecosystem [13]. This hints that having ICT as a priority domain for innovation should entail very different niches and approaches across the SE region. Moreover, since the number of patents in the SE region is rather limited if compared with Northern European Countries, it is also necessary to increase Intellectual Property (IP) awareness among innovators, inventors, and SMEs decision-makers until it is understood that IPRs are intangible assets whose value and importance as an asset class constantly increases as we move to knowledge-based economies worldwide. This might well prove transformative for key industries to shift from labour-intensive into innovation-driven while fuelling strategic sectors targeted in each country's roadmap for skills creation and retention. It could be done by promoting support facilities in the region that help innovative SMEs to make strategic use of IP as a way to project their trade in the domestic and international market. In short, a smart use of IP might be conducive to the increase of competitiveness and income from IP-bundle, which can have long-term effect in the SE region economy in terms of better paid job creation and brain retention. Also, creative SMEs (with soft IP content) can play an important role in providing disruptive services and attracting investors while nurturing the local ecosystem. The skills-for-innovation development process is a complex one and needs to take into account rapid technological changes.

2.2. Impact investing – assigning to finance a mission in society

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The literature review indicates that, from a theoretical perspective, impact investing has to be interpreted through the lenses of the collective action problem for public good. Impact investing is a case of institutional innovation providing a framework for the alignment of public and private interests [14]. It is a market-based solution with a form of commodification and financialisation of public value. However, contrary to past institutional reforms, this is not a form of privatization of public resources, but a form of public private partnership (PPP) leading towards the creation of a new market which has been adopted as a framework in recent studies on impact investing commissioned by the European Parliament [15].

2.2.1. Impact investment features and spectrum

Three are the defining features of impact investing that distinguish it from all the other forms of finance and financial products: intentionality, measurability and additionality. Intentionality exists when positive impact is a direct consequence of a deliberate action of investing in order to exclude all the other economic activities that generate negative externalities. For this reason impact investing is often considered in the sustainability due diligence and evaluation of any investment — i.e., ex ante and ex post. Measurability concerns the possibility to device the value of the generated social impact in objective and consistent manners and represents a crucial determinant of sustainable accountability and transparency. At the moment there are several competing international standards converging within the United Nations Sustainable Development Goals (UN SDGs) framework, which includes the nascent European taxonomy for sustainable activities [11] under which the Platform on sustainable finance has been established as a permanent Commission expert group. Additionality defines the extra positive social outcome generated by and attributed to the investment that, otherwise, would have not occurred. This last criterion draws the line between impact investing and other forms of ethical and sustainable finance, as these other forms do not generate a positive plus in social value and underlying investment decisions are aligned to a predetermined set of non-financial values – those being environmental, social and governance as in the case of ESG (Environment, Social, and Governance) that have become the most common form of sustainable finance. Additionality also aligns impact investing to the investment policy of most public investors, such as the European Investment Bank (EIB). Impact investing is also to be distinguished from philanthropy and public subsidies, as they are defined by the expectation of a financial return. Indeed, it should not be considered at odds with the most basic principle of traditional finance, i.e., profit maximisation, but rather in harmony with the evolution of such principle in the direction of producing more than just financial value and not just for the benefit of capital owners (shareholders) and fund managers.

The realisation of financial gains is therefore a prerequisite of impact investing. Conversely value sharing includes targeted stakeholders and may nevertheless give way to other nonfinancial objectives. The question debated amongst professionals considers if there is a trade-off between financial and non-financial results or impact investing can deliver market risk-adjusted returns in line with the correspondent asset classes. In the latter case, impact investing could really have an impact in the

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

future of mainstream finance and investment volume for public value [16]. Hence, there is a rich phenomenology of impact investing that demands a conceptual classification. Most of the variations that impact investing may assume and its relation with mainstream finance and philanthropy. It can be found within a spectrum that goes from a focus on financial returns only, to a focus on impact only: the first category includes traditional finance, whose sole purpose is the maximisation of profits with no explicit interest in the social impact generated, whereas the second refers to philanthropy, whose sole purpose is the generation of social impact with no interest in generating financial returns. In between the two extremes, there is a range of asset classes and tested models of impact investing, which at the moment is emerging as a conceptual model that offers a general approach to the field and draws from the recommendations of the G8 Taskforce for social impact investing [17].

2.2.2. The evolution of the impact investing market and policy

The roots of impact investing are multiple and stretched back to the dawn of capitalism [18]. Their intertwining is anything but linear and clear. In this research the last couple of decades have been examined to highlight the most relevant developments and milestones for relevant policy and public value creation. In Europe, impact investing emerges at the beginning of the new millennium, driven by a coalition of policymakers and investors in London [19]. In 2000, the New Labour government established the Social Investment Task Force to identify innovative solutions to channel private investments into community development. This move responded to the Third Way agenda to overcome the conflict between market and society and use market-based solutions to reform public services [20-21].

In 2005 the Commission on Unclaimed Assets was set up to use money left unclaimed in dormant bank accounts. Several years later, the Commission's recommendation led to the establishment of Big Society Capital, the first wholesaler or fund of funds created to foster the impact investing market. In 2006, Muhammad Yunus was awarded the Nobel Peace Prize for founding the Grameen Bank and pioneering microcredit and microfinance. However, impact investing remained a niche for policy experimentation, financial innovation and social entrepreneurship until the global financial crisis hit in 2008. Then it emerged as a response to bring finance back to its core purpose to serve the real economy, and to assuage public anger against the financial sector. In particular, in the UK the new Government Coalition was elected in 2010 with a programme of public spending cuts and transformation of public services.

It was the Big Society agenda that brought impact investing at the core of institutional innovation [22]. In 2010 the first Social Impact Bond was launched to tackle reoffending. This is the first example of public private partnership (PPP) that draws private capital to finance innovation in public service with a payment by result approach that shifts the risk from the State to private investors. In 2012 Big Society Capital was launched with £600m capital partially 'given' by the major commercial banks. And, in 2013, the British Government launched the G8 Taskforce for social impact investing as part of its Presidency of G8. The opening statement of the then British PM is particularly revealing:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

"We've got a great idea here that can transform our societies, by using the power of finance to tackle the most difficult social problems, problems that have frustrated government after government, country after country, generation after generation. Issues like drug abuse, youth unemployment, homelessness, and even global poverty. The potential for social investment is that big. So I want to make it a success in Britain and I want to sell it all over the world".

That zeal underpinned by the activism of the G8 Taskforce kicked off impact investing as a global movement multiplying new, dedicated funds and initiatives worldwide, and multiple acknowledgements from the most prominent international institutions and opinion leaders. Not least, it helped rebranding the financial sector after the global crisis.

2.2.3. Europe embracing impact investment to boost innovation

The European Union has recognised the strategic importance of a kind of impact investing since the Dutch presidency in 1997, which inspired both the Lisbon Treaty and the Europe 2020 Strategy. The EU focus was mostly on the convergence between economic and social development — although the contribution of the private sector, especially finance, was ancillary. Change and full inclusion of private partners in renewing public institutions and their mandate came to the front of policy making in 2010 as the concept of social innovation was introduced in Innovation Europe, the new innovation strategy of the European Union. The global financial crisis had accelerated the retrenchment of the welfare state and its ability to offer solutions to a wide range of growing challenges. Phenomena such as an ageing population, increasing migratory flows, changes in family structures, and the pressure on employment exerted by unprecedented technological shocks, threatened the capacity of public finance to cover the costs of basic services as never before. In the face of this emergency, on the solution of which will partially depend the survival (by means of evolution) of a social contract, social innovation presents itself as the application of innovative practices to societal problems, which engage forces beyond the State and requires first and foremost a particular type of funding aligned with the principles of impact investing.

Then, an array of new policies was introduced, giving ever greater space to private initiative within public policy. In the Social Business Initiative of 2011, Commissioner Barnier explicitly introduced impact investing as a source of private investment targeting private companies pursuing a mission of public interest besides profit making [23]. That was the turning point, also considering that policy was part of the overall revision of the capital market in the Union. Two more policy strands of the European Union are to be considered to have a clear picture. Impact investing has been introduced within the reform of the Welfare State as the application of the investment mindset for the transformation of public services and revaluation of funding allocated by the State to support citizens in all stages of their life. This was the approach championed by the Directorate-General for Employment, Social Affairs and Inclusion (DG EMPL, European Commission) with the Social Investment Package [24]. There was a role for private investors, but it was marginal. On the other hand, DG EMPL launched another programme, namely the European Programme for Employment and Social Innovation (EaSI) that brought together

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

all the components of impact investing to tackle unemployment and channel investments and innovation in the job market. Especially in its support to microfinance and social entrepreneurship, EaSI has been a direct public support to the development of the impact investing market. But it has given a rather restrictive interpretation favouring non-profit institutions (or companies with substantial limitation in profit distribution) at the expenses of the participation of mainstream market players. The European Investment Bank (EIB) and its equity investment arm, the European Investment Fund (EIF), have been at the forefront of impact investing.

In 2015, EIF launched the Social Impact Accelerator, the European equivalent of Big Society Capital although with less fanfare, capital, and capabilities. The turning point was marked by the Juncker Plan as the first public private investment programme to support the recovery of the European economy after the long tail of the global financial crisis over the real economy. The European Fund for Strategic Investment (EFSI) reached €0.5 trillion, introduced impact as evaluation criteria for investment, and identified social infrastructures as investment targets – in other words putting hospitals, schools, and affordable housing on the same level as the traditional infrastructures such roads, bridges and energy facilities. The Juncker Plan also included the establishment of the Advisory Hub, a unit within the EIB that provided technical assistance to project proponents.

The Juncker Plan marked a milestone and most of its innovation have been taken and expanded in Invest EU, the follow up programme that represents the most mature expression of a European policy for creation of an impact investing market. We will see more about InvestEU in section 2.3.

The response of the European Union to the impact of the Covid pandemics has reinforced the new trend increasing the political backing and committed resources as in the Next Generation EU Recovery Plan. At the same time, the European Union has made a step forward with the launch of the European Green Deal, establishing global leadership in the environmental dimension of impact investing. In particular, the Platform on Sustainable Finance [25] is the dedicated programme within the Directorate-General for Financial Stability, Financial Services and Capital Markets Union, European Commission (DG FISMA); a move that had been planned since 2018 as a response to the rising threat of climate change and the need for an effective engagement in the Paris Climate Agreement (2016). It is therefore expected that the response to the socio-economic consequences of Covid-19 pandemics will switch the public attention back to the social dimension.

Very recently, in July 2021, the Platform on Sustainable Finance published Draft Report by Subgroup 4 on a Social Taxonomy[26] for discussion and reflection, with a suggested structure in two dimensions - vertical and horizontal. On the one hand the vertical dimension is to focus on products /services for basic human needs and basic infrastructure, whereas the economic activities that make these products and services more accessible do no harm to efforts to achieve other social objectives. On the other hand, the horizontal dimension takes into account impacts on different groups of stakeholders affected by economic activities including workers, consumers and communities. Horizontal objectives would be likely to include a combination of entity-and activity-level criteria.

Europe recognises that economic activities such as job creation are inherently socially beneficial and that a social taxonomy has to distinguish between these inherent benefits and added social benefits

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

such as improving access to quality healthcare or ensuring decent jobs. It also recognises that for some social topics it might be more difficult to develop meaningful quantitative criteria. Skills development has also been mentioned, mostly in relation to upgrading skills of employees in companies, which could contribute to boosting company competitiveness. The move of the European Union with the Green Deal has been echoed by some of the main asset managers championed by BlackRock. With almost 8 trillion asset under management, BlackRock is the largest asset manager in the world. In 2018 Larry Fink, CEO of BlackRock, wrote a letter to all portfolio companies calling his peers to take in consideration the value a company creates for society along with profits for shareholders [27]. That message translated into action, leading to a gold rush for sustainable investments otherwise coded as ESG (environment, social and governance). Meanwhile, the ESG has grown exponentially, especially in Europe, reaching over $800 billion by the end of 2020. Some estimates of the market's size were as big as $32 trillion, using the broadest definitions, and suggested it had tripled in a decade.

It is believed that in 2008, impact investing was a reaction to the financial crisis and its social and political consequences. But from 2018 on, the market enthusiasm for sustainable investments has been driven by a changed context and rational calculation: reputation, competition for talented customers and employees, and preventing climate change from rocketing the world economy (i.e., systemic risk).

2.3. Modalities of implementing impact investment focusing on skills creation in Europe

At EU level, an important initiative is **InvestEU**. Taking into account leading European innovation systems, it emerges clearly that the InvestEU Fund, combining the European Fund for Strategic Investments (EFSI) with 13 centrally managed EU financial instruments into one instrument, offers the most significant framework in Europe to accelerate the development of human capital for innovation for the modalities it presents. Here following are the reasons why:

— First, the programme is designed to tackle market failures and lack of capabilities through a combination of high-risk capital, pre-set and simplified legal framework and technical assistance. In an interview, this was underlined by an InvestEU policy officer as follows: "the programme tends to favour financial relationship with companies investing in people".

— Second, features of the programme that have proven workable and impactful include the 'Social Investment and Skills' policy window, which has the objective to tackle areas of issues such as working conditions, poverty relief, social exclusion.

— Third, it provides social impact eligibility criteria "sustainability proofing"[28] to assess the eligibility of investment proposals that target social impact, for example, via skills creation for innovation.

Looking at the allocation principles for establishing financial products per policy window contained in the Investment Guidelines Regulation[29] for InvestEU, we note that social impact has been explicitly listed together with skills development, so that:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

"financial products to support financing and investment operations whose main objective is to achieve a positive social impact or skills development, fall under the Social Investment and Skills window;"

The European Structural and Investment Funds (ESIF) in the programming period 2021-2027 and in particular the European Regional Development Fund (ERDF), is another instrument where it appears to be increasingly more potential and more opportunities for supporting human capital development and skills for innovation in the EU Member States. In particular, under Policy Objective 1 one of the specific objectives is "developing skills for smart specialisation, industrial transition and entrepreneurship", Investments in education and training are essential for the [green and digital] transition [30].

On a wider geographical coverage, the Social Outcome Funds are another mechanism that can support skills development accelerating the introduction and growth of a social impact investing market in the region and, in particular, Social Outcome Contracts. The Social Outcome Fund is a new financial model which has as a main purpose to simplify for the public administration the purchase of outputs as realised results delivered by third parties (either public, private or not-for-profit) that meet policy goals. Internationally, the most successful example is the Education Outcome Fund, a public-private initiative led by UNICEF and already operating in developing countries [31].

The above analysis shows that, in the making, the impact investing market has a huge potential to support skills development for inclusion and innovation. Its development requires leadership, multi-stakeholder approach and appetite for experimentation and risk- taking. Such a new market is strongly aligned with the EU's policy goals, but it hasn't reached maturity within the EU yet to deliver on its potential. Furthermore, the level and degree of experimentation with associated risks and financial capabilities requires a high level of commitment by private partners. That indicates that private partners must combine a mix of public value mission with robust financial capabilities to be the most suitable partners, especially in volatile markets.

2.3.1. Impact Investment initiatives adopted in Southern Europe

The initiatives described below show how impact investing represents a tool to improve outcomes in education and support skills development while inducing public bodies, banks, service providers, philanthropists, and other stakeholders to develop evidence-informed, outcome-oriented mind-sets and processes. These examples were specifically selected to give an idea about modalities to support skills development, although they do not constitute a comprehensive list of those currently implemented. Nevertheless, the analysis of these selected initiatives provides design and execution elements to be taken into account in view of their relevance and viability in the Southern Europe (SE) region, identifying preconditions and possible solutions to constraints that may emerge.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The "Portugal Inovação Social" Initiative[32] is the largest experiment of "market creation" in the European Union (excluding the UK after Brexit) through European Structural Funds in a sector – impact investing – that is still underdeveloped, like in Italy. It demands an incisive and coordinated intervention as well as a political leadership and substantial mobilisation of public resources. Its success will be assessed in the long term, but it surely represents a blueprint for other SE countries. However, the Portuguese initiative brought out how current funding rules might pose constraints to the design and implementation of social impact investing programmes especially with regard to performance payments in SIB schemes, since inputs, but not outputs and outcomes are eligible expenditure.

In this regard, there are at least three solutions that can be put in place on European level:

- ✓ fiscal incentives for SIBs investors;
- ✓ investment models in which philanthropic or public investors use part of their outcome payments to support return payments to other investors;
- ✓ the use of European resources, namely structural funds, not as grants but for financial instruments.

The experiences launched in the wake of the Portuguese experience indicate that the effective execution of schemes might be hindered by factors other than regulatory constraints. This is particularly the case of:

The Social Investment Fund for Employment Impact (Fondo di investimento sociale per l'impatto occupazionale) constituted in May 2021 by ANPAL (Italian Agency for Active Labour Market Policies) using €50 million of the Youth Employment National Operational Programme (funded by ESF) to finance centres of excellence and other innovative projects aimed to provide professional training and upskilling to the NEET (young people who were not in education, employment or training) population of central and southern regions[33]. The Fund struggles to advance to the implementation stage due to the lack of an in-depth analysis of the target market characterised by a low level of maturity of both service providers and investors, a lack of market infrastructure and limited number and capabilities of intermediaries.

The Sardinian Social Impact Investing Fund (Fondo Social Impact Investing), launched during the 2014- 2020 programming period with €2 million from the European Regional Development Fund (ERDF) budget and €6 million from the European Social Fund (ESF) budget, with the intention to go beyond the classical logic of grant-based financing and to attract co-investors[34]. The call for proposal launched in March 2019 was suspended in August 2019 since no projects were submitted and it was never re-opened. Potential applicants were discouraged by the fact that the information required (ie. identification of targets, baseline and control group, a methodology for measuring potential savings) was beyond their actual capabilities, and the risk-return profile of the operation discouraging.

These two Italian experiences suggest that:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

- Capacity building and technical assistance should be provided to public administrations and service providers to design and implement innovative financial tools with complex operating mechanisms. Such activities should firstly cover collection and management of relevant data to be used in the design phase and for measurement and validation of project results (i.e., feasibility study and market assessment);
- Impact investing does not work if its ecosystem is not ready. Pilot initiatives in SE should engage and involve stakeholders (training and education providers, impact advisors and investors, philanthropic institutions, aid agencies, intermediaries, evaluators) inclined to partner with public actors to launch innovative initiatives;
- Practices, tools and procedures developed under the InvestEU Advisory Hub can become references for countries of the SE region when it comes to financial, operational and impact measurement models.

The Fund for Impact of Intesa Sanpaolo and the CGD-EFSI initiative show that leading — private and public — financial institutions can be key in ensuring the right to education.

- Asset managers should be engaged by governments with a view to create co-investment funds to support young people throughout the whole educational and upskiling journey.

2.3.2. Main challenges faced by the SE region in the effort to close innovation-related skills gap

An analysis of the current EU initiatives that links the funding for innovation with skills development tools in the last decade was conducted to make a diagnostic analysis on how impact investment is used in leading European innovation systems to support skills development, in order to propose best practices and examples for the SE region. The analysis suggests that the most common pressing issues faced by SE region include:

— Urgent need to expand the skills base in order to achieve a critical mass of qualified workforce that may well give life to a strong innovation ecosystem and support the development of the SME sector.

— Lack of a dedicated investment window for social investment and skills that targets social enterprises, microfinance, training, and social innovation (additional to the InvestEU policy initiatives and instruments).

— Need for developing the capacity of institutions devoted to advance entrepreneurial capabilities in the region, and their ability to attract private investment that can be coupled with direct match funding of innovative projects/social enterprises.

— Need to integrate advisory services and train the trainer components into programs for skills development and innovation, to support larger market absorption and capacities, and enhance the necessary impact.

— Need to address prevailing lack of programs in the region with clear KPIs to measure in an objective and consistent manner skills spill-over effects should be aligned to the EC pursuit to help with

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

human capital development as a way to nurture the birth of a local innovation ecosystem conducive to achieve a multiplier effect in terms of prosperity, wealth, and quality jobs creation.

— Major focus is on digital transformation to help a regional knowledge-based economy that creates equal opportunities for all citizens, which demands attention and dedicated programmes aimed at expanding the use of digital technologies to create new opportunities and innovative business processes to strengthen ties and cooperation and convergence within other European Union countries.

Additionally, the feedback received from interviews carried out on this matter suggest that the discussion on and awareness of impact investment in the SE region are highly limited, which holds even more for the impact investment programs and initiatives for skills development. Interviewees, however, considered that recent developments show that there is a growing focus on: i) skills enhancement for innovation and ii) regional approach and exchange of knowledge and experience among the countries of this region.

2.3.3. Impact investments to support innovation-driven SMEs skills development

It is clear that SMEs are the main drivers of economic development in the region because they account for creating private initiatives, innovation, and employment. However, despite their importance, SMEs are extremely sensitive to economic downturns. In general, the current financial support is concentrated primarily in the banking sector through loan guarantee schemes and reduced interest rates, reason why debt financing remains the major mechanism for SMEs funding in the region.

In the effort to understand how to fill the existing skills gap in the SE region by redirecting (or reinforcing) investment in the small and medium sized enterprises (SMEs) sector through impact investing, current financial instruments used to enhance effective delivery were examined.

The EU finances a large part of its interventions in Southern Europe countries in close cooperation with local partners. The EU is the biggest donor in the area of human capital development and together with regional and international actors, including IFIs, the trend is upwards. For example, the EBRD has increased its support for SMEs in several European countries to provide new credit lines to partner financial institutions for on-lending to local businesses. On its end, the EU is complementing these funds to ensure that SMEs increase their competitiveness by shifting towards a green economy.

Also UN Institutions, like UNDP and UNIDO, have an increasingly important role in implementing SME and human capital development initiatives.

By looking at the current investment instruments available for innovation promotion and skills development available to SMEs in the SE region, it transpires that among those offering access to finance (the biggest constraint on businesses in the region today) and non-financial support (such as guidance and advice on how to create and develop their businesses), practical initiatives that present suitable candidates for upskilling include:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

— Bank loans extended at improved conditions (such as lower collateral and interest rates), often also to riskier categories of SMEs.

— Access to targeted equity investment and support to foster the launch and development of high-growth and innovative SMEs.

Expanding existing financial platform services and targeted focus on innovation skills, as part of the best practices to embrace, will further help promote initiatives in each country that target inclusive skills creation while supporting key stages of the enterprise development process. This would include the provision of seed and scale-up financing. In addition, it will further fortify a nascent regional innovation ecosystem.

2.3.4. New set of instruments to be considered to support for innovation-driven SMEs

As already mentioned, impact investing is meant to produce more than just economic value through the realisation of financial gains, by giving way to several non-financial objectives, including skills creation and retention, and local economic stability. There are therefore a series of new set of instruments that can be used to develop an impact investing market supporting skills development in the SE region mobilising resources and actors. They include:

- The **InvestEU Fund**, which allows continued cooperation with individual countries in the fields of research and innovation as well as SMEs. It is worth noting that in addition to the amount dedicated for provisioning the EU guarantee itself, the budgetary envelope for advisory support is instrumental in ensuring that countries develop capacities to make best use of the opportunity.

New instruments that can be key to attract further impact investment in the Southern Europe region at national level, institutional level, and SMEs level can be a combination of existing tools and funding programmes and creation of new ones, as per the example of InvestEU. For an effective design and implementation of such instruments, it is essential to ensure:

- Political Commitment: it is important for each SE country economy to develop a cohesive instrument to foster an inclusive skills creation process and to help deploy the funding for the implementation of the investment plan.

- Broader engagement of the Private Sector in skills development: the private sector has become more active in skills development during the last years, e.g., through opportunities for work-based learning, involvement in definition qualification and training standards, cooperation with training providers to deliver training. But the bulk of this engagement is concentrated among a certain number of innovative companies. Unlocking the innovation potential of the private sector requires governmental action that creates appropriate

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

incentive structures and support mechanisms for engagement of a wider spectrum and number of companies (in particular SMEs) in skills development.

- ❖ Increase of intellectual property (IP) awareness while boosting ecosystem-based strategy to develop and evolve with suitable partners and skilled workers, getting positive technical spill over effect from external sources and testing these adjustments in the local market before planning expansion abroad.

2.3.5. Can social impact generated by current instruments be measured?

A number of selected undergoing and completed initiatives that link impact investment with human capital development and innovation were examined to understand whether relevant measure (in an objective and consistent manner) of the social impact generated by skills creation and skills retention was possible and/or whether a well-developed system of KPIs is deemed necessary.

In an interview with representatives of the European Investment Fund (EIF), the answer to the question 'How do you measure social impact generated by impact investments?' was that there are not predefined indicators to measure social impact, and that instead an evaluation performance approach is normally undertaken to establish five indicators for each specific client. Such an impact is therefore done on a case-by-case basis for the portfolio, which performance is validated by the Fund based on the report presented by the client.

For investments made by the EIF, the point was made that most of the time qualified entrepreneurs came from top ranked universities and for that reasons there is no abundance of proposals. This reveals that investment in innovation requires investing in education and training. It was said that a particular emphasis has been provided to this goal after the 2008 crisis with the re-launch of economic investments to stimulate economic growth and thereby create more jobs through three windows: Infrastructure, SMEs and Social. This has caused some controversy, particularly because basic help was mostly given to support local authorities to build schools - which do not guarantee that SMEs upskilling needs are addressed. The problem to help funding SMEs to increase capacity building lies on the fact that EIF has to find a compromise to fund mid-high risk projects such as skills for innovation, which is often considered "a very-high risk investment".

This was corroborated by representatives of DG FISMA, who sustain that the EU taxonomy for sustainable initiatives is still developing its social objectives and that clear criteria are not yet available to measure the outcomes of impact investing on skills creation and skills retention. For instance, recent publications and initiatives by EIF in relation to impact investing and social impact include:

The 2020 EIF Annual Report outlines the increased focus on impact investment, having mobilised additional EFSI resources to focus more on impact investing, including in the social dimension [35]. EIF also expanded their toolkit under the EaSI programme to increase support to social entrepreneurship

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

and the inclusive finance ecosystem through capacity-building activities and inclusion of very small actors from the microfinance scene.

Working Paper from 2019-2020 by EIF provides the first testimony on the integration of social considerations and impact investing in the areas of venture capital (VC) and business angel (BA) investing, finding that there is a general consensus that social considerations and investment performance are not mutually exclusive [36].

EFSI Equity (2018, part of EFSI) is a facility managed by the EIF providing equity investments to or alongside financial intermediaries focusing on early stage, growth stage and expansion financing [37]. Through this facility the Commission and EIF aimed to help strengthen the European social impact ecosystem. To receive social impact financing under the EFSI Equity Instrument, financial intermediaries had to observe/acknowledge certain criteria[38], such as (with relevance to social impact):

- Prioritising investments in Social Enterprises, dedicating ideally a majority of its invested amount, or
- Fostering investments in the field of Impact Investing
- Agreeing to apply a social impact measurement methodology.

3. Recommendations for policy-makers

Tailored tools according to the skill needs of the SE region:

Innovative financial tools combined with and activities that are already producing practical learning in several EU countries, such as InvestEU, can be extended to/ or replicated to accelerate the development of human capital for innovation in individual countries of the SE region. Targeted technical assistance to public administration, service providers and financial operators and ecosystem developing components are crucial for effectiveness of any investments in human capital development and in skills for innovation, as financial incentives alone would not be sufficient to achieve the expected results. Since these are complex operating mechanisms, it is advisable that practices, tools, and procedures already developed under the InvestEU-Advisory Hub be used as a reference by stakeholders when it comes to financial, operational and impact measurement models.

Additionally, private sector employers should get progressively acquainted with the long-term benefits of their involvement as training providers, as it is basic to break the silos effect across sectors in the process of consolidating an innovation ecosystem made of diverse stakeholders who have different perspectives but unified vision towards achieving common goals. Likewise, the importance of training for business success is a critical factor in how relevant and important training and skills development is perceived in a SME. A general recommendation is to encourage networking between

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

companies and training organisations to share knowledge and expertise and develop common solutions. For example, more platforms can be installed to bring companies together. SMEs should also be able to direct specific questions to the academic world. Academic institutes could be more closely connected with practical reality of companies and their issues.

To the question “What kind of training is more suitable for SMEs?” there is no one-size-fits-all answer. Here some successful examples beyond Europe. In Australia, two-thirds of small businesses do not provide structured business training for their employees. Instead, they look for strategies that focus on business needs rather than government agendas and funding [39]. Those strategies are more based on mentoring, networking and collaborative group learning with other businesses through clusters. Meaning that one factor that is to take into account for the future in the SE region, in addition to formal education, refers to technical and vocational trends shaped by automation, social media and the increasing personalisation of training. Last but not least, diversity and inclusion practices should also be at the centre of the policy focus to achieve the presence of underrepresented groups at work. While in Canada, for example, much of the policy focus on diversity in SMEs has been on improving access to capital for women to form or grow business, a larger impact came from attending to all SMEs and their ability to implement diversity and inclusion in their work [40]. EBRD has long experience in engaging its clients in inclusive skills development processes.

Strategic planning and monitoring:

Taking into account that the development of Social Impact criteria of the EU taxonomy is still undergoing, measuring social impact generated from Impact Investments will need to adapt to current approaches undertaken by financial institutions involved on the ground. It is appropriate, however, that future impact investments contemplate the ability of skills for innovation to deter brain drain and foster innovation as a Key Performance Indicator (KPI).

Measuring the social impact generated by financial instruments linked to skills creation and skills retention in an objective and consistent manner will support the relevant decision makers and institutions in the Southern Europe economies in building SMEs skills into smart specialisation strategies while boosting their innovation potential. Skills have been often treated as an under- thought and are only now being considered in more depth. Nevertheless, better monitoring of SME support programmes will be needed to enable decision makers to identify successful and less relevant support actions. Practical recommendations that should be considered for this purpose include:

— Continue to move SMEs skills forward with smart specialisation to affect demand for skilled workforce. For this, each SE country will need to adapt SMEs education and training policies.

— Training offer should be tailored to local needs, especially for SMEs responding to local and regional markets, as proximity plays a significant role in innovation consolidation.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

— Designate a dedicated institution for SMEs skill-building in the region, which in turn supports individual SE countries innovation systems governance. Such institution/s should also coordinate and share relevant data gathering, policy making and funding.

Specific measures for SMEs training and capacity building:

It is clear that SMEs are the main drivers of economic development in the region because they account for creating private initiatives, innovation, and employment. However, despite their importance, SMEs are extremely sensitive to economic downturns. In general, the current financial support is concentrated primarily in the banking sector through loan guarantee schemes and reduced interest rates, reason why debt financing remains the major mechanism for SMEs funding in the region. This has several implications, the first being that guaranteed loans are temporary solutions to a long-term problem: debt finance is not only expensive and difficult to get, but also inconvenient unless it has a 'convertibility' feature. Equity finance, instead, offers an opportunity for SMEs to raise capital, share risks and complement knowledge and skills. New policy initiatives for SMEs funding should therefore leverage on the benefits of equity funding, which remains small in size in the SE region.

On a sectoral point, it seems that regional SMEs are increasing their efforts to shift towards green economy and digitalisation in the post-pandemic. While these results align local businesses to smart specialisation, it is also opportune to recall that investments in physical infrastructure should be accompanied by skills development together with management and technological upgrading.

In an increasingly knowledge-driven economy, intellectual property (IP) should be for innovative SMEs a key consideration in day-to-day business decisions. New products patents, industrial designs, trademarks, and creative designs appear almost every day on the market and are the result of continuous human innovation and creativity. The European Commission (EC) aims to help SMEs use IP more effectively by providing a coherent policy of IP support for SMEs. One way this has been done is via the European IP helpdesk of the EU IP Office (EUIPO). It provides technical support to cross-border SME and research activities in managing and commercialising technologies and other intellectual property rights and IP assets at an EU level. A best practice every innovative SME should adopt demands strategic IP portfolio management and protection in order to fend off competition and secure market position.

Innovation ecosystems seem to be the answer to the challenges that can make SMEs fit in the long term. This is valid because being part of the business economy fuels a company's innovative power and growth by allowing SMEs to tap into new customer groups. According to Deloitte (2021) more than half of German SMEs have already utilized ecosystem-based strategies to develop and evolve by being in consultation with suitable partners and skilled workers, getting positive technical contamination from external sources and testing these adjustments in the local market before planning expansion abroad.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

An innovation ecosystem can be engineered using clusters as a key part of its design. This is because clusters have a shared responsibility both to foster competitiveness, technology and knowledge transfer, and increasingly to act as innovation intermediaries to reach and engage quadruple helix actors (i.e., science, policy, industry, and society). A good example to follow is offered by the Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies or Technology Transfer Accelerators (SATTs) in France. In fact, SATTs concentrate expertise in the science-to-business process to act as intermediaries between universities or public research labs, which are their shareholders, and regional businesses. The labs transfer their IP to the regional SATT, which is then responsible for accelerating the technology transfer via the three channels indicated above. The SATT also scout for or define innovation projects to guide them towards the market, i.e. projects are selected by an investment committee which investigates the best pathways to the market and calls on its network of contacts — from regional to global — to identify partners and sources of grant funding.

From the emerging innovation ecosystem, the complementarity of these recommendations will generate a great deal of information and data. This information could well provide the necessary elements to further envision, run and support programmes aimed at boosting regional economic development and growth but also strengthening democracy, fostering European integration, and affirming the role of the SE region in addressing Europe’s emerging challenges and welfare

4. Next steps to be adopted by Italy

The economic and social transformation triggered by the transition to greener and digital societies has to be supported by investment in inclusive skills development for innovation. Impact investing has proven a valuable tool to improve outcomes in both education and innovation development programmes. It has a promising potential to support skills creation and retention in Italy because it assigns to financial actors a mission in society.

First of all, the objective of investments is generating monetary gains along with other non-financial values, typically positive social and environmental impacts.

Secondly, such generated values are due to be shared by design with the other Italian stakeholders and the community as a whole. In other words, finance is not set just to generate profits for a minority of capital owners, but as an engine of societal prosperity creation and distribution hinged on the power of capital in a market economy. Such a vision of finance has gained traction over the last two decades, propelled by 2008 global financial crisis, and has turned into a priority in the post-Covid recovery plans finding its most suitable place in the partnership between public and private sectors (PPPs).

This research investigated the gaps in current programmes and financial instruments in relation to skill creation and retention in the Age of Innovation and knowledge-based societies. It identified new opportunities under InvestEU and the Economic and social investment trends in the SE region, as well

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

as explored innovative practices such as Social Impact Bonds schemes. At the same time it has also defined some of the challenges that the Southern Europe region faces to attempt to steer the attention into two directions: 1) the lack of tailored financial instruments to target the sustainable development of skills for SMEs and innovation, and 2) the enabling conditions and factors which are required to ensure successful delivery of such instruments.

Furthermore, the whole notion of impact investment, as presented, is attached to accountability and measurability, which suggests the need for ex-ante definition of the expected results. In this context, KPIs linked to performance in impact investing need to be elaborated and adapted to the European (and in particular Italian) context in an attempt to improve the framework conditions for impact investing in skills.

References

1. Heitor, M., Horta, H., & Mendonça, J. (2014). Developing human capital and research capacity: Science policies promoting brain gain. *Technological Forecasting and Social Change*, *82*, 6-22.
2. Morano Foadi, S. (2006). Key issues and causes of the Italian brain drain. Innovation, 19(2), 209-223.
3. Martini, A. (2021). Socially responsible investing: from the ethical origins to the sustainable development framework of the European Union. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(11), 16874-16890.
4. Birindelli, G., Trotta, A., Chiappini, H., & Rizzello, A. (2020). Environmental Impact Investments in Europe: Where Are We Headed?. In *Contemporary Issues in Sustainable Finance* (pp. 151-175). Palgrave Macmillan, Cham.
5. ETF 2019, Policies for human capital development: South Eastern Europe and Turkey – An ETF Torino Process Assessment.
6. Basso, A., Baltar, E., & Andonova, E. (2018). Startup Innovation Ecosystems in Southern Europe. *European Commission, Brussels, JRC113872*, 4-6.
7. Uvarova, I., & Vitola, A. (2019). Innovation challenges and opportunities in European rural SMEs.
8. Horvat, V. (2004). Brain drain. Threat to successful transition in South East Europe. *Southeast european politics*, *5*(1), 76-93.
9. Tung, R. L., & Lazarova, M. (2006). Brain drain versus brain gain: an exploratory study of ex-host country nationals in Central and East Europe. *The International Journal of Human Resource Management*, *17*(11), 1853-1872.
10. OECD (2020), OECD Business and Finance Outlook 2020: Sustainable and Resilient Finance, OECD Publishing, Paris, http://www.oecd.org/daf/Sustainable-and-Resilient-Finance.pdf.
11. De Kok, J., Vroonhof, P., Verhoeven, W., Timmermans, N., Kwaak, T., Snijders, J., & Westhof, F. (2011). Do SMEs create more and better jobs. *Report prepared by EIM for the European Commission DG Enterprise and industry, Brussels, European Commission*.
12. Garrido, M., Rissolai, G., Rastrelli, M., Diaz, A., & Ruíz, J. A. (2009). *Immigrant women, e-skills, and*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

employability in Europe: The case of Hungary, Italy, the Netherlands, Romania, and Spain. Technology & Social Change Group (TASCHA).

13. Alunni, A. (2019). Innovation Finance and Technology Transfer. Publisher: Routledge, Taylor and Francis group – London and New York. ISBN: 978-0-367-23210-8,. Available at https://doi.org/10.4324/9780429278778.
14 Addarii, F., Barrell, A., Fazio, A., Hinoul, M., Shamuilia, S. (2021) "For without innovation, there is no future" - accelerating the European recovery and sustainable transition through an investment strategy for innovation ecosystems" IASP (https://www.iasp.ws/activities/blog/@105/innovation-and-the-postpandemic-future).
15. Mackeviciute R., Martinaitis, Z., Lipparini, F., Scheck, B.C., Styczynska, I., 2020. Social Impact Investment. Best Practices and Recommendations for the Next Generation. European Parliament, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies Directorate-General for Internal Policies Authors: PE 658.185 -November 202 https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/658185/IPOL_STU(2020)658185_EN.pdf
16. Alunni, A.; Addarii, F.; Mojsoska, N. (2021). Exploration of impact investment for skills creation. Publication Office of the European Union Luxembourg. ISBN: 978-92-76-46885-1, doi:102760/660676, EUR 30971 EN, JRC128199
17. G8 Taskforce for social impact Investment 2014. Impact Investment: The Invisible Heart of Markets.Harnessing the power of entrepreneurship, innovation and capital for public good Global Impact Investing Network (GIIN) 2009.
18. Rogalska, M. (2016). Globalisation and Financialisation of the Economy Impact Investing at Scale as a Promising Response. *Weatherhead Center for International Affairs, Harvard University. Retrieved from: https://programs. wcfia. harvard. edu/files/fellows/files/rogalska. pdf*.
19. Bugg-Levine, A., & Emerson, J. (2011). *Impact investing: Transforming how we make money while making a difference*. John Wiley & Sons.
20. Williams, C. A., & Conley, J. M. (2005). An emerging third Way-The erosion of the Anglo-American shareholder value construct. *Cornell Int'l LJ*, *38*, 493.
21. Giddens, A. (2013). *The third way: The renewal of social democracy*. John Wiley & Sons.
22. Lowndes, V., & Pratchett, L. (2012). Local governance under the coalition government: Austerity, localism and the 'Big Society'. *Local government studies*, *38*(1), 21-40.
23. Hubert, A. (2011). Investing in social innovation. *Report Challenge Europe*, *21*, 34-39.
24. Sabato, S., Vanhercke, B., & Verschraegen, G. (2017). Connecting entrepreneurship with policy experimentation? The EU framework for social innovation. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, *30*(2), 147-167.
25. Macchiavello, E., & Siri, M. (2020). Sustainable Finance and Fintech: Can Technology Contribute to Achieving Environmental Goals? A Preliminary Assessment of 'Green FinTech'.
26. Beerbaum, D., & Puaschunder, J. M. (2018). A Behavioral Economics approach to a Sustainable Finance Architecture–Development of a Sustainability Taxonomy for investor decision

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

usefulness. *Julia M., A Behavioral Economics Approach to a Sustainable Finance Architecture–Development of a Sustainability Taxonomy for Investor Decision Usefulness (October 1, 2018)*.
27. Meynhardt, T. (2019). Public value: value creation in the eyes of society.
28. Claringbould, D., Koch, M., & Owen, P. (2019). Sustainable finance: The European Union's approach to increasing sustainable investments and growth–opportunities and challenges. *Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung*, *88*(2), 11-27.
29. TUOMINEN, U. M. (2018). Establishing the InvestEU programme.
30. Rissola, G., & Sörvik, J. (2018). Digital innovation hubs in smart specialisation strategies. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*.
31. Jackson, E. T. (2013). Evaluating social impact bonds: questions, challenges, innovations, and possibilities in measuring outcomes in impact investing. *Community Development*, *44*(5), 608-616.
32. Almeida, F., & Santos, F. (2017). Portugal Inovação Social: na encruzilhada dos tempos. *Cooperativismo e economía social*, (39).
33. Amendola, S. (2021). Trends in rates of NEET (not in education, employment, or training) subgroups among youth aged 15 to 24 in Italy, 2004-2019. *Journal of Public Health*, 1-9.
34. Percoco, M. (2005). The impact of structural funds on the Italian Mezzogiorno, 1994-1999. *Région et Développement*, *21*, 141-152.
35. EIF Annual Report 2020, https://www.eif.org/news_centre/publications/eif-annual-report-2020.pdf 46
36. Botsari, Antonia; Lang Frank; Working Paper, ESG considerations in Venture Capital and Business Angel investment decisions: Evidence from two pan-European surveys, 2020. https://www.eif.org/news_centre/publications/eif_working_paper_2020_63.pdf
37. EIF, EFSI Equity social impact investment instruments, https://www.eif.org/news_centre/publications/eif_efsi_equity_en.pdf
38. EFSI Equity Instrument - Guidance for social impact investors, https://www.eif.org/what_we_do/equity/efsi/call/Guidance_for_social_impact_investors.pdf.
39. NCVER. (2017). Education and training that meets the needs of small businesses: a systematic review of research, information policy and practice in Australia's training system. National Centre for Vocational Education Research. Australia, 2017.
40. Ravanera, C. and Kaplan, S. (2021). Gender and the economy. Diversity and inclusion in small and medium enterprises (SMEs). Online article. Policy briefs. Public policy. Retrieved on 15 March 2021 at www.gendereconomy.org.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Emissione di particelle sub-micrometriche da sistemi di riscaldamento residenziali

Elisa Caracci [1, *], Laura Canale [1, 2], Giorgio Buonanno [2, 3], Luca Stabile [1]

1 Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Cassino, FR, Italia
2 Dipartimento di Economia, Universitas Mercatorum, Piazza Mattei 10, Roma, Italia
3 International Laboratory for Air Quality and Health, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia

* Autore di riferimento. E-Mail: elisa.caracci@unicas.it

Abstract: L'emissione di inquinanti da sistemi di riscaldamento residenziali rappresenta un tema di particolare interesse nell'ambito della qualità dell'aria outdoor. A differenza delle altre tipologie di inquinanti, la letteratura scientifica mostra una carenza di dati disponibili in riferimento all'emissione di particelle sub-micrometriche legata a sistemi di riscaldamento, specialmente per quanto concerne caldaie alimentate a gas. Nel presente lavoro, sono riportati i dati raccolti durante una campagna sperimentale mirata a caratterizzare i sistemi di riscaldamento residenziali alimentati in maniera automatica (caldaie tradizionali, a condensazione e stufe a pellet) in termini di concentrazione in numero e distribuzione dimensionale delle particelle al camino. Considerando le concentrazioni misurate, sono stati stimati i corrispondenti fattori di emissione. I risultati della campagna sperimentale hanno rivelato concentrazioni al camino più elevate per le stufe a pellet (>10^7 part. cm^{-3}) rispetto alle caldaie tradizionali (circa 1×10^6 part. cm^{-3}) e a condensazione (<10^6 part. cm^{-3}). La concentrazione totale misurata sulle caldaie non ha mostrato una dipendenza dalla tipologia di combustibile (gas naturale, GPL), mentre la distribuzione dimensionale è caratterizzata da una moda principale intorno ai 10 nm. I ratei e i fattori di emissione più alti sono stati calcolati per le stufe a pellet (2.1×10^{15} part. h^{-1} e 8.4×10^{13} part. kWh^{-1}, rispettivamente), mentre quelli per caldaie tradizionali e a condensazione sono circa 5×10^{13} part. h^{-1} e 2×10^{13} part. h^{-1}, rispettivamente.

Keywords: concentrazione in numero; SMPS; stufe a pellet; fattori di emissione; caldaie.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduzione

Il settore del riscaldamento residenziale è considerato come la seconda sorgente emissiva di inquinanti a livello globale outdoor dopo il traffico [1]. Per questo motivo, è importante investigare tale settore al fine di ridurre i relativi consumi energetici e le emissioni di inquinanti [2]–[4].

Il gas naturale è il principale combustibile utilizzato nei sistemi di riscaldamento residenziali nell'ambito del quadro energetico europeo [5]. Nonostante ciò, negli ultimi 30 anni anche le biomasse hanno subito una rapida diffusione. Infatti, molti stati membri dell'UE hanno incentivato l'utilizzo delle biomasse solide nei sistemi di riscaldamento ad alimentazione automatica (ad esempio stufe a pellet), basandosi sul concetto di "neutralità carbonica", ovvero sull'assunto che le emissioni di CO_2 dovute alla combustione della biomassa siano interamente compensate dalla CO_2 assorbita in fase di crescita [6], [7]. Inoltre, la larga diffusione nell'utilizzo delle biomasse è stata agevolata anche dai costi più competitivi rispetto ai combustibili fossili [8].

I combustibili gassosi sono principalmente impiegati nelle caldaie tradizionali. In Europa, ad esempio, il 79% dei sistemi di riscaldamento centralizzati è caratterizzato da caldaie tradizionali alimentate con combustibili gassosi, ma meno del 10% sono dotati della tecnologia a condensazione [9]. Nelle caldaie a condensazione, il gas di scarico è convogliato verso uno scambiatore di calore dove l'interazione termica con il fluido di lavoro in ingresso al sistema ne permette la condensazione del vapore acqueo, con conseguente rilascio del calore latente di vaporizzazione. Per questo motivo, la loro efficienza può essere maggiore del 10% se paragonata a quella delle caldaie tradizionali [10].

Le biomasse sono tipicamente utilizzate in sistemi di riscaldamento non automatici [11]. Nonostante ciò, il progresso tecnologico ha consentito lo sviluppo di sistemi alimentati in maniera automatica, come ad esempio le stufe a pellet, in grado di raggiungere migliori efficienze di conversione [12], [13] e di ridurre l'emissione di particelle aerodisperse [14].

Ciononostante, questi sistemi di riscaldamento rilasciano particelle aerodisperse, considerate tra le maggiori cause di inquinamento outdoor [15] e recentemente classificate come cancerogene per la salute umana [16], a causa della loro capacità di veicolare composti cancerogeni nell'apparato respiratorio. Inoltre, le polveri aerodisperse sono state anche riconosciute come responsabili di alcuni effetti indesiderati sulla salute, tra cui problemi cardiovascolari e respiratori [17], [18]. Negli ultimi anni, l'attenzione della comunità scientifica si è spostata verso le particelle sub-micrometriche e ultrafini (*ultrafine particles*, *UFPs*, particelle il cui diametro è inferiore a 100 nm), la cui concentrazione è tipicamente espressa in numero e in area superficiale, dal momento che riescono a depositarsi con maggiore probabilità nelle parti più periferiche dell'apparato respiratorio [19] rispetto a quelle super-micrometriche (espresse come PM_{10} e $PM_{2.5}$, ovvero la concentrazione in massa di particelle il cui diametro aerodinamico è inferiore a 10 µm e 2.5 µm, rispettivamente). Inoltre, studi tossicologici riportano che le *UFPs* generate dalla combustione sono caratterizzate da un più alto potenziale rischio di cancro al polmone rispetto a quelle grossolane [20]–[22].

Da un punto di vista legislativo, i limiti sulle emissioni dei sistemi di riscaldamento sono imposti dalle autorità solo in termini di particelle in massa (per sistemi di riscaldamento alimentati a biomassa) [23], mentre le particelle sub-micrometriche (ovvero emissione di particelle in numero) non sono ancora

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

regolamentate dalla legislazione corrente. Analogamente, la legislazione attuale sulla qualità dell'aria outdoor in Europa [24] definisce soltanto un valore limite in termini di PM_{10} (con una concentrazione media giornaliera di 50 μg m^{-3}, da non superare per più di 35 volte all'anno). Considerando questa direttiva, sono state adottate limitazioni su scala regionale anche in aree caratterizzate da alte concentrazioni di PM_{10} vietando, ad esempio, l'accensione di stufe con una bassa efficienza di combustione.

Tra i parametri di influenza dell'emissione di particelle aerodisperse rientra la tipologia di combustibile. Infatti, sistemi alimentati con gas naturale o gas da petrolio liquefatto (GPL) sono caratterizzati da basse emissioni di particelle in massa rispetto al pellet, dal momento che il fenomeno di combustione di un gas o di un combustibile liquido è meno complesso rispetto a quello di un combustibile solido [25]. Inoltre, l'emissione di particelle aerodisperse dipende anche dalla tecnologia adottata. Le caldaie a condensazione permettono di ottenere migliori efficienze di conversione e riduzioni degli inquinanti [26], [27] rispetto a quelle tradizionali, analogamente, le stufe a pellet alimentate in maniera automatica comportano una più bassa emissione di $PM_{2.5}$ e PM_{10} rispetto a quelle manuali [14].

La maggior parte degli studi riguardanti i sistemi di riscaldamento residenziali sono incentrati sull'emissione di PM_{10}, mentre c'è ancora una carenza di dati per l'emissione di particelle sub-micrometriche e *UFPs*, specialmente per le caldaie tradizionali e a condensazione. Inoltre, la maggior parte degli studi esistenti riguarda sistemi di riscaldamento pilota o da laboratorio, sfruttando strumentazioni non particolarmente performanti nel range delle polveri sub-micrometriche [28], [29]. Considerando il contributo del settore del riscaldamento residenziale all'inquinamento dell'aria outdoor, è importante caratterizzare tali sorgenti emissive includendo tutte le metriche descrittive delle polveri aerodisperse. Infatti, questi dati potrebbero essere di supporto alle autorità legislative al fine di regolare le emissioni di polveri sub-micrometriche e *UFPs*.

Il presente lavoro ha avuto l'obiettivo di determinare sperimentalmente l'emissione di particelle sub-micrometriche per differenti sistemi di riscaldamento residenziali, ovvero caldaie tradizionali, a condensazione e stufe a pellet. Le concentrazioni in numero e le distribuzioni dimensionali delle particelle sono state misurate al camino sotto condizioni stazionarie e di carico nominale. Infine, sono stati valutati i corrispondenti fattori di emissione.

2. Metodologia

I sistemi di riscaldamento considerati in questo studio sono installati in abitazioni collocate nell'area di Cassino (FR), nel centro Italia. La campagna sperimentale è stata condotta tra dicembre 2020 e marzo 2021 con l'obiettivo di misurare la concentrazione in numero e la distribuzione dimensionale delle particelle al camino, sotto condizioni stazionarie e di carico nominale.

Sono state analizzate 8 caldaie tradizionali, di cui 4 alimentate a gas naturale e 4 a GPL, 8 caldaie a condensazione, di cui 4 alimentate a gas naturale e 4 a GPL, e 4 stufe a pellet (**Tabella 1**). Tutti i generatori analizzati sono autonomi e alimentano impianti idronici collegati a radiatori, ovvero la tipologia maggiormente diffusa di sistemi di riscaldamento in Italia [6], [30]. In **Tabella 1** sono riportati

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

i principali dati tecnici che caratterizzano i generatori investigati: in particolare, la potenza termica nominale in ingresso e in uscita, l'efficienza nominale, il consumo di combustibile (alla massima potenza) e le portate degli esausti.

Tabella 1. Dati tecnici forniti dai costruttori in riferimento alle caldaie tradizionali, a condensazione e alle stufe a pellet investigate.

Parametri	Caldaie tradizionali		Caldaie a condensazione		Stufe a pellet
	Gas naturale	GPL	Gas naturale	GPL	
Potenza termica nominale	21.8-26.7 kW	25.7-31.1 kW	24.5-28.4 kW	25.0-30.0 kW	20.1-31.4 kW
Potenza termica utile (max)	18.9-24.0 kW	23.3-28.0 kW	26.3-30.6 kW	24.0-24.4 kW	18.4-28.4 kW
Efficienza nominale	80.9 - 89.9%	85.4-90.4%	97.1-97.8%	96.6–97.4%	91.6-95.9%
Consumo di combustibile, C (max)	2.72-2.82 $m^3 h^{-1}$	2.03-2.07 kg h^{-1}	2.50-2.65 $m^3 h^{-1}$	1.94-2.33 kg h^{-1}	4.2-6.5 kg h^{-1}
Portata degli esausti, V_{es}	36.6-55.4 $m^3 h^{-1}$	44.0-48.9 $m^3 h^{-1}$	28.8-41.0 $m^3 h^{-1}$	39.1-39.4 $m^3 h^{-1}$	39.8-76.2 $m^3 h^{-1}$

Le misure di concentrazione in numero e di distribuzione dimensionale delle particelle sono state condotte attraverso la seguente strumentazione: i) un Condensation Particle Counter (CPC 3774, TSI Inc.) in grado di misurare la concentrazione in numero di particelle fino ad un diametro di 4 nm, ii) uno Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS 3936, TSI Inc.), composto da un Electrostatic Classifier (EC 3080) (TSI Inc.) e da un CPC 3775 (TSI Inc.), per misurare la distribuzione dimensionale delle particelle nel range sub-micrometrico (14-700 nm in condizioni di "low-flow" o 5-220 nm in condizioni di "high-flow"); iii) un sistema di termo-diluizione composto da un Rotating Disk Thermodiluter (Model 379020, Matter Engineering AG) e un Thermal Conditioner (Model 379030, Matter Engineering AG) in grado di consentire delle condizioni appropriate di campionamento durante le misurazioni di concentrazioni in numero e distribuzioni dimensionali al camino dei sistemi di riscaldamento considerati [31]. Per garantire la qualità dei dati, il CPC 3775 è stato calibrato nel Laboratorio Europeo Accreditato dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, effettuando un confronto con un Aerosol Electrometer 3068B (TSI, Inc.), utilizzando un generatore di particelle (NaCl) attraverso un generatore di particelle sub-micrometriche (TSI 3940). Inoltre, l'accuratezza delle misure è stata garantita confrontando i flussi dell'SMPS e del CPC prima di ogni periodo di monitoraggio attraverso un misuratore di portata (TSI 4140).

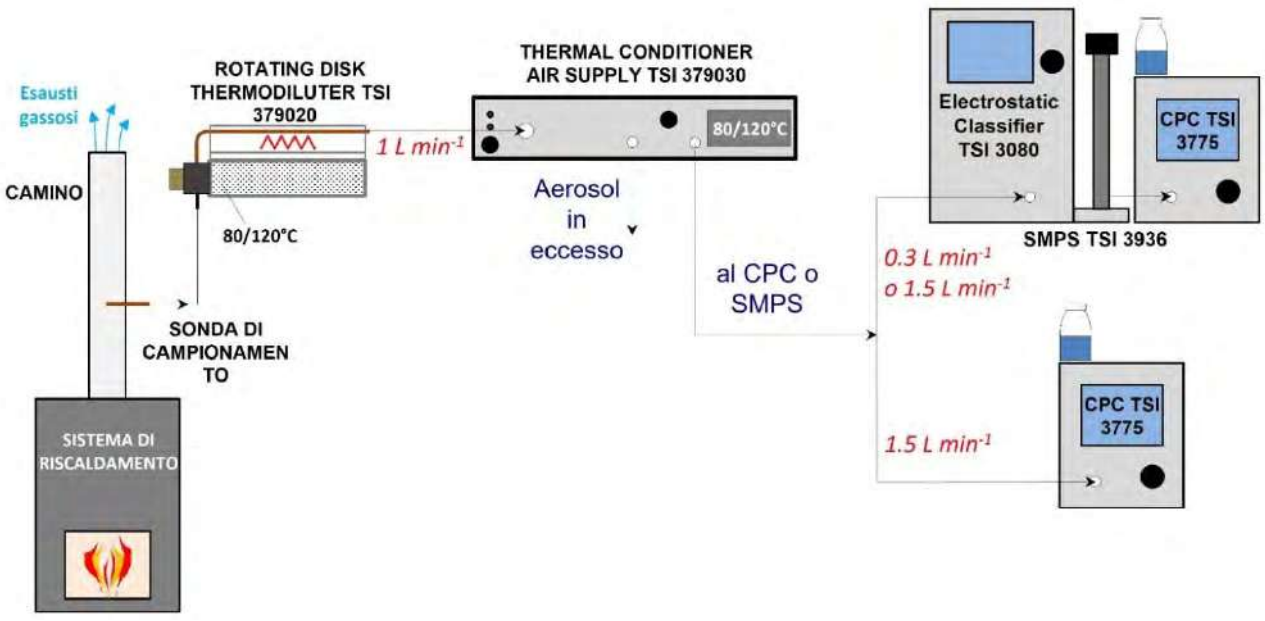
Le misure delle concentrazioni in numero sono state effettuate attraverso il CPC 3775 per 1 h con una frequenza di campionamento di 1 s con una portata di 1.5 L min^{-1} per tutti i sistemi di riscaldamento investigati. La distribuzione dimensionale in numero delle particelle è stata condotta attraverso un SMPS 3936 per 1 h con una frequenza di campionamento di 120 s. Dal momento che la moda delle distribuzioni dimensionali emesse dalle caldaie alimentate a gas naturale e GPL può raggiungere diametri fino a 10 nm, le misure per l'SMPS al camino delle caldaie sono state effettuate considerando un range di 5-220 nm; al contrario, per le stufe a pellet è stato considerato il range 14-700 nm.

In **Figura 1** è riportata una rappresentazione grafica della linea di campionamento, dove viene mostrato anche il profilo di temperatura per sottolineare l'importanza del condizionamento termico. La **Figura 1** mostra come l'aerosol viene inviato verso un CPC o SMPS solo dopo due aver subito due

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

step di termo-diluizione attraverso il Rotating Disk Thermodiluter e il Thermal Conditioner. Infatti, l'aerosol emesso da questa tipologia di sorgenti di combustione è tipicamente caldo, altamente concentrato e composto da composti gassosi volatili che tendono a condensare sia in maniera omogenea, creando particelle nella moda di nucleazione, che eterogenea, su particelle solide quando il gas di scarico si raffredda. Inoltre, un aerosol altamente concentrato può comportare fenomeni di coagulazione tra le particelle quando entra in contatto con la sonda di campionamento. Per questo motivo, è necessario che gli esausti emessi siano propriamente diluiti e condizionati termicamente, altrimenti la distribuzione dimensionale e la concentrazione in numero potrebbe subire importanti cambiamenti tra la sorgente e lo strumento di misura [31], [32]; infatti, è stata adottata una sonda di campionamento sufficientemente corta (10 cm). Al fine di ridurre la deposizione delle particelle all'interno delle pareti della sonda, è stato garantito un flusso laminare in ogni sottosezione della linea di campionamento (massimo numero di Reynolds pari a 500). Il tempo di permanenza nella linea di campionamento prima di entrare nello strumento di misura è di circa 5 s. Dal momento che l'aerosol non è condizionato termicamente nel tubo che connette il Thermal Conditioner al CPC (o SMPS), è importante ridurre questa lunghezza il più possibile. Nella presente catena di misura, è stato utilizzato un condotto di 40 cm, in modo tale da rendere trascurabile gli effetti del tempo di residenza (inferiore a 0.5 s). Le temperature scelte per il sistema di termo-diluizione sono state le seguenti: 120 °C per le caldaie tradizionali e per le stufe a pellet ed 80 °C per le caldaie a condensazione, a causa delle temperature più basse raggiunte dagli esausti. I fattori di diluizione considerati sono stati 1:40 per le caldaie tradizionali e a condensazione, e 1:110 per le stufe a pellet, dal momento che in quest'ultimo caso erano attese delle concentrazioni più alte. Le misure sono state effettuate durante il periodo di riscaldamento, sotto condizioni stazionarie e di carico nominale per ogni sistema investigato.

Figura 1. Linea di campionamento utilizzata durante le misure di concentrazione in numero e distribuzione dimensionale, dalla sonda verso il dispositivo di misura.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Le concentrazioni in numero qui ottenute sono state analizzate attraverso un test preliminare (Shapiro-Wilk test) per valutare la distribuzione statistica. Dal momento che i dati non sono risultati essere distribuiti secondo una distribuzione Gaussiana, è stato considerato un test parametrico (Kruskal-Wallis test) [33] per valutare se i risultati ottenuti per ogni sistema di riscaldamento fossero statisticamente differenti; è stato adottato un livello di significatività pari al 99%, ovvero un *p*-value inferiore a 0.01.

La stima dei fattori di emissione per unità di tempo ($FE_{N(h)}$) è stata effettuata moltiplicando la concentrazione delle particelle in numero (*CPN*, part. cm^{-3}) per la portata degli esausti (V_{es}, m^3 h^{-1}) per ogni sistema di riscaldamento (i cui valori sono riportati in **Tabella 1** (Eq. (1)).

$$FE_{N(h)} = CPN \cdot V_{es} \ (part.h^{-1}) \quad (1)$$

I fattori di emissione per unità di energia del combustibile, $FE_{N(C)}$ (ovvero legata al contenuto di energia primaria del combustibile), sono stati poi calcolati a partire dai fattori di emissione per unità di tempo, come riportato in Eq. (2), considerando il consumo di combustibile specifico per ogni sistema di riscaldamento dichiarato dai produttori (C, espresso come m^3 h^{-1} o kg h^{-1}, dipendente dal tipo di combustibile, i cui range sono riportati in **Tabella 1**) e i tipici valori di Potere Calorifico Inferiore (PCI) dei combustibili analizzati (9.94 kWh m^{-3} per il gas naturale, 12.78 kWh kg^{-1} per GPL e 4.6 kWh kg^{-1} per il pellet):

$$FE_{N(C)} = \frac{FE_{N(h)}}{C \cdot PCI} \ (part.kWh^{-1}) \quad (2)$$

3. Risultati e discussioni

Le rappresentazioni statistiche (espresse in termini di box-plot) delle concentrazioni in numero di particelle, misurate al camino per i sistemi di riscaldamento investigati, sono mostrate in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.. I valori mediani per caldaie tradizionali, caldaie a condensazione e stufe a pellet (**Tabella 2**), sono risultati pari a 1.1×10^6, 1.1×10^6, 5.1×10^5, 5.2×10^5 e 3.5×10^7 part. cm^{-3}, rispettivamente, dando prova dell'effetto del tipo di combustibile (gas naturale, GPL, pellet) e delle diverse tecnologie (caldaie, stufe) sull'emissione delle polveri emesse.

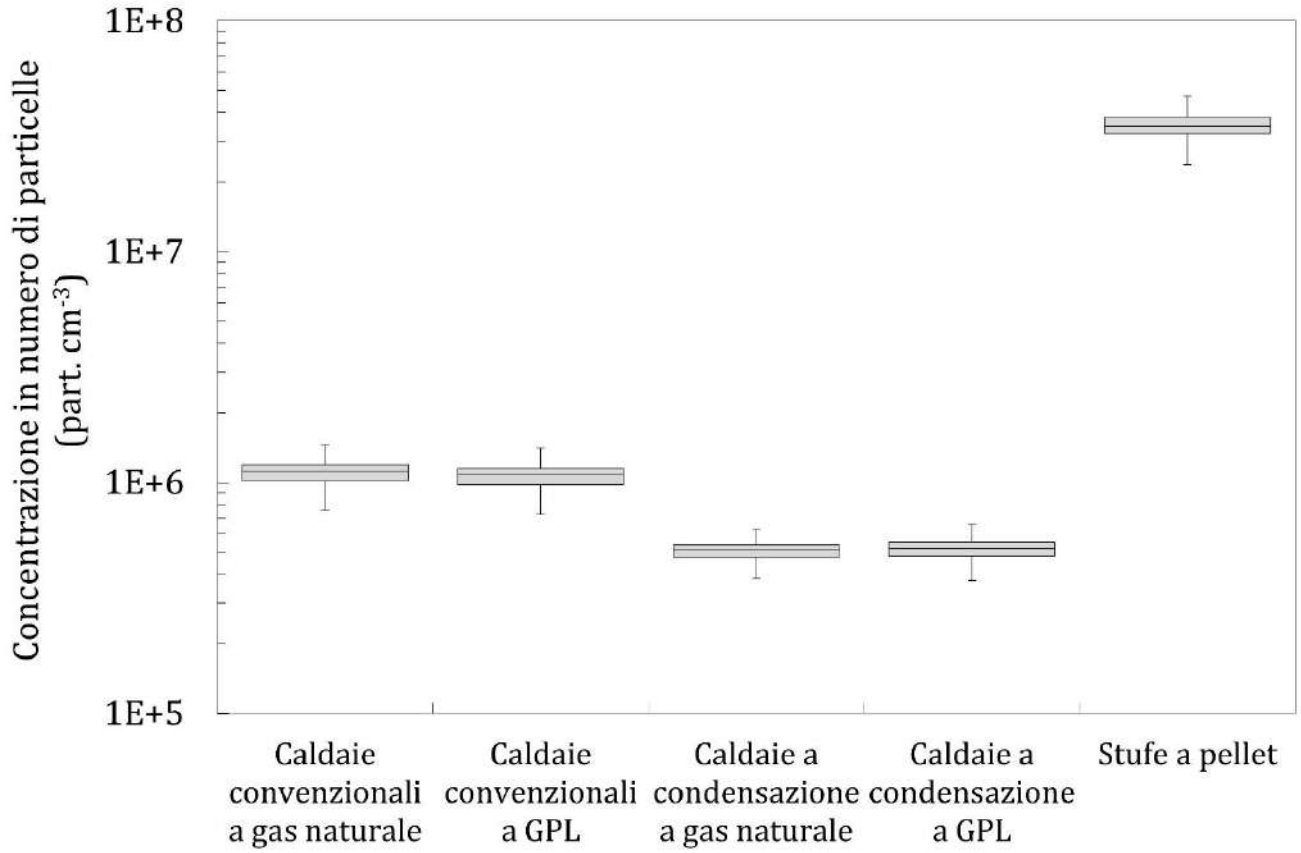
In particolare, le concentrazioni in numero di particelle al camino per le caldaie tradizionali sono risultate statisticamente più alte (valore mediano > 1×10^6 part. cm^{-3}) rispetto a quelle delle caldaie a condensazione (valore mediano < 1×10^6 part. cm^{-3}) probabilmente per effetto dei processi di rimozione che si verificano per temperatura e umidità relativa tipiche delle caldaie a condensazione, che portano alla condensazione del vapore acqueo sulle particelle con conseguente aumento delle loro dimensioni e incremento dei meccanismi di deposizione [34], [35]. Ciononostante, sia per le caldaie tradizionali che per quelle a condensazione non sono state riscontrate differenze statistiche (p < 0.01) tra gas naturale e GPL in termini di concentrazione in numero. Va sottolineato che non è semplice misurare particelle emesse da caldaie alimentate con gas naturale, come già detto, in quanto sono caratterizzate

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

da alte concentrazioni di particelle di piccoli diametri: infatti, studi precedenti hanno fortemente sottostimato le concentrazioni delle particelle per aver adottato un apparato sperimentale la cui efficienza di conteggio per piccoli diametri è bassa [28], [36].

Le concentrazioni mediane misurate per le stufe a pellet (> 1×10^6 part. cm^{-3}) sono risultate più alte delle caldaie tradizionali (un ordine di grandezza) e di quelle a condensazione (due ordini di grandezza) e nel range dei pochi dati disponibili in letteratura [36]–[38].

Figura 2. Concentrazioni in numero di particelle (riportate come box-plot) misurate al camino dei sistemi di riscaldamento analizzati attraverso il CPC 3775. I box-plot riportano il 5° e 95° percentile, 1° (Q_1) e 3° (Q_3) quartile e il valore mediano; i baffi superiori (U) e inferiori (L) sono stati valutati come $U = Q_3\times1.5-(Q_3-Q_1)$ e $L=Q_1-1.5\times(Q_3-Q_1)$, rispettivamente. I dati delle misure più alti rispetto a U o più bassi rispetto a L sono stati considerati "outliers" e non mostrati.



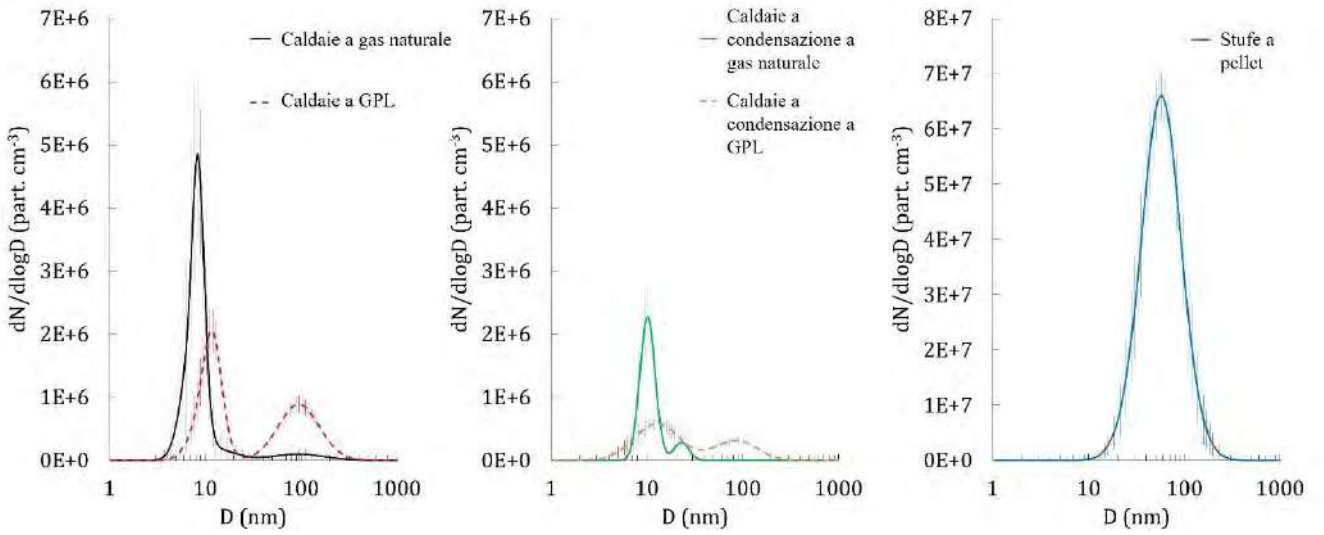
Le distribuzioni medie (e le corrispondenti deviazioni standard) misurate al camino per i diversi sistemi di riscaldamento attraverso l'SMPS sono mostrate in **Figura 3**; le distribuzioni riportate sono normalizzate rispetto alla concentrazione mediana delle particelle (riassunte in **Tabella 2**). Le distribuzioni dimensionali delle particelle per caldaie tradizionali e a condensazione sono caratterizzate da distribuzioni bimodali: in particolare, le distribuzioni delle particelle in numero al camino di caldaie tradizionali e a condensazione alimentate a gas naturale presentano una moda principale intorno ai 10 nm e una moda secondaria trascurabile a 100 nm e 25 nm per caldaie tradizionali e a condensazione,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

rispettivamente. Le distribuzioni per caldaie alimentate a GPL sono bimodali allo stesso modo, con una moda principale leggermente inferiore a 20 nm e una moda secondaria a 100 nm. La distribuzione bimodale è in accordo con i pochi studi disponibili sui sistemi di combustione (inclusi i motori) alimentati a gas naturale e GPL [39], [40] con una moda principale di nucleazione (nel range 5-50 nm) e una possibile moda di accumulazione (con particelle > 50 nm).

Nel caso di stufe a pellet è stata riscontrata una moda tipica (di circa 60 nm) più alta rispetto ai combustibili liquidi e gassosi e confrontabile con i pochi dati disponibili in letteratura sui sistemi di riscaldamento alimentati con il pellet [41], [42].

Figura 3. Distribuzioni medie dimensionali in numero (e le corrispondenze deviazioni standard) misurate al camino di caldaie tradizionali, a condensazione e stufe a pellet investigate. Le distribuzioni sono normalizzate rispetto alla concentrazione mediana riportata in Tabella 2.



I fattori di emissione ($FE_{N(h)}$, $FE_{N(C)}$), valutati attraverso le equazioni (1) e (2), per i sistemi di riscaldamento investigati sono riportati in **Tabella 2**. Questi dati sono molto utili nel caso in cui si volesse stimare l'emissione totale delle particelle emesse da una specifica popolazione/città/area, conoscendo, ad esempio, la quantità di combustibile consumata e/o il periodo di riscaldamento. I fattori di emissione confermano le differenze tra i sistemi di riscaldamento precedentemente mostrati in termini di concentrazioni in numero delle particelle, con le stufe a pellet che emettono circa 100 volte di più (valore mediano pari a 2.1×10^{15} part. h^{-1}) rispetto alle caldaie (circa 5×10^{13} part. h^{-1} e 2×10^{13} part. h^{-1} per caldaie tradizionali e a condensazione, rispettivamente). In termini di fattori di emissione, le caldaie alimentate a gas naturale, tradizionali e a condensazione, emettono (come valore mediano) 1.9×10^{12} part. kWh^{-1} e 6.9×10^{11} part. kWh^{-1}, rispettivamente, mentre i valori mediani dei fattori di emissione per le caldaie alimentate a GPL, tradizionali e a condensazione, sono risultati uguali a 1.9×10^{12} part. kWh^{-1} e 7.6×10^{11} part. kWh^{-1}, rispettivamente. I più alti fattori di emissione sono legati alle stufe a pellet, con un valore mediano pari a 8.4×10^{13} part. kWh^{-1}, comparabile con i pochi dati sulle

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

emissioni disponibili nella letteratura scientifica [43], [44]. Al fine di voler effettuare un confronto, è importante considerare che le particelle aerodisperse emesse da una singola stufa a pellet in 1 h sono due volte superiori a quelle emesse da un inceneritore (9.1×10^{12} part. min^{-1}) [45] e maggiori rispetto a quelle emesse dai veicoli nel coprire una distanza di 1 km [41].

Tabella 2. Concentrazione mediana (e range min-max) in numero delle particelle (CPN) e fattori di emissione ($FE_{N(h)}$, $FE_{N(C)}$) per i sistemi di riscaldamento investigati.

Sistemi di riscaldamento	CPN (part. cm^{-3})	$FE_{N(h)}$ (part. h^{-1})	$FE_{N(C)}$ (part. kWh^{-1})
Caldaie tradizionali Gas naturale	1.1×10^{6} (7.5×10^{5} – 1.5×10^{6})	5.1×10^{13} (3.4×10^{13} – 6.7×10^{13})	1.9×10^{12} (1.3×10^{12} – 2.4×10^{12})
Caldaie tradizionali GPL	1.1×10^{6} (7.3×10^{5} - 1.4×10^{6})	5.0×10^{13} (3.8×10^{13} – 6.4×10^{13})	1.9×10^{12} (1.4×10^{12} – 2.4×10^{12})
Caldaie a condensazione Gas naturale	5.1×10^{5} (3.9×10^{5} – 6.3×10^{5})	1.8×10^{13} (1.4×10^{13} – 2.2×10^{13})	6.9×10^{11} (5.2×10^{11} – 8.6×10^{11})
Caldaie a condensazione GPL	5.2×10^{5} (3.8×10^{5} – 6.6×10^{5})	2.0×10^{13} (1.6×10^{13} – 2.5×10^{13})	7.6×10^{11} (5.7×10^{11} – 9.4×10^{11})
Stufe a pellet	3.5×10^{7} (2.4×10^{7} – 4.7×10^{7})	2.1×10^{15} (1.3×10^{15} – 2.9×10^{15})	8.4×10^{13} (5.2×10^{13} – 1.3×10^{14})

4. Conclusioni

Il presente lavoro è incentrato sulla caratterizzazione fisica (concentrazioni in numero, distribuzioni dimensionali) delle particelle sub-micrometriche emesse al camino da sistemi di riscaldamento residenziali automatici, sotto condizioni di carico nominali e stazionarie. In particolare, sono state investigate caldaie tradizionali, caldaie a condensazione e stufe a pellet. I risultati sperimentali hanno mostrato che:

- Le concentrazioni mediane in numero misurate al camino delle stufe a pellet (>10^{7} part. cm^{-3}) sono circa di due ordini di grandezza più grandi rispetto a quelle misurate per caldaie tradizionali (circa 1×10^{6} part. cm^{-3}); mentre le concentrazioni in numero misurate per le caldaie tradizionali sono <10^{6} part. cm^{-3};
- non ci sono differenze statistiche in termini di concentrazioni in numero di particelle tra caldaie alimentate a gas naturale e a GPL (sia nel caso di caldaie tradizionali che a condensazione);
- le distribuzioni dimensionali in numero per le caldaie alimentate a gas presentano una moda principale intorno ai 10 nm, mentre quella associata alle caldaie alimentate a GPL è leggermente superiore (<20 nm); al contrario, la moda principale per le stufe a pellet è di circa 60 nm.
- Combinando questi valori misurati con le portate degli esausti e i consumi di combustibile, sono stati stimati i fattori di emissione. In particolare, i più alti fattori di emissione sono stati stimati per le stufe a pellet, con valori mediani pari a 2.1×10^{15} part. h^{-1} e 8.4×10^{13} part. kWh^{-1}, mentre, i fattori di emissione per caldaie tradizionali e a condensazione sono circa 5×10^{13} part. h^{-1} e 2×10^{13} part. h^{-1}, rispettivamente.

Adottando i fattori di emissione stimati si potrebbe valutare il contributo di ciascun sistema di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

riscaldamento automatico nel settore residenziale (in termini di particelle sub-micrometriche) per una specifica popolazione (conoscendo, ad esempio, il numero di dispositivi per ciascuna tipologia di impianto ed il corrispondere periodo di accensione) in modo da individuare i sistemi di riscaldamento maggiormente impattanti.

Bibliografia

[1] P. Paasonen, K. Kupiainen, Z. Klimont, A. Visschedijk, H. A. Denier van der Gon, e M. Amann, «Continental anthropogenic primary particle number emissions», *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, n. 11, pagg. 6823–6840, 2016.

[2] S. Attia *et al.*, «Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe», *Energy and Buildings*, vol. 155, pagg. 439–458, nov. 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.09.043.

[3] D. D'Agostino e L. Mazzarella, «Data on energy consumption and Nearly zero energy buildings (NZEBs) in Europe», *Data in Brief*, vol. 21, pagg. 2470–2474, dic. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.11.094.

[4] D. D'Agostino e L. Mazzarella, «What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions», *Journal of Building Engineering*, vol. 21, pagg. 200–212, gen. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.10.019.

[5] Odysee-Mure,«https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/households/household-eu.pdf». 2021.

[6] ISTAT, «I consumi energetici delle famiglie». 15 dicembre 2014. [Online]. Disponibile su: https://www.istat.it/it/files//2014/12/StatReport_Consumi_energetici.pdf

[7] C. Pelletier, Y. Rogaume, L. Dieckhoff, G. Bardeau, M.-N. Pons, e A. Dufour, «Effect of combustion technology and biogenic CO2 impact factor on global warming potential of wood-to-heat chains», *Applied Energy*, vol. 235, pagg. 1381–1388, 2019.

[8] I. D'Elia, U. Ciorba, M. Gaeta, e M. R. Virdis, *Impatti energetici e ambientali dei combustibili nel riscaldamento residenziale*. ENEA, 2017.

[9] European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., *Best available technologies for the heat and cooling market in the European Union.* LU: Publications Office, 2012. Consultato: 7 dicembre 2021. [Online]. Disponibile su: https://data.europa.eu/doi/10.2790/5813

[10] D. Jones, «Principals of Condensing Boiler System Design», pag. 8, 2014.

[11] N. Bertelsen e B. Vad Mathiesen, «EU-28 residential heat supply and consumption: Historical development and status», *Energies*, vol. 13, n. 8, pag. 1894, 2020.

[12] G. Martinopoulos, K. T. Papakostas, e A. M. Papadopoulos, «A comparative review of heating systems in EU countries, based on efficiency and fuel cost», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pagg. 687–699, 2018.

[13] S. Ozgen, S. Cernuschi, e M. Giugliano, «Experimental evaluation of particle number emissions from wood combustion in a closed fireplace», *Biomass and Bioenergy*, vol. 50, pagg. 65–74, 2013.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[14] J. Poláčik, T. Sitek, J. Pospíšil, L. Šnajdárek, e M. Lisý, «Emission of fine particles from residential combustion of wood: Comparison of automatic boiler, manual log feed stove and thermo-gravimetric analysis», *Journal of Cleaner Production*, vol. 279, pag. 123664, 2021.

[15] L. Stabile, G. Buonanno, P. Avino, A. Frattolillo, e E. Guerriero, «Indoor exposure to particles emitted by biomass-burning heating systems and evaluation of dose and lung cancer risk received by population», *Environmental Pollution*, vol. 235, pagg. 65–73, 2018, doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.055.

[16] International Agency for Research on Cancer, «IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths», Lyon/Geneva, 17 October 2013, ott. 2013.

[17] A. Kocbach Bølling *et al.*, «Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties», *Particle and Fibre Toxicology*, vol. 6, n. 1, pag. 29, 2009, doi: 10.1186/1743-8977-6-29.

[18] R. J. Laumbach e H. M. Kipen, «Respiratory health effects of air pollution: update on biomass smoke and traffic pollution», *Journal of allergy and clinical immunology*, vol. 129, n. 1, pagg. 3–11, 2012.

[19] International Commission on Radiological Protection, «Human respiratory tract model for radiological protection. A report of a Task Group of the International Commission on Radiological Protection.», *Annals of the ICRP*, vol. 24, n. 1–3, pagg. 1–482, 1994, doi: 10.1016/0146-6453(94)90029-9.

[20] Y. Landkocz *et al.*, «Fine and ultrafine atmospheric particulate matter at a multi-influenced urban site: Physicochemical characterization, mutagenicity and cytotoxicity», *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, vol. 221, pagg. 130–140, feb. 2017, doi: 10.1016/j.envpol.2016.11.054.

[21] C.-M. Liao *et al.*, «Lung cancer risk in relation to traffic-related nano/ultrafine particle-bound PAHs exposure: a preliminary probabilistic assessment», *Journal of hazardous materials*, vol. 190, n. 1–3, pagg. 150–158, 2011.

[22] G. N. Sze-To, C. L. Wu, C. Y. H. Chao, M. P. Wan, e T. C. Chan, «Exposure and cancer risk toward cooking-generated ultrafine and coarse particles in Hong Kong homes», *HVAC&R Research*, vol. 18, n. 1–2, pagg. 204–216, feb. 2012, doi: 10.1080/10789669.2011.598443.

[23] Commission Regulation, *Commission Regulation (EU) No 453/2010 of 20 May 2010 amending Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council on the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)*, vol. L 133/1. 2010.

[24] European Parliament and Council of the European Union, *Commission Regulation (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information*, vol. L 199/1. 2008.

[25] Lackner M., Palotás A.B., e Winter F., «Combustion Principles», in *Combustion*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013, pagg. 43–96. [Online]. Disponibile su: http://dx.doi.org/10.1002/9783527667185.ch03

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[26] D. Che, Y. Liu, e C. Gao, «Evaluation of retrofitting a conventional natural gas fired boiler into a condensing boiler», *Energy Conversion and Management*, vol. 45, n. 20, pagg. 3251–3266, 2004.

[27] G. Vignali, «Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology», *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pagg. 2493–2508, gen. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025.

[28] S. Ozgen, G. Ripamonti, S. Cernuschi, e M. Giugliano, «Ultrafine particle emissions for municipal waste-to-energy plants and residential heating boilers», *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 11, n. 4, pagg. 407–415, dic. 2012, doi: 10.1007/s11157-012-9280-0.

[29] M. Tiwari, S. K. Sahu, R. C. Bhangare, A. Yousaf, e G. G. Pandit, «Particle size distributions of ultrafine combustion aerosols generated from household fuels», *Atmospheric Pollution Research*, vol. 5, n. 1, pagg. 145–150, gen. 2014, doi: 10.5094/APR.2014.018.

[30] C. Carpino, R. Bruno, e N. Arcuri, «Statistical analysis of the heating demand in residential buildings located in Mediterranean climate and proposals for refurbishment», *Energy Procedia*, vol. 133, pagg. 16–27, 2017.

[31] C. Hueglin, C. Gaegauf, S. Künzel, e H. Burtscher, «Characterization of wood combustion particles: Morphology, mobility, and photoelectric activity», *Environmental Science and Technology*, vol. 31, n. 12, pagg. 3439–3447, 1997.

[32] H. Burtscher, «Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review», *Journal of Aerosol Science*, vol. 36, n. 7, pagg. 896–932, 2005.

[33] W. H. Kruskal e W. A. Wallis, «Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis», *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, n. 260, pagg. 583–621, dic. 1952, doi: 10.1080/01621459.1952.10483441.

[34] Q. Wang, L. Wang, H. Wu, e H. Yang, «Promoting fine particle removal in double-tower cascade wet flue gas desulfurization system by flue gas temperature reduction», *Powder Technology*, vol. 373, pagg. 581–589, 2020.

[35] R. Zhang, H. Wu, X. Si, L. Zhao, e L. Yang, «Improving the removal of fine particulate matter based on heterogeneous condensation in desulfurized flue gas», *Fuel Processing Technology*, vol. 174, pagg. 9–16, 2018.

[36] S. Cernuschi, M. Giugliano, e S. Consonni, «Emissioni di Polveri Fini e Ultrafini da impianti di combustione», Laboratorio Energia & Ambiente Piacenza, Piacenza, 2010.

[37] L. S. Bäfver, B. Leckner, C. Tullin, e M. Berntsen, «Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves», *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n. 8, pagg. 3648–3655, 2011.

[38] L. S. Johansson, B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, e A. Potter, «Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets», *Atmospheric Environment*, vol. 38, n. 25, pagg. 4183–4195, ago. 2004, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.04.020.

[39] M. C. O. Chang, J. C. Chow, J. G. Watson, P. K. Hopke, S. M. Yi, e G. C. England, «Measurement of ultrafine particle size distributions from coal-, oil-, and gas-fired stationary combustion sources», *Journal of the Air and Waste Management Association*, vol. 54, n. 12, pagg. 1494–1505, 2004.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[40] P. Minutolo, A. D'Anna, M. Commodo, R. Pagliara, G. Toniato, e C. Accordini, «Emission of ultrafine particles from natural gas domestic burners», *Environmental Engineering Science*, vol. 25, n. 10, pagg. 1357–1364, 2008.

[41] C. Boman, E. Pettersson, R. Westerholm, D. Boström, e A. Nordin, «Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves», *Energy & Fuels*, vol. 25, n. 1, pagg. 307–314, gen. 2011, doi: 10.1021/ef100774x.

[42] M. Obaidullah e J. De Ruyck, «Performance, Gaseous and Particle Emissions from a Residential Pellet Stove», in *Renewable Energy*, IntechOpen, 2020.

[43] G. Shen *et al.*, «A laboratory comparison of emission factors, number size distributions, and morphology of ultrafine particles from 11 different household cookstove-fuel systems», *Environmental science & technology*, vol. 51, n. 11, pagg. 6522–6532, 2017.

[44] F. Fachinger, F. Drewnick, R. Gieré, e S. Borrmann, «How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions», *Atmospheric environment*, vol. 158, pagg. 216–226, 2017.

[45] G. Buonanno e L. Morawska, «Ultrafine particle emission of waste incinerators and comparison to the exposure of urban citizens», *Waste Management*, vol. 37, pagg. 75–81, 2015.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Quantificazione degli effetti idro-meccanici prodotti da interventi di Ingegneria Naturalistica e applicazione ad un caso di studio nel centro storico di Deruta

Silvia Settembre[1], Arianna Lupattelli[1,*], Erica Cernuto[1] e Diana Salciarini[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia, 06125, Italia

***** Autore di riferimento. E-mail: arianna.lupattelli@studenti.unipg.it

Abstract: I fenomeni franosi superficiali rappresentano un problema diffuso nella maggior parte del territorio italiano. I cambiamenti climatici e le trasformazioni antropiche hanno accentuato tali processi, generando situazioni di squilibrio eco-ambientali e rendendo estremamente onerosi gli interventi necessari per la mitigazione della pericolosità. Nell'affrontare gli aspetti tecnici, naturalistici e paesaggistici del problema, un contributo importante è fornito dalle tecniche di Ingegneria Naturalistica, ovvero interventi a basso impatto ambientale e paesaggistico che utilizzano le caratteristiche biotecniche di materiale vegetale vivo, geo-sintetico e fibre naturali, per il consolidamento, rivegetazione e antierosione del terreno. Allo scopo di quantificare l'incremento della stabilità di pendii in frana mediante opere di Ingegneria Naturalistica, sono state condotte simulazioni numeriche su una serie di pendii ideali mediante il codice di calcolo Plaxis 2D, valutando il contributo stabilizzante dovuto a: *i)* l'effetto idro-meccanico prodotto dalla presenza di vegetazione; *ii)* un apparato radicale che si estende a diverse profondità dalla superficie. È stato possibile osservare che: *a)* in generale la stabilità del pendio aumenta in presenza di un manto vegetale, con benefici maggiori per terreni a grana grossa; *b)* il contributo benefico dell'effetto idro-meccanico combinato delle radici è meno apprezzabile nel caso di terreni a grana fine; *c)* l'apparato radicale influisce sul comportamento del pendio anche nel periodo di parziale sviluppo e la stabilità del versante aumenta progressivamente con l'approfondimento delle radici. Infine, sono state avanzate delle proposte di intervento, paesaggisticamente non invasive, di consolidamento dei versanti del centro storico della città di Deruta mediante tecniche di Ingegneria Naturalistica.

Keywords: ingegneria naturalistica; frane; stabilità dei pendii.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_005_pp_36

1. Introduzione

La maggior parte del territorio italiano è da sempre predisposto a fenomeni di dissesto idrogeologico, per le sue peculiari caratteristiche geologiche e geomorfologiche. Negli anni più recenti, la fragilità del territorio è stata aggravata dagli effetti locali dei cambiamenti climatici globali e dalle trasformazioni apportate dall'uomo nel corso dei secoli con scarsa consapevolezza e attenzione verso l'uso del suolo, dando origine a processi degradativi che hanno limitato o inibito totalmente la funzionalità dello stesso [1]. Nell'attuare gli interventi necessari a mitigare gli effetti dei numerosi eventi calamitosi che interessano il territorio italiano, viene attribuita un'importanza sempre maggiore all'interazione tra le opere da realizzare e l'ambiente nel quale vengono poste in atto, non solo cercando di ridurre al minimo il loro impatto ma anche facendo il possibile per ripristinare le condizioni naturali tipiche dell'area di interesse, poiché l'esigenza di porre in sicurezza il territorio non può dissociarsi dalla necessità della sua salvaguardia e conservazione.

È proprio in questo ambito che si inserisce l'Ingegneria Naturalistica, una disciplina tecnico-scientifica in grado di studiare soluzioni di consolidamento, antierosione e regimazione delle acque, mediante l'associazione di materiali naturali e inerti, a basso impatto ambientale e vantaggiose a livello paesaggistico. L'attuazione di tali interventi trova una perfetta collocazione nella Regione Umbria, caratterizzata da un mirabile scenario naturale. Lo scopo di questo studio è quello di individuare delle soluzioni per interventi a basso impatto ambientale applicabili ad uno specifico caso di studio, città situata nella Regione Umbria in provincia di Perugia, al fine di considerare interventi di consolidamento e di stabilizzazione dei versanti del suo centro storico, soggetti a fenomeni franosi.

Il lavoro è strutturato come segue. Il Paragrafo 2 contiene le principali definizioni dell'Ingegneria Naturalistica, con le finalità e i campi di applicazione in relazione ai possibili interventi di consolidamento e stabilizzazione dei versanti e di soluzioni tecniche per il controllo dell'erosione superficiale in un'ottica di tutela e valorizzazione del patrimonio culturale, ambientale e paesaggistico. A seguire, viene riportata un'analisi dei diversi modelli matematici disponibili in letteratura, elaborati da diversi ricercatori a partire dalla fine degli anni '70, relativi alla capacità dell'apparato radicale delle piante di aumentare la resistenza a taglio del terreno e quindi la stabilità dei pendii, sia dal punto di vista meccanico che idraulico. Dopo aver accennato ai diversi approcci possibili, nel Paragrafo 3 si introduce il metodo agli elementi finiti (FE) ed in particolare il codice di calcolo PLAXIS 2D e la procedura utilizzata per l'elaborazione delle analisi numeriche condotte. Vengono presentate le simulazioni numeriche svolte allo scopo di valutare il contributo meccanico e idraulico fornito dalle radici della vegetazione sulla stabilità di una serie di pendii ideali dalle caratteristiche note. Le analisi numeriche, svolte attraverso il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D (Bentley, 2020), hanno consentito la determinazione del coefficiente di sicurezza nel caso di pendii privi di vegetazione, assunti come modelli di riferimento, e pendii con vegetazione. Le variabili che sono state prese in considerazione nelle analisi di stabilità sono: *i)* le diverse inclinazioni del pendio; *ii)* le diverse caratteristiche meccaniche del terreno; *iii)* il contributo di un apparato radicale della vegetazione che si approfondisce a diverse quote. Per concludere, nel Paragrafo 4 viene descritto lo specifico caso di studio individuato nella Regione Umbria: questo riguarda i versanti del centro storico della città di Deruta, estremamente

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

predisposti a fenomeni franosi e ad erosione superficiale. L'analisi del caso di studio selezionato, a partire dai pregressi dissesti ed interventi che hanno interessato il sito, viene condotta al fine di evidenziare la compatibilità ambientale e paesaggistica degli interventi da realizzare e l'efficacia dal punto di vista tecnico.

2. Cenni di Ingegneria Naturalistica

L'Ingegneria Naturalistica è una disciplina tecnico-scientifica relativamente recente che studia le modalità di utilizzo di materiale vegetale vivo negli interventi a basso impatto ambientale e paesaggistico [2] di consolidamento, rinaturalizzazione, rivegetazione e antierosione, abbinandoli ad altri materiali inerti, come pietrame, massi, terra, legno, ferro, acciaio, ma anche geosintetici e fibre naturali, che hanno il ruolo di garantire l'efficienza delle opere per un lasso di tempo sufficiente al totale sviluppo dell'apparato radicale della vegetazione messa a dimora. L'Ingegneria Naturalistica rappresenta uno strumento di raccordo tra la necessità, e talvolta l'urgenza, di intervenire a livello ingegneristico sul territorio e la sensibilità naturalistico-paesaggistica, di tutela e valorizzazione dello stesso.

Le prime esperienze in ambito di Ingegneria Naturalistica avvengono in Europa nei primi anni dell'Ottocento, con testimonianze anche in Italia [3]. Un contributo importante lo si deve principalmente a Hugo Meinhard Schiechtl [4], che canalizzò nel suo lavoro lo studio sull'analisi delle specificità biologiche della vegetazione impiegate negli interventi ambientali, pubblicando il primo manuale in materia. In Italia, a partire dal 1988, vennero emanate una serie di normative in campo ambientale per l'inserimento sistematico di interventi di Ingegneria Naturalistica in alcune tipologie progettuali e seguì la redazione di numerosi manuali regionali, oltre che l'avviamento alla collaborazione con altre associazioni nazionali e internazionali.

I materiali da costruzione che vengono impiegati sfruttano tendenzialmente le peculiarità di alcune specie vegetali vive, come la potenzialità di sviluppo di un considerevole apparato radicale in grado di resistere a sollecitazioni di trazione e taglio oltre che alle capacità di drenaggio del terreno e di propagazione vegetativa, in abbinamento con materiali biodegradabili di origine naturale o altri materiali inerti o prodotti di origine sintetica in diverse combinazioni.

Gli interventi volti alla stabilizzazione e al sostegno di pendii, oltre a garantire efficienza dal punto di vista tecnico e funzionale, contribuiscono a rispettare un particolare valore ecologico, naturalistico, estetico e paesaggistico del sito. Si distinguono due categorie di intervento, a seconda delle cause innescanti i fenomeni di dissesto idrogeologico indagati (Figura 1) [5]: *i)* interventi di stabilizzazione, con azione anti-erosiva nella parte più superficiale del substrato, di rinforzo del terreno e drenaggio delle acque (piantumazioni, gradonate vive, cordonate vive, fascinate vive, palizzate vive e viminate vive); *ii)* opere di consolidamento, agenti più in profondità, mediante la cooperazione tra materiali inerti e vegetazione (grate vive, palificate vive, gabbionata viva). Nell'ambito degli interventi volti al controllo dell'erosione superficiale, la crescita della copertura vegetale consente un efficace controllo e mitigazione dei fenomeni d'erosione, proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1. Alcuni esempi schematici di interventi di stabilizzazione e consolidamento dei pendii: a) sezione di viminata viva; b) palificata viva di tipo Roma [5].

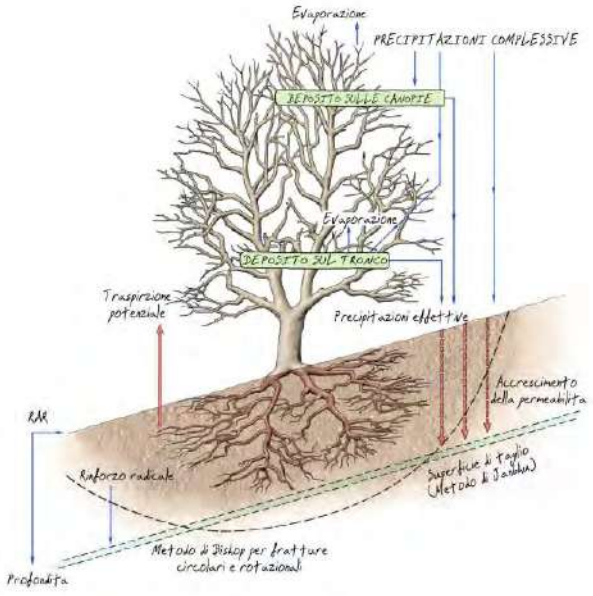


a) b)

2.1 Il ruolo della vegetazione nella stabilizzazione dei pendii

Per valutare l'impatto della vegetazione sulla stabilità dei pendii è necessario quantificare gli effetti dei meccanismi di interazione meccanica-idraulica tra la vegetazione e il terreno. In particolare, gli effetti di natura meccanica sono attribuibili ai processi di interazione radice-terreno, che producono un miglioramento delle caratteristiche tecniche di quest'ultimo attraverso l'azione di rinforzo esplicata dalle radici, dotate in genere di una affidabile resistenza a trazione (Figura 2). Un meccanismo che rientra tra gli effetti di natura idraulica è quello secondo cui l'apparato radicale può ridurre significativamente il contenuto d'acqua del terreno, inibendo l'infiltrazione di acqua meteorica attraverso l'assorbimento d'acqua da parte delle radici e la riduzione del grado di saturazione, che dà generalmente luogo ad un incremento di resistenza al taglio del terreno.

Figura 2. Effetti della vegetazione sul terreno [5].



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2 Caratteristiche meccaniche del sistema terreno-pianta

Il contributo più significativo fornito dalla vegetazione alla stabilità dei pendii è rappresentato dal rinforzo aggiuntivo, di tipo coesivo, dovuto alla presenza delle radici. Il terreno, come altri materiali da costruzione, è dotato di elevati valori di resistenza a compressione e non sempre adeguati valori di resistenza a trazione e taglio. È stato dimostrato che La presenza delle radici, disposte circa perpendicolarmente alla superficie del terreno può incrementare la resistenza a taglio del terreno [6].

Secondo gli studi di [7], il rinforzo meccanico apportato dagli apparati radicali presenti nel terreno può esprimersi attraverso tre differenti vie: l'effetto dovuto alle radici di maggiori dimensioni che attraversano la potenziale superficie di scorrimento (vedi, ad esempio, [8]); l'azione di rinforzo assicurata dagli elementi radicali più sottili e flessibili, che comportano un aumento della coesione apparente; l'ancoraggio, attraverso le radici, di coltri di terreno di limitato spessore al *bedrock* sottostante, più stabile. Negli ultimi anni, numerosi ricercatori hanno dimostrato che la porzione di terreno in cui il rinforzo è più efficace si trova in corrispondenza dello strato più superficiale dove il sistema radicale è più sviluppato, fino ad una profondità di 1-2 m, al di sotto del quale la densità delle radici si riduce rapidamente.

Nel corso degli anni '70, l'esecuzione di prove in laboratorio e in situ hanno costituito la base per la definizione di modelli analitici per la valutazione del contributo meccanico delle radici alla resistenza del terreno. Ad esempio, le prove di [9] hanno dimostrato che la resistenza a taglio dei terreni contenenti radici è superiore rispetto a quelli che ne sono privi e che la rottura può avvenire per raggiungimento della resistenza a rottura delle radici principali, per rottura progressiva delle ramificazioni, per rottura a taglio del sistema radici-terreno oppure per combinazione dei tre meccanismi menzionati. Inoltre, è stato dimostrato che i pendii privi di vegetazione sono più propensi alle frane di quelli vegetati [10]. Il modello introdotto da [11] e da [12] è stato il primo a includere la valutazione del contributo stabilizzante delle radici nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb, sottoforma di coesione aggiuntiva del terreno, definita mediante la resistenza a trazione media delle radici σ_{rt} e dal rapporto di superficie di terreno occupata dalle radici (*RAR*), secondo l'equazione proposta da [13]:

$$\sigma^* = \sigma + \sigma_{veg} = c' + \sigma'_n \tan\varphi' + \sigma_{veg} \quad (1)$$

dove σ^* è la resistenza a taglio totale del terreno vegetato, c' è la coesione efficace, φ' l'angolo di attrito efficace del terreno e σ'_n è la tensione efficace del terreno che agisce normalmente alla potenziale superficie di rottura. Gli autori hanno stimato la massima azione di rinforzo esplicata dalle radici in uno specifico istante temporale in cui tutte le radici contenute nel volume di terreno considerato raggiungono il valore massimo della loro resistenza a trazione.

Le modifiche apportate in seguito da [14] e [15] hanno condotto ad una descrizione più realistica, nella definizione del modello *Fiber Boundle Model* (*FBM*), presupponendo la rottura progressiva delle radici in funzione della loro resistenza e distribuendo le tensioni delle radici rotte tra gli elementi rimanenti. Uno studio più recente di [16] utilizza invece il modello del fascio di radici *Root Boundle Model* (RBM), descrivendo il rapporto tra l'azione di sfilamento e l'allungamento/spostamento delle radici, congiuntamente ad un modello per la distribuzione delle radici laterali. Con una

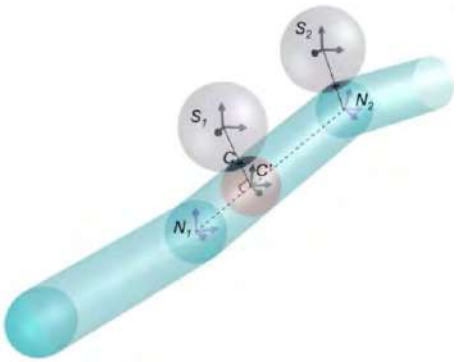
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

caratterizzazione forza-spostamento del fascio di radici, è possibile stimare quantitativamente l'impatto meccanico della vegetazione sulla stabilità del pendio, comprendendo la stima del massimo valore di rinforzo delle radici, l'allungamento del fascio di radici e il modulo di Young secante (rapporto tra il massimo rinforzo e l'allungamento).

Sviluppi più recenti del modello *RBM* permettono di valutare il rinforzo delle radici in modo più semplice ma sufficientemente accurato, includendo l'effetto della variabilità della resistenza delle radici. Per fare ciò è stata incorporata nel modello una funzione di distribuzione cumulativa complementare di probabilità. In tale modello si parte dal presupposto che ciascuna radice del fascio sia una fibra elastica-lineare e che si rompa ad una determinata soglia di spostamento [6], basandosi su valori medi dei parametri delle radici, definiti per ciascuna classe di diametro, quali: la lunghezza della radice L_r, la massima resistenza a trazione $F_{r,max}$ ed il modulo di Young. La resistenza a trazione di una singola radice, F_r può essere rappresentata come una funzione dello spostamento Δ_{dx} e del diametro della radice d_r. Inoltre, diversamente dal modello *RBM*, è efficace per fasci con numerose radici poiché prende in considerazione solo il comportamento meccanico medio di ciascuna classe di diametro e non tiene in considerazione esplicitamente dei meccanismi di sfilamento.

Uno degli approcci più recenti è quello sviluppato da [17], secondo il quale i grani di terreno e i segmenti delle radici vengono modellati con il metodo ad elementi discreti (*DEM*): il terreno è modellato come un insieme di sfere interagenti attraverso forze di contatto; le radici sono modellate come elementi cilindrici e sferici elastici-perfettamente plastici, in grado di sopportare azioni normali, di taglio, flettenti e torcenti (Figura 3). Si assume che tutte e tre abbiano la stessa formulazione di contatto con diversi parametri costitutivi. Il collasso della radice può derivare da un carico di trazione che conduce alla rottura, da un carico di flessione, da forze di interazione radice-terreno che conducono alla perdita dell'adesione, oppure dallo sfilamento delle radici. Le interazioni tra terreno e radice, così come il tipo di meccanismo di collasso, dipendono dalle differenze di rigidezza del sistema radice-terreno. Dai risultati del modello numerico emerge che i terreni contenenti radici, se soggetti ad una forza di taglio, hanno una resistenza superiore rispetto a quelli che ne sono sprovvisti. Una delle osservazioni più importanti che emerge dalla ricerca è che il rinforzo del terreno ad opera delle radici non può essere quantificato come una forza addizionale di resistenza a taglio costante perché l'attivazione di tale forza dipende dal livello di tensione applicato.

Figura 3. Geometria delle interazioni tra una sfera e i cilindri tra loro collegati in un modello discreto relativo alle radici [17].



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.3 Caratteristiche idrologiche del sistema terreno-pianta

L'apparato radicale della vegetazione può influenzare le proprietà idrauliche del terreno (contenuto d'acqua, suzione, permeabilità, percorsi preferenziali delle acque sotterranee) e l'incremento di coesione apparente dovuto alle radici può essere significativo [18]. La vegetazione è in grado di assorbire e trattenere grandi quantità d'acqua intercettata, riducendo o anche annullando il suo scorrimento superficiale a vantaggio dell'immagazzinamento e dello scorrimento in profondità. Inoltre, evaporazione e traspirazione sono due fenomeni essenziali nella definizione del bilancio idrico di un suolo.

Diversi approcci analitici e numerici sono stati sviluppati al fine di calcolare la quantità di acqua che viene dissipata dalle radici delle piante. In questi modelli denominati *Root Water Uptake* (*RWU*), focalizzati sulla modellazione dell'evapotraspirazione e sui suoi effetti, la quantità d'acqua che le radici riescono a sottrarre al terreno viene valutata mediante un termine aggiuntivo all'equazione di continuità del flusso, che rappresenta il contenuto d'acqua volumetrico *S(z,t)* traspirato dalle radici nell'unità di tempo. Tale termine aggiuntivo dipende principalmente dal contenuto d'acqua volumetrico del terreno, dalla densità radicale e dal tasso di traspirazione potenziale:

$$S(z,t) = [\frac{\phi_s - \phi_L}{R_{sl}}] \, S_{act}(z,t) \quad (2)$$

dove "ϕ_s - ϕ_L" è la differenza tra il potenziale idraulico del terreno e delle foglie, R_{sl} è l'effettiva resistenza idraulica al flusso d'acqua dal terreno alle foglie, dipendente dalla profondità, S_{act} è la superficie specifica della parte attiva delle radici e *z* è la profondità. Questo concetto rimane abbastanza teorico, tuttavia, fornisce le basi per lo sviluppo di ulteriori modelli. [19] sviluppò un approccio che collega il modello *RWU* alla legge di Darcy, dove la funzione di estrazione dell'acqua descrive un flusso costante di acqua nella zona delle radici, che si assume abbia la forma di un cilindro infinitamente lungo. Le modifiche apportate successivamente da [20] introducono il coefficiente di conducibilità idraulica non satura del terreno.

Uno dei primi codici che ha consentito il calcolo della stabilità di un pendio considerando sia l'influenza meccanica delle radici che quella idraulica è il software CHASM. Nei modelli, l'estrazione di acqua attraverso l'apparato radicale e la perdita dalla superficie fogliare determinano una riduzione della pressione interstiziale all'interno del pendio, portando all'aumento della resistenza al taglio effettiva e quindi al miglioramento della stabilità di quest'ultimo. Inoltre, il modello tiene conto dei cambiamenti indotti nella conducibilità idraulica del terreno dalla distribuzione dell'apparato radicale nel sottosuolo. [21] sviluppò un semplice strumento numerico chiamato SLIP4EX, utilizzato per l'analisi preliminare del problema e della natura del processo, che tiene conto della variazione della pressione interstiziale e dell'aumento della coesione apparente considerando diversi parametri, tra i quali la massa della vegetazione, la forza del vento e il rinforzo meccanico delle radici. Il fattore di sicurezza viene calcolato utilizzando diversi metodi basati sulla teoria dell'equilibrio limite. [22] propose un modello basato su un approccio macroscopico in cui l'intero apparato radicale viene trattato come un

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

unico elemento in modo da poter sintetizzare i vari contributi dovuti alla presenza di tutte le singole radici. Quest'ultimo approccio si basa sull'equazione di Richards opportunamente modificata:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \nabla(k\nabla\psi) - \frac{\delta k_z}{\delta z} - S(x, y, z, t) \quad (3)$$

dove $\delta\theta$ è il contenuto di umidità del terreno e k_z è la permeabilità verticale, applicabile sia per mezzi porosi omogenei che eterogenei.

Un altro approccio interessante è quello proposto da [23], dove viene indagato l'effetto della variazione spaziale dell'evapotraspirazione potenziale T_p e la sua influenza nella distribuzione della suzione (pressione interstiziale negativa) in un pendio sottoposto a diversi tipi di precipitazione. L'assorbimento di acqua da parte delle radici che provoca un aumento della suzione influenza anche il fattore di sicurezza del pendio vegetato, perché questa crea una coesione apparente nel terreno. Il valore dell'evapotraspirazione dipende da molti parametri come, ad esempio, dalle caratteristiche della pianta (densità dell'apparato radicale, superficie delle foglie, lunghezza delle radici) e, pertanto, il quantitativo di acqua assorbito dalle radici è altamente incerto e può essere soggetto a variazioni. Per modellare l'assorbimento di acqua ad una profondità *z* viene utilizzato un approccio macroscopico:

$$S(z) = T_p\, \beta(z)\, \alpha(\Psi) \quad (4)$$

dove T_p è la massima evapotraspirazione potenziale, β è la funzione di forma della distribuzione delle radici ad una data profondità *z* nella direzione verticale, $\alpha(\Psi)$ è un coefficiente di riduzione che è funzione della suzione di matrice. La traspirazione effettiva, invece, può essere definita come l'integrale della quantità di acqua assorbita all'interno della profondità dell'apparato radicale. La distribuzione della suzione viene poi utilizzata nei calcoli del fattore di sicurezza e i risultati hanno mostrato che la presenza della vegetazione sul versante può aumentare notevolmente la sua stabilità soprattutto quando il periodo di pre-essiccazione è lungo e l'intensità della precipitazione è relativamente bassa.

3. Modello numerico per la valutazione dell'effetto della vegetazione

Nella maggior parte dei casi applicativi della valutazione del rischio associato alla potenziale instabilità di un versante, viene usato l'approccio basato sulla stabilità globale di un volume di terreno nei confronti di un eventuale meccanismo di collasso, come ad esempio uno scorrimento lungo una superficie di rottura. Secondo questa ipotesi, le deformazioni nel terreno sono localizzate in corrispondenza di una superficie netta di separazione tra il corpo di frana e la parte di terreno stabile, detta superficie di scorrimento. È possibile valutare le condizioni di stabilità del terreno facendo riferimento ad un parametro scalare noto come coefficiente di sicurezza (F_s), definito come il rapporto tra la resistenza a rottura del terreno e la tensione tangenziale mobilitata in un generico punto P lungo la superficie di scorrimento. Per definizione, questo parametro può assumere diversi valori che identificano diverse condizioni del terreno: i) $F_s > 1$, condizioni lontane dalla rottura; ii) $F_s = 1$, condizioni di rottura; iii) $F_s < 1$, condizioni di sollecitazione non compatibili con le caratteristiche di resistenza del terreno.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In generale, la verifica delle condizioni di stabilità di un pendio consiste nell'individuazione di un certo numero di cinematismi di collasso, ciascuno dei quali è caratterizzato da una specifica superficie di scorrimento e dal corrispondente coefficiente di sicurezza F_s e, successivamente, nel confrontare i coefficienti di sicurezza trovati con un valore limite di riferimento F_{lim} fissato dalla Normativa, in modo tale che:

$$F_S > F_{lim} \tag{5}$$

La definizione di questo valore limite F_{lim} del coefficiente di sicurezza nelle analisi di stabilità dei pendii è una precauzione adottata in sede di normativa nei confronti delle varie incertezze presenti in ogni analisi di stabilità. I metodi più largamente impiegati per effettuare l'analisi di stabilità di pendii sono due: il metodo dell'equilibrio limite (*LEM – Limit Equilibrium Method*) e il metodo agli elementi finiti (*FEM – Finite Element Method*).

Nel presente lavoro sono state condotte delle simulazioni numeriche attraverso il codice di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D (Bentley, 2020), tenendo conto di alcune caratteristiche salienti del sistema terreno-vegetazione, e combinandole in un modello realistico e fisicamente coerente per modellare la complessa interazione tra terreno, pianta, acqua e atmosfera così da giungere a valutazioni del coefficiente di sicurezza il più affidabili possibile.

3.1 Implementazione del modello e programma delle simulazioni

È stato utilizzato un modello di pendio di riferimento ideale, con terreno uniforme e privo di vegetazione (Figura 4) ed inclinazione variabile, assumendo valori compresi tra un minimo di 10° ed un massimo di 25° (Tabella 1). Gli altri parametri sono stati calcolati in base a semplici considerazioni geometriche e vengono riportati in Tabella 1.

Figura 4. Modello 2D del pendio di riferimento.

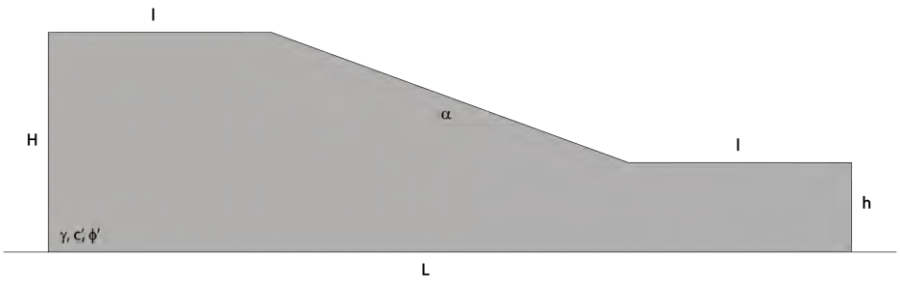


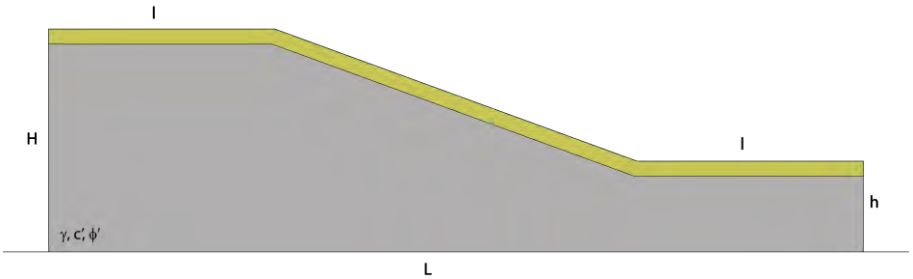
Tabella 1. Parametri geometrici del modello di pendio naturale di riferimento.

	10°	**15°**	**20°**	**25°**
H (m)	10.23	12.43	14.73	17.19
L (m)	54	54	54	54
h (m)	6	6	6	6
l (m)	15	15	15	15

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In un secondo modello è stato introdotto un manto vegetale uniforme rappresentato attraverso l'inserimento di uno strato a spessore costante lungo tutto il pendio (Figura 5), utile alla valutazione del rinforzo esplicato dall'apparato radicale sul pendio. Gli spessori radicali del manto vegetale sono stati considerati pari a 1 e 2 m. Questi spessori sono rappresentativi della zona di maggiore influenza esercitata delle radici, al fine di poter valutare l'effetto della variazione della loro profondità tenendo conto dei diversi tempi di accrescimento.

Figura 5. Modello 2D del pendio con manto vegetale uniforme.



Le analisi sono state condotte nei due modelli (privo e in presenza di vegetazione), e per due casi differenti di terreno: a grana grossa (sabbia argillosa) e a grana fine (argilla). Nell'ottica di dare generalità allo studio, nell'attribuzione delle caratteristiche fisico-meccaniche ai terreni si è fatto riferimento a materiali di libreria, disponibili nel database di PLAXIS 2D, ed è stato adottato un modello di comportamento elastico-perfettamente plastico alla Mohr-Coulomb. In Tabella 2 sono riassunti i parametri di resistenza e permeabilità adottati per le due tipologie di terreno.

Tabella 2. Parametri fisico-meccanici del terreno a grana grossa e a grana fine.

Parametri	Sabbia argillosa	Argilla
γ (kN/m^3)	20	20
ϕ' (°)	35	28
c' (kPa)	1	5
c'_{veg} (kPa)	11	15
k (m/giorno)	0.125	0.048

Il parametro c'_{veg} rappresenta la somma tra la coesione del terreno e quella aggiuntiva fornita dall'apparato radicale alla resistenza a taglio del terreno, assunto pari a 10 kPa. La definizione delle condizioni idrauliche ha previsto l'inserimento di una superficie piezometrica al livello del piano campagna, ovvero nella condizione più gravosa. L'analisi di stabilità è stata condotta attraverso il metodo della riduzione dei parametri di resistenza "ϕ - *c reduction*", che permette di approssimare le condizioni limite di stabilità superate le quali si verifica il collasso del sistema geotecnico.

Il programma delle simulazioni ha previsto l'esecuzione di un numero totale di 56 analisi parametriche per poter fornire delle indicazioni tecniche rispetto alla variazione del coefficiente di sicurezza F_s nella stabilità dei modelli di pendio (Figura 6). È stato valutato l'effetto idraulico, meccanico e idro-meccanico per il modello di pendio naturale e con manto vegetato alle diverse inclinazioni, per

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

terreni di diversa granulometria, con un minor o maggior approfondimento delle radici della vegetazione.

Figura 6. Sintesi delle 56 analisi parametriche condotte.

Terreno a grana grossa				
Effetto idraulico				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_01	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	1	35
Run_02	*Pendio naturale*	10	1	35
Run_03	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	1	35
Run_04	*Pendio naturale*	15	1	35
Run_05	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	1	35
Run_06	*Pendio naturale*	20	1	35
Run_07	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	1	35
Run_08	*Pendio naturale*	25	1	35
Effetto meccanico				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_33	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	11	35
Run_02	*Pendio naturale*	10	1	35
Run_34	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	11	35
Run_04	*Pendio naturale*	15	1	35
Run_35	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	11	35
Run_06	*Pendio naturale*	20	1	35
Run_36	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	11	35
Run_08	*Pendio naturale*	25	1	35
Effetto combinato				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_17	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	11	35
Run_18	*Pendio naturale*	10	1	35
Run_19	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	11	35
Run_20	*Pendio naturale*	15	1	35
Run_21	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	11	35
Run_22	*Pendio naturale*	20	1	35
Run_23	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	11	35
Run_24	*Pendio naturale*	25	1	35
Effetto combinato				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_37	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	10	11	35
Run_38	*Pendio naturale*	10	1	35
Run_39	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	15	11	35
Run_40	*Pendio naturale*	15	1	35
Run_41	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	20	11	35
Run_42	*Pendio naturale*	20	1	35
Run_43	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	25	11	35
Run_44	*Pendio naturale*	25	1	35

Terreno a grana fine				
Effetto idraulico				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_09	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	5	28
Run_10	*Pendio naturale*	10	5	28
Run_11	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	5	28
Run_12	*Pendio naturale*	15	5	28
Run_13	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	5	28
Run_14	*Pendio naturale*	20	5	28
Run_15	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	5	28
Run_16	*Pendio naturale*	25	5	28
Effetto meccanico				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_53	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	15	28
Run_10	*Pendio naturale*	10	5	28
Run_54	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	15	28
Run_12	*Pendio naturale*	15	5	28
Run_55	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	15	28
Run_14	*Pendio naturale*	20	5	28
Run_56	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	15	28
Run_16	*Pendio naturale*	25	5	28
Effetto combinato				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_25	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	10	15	28
Run_26	*Pendio naturale*	10	5	28
Run_27	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	15	15	28
Run_28	*Pendio naturale*	15	5	28
Run_29	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	20	15	28
Run_30	*Pendio naturale*	20	5	28
Run_31	*Manto vegetato* ($s = 2.0$ m)	25	15	28
Run_32	*Pendio naturale*	25	5	28
Effetto combinato				
Simulazione		α [°]	c' [KN/m^2]	ϕ' [°]
Run_45	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	10	15	28
Run_46	*Pendio naturale*	10	5	28
Run_47	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	15	15	28
Run_48	*Pendio naturale*	15	5	28
Run_49	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	20	15	28
Run_50	*Pendio naturale*	20	5	28
Run_51	*Manto vegetato* ($s = 1.0$ m)	25	15	28
Run_52	*Pendio naturale*	25	5	28

3.2 Risultati

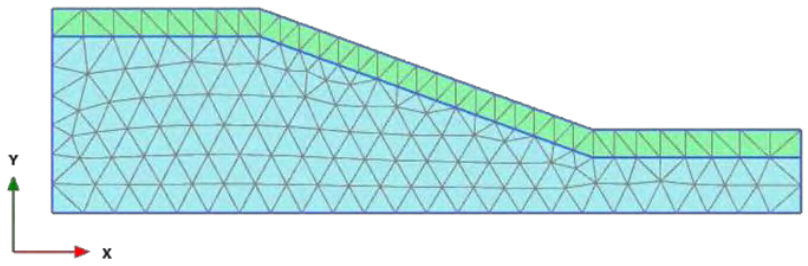
In questa sezione verranno illustrati e discussi i risultati delle simulazioni effettuate sui diversi modelli di pendio, per la valutazione del:

- contributo stabilizzante della vegetazione dovuto al solo effetto idraulico, *H* (ovvero ipotizzando che la presenza delle radici produca una variazione solo delle caratteristiche idrauliche del terreno);
- contributo stabilizzante della vegetazione dovuto al solo effetto meccanico, *M* (ovvero ipotizzando che la presenza delle radici produca una variazione solo delle caratteristiche meccaniche del terreno);
- contributo stabilizzante della vegetazione dovuta all'effetto idro-meccanico, *HM* (ovvero ipotizzando che la presenza delle radici produca una variazione sia delle caratteristiche idrauliche che meccaniche del terreno);
- contributo stabilizzante di un apparato radicale della vegetazione a diverse profondità.

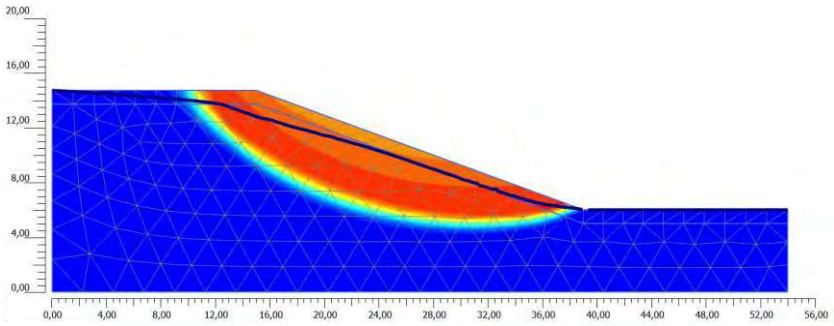
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Per i pendii esaminati nell'ambito dell'analisi parametrica riassunta in Figura 6, i risultati ottenuti sono espressi in termini di coefficiente di sicurezza F_s. La Figura 7a mostra la discretizzazione del dominio usato nelle analisi, mentre la Figura 7b mostra un esempio di risultato ottenuto dove è individuata la possibile superficie di rottura, a cui corrisponde il calcolo del rispettivo fattore di sicurezza.

Figura 7. a) discretizzazione del dominio di analisi; b) esempio di risultato dell'analisi di stabilità dove è evidente la superficie di rottura più critica, a cui corrisponde il calcolo del rispettivo F_s.



a)

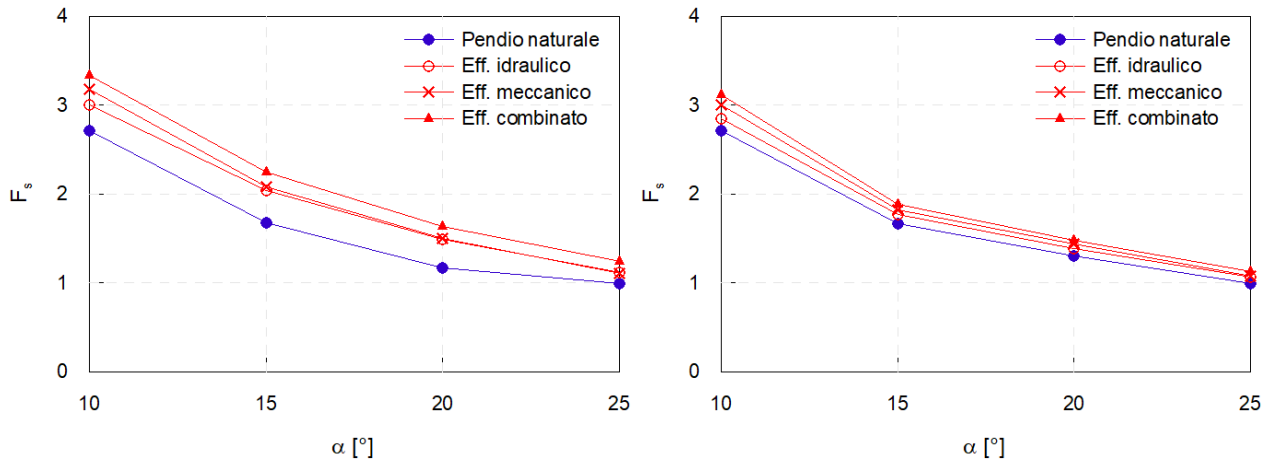


b)

In Figura 8 è mostrato l'andamento del coefficiente di sicurezza al variare dell'inclinazione del pendio per: a) terreno a grana grossa e b) terreno a grana fine, confrontando i valori ottenuti nel caso di pendio privo di vegetazione e pendio vegetato con apparato radicale a spessore costante *s* pari a 2 m, considerando separatamente i diversi contributi stabilizzanti (*M*, *H* e *HM*). Come ci si attende, il coefficiente di sicurezza F_s, e quindi la stabilità del versante, diminuisce al crescere della pendenza del pendio. Si osserva inoltre che il pendio con manto vegetale ha sempre un coefficiente di sicurezza maggiore rispetto al pendio naturale senza vegetazione, indipendentemente da quale effetto stabilizzante si valuti (*H*, *M*, o *HM*). Nel caso di terreni a grana grossa, si osserva che gli effetti *H* e *M*, presi separatamente, sono confrontabili in termini di effetto stabilizzante prodotto; mentre come è lecito attendersi, l'effetto combinato *HM* è maggiore dei due effetti presi singolarmente e può condurre ad un aumento della stabilità fino al 60% per pendii a bassa pendenza, e fino al 30 % per pendii più inclinati. Nel caso di terreni a grana fine, si osserva invece che l'effetto stabilizzante di tipo meccanico *M* è superiore a quello di tipo idraulico *H*. Inoltre, dal confronto della Figura 8a,b si osserva come tutti i contributi stabilizzanti, sia presi singolarmente che in modo combinato, abbiano comunque un impatto inferiore nei terreni a grana fine rispetto ai terreni a grana grossa.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

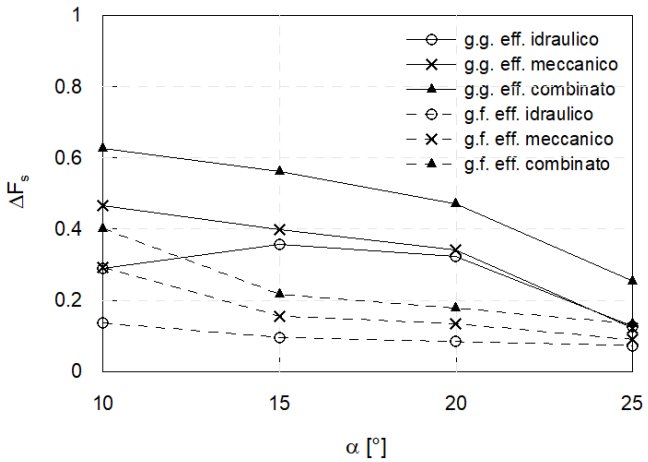
Figura 8. Andamento di F_s al variare di α per terreno a) a grana grossa e b) a grana fine, nel caso di modelli di riferimento e a manto vegetale uniforme, con apparato radicale con s = 2 m, confrontando i tre contributi: *H*, *M* e *HM*.



Infine, per tutti i casi considerati, quando il pendio è molto inclinato (α = 25°), il contributo stabilizzante dovuto alla presenza di un apparato radicale, benché apprezzabile, è molto limitato.

La Figura 9 mostra l'andamento dell'incremento di stabilità (ΔF_s) prodotto dagli interventi basati sulla vegetazione, confrontando i diversi casi esaminati mediante l'analisi parametrica di Figura 6. Si osserva che nel caso dei terreni a grana grossa è possibile ottenere fino ad un incremento del coefficiente di sicurezza ΔF_s = 0.6, mentre a parità di condizioni, l'incremento massimo ottenibile per i terreni a grana fine è di ΔF_s = 0.4.

Figura 9. Andamento di ΔF_s al variare di α per terreno a grana grossa (g.g.) e a grana fine (g.f.), confrontando i tre contributi: *H, M* e *HM*.

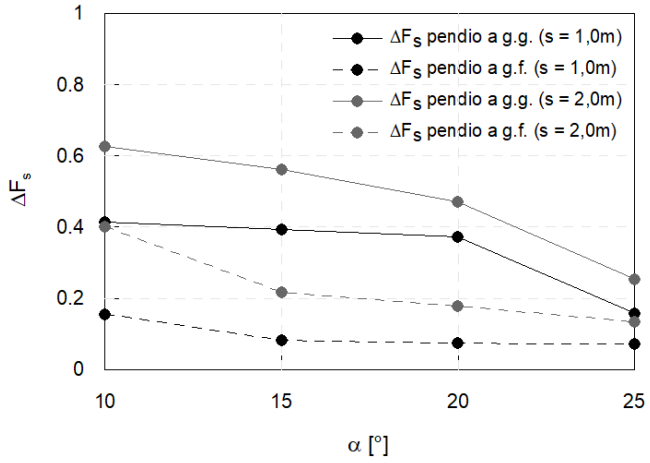


L'apparato radicale influisce sul comportamento meccanico ed idraulico del pendio anche nel periodo temporale che impiega per svilupparsi completamente. In Figura 10 viene mostrato l'andamento dell'incremento del coefficiente di sicurezza del pendio al variare della profondità del sistema radicale, considerando due casi per la profondità delle radici: s = 1 m ed s = 2 m. Si osserva che l'incremento ΔF_s del coefficiente di sicurezza aumenta con l'aumentare della profondità dell'apparato

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

radicale, con un incremento confrontabile sia nel caso di terreno a grana grossa che di terreno a grana fine.

Figura 10. Incremento del fattore di sicurezza del pendio ΔF_s, per terreno a grana grossa (g.g.) e a grana fine (g.f.), al variare dello spessore dell'apparato radicale *s*.



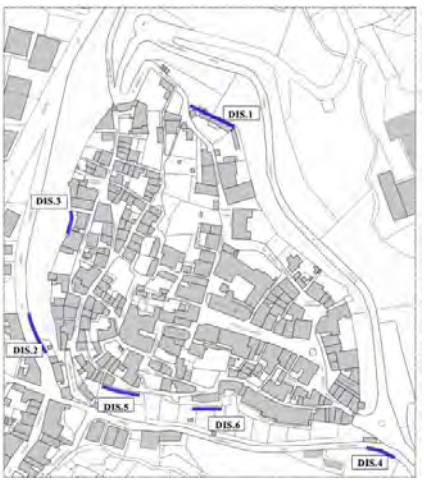
4. Caso di studio: Deruta

Il caso di studio, individuato nella Regione Umbria, riguarda i versanti del centro storico della città di Deruta, estremamente predisposti a fenomeni di frana ed erosione superficiale. L'analisi viene condotta al fine di evidenziare la compatibilità ambientale e paesaggistica degli interventi da realizzare e l'efficacia dal punto di vista tecnico. Il caso di studio costituisce uno spunto per proporre interventi possibili basati sulla vegetazione e non ha la finalità di fornire una valutazione delle condizioni di sicurezza dei versanti. L'obiettivo è quello di mostrare gli aspetti di sostenibilità ambientale di tali realizzazioni, dopo aver mostrato l'efficacia tecnica in quanto descritto al Paragrafo precedente (Paragrafo 3).

Figura 11. a) Carta dei fenomeni franosi e b) localizzazione dei dissesti verificatesi sui versanti del centro storico di Deruta.



a)



b)

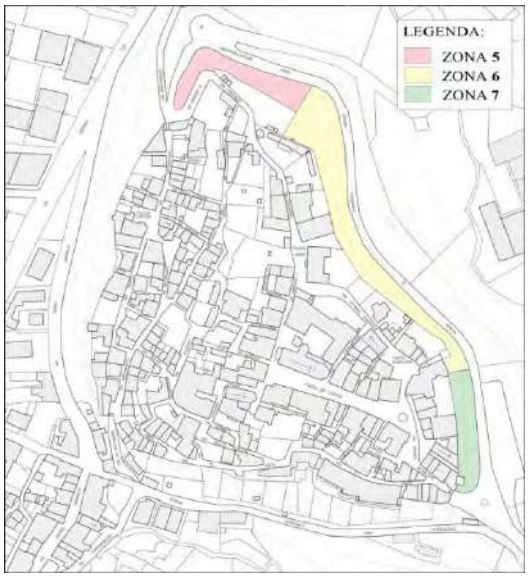
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'osservazione diretta e le analisi delle foto aeree hanno permesso di accertare la presenza di fenomeni di instabilità superficiale che interessano la coltre d'alterazione superficiale dei terreni fluvio-lacustri ed in parte le scarpate morfologiche localizzate ai margini esterni del centro storico di Deruta, dove si rinvengono fenomeni di crollo e/o scivolamento (Figura 11a). In corrispondenza dei versanti esposti a Sud-Ovest e a Nord-Ovest del centro storico di Deruta si sono verificati negli anni differenti dissesti, spesso innescati da una scarsa e/o cattiva regimentazione delle acque superficiali, dalle scadenti caratteristiche geomeccaniche dei terreni affioranti a seguito dei fenomeni d'alterazione e dalla morfologia del sito, caratterizzata da ripide scarpate (Figura 11b). Oltre a quanto analizzato in precedenza, si riscontrano molteplici criticità sui versanti posti a sud-ovest e nord-est del centro storico di Deruta.

Nel presente lavoro si avanzano differenti proposte di intervento, paesaggisticamente non invasive, di consolidamento dei versanti mediante interventi di Ingegneria Naturalistica. In particolar modo, sono oggetto di analisi i versanti collocati nella parte Nord-Est della città. I versanti d'interesse fanno parte del rilievo collinare su cui sorge la città di Deruta, nella parte Nord-Est rispetto al centro storico della città. Gli interventi ipotizzati si caratterizzano come interventi di messa in sicurezza di parte del territorio urbano interessato da movimenti di instabilità geomorfologica. Essi non interferiscono con altre componenti ambientali e sono finalizzati alla conservazione del suolo, alla regimazione delle acque superficiali, all'incremento di sicurezza per la salute pubblica e in particolar modo, le opere previste sono state selezionate anche in virtù della conservazione dello stato dei luoghi.

L'area in esame è stata suddivisa in tre zone, rispettivamente zona 5, zona 6 e zona 7 (Figura 12), per ciascuna delle quali è stato elaborato un intervento di consolidamento del versante mediante interventi paesaggisticamente non invasivi. Per motivi di spazio, in questa memoria saranno descritti solo gli interventi previsti nelle prime due zone.

Figura 12. Inquadramento dei versanti oggetto di studio a nord-est del centro storico di Deruta.



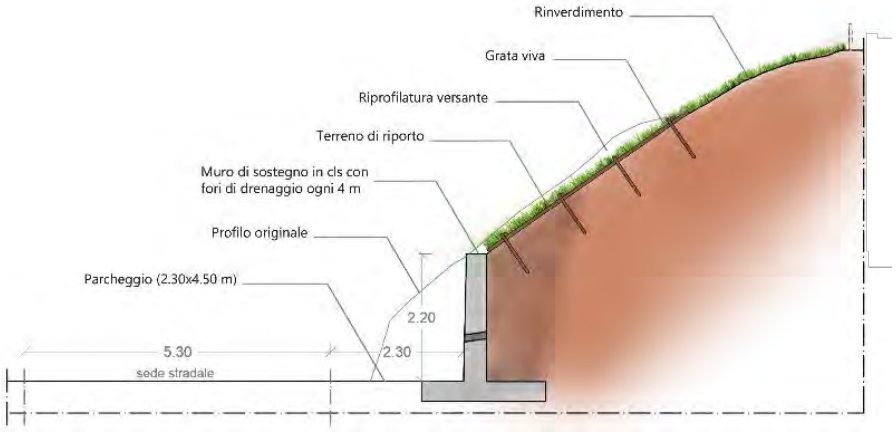
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4.1 Ipotesi di intervento in zona 5

Dall'osservazione in sito e dall'analisi dello stato attuale del versante situato all'intersezione tra via Urbano IV e la Circonvallazione Nord, sono stati riscontrati fenomeni di frana e di erosione superficiale in corrispondenza del piede del pendio adiacente alla strada e la presenza di condizioni che non permettono al terreno di assumere la sua naturale pendenza d'equilibrio.

Si è ipotizzato dunque un intervento di consolidamento mediante la realizzazione di un muro di sostegno, realizzato in calcestruzzo, del tipo a sbalzo e rivestito in pietra faccia a vista per rendere più armoniosa la struttura con l'ambiente circostante (Figura 13). In aggiunta, è stata prevista l'esecuzione di un intervento di riprofilatura della parte alta della scarpata, finalizzato ad incrementare la stabilità attraverso una ridistribuzione delle masse lungo il pendio.

Figura 13. Sezione tipo dell'intervento previsto in zona 5.



Per garantire la stabilizzazione della parte superiore del versante è stata prevista la realizzazione di una grata viva, ottenuta disponendo tronchi orizzontali e verticali in maniera perpendicolare tra loro: si tratta di un sostegno reticolare con capacità di contenimento di materiale vegetativo e di riporto, da addossare a pareti instabili così da limitare i processi erosivi e la possibilità che si verifichino frane. In Figura 14 si riporta il foto-inserimento dell'intervento ipotizzato lungo il versante esaminato.

Figure 14. Stato di fatto del versante e foto-inserimento dell'intervento ipotizzato nella zona 5.



a) b)

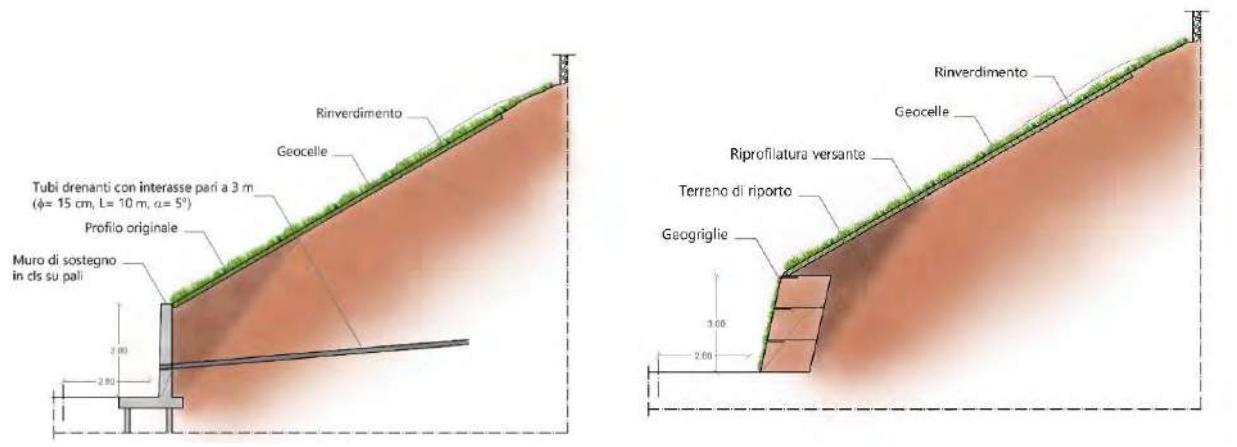
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tali tecniche possono definirsi a basso impatto ambientale, basandosi essenzialmente sulle caratteristiche biotecniche di alcune specie vegetali, sintetizzabili principalmente nella capacità di sviluppo di un considerevole apparato radicale e nell'elevata capacità di propagazione vegetativa.

4.2 Ipotesi di intervento in zona 6

Dall'osservazione in sito e dall'analisi dello stato attuale del versante situato a Nord-Est della cinta muraria del centro storico di Deruta, a ridosso della Circonvallazione Nord, sono state riscontrate delle criticità a causa dell'elevata pendenza del versante. In particolare, si presentano condizioni che non permettono al terreno di assumere la sua naturale pendenza d'equilibrio, riscontrabile anche dall'inclinazione degli alberi che risultano essere tutti inclinati verso valle. Per questo motivo si ritiene necessario un intervento di consolidamento mediante la realizzazione di un muro di sostegno che permetta di contenere i movimenti dell'intero versante. Vengono proposte due ipotesi progettuali: la prima ipotesi progettuale (Ipotesi 1) prevede la realizzazione di un muro tradizionale in c.a. della tipologia con sezione "ad L", fondato su una doppia fila di pali, e rivestito in pietra faccia a vista per rendere più armoniosa la struttura con l'ambiente circostante. È stato previsto un intervento di riprofilatura, a monte della struttura di sostegno, per poter ridistribuire le masse lungo il pendio e formare un profilo con pendenza il più possibile uniforme. Infine, per garantire la protezione della scarpata, l'ipotesi progettuale ha previsto l'installazione di geo-celle, riempite con terriccio vegetale per creare un'azione di confinamento del terreno impedendo lo scivolamento dello stesso verso valle e bloccando i meccanismi di formazione dell'erosione.

Figura 15. Sezione tipo dell'intervento secondo a) l'ipotesi Ipotesi 1 e b) l'ipotesi 2 previsto nella zona 6.



a) b)

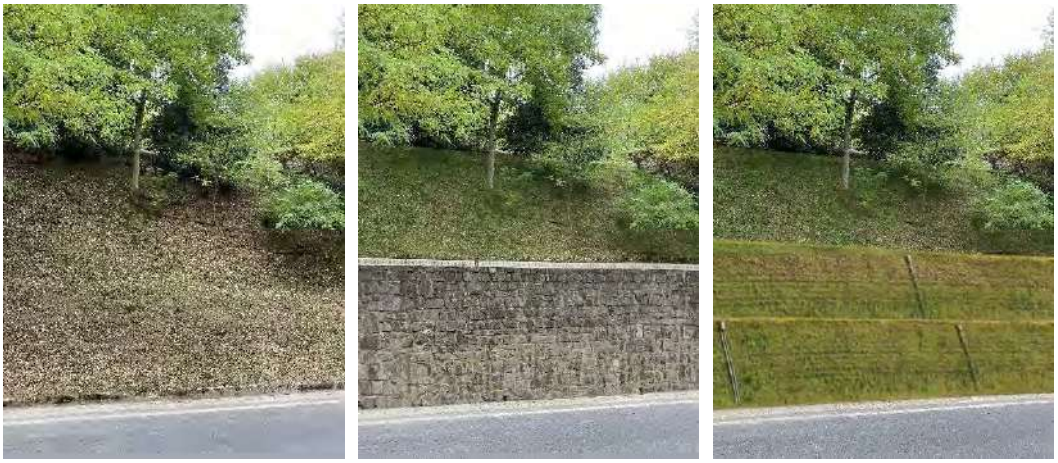
L'ipotesi progettuale alternativa (Ipotesi 2) prevede l'installazione di geo-griglie orizzontali di rinforzo al piede del pendio al fine di realizzare una struttura in terra rinforzata con facciata rinverdita e minor impatto ambientale rispetto al caso precedentemente descritto: sono stati previsti 3 moduli fino al raggiungimento di un'altezza fuori terra della struttura pari a 3 m. Anche in questo caso è

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

necessaria la riprofilatura del versante e la messa in opera di geo-celle nella parte superiore del versante (Figura 15b).

In Figura 16 si riporta il foto-inserimento delle due ipotesi alternative di intervento lungo il versante esaminato e si evidenzia come l'intervento di Ingegneria Naturalistica porti ad un risultato paesaggisticamente più sostenibile e simile alla situazione reale.

Figura 16. a) Stato di fatto del versante e foto-inserimento dell'ipotesi progettuale b) 1 e c) 2 lungo la zona 6.



a) b) c)

5. Conclusioni

L'Ingegneria Naturalistica si identifica come lo strumento attraverso il quale è possibile unire la necessità, e talvolta l'urgenza, di intervenire a livello ingegneristico sul territorio e la sensibilità naturalistico-paesaggistica, di tutela e valorizzazione dello stesso.

Le analisi svolte nell'ambito di questo lavoro hanno avuto lo scopo di valutare il contributo fornito dalla vegetazione sulla stabilità dei pendii. Queste, eseguite tramite il software di calcolo agli elementi finiti PLAXIS 2D, hanno consentito la determinazione del coefficiente di sicurezza, confrontando il caso di pendii naturali privi di vegetazione e pendii vegetati, valutando l'efficacia tecnica degli interventi studiati. Le variabili che sono state prese in considerazione nelle analisi di stabilità parametriche sono: diverse inclinazioni del pendio, diverse caratteristiche meccaniche del terreno, assenza e presenza di vegetazione, e diverse profondità dell'apparato radicale. Tutte le analisi eseguite assumono la presenza di linea piezometrica coincidente con il piano campagna, condizione più gravosa possibile come conseguenza di eventi intensi di pioggia.

A seguito delle analisi condotte per tutti i modelli, relativi a ciascun gruppo di analisi, è stato possibile osservare che il contributo fornito dalla coesione aggiuntiva dovuta all'apparato radicale della vegetazione determina in ogni caso una maggiore stabilità del pendio rispetto alla sua condizione naturale senza vegetazione, indipendentemente da quale effetto stabilizzante si valuti (*H*, *M*, o *HM*), con maggior incidenza nei terreni a grana grossa rispetto a quelli a grana fine. Risulta inoltre evidente che la maggior inclinazione del pendio limita il contributo stabilizzante che un apparato radicale è in

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

grado di produrre: questo, infatti, influisce sul comportamento meccanico ed idraulico del pendio anche nel periodo che impiega per svilupparsi completamente ed il suo approfondimento contribuisce alla sua maggiore condizione di stabilità.

Una parte del lavoro ha riguardato infine l'analisi del caso di studio della città di Deruta, ipotizzando l'applicazione di alcuni interventi di Ingegneria Naturalistica per la mitigazione di fenomeni franosi e di erosione superficiale che interessano i versanti del centro storico. Sono state proposte delle soluzioni progettuali che prevedono la realizzazione di opere di basso impatto ambientale, strutturalmente efficienti, di costo contenuto e rispettose delle tematiche ambientali e paesaggistiche: le tecniche adottate permetterebbero di coniugare la compatibilità ambientale e paesaggistica degli interventi di Ingegneria Naturalistica e l'efficacia dal punto di vista tecnico.

Bibliografia

1. I. ISPRA. Il consumo di suolo. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Available online: https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/ilconsumo-di-suolo (2020).
2. Di Pietro, L. Soluzioni a basso impatto ambientale per la mitigazione dei rischi naturali lungo la ex ferrovia Spoleto-Norcia. Master's Thesis, Università degli Studi di Perugia, Corso di Laurea in Ingegneria Edile-Architettura, 2019.
3. Menegazzi, G. Attività di formazione relativa alle opere di Ingegneria Naturalistica nel Parco nazionale del Vesuvio. In *Atti del Convegno «Il recupero ambientale con le tecniche di Ingegneria Naturalistica»*, Pomigliano D'Arco, Italia 2000.
4. Schiechtl, H.M. *Sicherungsarbeiten im Landshaftsbau*; Callwey: Munich, Germany, 1973.
5. Cornelini, P.; Sauli, G. *Manuale di indirizzo delle scelte progettuali per interventi di ingegneria naturalistica*; Ist. Poligrafico dello stato: Roma, Italia, 2005.
6. Wei, W; Switala, B.M.; Acharya, M.S.; Tamagnini R.; Auer, M.; Graf, F.; te Kamp, L.; Xiang, W. Effect of vegetation on stability of soil slopes: numerical aspect. *In Recent Advances in Modeling Landslides and Debris Flows*; Wu, W. Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2015; pp. 163–177.
7. Stokes, A.; Atger, C.; Bengough, A.; Fourcaud, T.; Sidle, R. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and* Soil **2009**, 324(1), 1–30
8. Tsukamoto, Y.; Kusakabe, O. Vegetation influences on debris slide occurrences on steep slopes in Japan. In *Symposium on Effects of Forest Land Use on Erosion and Slope Stability*; Loughlin, C.L., A.J. Pearce (Eds.); HI University of Hawaii, E-W Center, Environmental and Policy Institute: Honolulu, USA, 1984, pp. 63–72.
9. Wu, T. Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design. *Canadian Geotechnical Journal* **2013**, 50(3) pp. 259–274.
10. Brenner, R. A hydrological model study of a forested and cutover slope. *Hydrological Sciences* **1973**.
11. Wu, T. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Geotechnical Engineering Report* 5, Ohio State University, Department of Civil Engineering, 1976.
12. Waldron, L. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Society of America Journal **1977**, 41, pp. 843–849.
13. Wu, T.; McKinnel, W.; Swanston D. Strenght of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. *Canadian Geotechnical Journal* **1979**, 114, pp. 19–33.
14. Pollen, N.; Simon, A. Estimating mechanical effect of riparian vegetation of streambank stability using a fiber bundle model. *Water Resources Research* **2005**, 41.
15. Pollen, N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strenght and moisture. *Catena* **2007**, 69(3), pp. 197–205.
16. Schwarz, M.; Giadrossich, F.; Cohen, D. Modeling root reinforcement using a root-failure weibull survival function. *Hydrology and Earth System Science* **2013**, 17(11), pp. 4367–4377.
17. Bourrier, F.; Kneib, F.; Chareyre, B.; Fourcaud T. Discrete modeling of granular soils reinforcement by plant roots. *Ecological Engineering* **2013**, 61, pp. 646–657.
18. Giasi, C.I. L'influenza della vegetazione sulla stabilità dei pendii. *Geologica Romana* **1994**, 30, pp. 145–150.
19. Gardner, W.R. Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Science* **1960**, 89(2), pp. 228–232
20. Feddes, R. A., Kowalik, P. J., and Zaradny, H. Simulation of field water use and crop yields. *Simulation monographs*, University of Wageningen, Pudoc, 1978.
21. Greenwood, J.R. SLIP4EX - a program for routine slope stability analysis to include the effects of vegetation, reinforcement and hydrological changes. *Geotechnical and Geological Engineering* **2006**, 24, pp. 449–465.
22. Fatahi, B. Modelling of influence of matric suction induced by native vegetation on sub-soil improvement. PhD thesis, University of Wollongong, Australia, 2007.
23. Zhu, H.; Zhang, L. Evaluating suction profile in a vegetated slope considering uncertainty in transpiration. *Computers and Geotechnics* **2015**, 63, pp. 112–120.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

COMUNITÀ RESILIENTI
Progetto di rigenerazione del Villaggio ENI di Borca di Cadore (BI)

Monica Battistoni [1,*], Paolo Belardi [1], Alessandro Melis [2]

[1] University of Perugia, Via Goffredo Duranti 93 (IT)
[2] New York Institute of Technology, 1855 Broadway Street (NY)

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: monica.battistoni@studenti.unipg.it

Abstract: Il contributo affronta il progetto di rigenerazione del Villaggio ENI di Borca di Cadore, un complesso edilizio di grande interesse che nasce come villaggio-vacanze per i dipendenti dell'ENI alle pendici del monte Antelao, nell'ambito di un progetto di utopia sociale di cui è promotore il presidente Enrico Mattei. Il villaggio, concepito nel rispetto del *genius loci*, riscuote grande successo di pubblico e di critica, ma negli anni Novanta cade in disuso e da molti anni versa nell'abbandono e nel degrado. Il progetto, con l'obiettivo di valorizzare un patrimonio paesaggistico e architettonico di grande pregio, ha prefigurato nuovi usi e nuove funzioni alla luce dei recenti studi condotti dal CNR, dai quali emerge come l'ecosistema che insiste sulla parte sommitale delle creste montuose sia capace di captare l'avvento dei cambiamenti climatici nel medio-lungo periodo attraverso modificazioni della flora e della fauna, riconoscendo così alla montagna il ruolo di "sentinella". Da qui le ragioni per cui il progetto prevede la trasformazione del villaggio in un centro di ricerca sulla media e alta montagna e, con esso, l'insediamento di una comunità scientifica capace di valorizzare la componente sociale locale. Il progetto è fondato su strategie di rigenerazione adattiva e di accrescimento sostenibile delle strutture esistenti, sviluppate mediante azioni insolite quali la ridondanza e la sovrapposizione, laddove forme modulari invadono viralmente il tessuto edilizio esistente, applicando sistemi passivi e favorendo interventi di bioarchitettura. Il progetto è fortemente legato all'idea di una sostenibilità veicolata dall'architettura che, coadiuvata dall'utilizzo di soluzioni tecnologiche innovative, sia foriera di un nuovo concetto di tutela dell'ambiente.

Keywords: Villaggio ENI; rigenerazione; cambiamento climatico; resilienza; exaptation; colonia.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Allóra: il progetto di utopia sociale per il Villaggio ENI

L'esperienza del Villaggio ENI di Borca di Cadore si inserisce in un contesto economico in cui cresce il sentimento di emancipazione sociale che coinvolge la classe operaia, favorito da una nascente imprenditoria italiana composta di piccole e medie imprese che, negli anni del boom economico, si impegnano nello sviluppo di nuovi modelli economici che valorizzino il ruolo dell'operaio tanto all'interno della vita lavorativa quanto all'interno della società contemporanea, superando la rigida segmentazione delle classi economiche del passato, e attivando così un processo di slittamento dell'asse della centralità tanto dal punto di vista economico-sociale quanto dal punti di vista territoriale con il conseguente coinvolgimento delle aree periferiche [1]. L'Europa occidentale, infatti, è teatro di un proficuo dialogo tra le parti sociali sui temi del lavoro, che confluisce nella nascita di programmi di welfare aziendale rivolti al miglioramento dei bisogni sociali e delle condizioni della vita quotidiana dei lavoratori. Già all'inizio del Novecento, imprenditori lungimiranti si impegnarono nella costruzione di alloggi a basso costo, nonché nel rafforzamento di servizi collettivi quali scuole, biblioteche, centri ricreativi e per il dopolavoro, potenziando la parallela offerta statale e anticipando, molto spesso, la stessa iniziativa pubblica [2]. In questo contesto, il progetto architettonico si fa portavoce di un rinnovato linguaggio capace di interpretare gli obiettivi sociali e tramutarli in intenti progettuali ponendo l'architetto nel ruolo di interprete di un rinnovamento culturale che, in Italia, dà luogo a esiti del tutto innovativi all'interno del panorama architettonico contemporaneo [3].

In questo scenario, le figure di Enrico Mattei e Adriano Olivetti, fra gli altri, si distinguono per la promozione di una visione imprenditoriale all'avanguardia, capace di coniugare in maniera sinergica la crescita aziendale con la crescita sociale dei propri dipendenti creando terreno fertile per lo sviluppo di nuovi modelli architettonici e urbanistici [4]. L'esperienza condotta dal celebre Adriano Olivetti alla guida dell'azienda italiana omonima, leader nella produzione di macchine da scrivere, trasforma l'attività di famiglia in una fabbrica moderna dove l'attenzione per gli elevati livelli produttivi viene fiancheggiata dalla salvaguardia della dignità del lavoratore, dalla valorizzazione del rapporto con il contesto territoriale e dalla promozione della cultura all'interno della classe operaia superando la dimensione strumentale ed economica del benessere troppo attenta – secondo Olivetti – al profitto [2]. Il profondo interesse che Olivetti nutre per l'arte e il design lo porta a circondarsi di figure di spicco del panorama letterario e architettonico contemporaneo, promuovendo la divulgazione dell'arte contemporanea internazionale e delle tendenze europee della ricostruzione (gli esempi anglosassoni, scandinavi, olandesi) con particolare propensione verso le architetture del Movimento Moderno, il cui apice viene raggiunto con il conferimento del Premio Compasso d'Oro nel 1954 (il primo di una lunga serie) per l'ideazione della macchina da scrivere *Lettera 22* [5]. Nello stesso anno, l'incontro con Carlo Scarpa sancisce un sodalizio culturale e architettonico che culmina nel progetto del negozio Olivetti a Venezia, uno showroom pensato come una finestra sulla fabbrica di Ivrea che si contraddistingue per il gusto spiccatamente contemporaneo e per l'attenzione minuziosa alla componente materica e alla cura del dettaglio. È difficile discernere se il linguaggio architettonico sposi maggiormente la visione *scarpiana* nell'uso contemporaneo dei materiali tradizionali locali e nella complessa disposizione volumetrica degli spazi, o piuttosto la visione *olivettiana* nella valorizzazione della continuità tra esterno e interno e nell'elevazione dell'arte a veicolo della propria cultura aziendale [6].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Allo stesso modo, l'esperienza condotta dalla compagnia petrolifera italiana ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) rappresenta un ulteriore passo in avanti nel campo dello sviluppo delle politiche aziendali per esplicita volontà del presidente Enrico Mattei, fervente sostenitore di un modello di welfare rivolto alla valorizzazione del ruolo dell'operaio in quanto capace di generare un reale vantaggio competitivo per la compagnia [4]. Enrico Mattei fu promotore di una visione utopica e innovatrice sin dagli esordi quando, incaricato di smantellare l'ex compagnia petrolifera italiana Agip (Azienda Generale Italiana Petroli), decide di rifondarla sotto il nome di ENI con l'intento di portare l'Italia all'indipendenza energetica sostenendo lo sviluppo dell'industria mineraria sul territorio nazionale e, al contempo, sfidando il monopolio de "le sette sorelle", le sette compagnie petrolifere più influenti del mondo. Altresì, la sua visione andava ben oltre i principi di una rinnovata cultura energetica e aziendale, ma si prefiggeva di promuovere una nuova sensibilità culturale volta al superamento delle disuguaglianze sociali e della rigida suddivisione di classe. L'ambizioso progetto si concretizza, in primis, nella pianificazione urbana della cittadella ideale di Metanopoli che, come nell'analogo esempio olivettiano di Ivrea, era pensata per ospitare gli spazi lavorativi e residenziali dei lavoratori della compagnia nella frazione di San Donato Milanese. La costruzione ha inizio nel 1952, concretizzando la realizzazione degli spazi aziendali insieme agli spazi residenziali quali le palazzine per l'alloggio di circa 1200 famiglie, la chiesa, gli impianti sportivi, e uno dei primi supermercati. La cittadella è stata progettata nell'intento di offrire ai dipendenti un ambiente di lavoro e di vita confortevole, immerso nel verde e dotato di servizi collettivi come l'asilo, la scuola, il cinema e il centro sportivo [7]. Ancor di più, il progetto per il Villaggio ENI di Corte di Cadore (chiamato "Corte di Cadore" in memoria del luogo dove fu scoperto il primo giacimento di petrolio in provincia di Piacenza) rappresenta il connubio tra l'innovazione sociale promosso da Enrico Mattei e la visionarietà progettuale dell'architetto Edoardo Gellner, suggellato dal sodalizio culturale che elegge, fra gli obiettivi fondativi l'intervento, un modello sociale dove la famiglia riveste il ruolo di nucleo elementare e, di conseguenza, di cellula fondativa dell'intero progetto architettonico [8]. Altresì, l'intento progettuale mira a valorizzare lo spiccato sentimento di uguaglianza sociale promosso dal committente che prefigura un villaggio nel quale gli alloggi familiari vengano assegnati casualmente secondo una turnazione che oltrepassa le gerarchie aziendali. Nondimeno, la spiccata sensibilità ambientale che contraddistingue l'architetto risulta determinante sin dalla scelta del sito, che si volge verso un'area all'epoca brulla e disboscata quale il versante meridionale del monte Antelao promuovendo così una forte opera di riqualificazione e di rimboschimento. Raccogliendo la sfida dell'ambizioso committente, Gellner dà vita a una forma urbana capace di conciliare le esigenze degli abitanti con quelle dell'ambiente naturale, mescolando le tecniche della scuola inglese di *landscape gardening* con le più contemporanee teorie dell'urbanistica organica, attraverso la scomposizione del programma residenziale in unità di quartiere che consentono il rispetto della privacy degli abitanti e la leggibilità dei gruppi di ville nel contesto paesaggistico. La scelta del sito risulta un pretesto per affrontare, con un rinnovato linguaggio architettonico, il complesso rapporto tra architettura e ambiente naturale in un dialogo virtuoso in cui l'architettura è foriera della riqualificazione del paesaggio stesso. Il villaggio, costruito tra la fine degli anni Cinquanta e i primi anni Sessanta del secolo scorso nella frazione di Borca di Cadore (poco distante da Cortina d'Ampezzo), si

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sviluppa su di una superficie di oltre 10 ettari e si compone 270 ville (per ospitare le famiglie), la struttura alberghiera Boite (per la residenza dei nuclei familiari composti da una o due persone) e la struttura alberghiera Corte (per il personale del villaggio), la colonia (per la residenza dei bambini dai 6 ai 12 anni), il campeggio con tende fisse (per la residenza dei bambini dai 13 ai 18 anni) e, infine, la chiesa di Nostra Signora del Cadore (Figura 1). Non a caso, nella fucina dell'ambizioso progetto-cantiere, viene coinvolto anche il maestro Carlo Scarpa che si occupa del progetto della chiesa quale culmine di un complesso architettonico spiccatamente moderno capace di evocare soltanto formalmente l'architettura montana e trasformare il cantiere in un vero e proprio laboratorio tecnologico e innovativo [9]. La prematura scomparsa di Enrico Mattei nel 1962 determina una forte battuta d'arresto del visionario progetto che risulterà completato solo parzialmente rispetto al progetto iniziale. La compagnia, infatti, sin da subito dimostra scarso interesse rispetto ai valori e ai principi che avevano mosso Mattei nell'ideazione di tale visione utopica e, nonostante l'importanza e l'entità delle strutture realizzate, queste restarono attive soltanto per trent'anni dall'inaugurazione avvenuta nel 1963. Il destino di questo imponente complesso edilizio passò in mano al gruppo Minoter, che acquistò la proprietà nel 2000, procedendo alla privatizzazione della maggior parte degli spazi. Oggi, infatti, le ville risultano tutte di proprietà privata, così come l'Hotel Corte, sede di un omonimo resort a quattro stelle [10]. Rimangono luogo dell'abbandono lo spazio della Colonia e del Campeggio, il cui destino risulta incerto se non pianificato a partire da una visione programmatica condivisa con partner locali, ma che vivono ancora oggi grazie al presidio rappresentato dall'associazione Dolomiti Contemporanee che dal 2011 ha avviato un'intensa attività di valorizzazione attraverso progetti di carattere culturale e sociale che riportano la comunità entro questi luoghi.

Figura 1. Le strutture del Villaggio ENI di Borca di Cadore



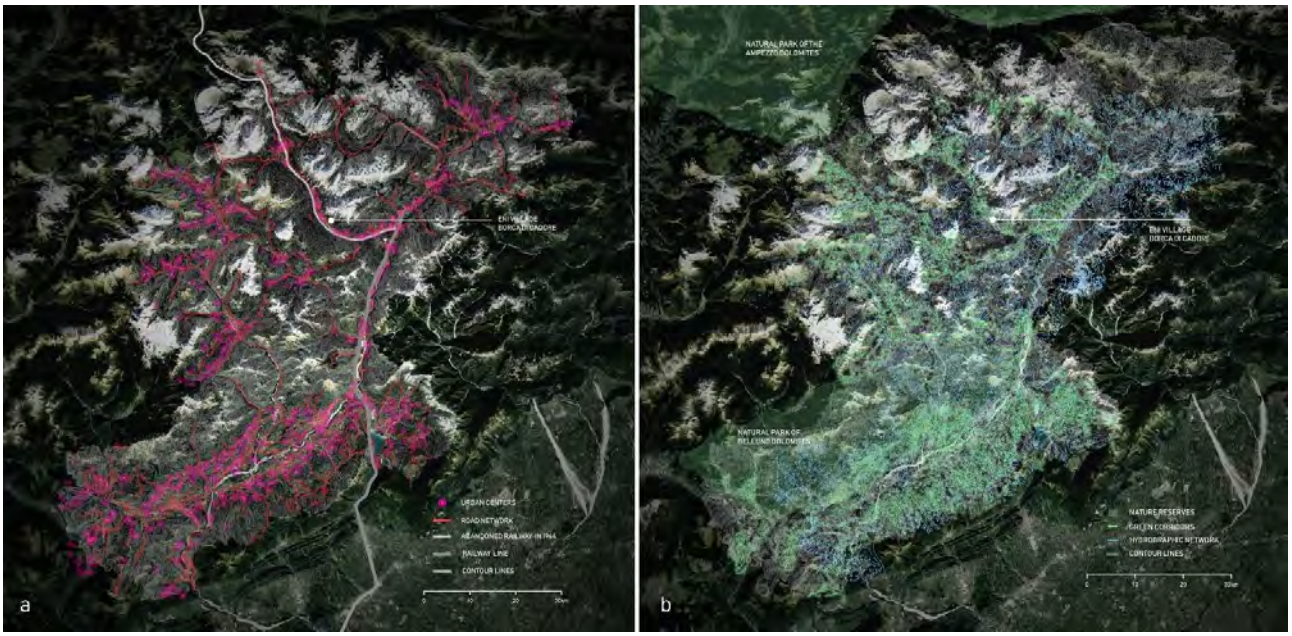
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Il progetto di rigenerazione: da villaggio-vacanze a centro di ricerca

2.1. Presupposti progettuali

Lo scenario che oggi permette di ripensare alla rigenerazione del Villaggio ENI di Borca di Cadore[1], con particolare riferimento agli spazi abbandonati della colonia montana, si origina dalle esperienze già avviate nell'ambito dell'attività di valorizzazione e riattivazione condotta da Dolomiti Contemporanee, coglie l'opportunità della candidatura di Milano-Cortina a sede ospitante i Giochi Olimpici 2026 per mettere in campo strategie progettuali alla scala urbana rivolte a favorire la crescita del territorio dolomitico e, altresì, trova terreno fertile nelle tematiche – più che mai attuali – affrontate dal Padiglione Italia alla 17. Mostra Internazionale di Architettura di Venezia dal titolo *Comunità Resilienti*, proponendo una riflessione sulle questioni urgenti con le quali l'architettura deve interfacciarsi nel contesto italiano e suggerendo prospettive future per ridefinire il ruolo strategico e multidisciplinare dell'architettura nel contesto dei processi di rigenerazione della città [11]. La straordinaria valenza di carattere culturale, sociale e ambientale che il villaggio incarna, permette di tornare a parlare del grande spazio della colonia, che si estende su una superficie di tre ettari, ed è composto di diciassette padiglioni collegati da un sistema di rampe coperte che assecondano la morfologia del terreno e agevolavano lo spostamento dei bambini, marcate da colorazioni vivaci e contrappuntare dalla presenza di aperture quadrate di dimensioni varie che creano scenografici effetti di luce e ombra. All'esterno, di fronte al padiglione centrale contrassegnato dall'iconico tetto a capanna che richiama l'architettura della chiesa, la grande piazza delle Adunate pensata per il raduno degli ospiti della colonia. I materiali e i sistemi costruttivi messi in opera richiamano le cromie e le tecniche del mondo alpino molto care all'architetto ed evidenziano come l'attenzione progettuale sia stata rivolta, tanto nella colonia quanto nell'intero villaggio, al coordinamento di un progetto "dal cucchiaio alla città" che interessa tanto il disegno degli spazi urbani quanto il disegno dei complementi di arredo [12].

Figura 2. Analisi del sistema insediativo (a) e del sistema ambientale (b)

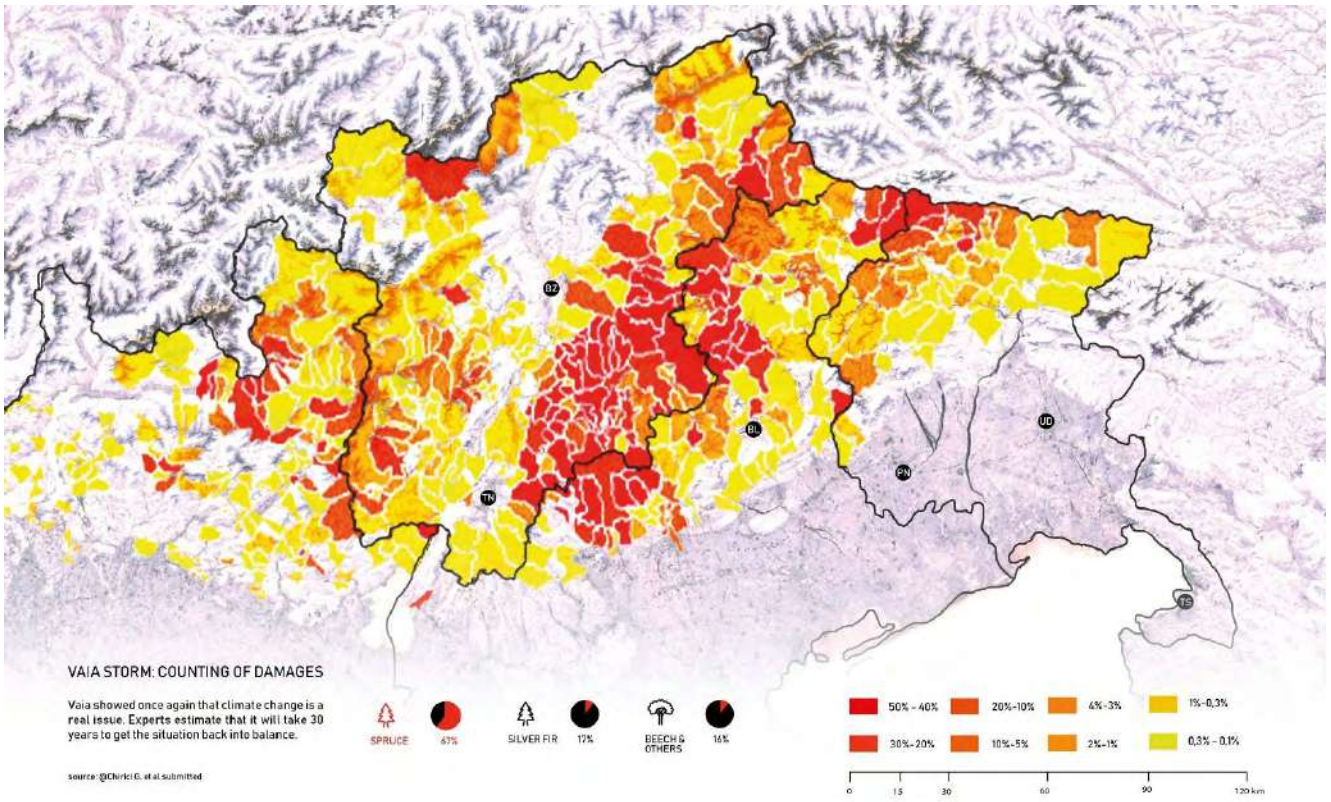


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

A questo punto dell'attività progettuale, si è reso necessario l'indagine analitica rivolta allo studio e alla ricerca dei presupposti progettuali da ricercarsi necessariamente all'interno del contesto territoriale in cui si inserisce l'area di intervento, valorizzando gli enzimi di un patrimonio culturale e socioeconomico identitario e sedimentato a tal punto da rendersi promotore di uno sviluppo endogeno. A tal fine, l'analisi del sistema insediativo e del sistema ambientale che caratterizza la valle cadorina ha restituito l'immagine di un patrimonio paesaggistico di grande valore tanto da legittimare il prestigioso riconoscimento ricevuto dall'Unesco nel 2009; non a caso, l'approfondimento della componente vegetativa e forestale rendono evidente la ricca biodiversità che contrappunta l'ecosistema dolomitico. In particolare, l'analisi del sistema insediativo mette in luce il vincolo rappresentato dalla morfologia del terreno che si caratterizza per l'alternanza di creste montuose molto ripide contrapposte a valli molto strette entro le quali si affollano le strutture urbane principali (l'edificato e le reti infrastrutturali) che quindi risultano strette entro barriere naturali determinanti per lo sviluppo territoriale (Figura 2a). D'altro canto, però, l'analisi del sistema ambientale evidenzia una fitta rete idrografica che discende dalle creste e si riversa sulle anguste valli contribuendo alla rigogliosità delle vaste distese forestali che costituiscono il sistema di corridoi ecologici nei quali prolifica la biodiversità floristica e faunistica (Figura 2b). Infatti, dall'analisi della componente vegetativa emerge la prevalente presenza di boschi di conifere (in particolare l'abete rosso, l'abete bianco, il pino silvestre e il larice) che sono distribuiti nelle medie altitudini e rappresentano un patrimonio forestale alloctono impiantato nel contesto dolomitico dopo la Seconda guerra mondiale per ripopolare le perdite arboree e promuovere la produzione del legname. Oggi le Dolomiti orientali godono di una riserva forestale ampia e variegata, classificabile in sottocategorie che restituiscono la capacità della vegetazione di attivare processi favorevoli di accrescimento grazie alla contaminazione con la componente vegetale autoctona [13]. Da qui emergono i presupposti per lo studio e la salvaguardia di tale patrimonio ambientale, considerato tra i paesaggi montani più affascinanti del mondo, al fine di attuare un presidio in loco capace di valorizzazione il ruolo di "sentinella" svolto dalle montagne nel captare, per la loro posizione sommitale, l'avvento di cambiamenti climatici che si manifestano attraverso modificazioni della flora e della fauna. Infatti, studi condotti dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) nell'arco alpino hanno dimostrato come le Dolomiti abbiano subìto, negli ultimi 40-50 anni, un innalzamento delle temperature pari a circa 2 gradi producendo effetti riconducibili alle più recenti alterazioni degli ecosistemi montani [14]. In particolare, il considerevole ritiro di molti ghiacciai quali il Cristallino proprio sul monte Antelao ha prodotto un aumento della portata dei bacini idrografici esistenti che, nel breve termine, ha determinato un conseguente aumento dei rischi idrogeologici e delle alterazioni di carattere chimico. Di conseguenza, la maggiore quantità di vapore acqueo in circolo nell'ambiente ha prodotto l'incremento delle precipitazioni così da alimentare lo sviluppo estensivo della vegetazione locale che ha conquistato porzioni sempre maggiori delle creste montuose (prima destinate ai ghiacciai permanenti) inducendo la flora e la fauna ad adattarsi al cambiamento [15]. Questi eventi dipingono le fasi di un processo circolare che si autoalimenta attraverso fenomeni causa-effetto che stimolano il frequente verificarsi di eventi atmosferici calamitosi come la tempesta Vaia, quando nell'ottobre del 2018 un vento che ha raggiunto i 200 km/h ha abbattuto decine di migliaia di ettari di boschi di conifere proprio nelle Alpi Orientali (Figura 3).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

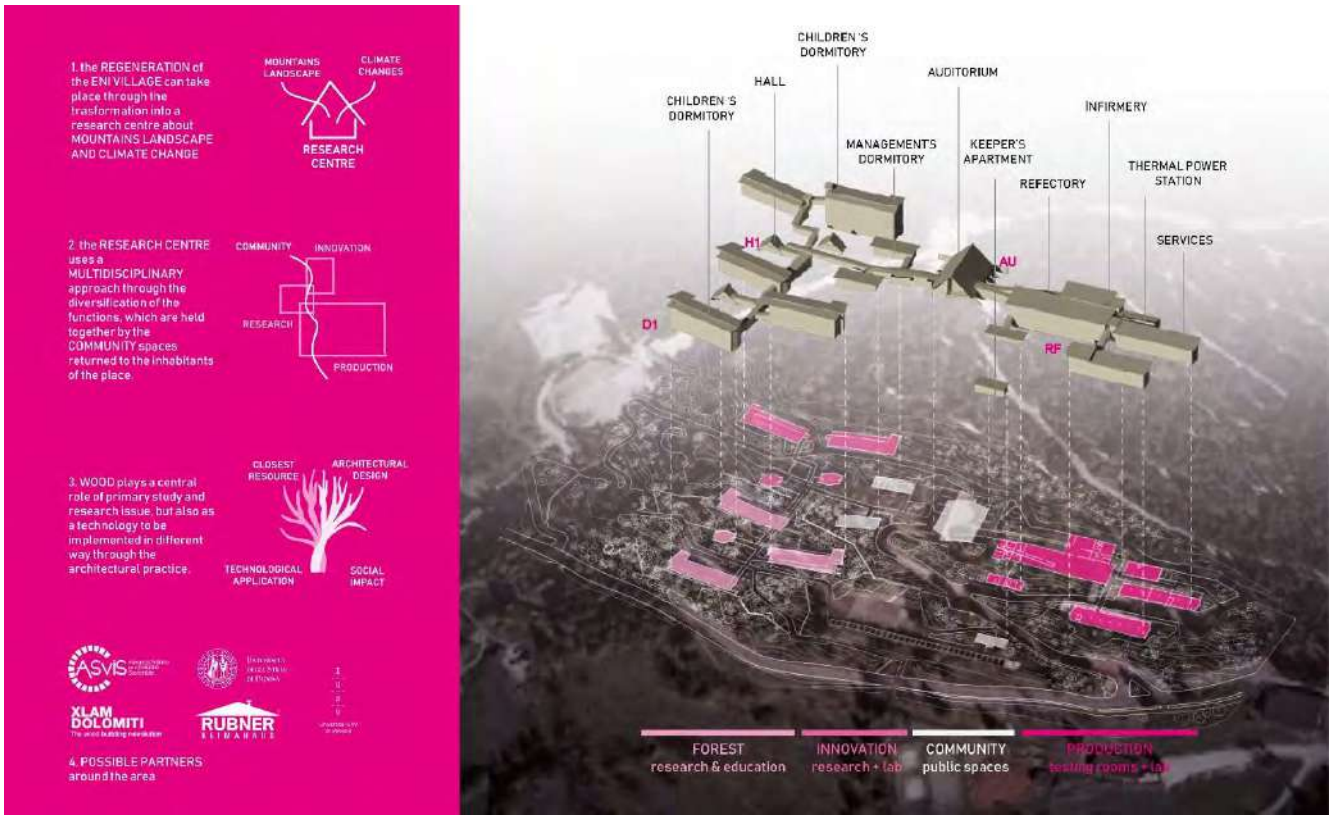
Figura 3. Visualizzazione diagrammatica delle perdite della tempesta Vaia



In questo contesto ambientale di spiccato valore socioculturale ed economico per la comunità locale, l'attività di analisi ha orientato il progetto verso la proposta di riqualificazione della colonia promossa dall'insediamento di un centro di ricerca sulla media e alta montagna, che si concentri sullo studio dei cambiamenti climatici di cui è teatro il paesaggio montano, mantenendo un presidio diretto sul territorio. Attraverso un approccio multidisciplinare, le nuove destinazioni d'uso hanno abbracciato il criterio della diversificazione delle funzioni, includendo i campi della ricerca in ambito forestale, dell'attività produttiva legata alla lavorazione del legname in chiave sostenibile e dell'innovazione condotta attraverso processi e tecnologie capaci di valorizzazione processi di economia circolare, per altro, in un contesto limitrofo già particolarmente sensibile alle seguenti tematiche [16] (Figura 4). Infatti, la valle cadorina concentra molteplici realtà che vanno dall'associazionismo alle attività produttive, dalle università dei centri limitrofi agli enti di ricerca estremamente sensibili ai temi della salvaguardia della risorsa forestale e dello sviluppo della filiera corta promuovendo lavorazioni a basso impatto ambientale. La relazione che la proposta progettuale si auspica di alimentare con il contesto locale è tesa all'arricchimento in termini economici e socioculturali del territorio dolomitico eleggendo il progetto non soltanto a strumento capace di rigenerare il patrimonio architettonico sopito ma, soprattutto, di favorire l'insediamento nel villaggio di una nuova comunità scientifica legata al centro di ricerca che diventi catalizzatore di interessi e risorse condivisi con il territorio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 4. Concept



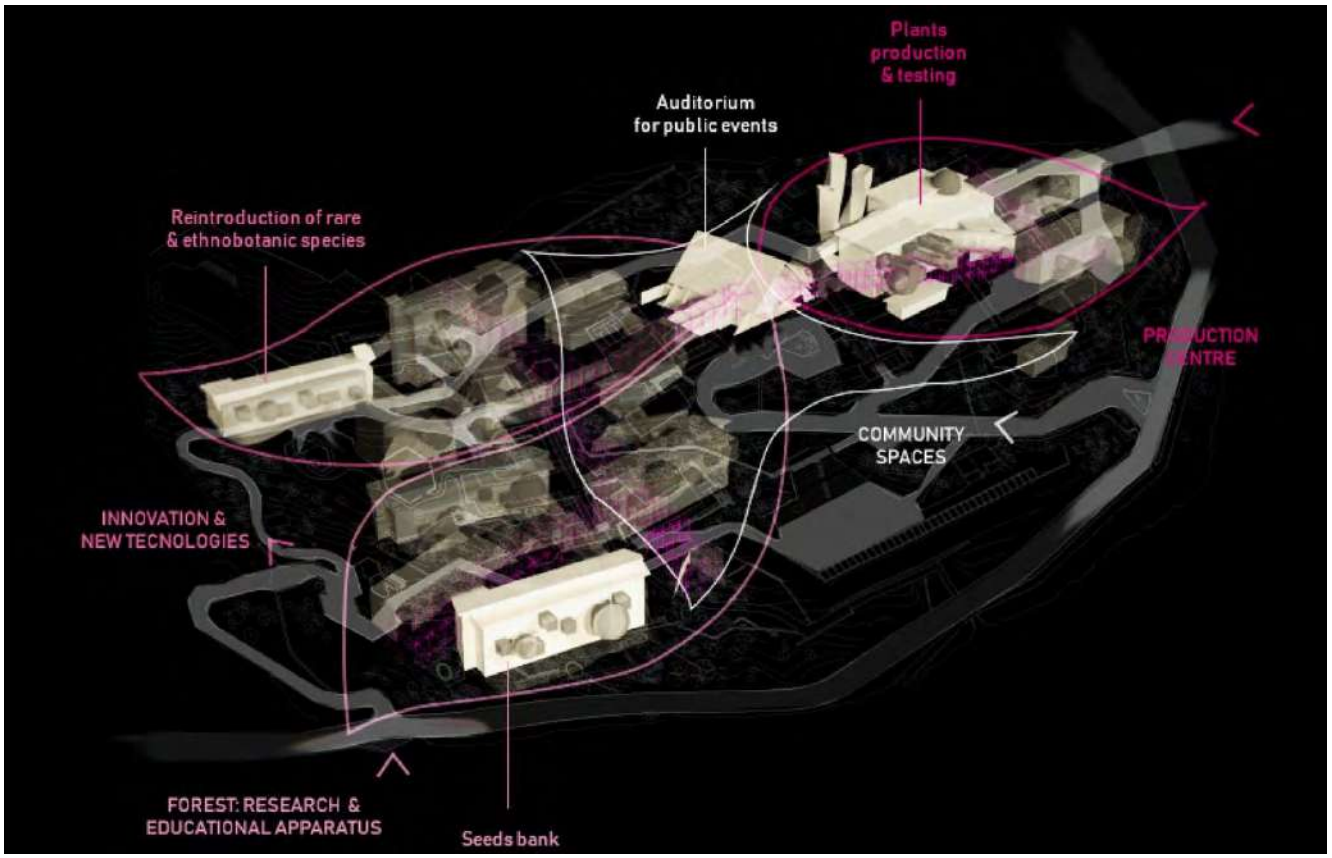
2.2. Metodologia progettuale

Il progetto si fonda sui principi dell'*exaptation*, un concetto derivante dalla biologia evolutiva secondo il quale caratteristiche fenotipiche e forme naturali risultano "atte" (e non adatte) a svolgere una funzione differente rispetto a quella per la quale sono state pensate proprio in virtù della loro forma [17], arricchendo la teoria dell'adattamento darwiniano con quella dell'*attamento* quale capacità di modificazione derivante da caratteristiche intrinseche all'elemento anziché frutto di trasformazioni indotte da agenti esterni. In tal senso, applicare una metodologia progettuale fondata sui principi dell'*exaptation* architettonica significa, in primo luogo, effettuare un'attenta lettura delle forme e degli spazi esistenti rivolta alla comprensione delle opportunità che il complesso edilizio è capace di fornire alla luce della nuova destinazione d'uso offerta dal centro di ricerca [18]. Il nuovo sistema architettonico introduce le azioni compositive dell'addizione e dell'intersezione, realizzando estrusioni dei volumi esistenti nell'obiettivo di creare *buffer zone*s capaci di reinterpretare il concetto di limite tra spazio interno e spazio esterno attraverso un sistema plug-in che diventa altresì elemento-cerniera tra l'esistente e il nuovo. Le estrusioni si inseriscono all'interno di un'infrastruttura che funge da maglia strutturale e, assecondando la morfologia del luogo, traguarda il nuovo sistema di edifici permettendo l'attecchimento di forme insolite che amplificano le opportunità di sviluppo e contaminazione del villaggio. Strategie fondate sui principi della rigenerazione adattiva e dell'accrescimento sostenibile

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

delle strutture esistenti, mediante azioni insolite quali la ridondanza e la sovrapposizione, stimolano l'invasione virale del tessuto edilizio facendo uso di sistemi passivi e di interventi di bioarchitettura.
La metodologia progettuale mira a veicolare l'immagine di un villaggio ricco di interconnessioni e interrelazioni alla scala architettonica, ambientale e sociale che favoriscono l'inserimento di una nuova comunità scientifica legata al centro di ricerca, in grado di attivare processi di valorizzazione del patrimonio culturale ed economico locale [19]. Per quanto concerne la distribuzione delle funzioni all'interno degli spazi rigenerati, si fa riferimento al caso esemplificativo di SCION, centro di ricerca neozelandese specializzato nella ricerca scientifica e nello sviluppo tecnologico nel settore forestale, con particolare interesse per la produzione del legno e dei sottoprodotti derivanti dalla sua lavorazione. Il progetto prevede, perciò, la distribuzione delle funzioni all'interno degli spazi della colonia secondo le tre sezioni sopracitate: nel primo settore dedicato alla ricerca forestale si sviluppano attività di mappatura genetica e conservazione dei semi, nel secondo settore destinato alla produzione si promuove lo sviluppo tecnologico della lavorazione del legno migliorandone la resistenza all'acqua e al fuoco, nonché favorendo lo sviluppo di biomateriali da esso derivanti, nel terzo settore dedicato all'innovazione si sviluppano tecnologie di supporto al sistema di monitoraggio e salvaguardia della risorsa forestale (Figura 5). Gli spazi dedicati alla comunità locale si diffondono viralmente all'interno del centro di ricerca, recuperano dei piccoli padiglioni contrassegnati dall'iconico tetto a capanna che fanno capo al padiglione centrale, contribuiscono ad amplificare l'attività di valorizzazione della componente sociale locale.

Figura 5. Masterplan dell'area di progetto



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Nello specifico, l'attività progettuale si è occupata dell'approfondimento di tre edifici-tipo che esemplifichino, per ogni tipologia analizzata, l'intervento architettonico preposto alla rigenerazione dello spazio alla luce della nuova destinazione d'uso. Perciò, negli edifici adibiti a dormitori si è immaginato l'inserimento di superfetazioni leggere che invadono il sistema strutturale della facciata esistente e che favoriscono l'inserimento di microecosistemi nei quali impiantare le specie rare selezionate dall'attività di ricerca. L'edificio-tipo progettato ricoprirà, perciò, il ruolo di "banca del seme", ovvero un luogo preposto alla conservazione delle specie antiche conservate nell'Orto botanico dell'Università di Padova, con il quale si auspica di attivare una proficua collaborazione (Figura 6b). La controfacciata funge da occasione per l'inserimento del sistema architettonico fatto di forme sferiche in grado di relazionarsi con la complessità spaziale che contraddistingue della preesistenza. Allo stesso modo, lo spazio dell'ex refettorio ospita, all'interno della maglia strutturale libera da partizioni interne, serre dedicate alla coltivazione controllata di specie arbustive ed erbacee nelle prime fasi della crescita, prima del loro reimpianto nel contesto locale, che vengono monitorate da strutture innovative atte a riprodurre il microclima ideale per il loro sviluppo (Figura 6a). Altresì, il padiglione centrale torna a svolgere la funzione di catalizzatore sociale, capace di ospitare attività capaci di coinvolgere la comunità locale favorendo il suo avvicinamento verso le attività del centro di ricerca con l'obiettivo di condividere un percorso di crescita capace di rigenerare tanto il villaggio quanto di arricchire il consistente patrimonio culturale e ambientale che contraddistingue il territorio della valle cadorina (Figura 6c).

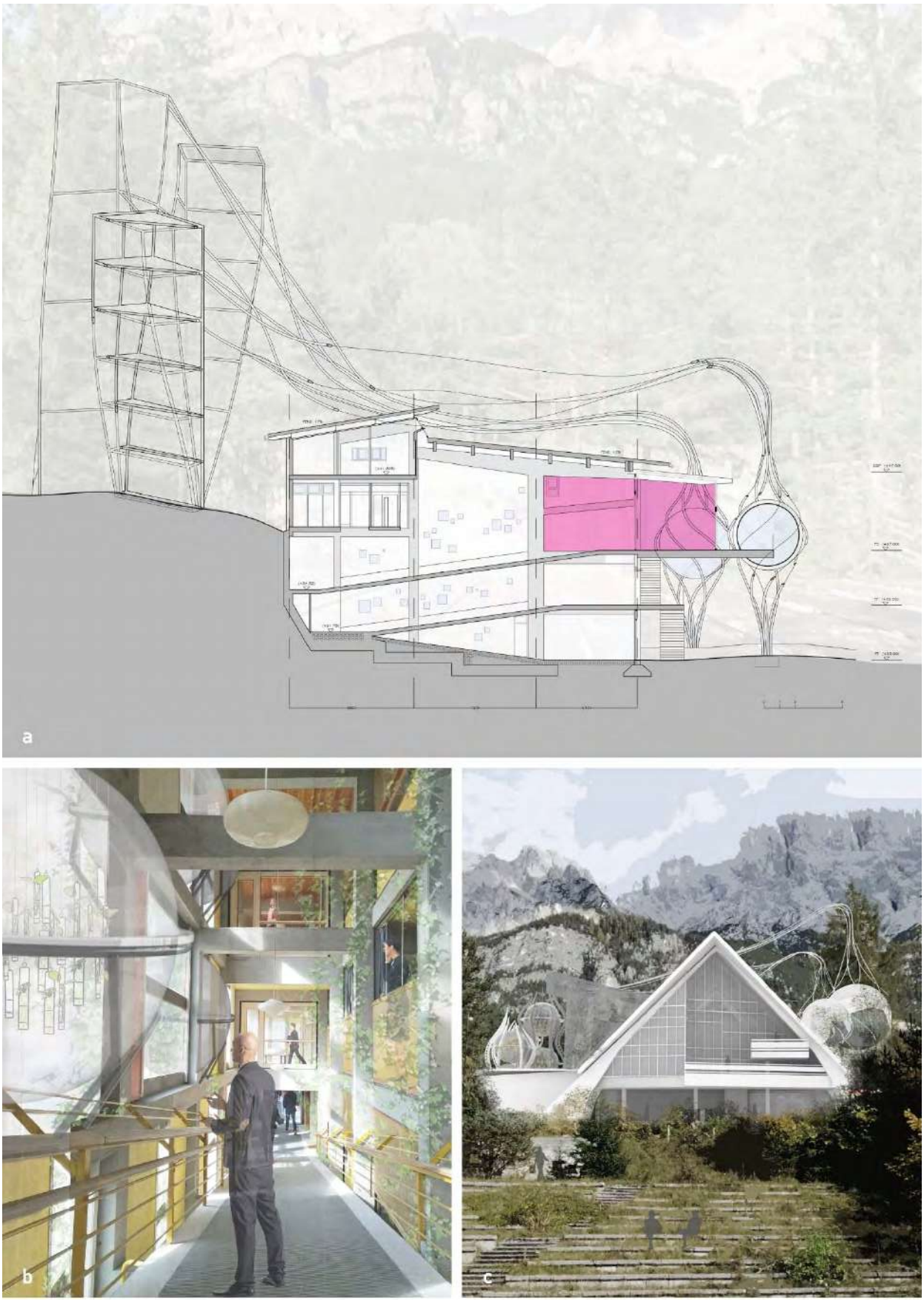
2.3. Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto di rigenerazione del Villaggio ENI si pone l'obiettivo di fornire uno scenario futuribile per la riattivazione dei grandi spazi della colonia da lungo tempo abbandonati e per la valorizzazione della componente ambientale locale alla luce delle rinnovate esigenze della comunità contemporanea in risposta alle modificazioni indotte dai cambiamenti climatici sul paesaggio montano. Dal punto di vista architettonico, il progetto è fondato su strategie di rigenerazione adattiva e di accrescimento sostenibile delle strutture esistenti, sviluppate mediante azioni insolite quali la ridondanza e la sovrapposizione, laddove forme modulari invadono viralmente il tessuto edilizio esistente, applicando sistemi passivi e favorendo interventi di bioarchitettura. Parafrasando le parole dell'architetto Edoardo Gellner "il paesaggio è la sommatoria di ambiente naturale e azione umana"; ciò significa che l'attività di progettazione consapevole genera "un buon paesaggio", mentre interventi disorganici e decontestualizzati restituiscono inevitabilmente "un pessimo paesaggio". In tal senso, il progetto è fortemente legato all'idea di una sostenibilità veicolata dall'architettura che, coadiuvata dall'utilizzo di soluzioni tecnologiche innovative, sia foriera di un nuovo concetto di tutela dell'ambiente nel quale il progetto architettonico possa riappropriarsi del ruolo strategico e multidisciplinare che ricopre all'interno dei processi di rigenerazione urbana.

[1] Il contributo presenta gli esiti della tesi di laurea interdisciplinare *Comunità Resilienti. Dalla rigenerazione del Villaggio ENI di Borca di Cadore alla 17. Mostra Internazionale di Architettura di Venezia*, Università degli Studi di Perugia, Laurea magistrale in Ingegneria edile-Architettura, a.a. 2018-2019, laureanda Monica Battistoni, relatori Paolo Belardi (Università di Perugia) e Alessandro Melis (University of Portsmouth).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 6. Simulazioni infografiche: (a) sezione di progetto, (b) vista interna, (c) vista esterna



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Riferimenti bibliografici

1. Bartolini, F. *La Terza Italia. Reinventare la nazione alla fine del Novecento*. Carocci editore: Roma, Italia, 2015.
2. Grandi, D. Le origini del welfare aziendale: dalle colonie operaie ai fringe benefits. in *Il welfare aziendale territoriale per la micro, piccola e media impresa italiana. Un'indagine ricostruttiva*; Massagli, E. (a cura di), Adapt University Press, Modena, 2014; Volume 31, pp. 6-11.
3. Swenarton, M.; Avermaete, T; Van den Heuvel, D. *Architecture and the Welfare State*. Routledge: Londra, United Kingdom, 2014.
4. Cesari, P. (a cura di). *Architettura per un'idea. Mattei e Olivetti, tra welfare aziendale e innovazione sociale*. Il mulino: Bologna, 2017.
5. Tinacci, E. *Mia memore et devota gratitudine. Carlo Scarpa e Olivetti, 1956-1978*. Edizioni di Comunità: Roma, 2018.
6. Toschi, C. *L'idioma Olivetti 1952-1979*. NYU Florence-Quodlibet: Macerata, 2018.
7. Melis, F. *Enrico Mattei e l'Italia dell'ENI*. Currenti Calamo: Bari, 2017.
8. León, M.; Migliavacca, M. Italy and Spain: Still the Case of Familistic Welfare Models?. *Population Review* **2013**, Sociological Demography Press: United States, Volume 52, Numero 1, pp. 25-42.
9. De Salvador, A (a cura di). Studio Gellner. Le villette del Villaggio ENI di Borca di Cadore. *Divisare*, 22 giugno 2015. Disponibile online: https://divisare.com/projects/292212-studio-gellner-sergio-casagrande-le-villette-del-villaggio-eni-di-borca-di-cadore (accessibile il 10/05/2022).
10. Perletti, M. A. Ri_visitati. Il villaggio Eni a Borca di Cadore tra passato e futuro. *Il Giornale dell'Architettura.com*, 30 settembre 2015. Disponibile online: https://ilgiornaledellarchitettura.com/2015/09/30/ri_visitati-il-villaggio-eni-a-borca-di-cadore-tra-passato-e-futuro/ (accessibile il 10/05/2022).
11. Melis, A.; Medas, B. *Catalogo del Padiglione Italia. Comunità Resilienti alla Biennale Architettura 2021*; D Editore: Roma, 2021; Volume 1b.
12. Severati, C.; Merlo, M. (a cura di). Edoardo Gellner. Architetture organiche per Enrico Mattei 1954-1961. Atti della giornata di studi, Roma-Gela-Pieve di Cadore, Italia, 17 marzo 2005). Gangemi: Roma, 2006.
13. Argenti, C. Segnalazioni floristiche per la Provincia di Belluno. II. In *Annali del Museo civico di Rovereto* **1999**, Volume 13, pp. 223-242
14. Rogora M. et al. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines. In *Science of The Total Environment* **2018**, Volume 624, pp. 1429-1442.
15. Bosello, F.; Marazzi, L.; Nunes, P. Le Alpi italiane e il cambiamento climatico. Elementi di vulnerabilità ambientale ed economica e possibili strategie di adattamento. Conferenza Nazionale sui Cambiamenti Climatici (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare), Roma, Italia, 12-13 Settembre 2007.
16. Leichenko, R. Climate change and urban resilience. In *Environmental Sustainability* **2011**, Volume

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3, Numero 3, Pages 164-168.
17. Gould, S. J.; Vrba, E. S. Exaptation - A Missing Term in the Science of Form. In *Paleobiology* **1982**, Volume 8, Numero 1, pp. 4-15.
18. Belardi, P. Ex-aptation: Quando il progetto è sottinteso. In Dall'Adriatico al Gran Sasso; Ciranna, S.; Gangemi editore: Roma, 2009; pp. 21-36.
19. Garcia, E. J.; Vale, B. *Unravelling Sustainability and Resilience in the Built Environment*. Routledge: Londra, 2017.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

On the combination of fluorescence and phosphorescence in light-emitting materials for a longer energy-saving effect within the built environment

Chiara Chiatti[1], Claudia Fabiani[1,2], Roberto Bondi[3], Giulia Zampini[3], Loredana Latterini[3,*] and Anna Laura Pisello[1,2,*]

[1] CIRIAF – Interuniversity Research Center, University of Perugia, Via G. Duranti 63, Perugia, 06125, Italy

[2] Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 97, Perugia, 06125, Italy

[3] Nano4Light-Lab Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, University of Perugia, Via Elce di Sotto 8, Perugia, 06123, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: loredana.latterini@unipg.it; anna.pisello@unipg.it

Abstract: In recent years, the building sector has become one of the major contributors to energy consumption, exacerbating urgent problems like global warming and the urban heat island (UHI) phenomenon. Luminescent materials have recently gained attention as an avant-garde option for energy-saving purposes, thanks to their capability to emit light upon being exposed to solar or artificial radiation. Indeed, the phosphorescent emission has proved not only to guarantee a renewable luminous gain but also to amplify the material's rejection of the incident solar radiation, resulting in cooler urban skins. Nevertheless, the need to increase the luminescence performances, especially in terms of durability, has emerged as fundamental issue for the effective implementation of luminescent materials in the built environment. The present work aims at investigating for the first time the emission persistency of combined fluorescent (F) and phosphorescent (P) materials. In particular, F and P pigments are mixed in different concentrations to enhance the overall luminescence brightness and duration. Their characterization is preliminary carried out at a laboratory scale, using monochromatic excitation. Results show how the interaction between phosphorescence and fluorescence is actually possible, toward advanced responsive materials for the built environments.

Keywords: photoluminescent materials; phosphorescence; fluorescence; lighting; passive cooling; energy saving

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

Nowadays, the building sector is responsible for more than one-third of the total energy consumption within the Mediterranean area, with cooling in summer as the driving factor for the electricity demand, followed by heating and lighting [1]. The high exploitation of traditional and sometimes outdated technologies, moved by increasingly high standards of human comfort and longer periods spent indoors, contributes to the exacerbation of already pressing global environmental problems. For instance, lighting accounts for almost 20% of a building's energy need, and around 40% of that amount is wasted by low-quality devices [2].

All this has started with the uncontrolled urban expansion and overpopulation of the last mid-century, which has led to the phenomenon of anthropogenic climate change [3]. Higher record-breaking daily temperatures have been recorded through the last years [4], with a detectable increase in local metropolitan ambient temperatures in comparison to the rural surroundings: the acknowledged "Urban Heat Island" (UHI) effect [5,6]. As a consequence, the energy demand for cooling and greenhouse gases emissions have raised dangerously, further contributing to the ongoing climate change and the deterioration of the livability of cities. Indeed, recent studies have demonstrated how higher air and surface temperatures exacerbate heatwaves, and increase the risk of heat-related illness and mortality, especially for vulnerable social groups [7,8].

UHI affects not only large metropolitan areas but also relatively small cities because it is mainly caused by the intrinsic characteristics of the built environment itself [9]. The lack of green spaces, water bodies, and, more in general, the high density of non-permeable surfaces alter the ground-atmosphere energy balance [10,11]. Therefore, the role played by materials applied as urban skins is fundamental, thanks to their common capability of releasing part of the daily absorbed heat to the atmosphere, increasing air temperatures. For this reason, a massive scientific effort has focused on the development of passive strategies that may effectively improve local microclimate by exploiting the intrinsic properties of peculiar materials [12].

The first generation of mitigation solutions has looked at high reflectance (ρ) and thermal emittance (ε) values as indicators of the material's capability to reduce heat absorption from the sun and increase heat dissipation to the environment. However, they have largely proved to produce a positive effect in terms of overheating reduction in summer, but also a significant increase in the buildings' energy consumption for heating because of the reduction in solar gains through the envelope in winter [13]. For this reason, in recent years, novel classes of "cool materials" with dynamic properties have been developed and investigated with the two-fold final aim of (i) reducing building energy consumption and (ii) providing better local comfort conditions for citizens [14]. Among them, photoluminescent materials are gaining attention for their potential as energy-saving solutions for the built environment. Their strength relies on the capability of adaptively modulating their optical properties in response to local boundary irradiation conditions. Indeed, photoluminescence is the direct consequence of the energy absorption, at moderate temperature, that occurs in a material when exposed to an exciting source. Luminescence is a radiative deactivation process consisting of the emission of photons that may last from a few nanoseconds to even hours, depending on the energy storage capability of the

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

material itself [15]. The latter is generally made of a matrix that is activated by doping ions, mostly rare-earth elements, and their interaction affects both color and persistency of the luminescent afterglow. Theoretically, when the emission occurs in a short time scale after the solicitation ends, the process involves a spin-allowed electronic transition and the phenomenon is called “fluorescence”; while a the radiative decay occurs with longer afterglow, it involves spin-forbidden transitions and it is referred to as “phosphorescence” [16].

In recent years, many inorganic phosphors have been developed with the final aim of enlarging the luminescent radiation through the whole visible waveband and up to the near-infrared region of the electromagnetic spectrum. A great number of studies, indeed, have highlighted the suitability of photoluminescence for several urban solutions, even if most of the investigations are still limited to the laboratory-chemical scale [16]. The suggested field of applications looks at two main different types of energy-saving: (i) for lighting, focusing on the self-sustained and renewable light emission provided by photoluminescence, and (ii) for passive cooling, exploiting changes in the material capability of rejecting the incident solar radiation, due to the activation of the luminescent phenomenon. Linked to the first topic, photoluminescent materials are widely used in the optimization of light-emitting diode (LED) systems [17,18], but researchers are also studying the possible implementation of their bulk form both indoors and outdoors, on a larger scale. For instance, Fabiani et al. [19] focused on the interaction of photoluminescent disks for outdoor lighting with both natural and artificial solicitation, highlighting how the combination of the two sources best empowered the luminescent afterglow. Bacero et al. [20], instead, evaluated the advantages of photoluminescent paving markings in terms of users’ visibility and perception when implemented on rural and low-illuminated roads. Regarding indoors, Chiatti et al. [21] calculated the energy-saving guaranteed by a translucent-photoluminescent envelope in comparison to an only-translucent one if applied to a case-study building in New York City: in the first case, the authors detected a 5% reduction in the energy consumption for lighting due to the luminescence activation. Focusing on the cooling potential of photoluminescence, the concept of “effective reflectance” (ρ*) should be introduced. It is the fraction of incident radiation that the material rejects thanks to the combination of both traditional reflectance (ρ) and light emission [22]. Therefore, the contribution of photoluminescent materials in mitigating the UHI phenomenon while maintaining lower surface temperatures relies on the additional reflectance due to the afterglow. Only a few works have recently detected such a positive effect on an engineering scale. Berdahl et al. [22] investigated materials made of photoluminescent ruby crystals in comparison to their non-luminescent counterpart, discovering a difference of -6.5°C in the surface temperature of the firsts. Kousis et al. [23], instead, went through numerical simulations to assess the cooling potential of phosphorescent coatings within the built environment, in comparison to conventional (-17.8°C) and cool (-13.3°C) concrete. The same authors also performed an extensive monitoring campaign on pavements with photoluminescent aggregates, recording a 3.3°C decrease in superficial temperatures during the hottest hours of the day [24].

Despite all the promising solutions for different fields of applications, one of the main critical aspects of photoluminescent materials is the duration of their afterglow. Many of the previously mentioned

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

studies depicted the necessity to optimize such materials toward longer decay periods, to better exploit photoluminescence advantages.

The present work investigates for the first time the effect of the combination of phosphorescence and fluorescence on the overall photoluminescent phenomenon. The idea is to explore how fluorescence can be sustained not only by an external solicitation but also by the phosphorescent re-emission within the same material. To this end, phosphorescent (P) and fluorescent (F) pigments with suitable absorption and emission spectra are analyzed and mixed, to establish the criteria to maximize their optical and luminescent properties for their exploitation for both passive cooling and lighting applications.

2. Materials and methods

2.1. Materials

Commercial phosphorescent (P) and fluorescent (F) pigments were selected according to their peculiar emission spectrum/color: the first are whitish when unloaded and emit a blue afterglow, while F pigments provide for a yellow luminescence (Figure 1). Four samples were realized by simply adding increasing percentages of fluorescent pigments (below 10% w:w) to the phosphorescent counterpart, as summarized in Table 1.

Figure 1. P and FP samples in their inactive (above) and active (below) state.

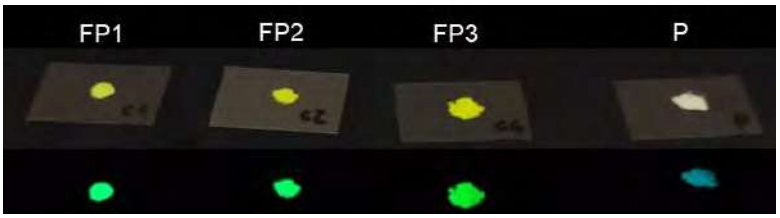


Table 1. P and FP samples produced according to different ratios of fluorescent (F) and phosphorescent (P) yellow-emitting pigments.

Sample code	F [%]	P [%]
P	-	100.0
FP1	3.0	97.0
FP2	4.5	95.5
FP3	9.0	91.0

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

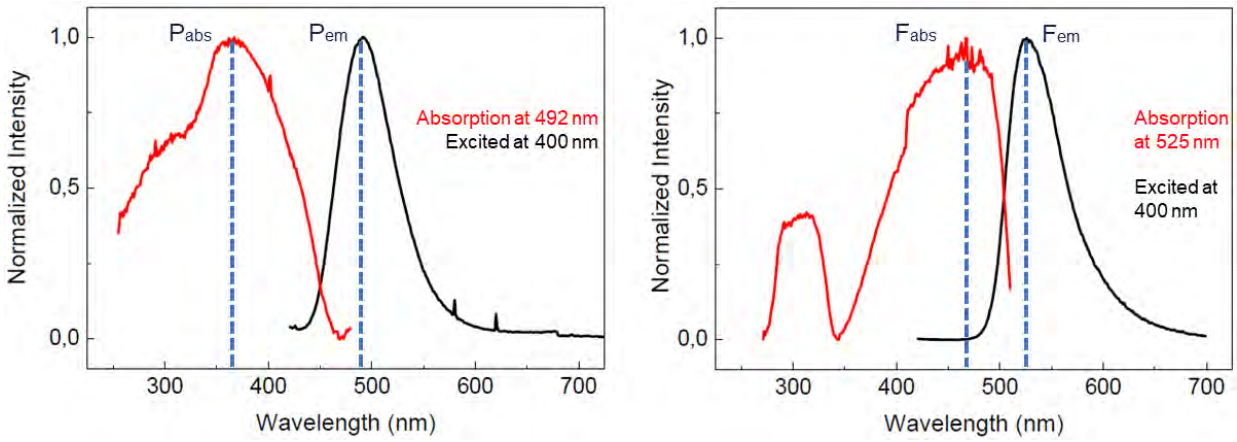
2.2. Fluorimetric analysis

To analyse the spectroscopic behaviour of the compounds, excitation and emission spectra were recorded with an Edinburgh Instruments FS5 spectrofluorometer equipped with a Xenon lamp (monochromator slit widths: 1 nm). The luminescence of the compounds was collected in a front face configuration (monochromator slit widths: 1 nm). To investigate more in detail the energy transfer between F and P pigments, the decay time and gated spectra of the samples were collected on the same instrument and on the same configuration.

3. Results

To obtain persistent luminescence with an intense and brilliant color, we exploited the combination of phosphorescent and fluorescent pigments. The aim was to investigate the occurrence of energy transfer processes from the long-living phosphor (the phosphor pigment, P) to the bright emitting fluorescent pigment (F). To this aim, pigments were selected so that the emission spectrum of P overlapped with the absorption spectrum of F. At first, the luminescence excitation and emission spectra of the neat powders were collected, as shown in Figure 2. In particular, the excitation spectrum of F, which shows the change in fluorescence intensity as a function of the excitation wavelength (giving sensitive insight on the absorption properties of the sample) presented a reasonable overlap with the emission spectrum of P. Data also indicated that for wavelengths in the range *between* 320 *and* 420 nm, the radiation *was* preferentially absorbed by P pigment.

Figure 2. Excitation and emission spectra of both P (on the left) and F (on the right) pigments.

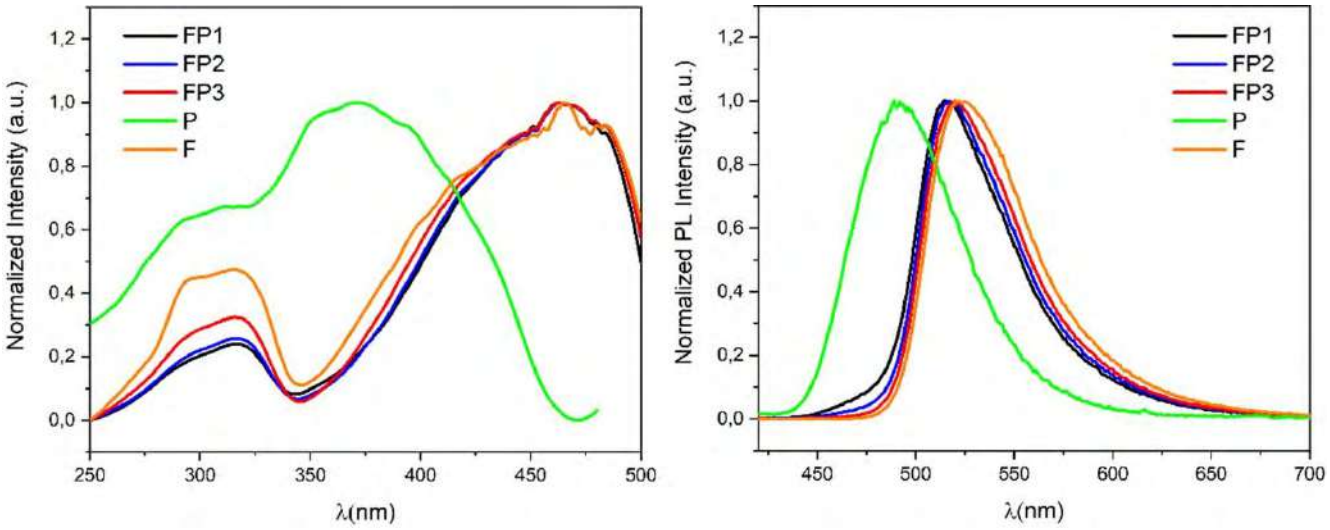


On the basis of these results, the luminescence properties of mixed powders (FP1, FP2, FP3 samples) were investigated and compared to the those of F and P powders.

In Figure 3, the excitation and emission spectra of the FP1, FP2, FP3 powder samples are shown, upon excitation at compared to 400 nm, together with spectra of neat F and P powders. FP1, FP2 and FP3 samples presented emission spectra with a peak at 510 nm, similar to the one recorded for F pigment, but different from the one recorded for P (λ_{max} = 490 nm). The excitation spectra of the mixed powder samples retrace the excitation spectra of the fluorescence powder F.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Excitation ($\lambda_{em.}$ = 510 nm, on the left) and emission spectra ($\lambda_{exc.}$= 400 nm, on the right) of FP1, FP2, FP3, F and P powders.



Time-resolved luminescence data (Figure 4a) show a shortening of the of the decay time going from P to FP1, FP2 and FP3 powders powder, thus indicating an energy transfer processes in the mixed samples can take place. This hypothesis is confirmed by the increase of the lifetime of the fluorescence in the combined samples, that goes from an order of nanosecond to second, indicating that the fluorescent state is populated by the phosphorescent material. A gated spectra (Figure 4c) recorded exciting at λ_{exc} = 400 nm with a delay time of 5 ms after excitation, show a strong fluorescence band in the range 500-550 nm, along with a weak shoulder due to the phosphorescence in the range of 450-500 nm. The observation that in fluorescence occurs in the time range of phosphorescence confirms the occurrence of energy transfer process, likely based on Forster Energy transfer mechanism. These results document the possibility to tune the spectra and timing of resulting luminescence.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 4. Luminescence decay profiles of (a) FP1, FP2, FP3, P and (b) F, monitored at λ_{exc} = 400 nm and λ_{em}= 510 nm. (c) Gated spectra of combined samples FP1, FP2 and FP3 samples (λ_{exc} = 400 nm, delay time = 5 ms)

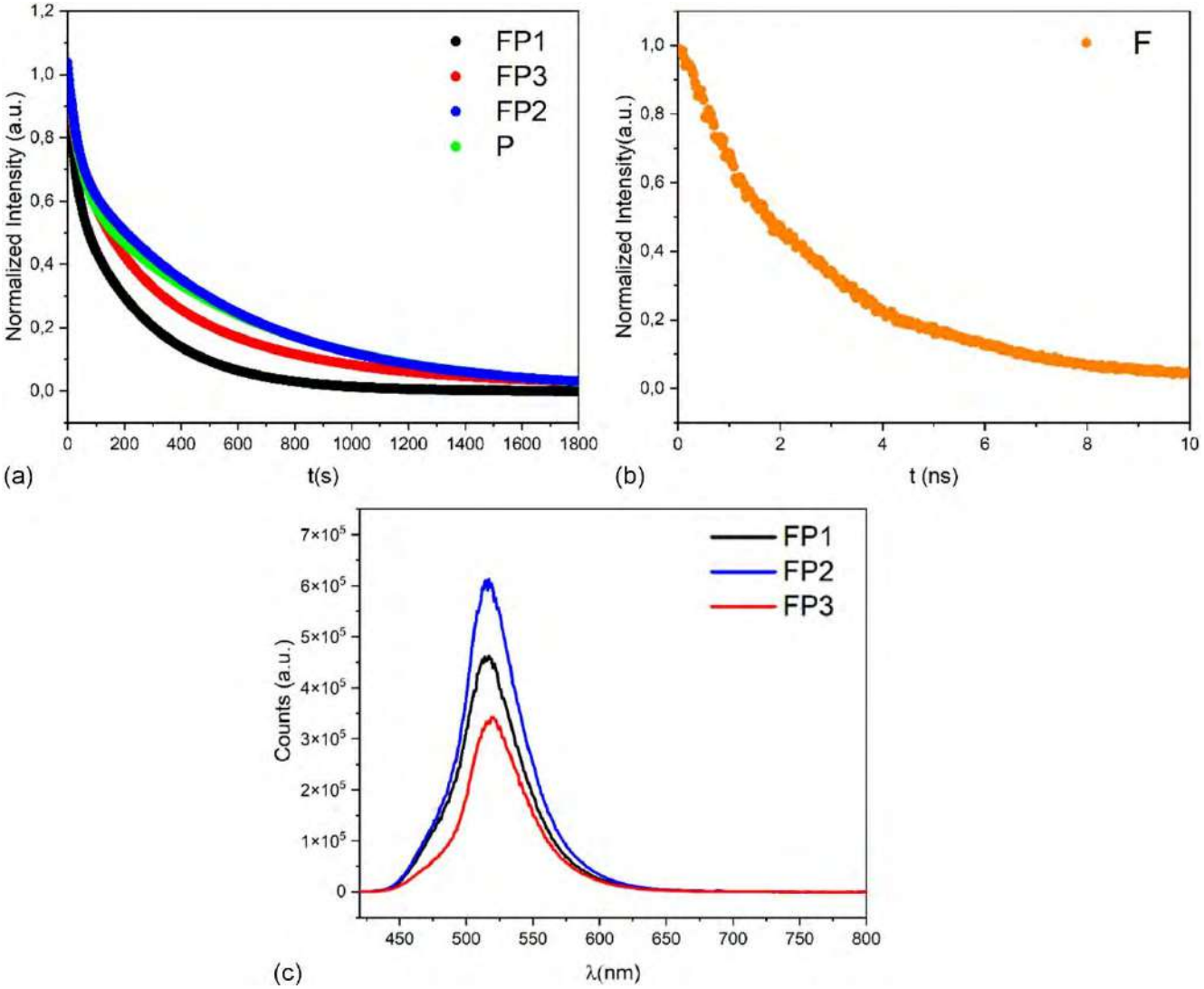


Table 2. Decay time of all the investigated samples.

Sample code	t
P	433.4 s
FP1	164.0 s
FP2	415.3 s
FP3	305.5 s
F	3.72 ns

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5. Conclusions

In this work, the emission behavior and extinction trend of commercially available fluorescent (F) and phosphorescent (P) pigments were assessed, combining for the first time the two photoluminescent phenomena. Their potential use in the built environment was investigated for both passive cooling and lighting energy-saving purposes.

More in detail, the idea was to make the fluorescent emission persistent, by combining the activation effect of an external radiative source with phosphorescence. For this reason, blue-emitting phosphorescent (P) and yellow-emitting fluorescent (F) pigments were selected, so that the afterglow spectrum of the first fell within the absorption range of the second and an energy transfer between the two may occur. Moving from a complete phosphorescent sample, different ratios of FP pigments were analyzed using an in-lab characterization procedure. A fluorimeter was used to precisely detect the absorption and emission spectra of the two powders, in response to a monochromatic radiation source. Results proved that the chosen P and F powders could generate a transfer of energy from phosphorescence to fluorescence: gated spectra, time resolved emission decay lifetime and emission and excitation spectra confirmed this conclusion. A similar approach can be considered a preliminary step to increase the technology readiness level of photoluminescent solutions, whose application is currently limited to the ornamental and decorative sphere: knowing the driving factors that can maximize their luminous performance, their potential in terms of energy-saving may be fully exploited.

References

[1] Family R, Mengüç MP. Materials for Radiative Cooling: A Review. Procedia Environ Sci 2017;38:752–9. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.158.

[2] Djuretic A, Kostic M. Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting. Energy 2018;157:367–78. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.179.

[3] Li Y, Schubert S, Kropp JP, Rybski D. On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. Nat Commun 2020;11:2647. https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9.

[4] Uhe P, Otto FEL, Haustein K, van Oldenborgh GJ, King AD, Wallom DCH, et al. Comparison of methods: Attributing the 2014 record European temperatures to human influences. Geophys Res Lett 2016;43:8685–93. https://doi.org/10.1002/2016GL069568.

[5] Qiao Z, Tian G, Zhang L, Xu X. Influences of Urban Expansion on Urban Heat Island in Beijing during 1989–2010. Adv Meteorol 2014;2014:1–11. https://doi.org/10.1155/2014/187169.

[6] Oke TR. The energetic basis of the urban heat island. Q J R Meteorol Soc 1982;108:1–24. https://doi.org/10.1002/qj.49710845502.

[7] Macintyre HL, Heaviside C, Taylor J, Picetti R, Symonds P, Cai X-M, et al. Assessing urban population vulnerability and environmental risks across an urban area during heatwaves – Implications for health protection. Sci Total Environ 2018;610–611:678–90.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.062.

[8] Schinasi LH, Benmarhnia T, De Roos AJ. Modification of the association between high ambient temperature and health by urban microclimate indicators: A systematic review and meta-analysis. Environ Res 2018;161:168–80. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.004.

[9] Su H, Han G, Li L, Qin H. The impact of macro-scale urban form on land surface temperature: An empirical study based on climate zone, urban size and industrial structure in China. Sustain Cities Soc 2021;74:103217. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103217.

[10] Kotharkar R, Bagade A, Ramesh A. Assessing urban drivers of canopy layer urban heat island: A numerical modeling approach. Landsc Urban Plan 2019;190:103586. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.05.017.

[11] Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA. Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press; 2017. https://doi.org/10.1017/9781139016476.

[12] Fabiani C, Pisello AL, Paksoy H. 2.30 Novel Building Materials. Compr. Energy Syst., Elsevier; 2018, p. 980–1017. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00257-1.

[13] Fabiani C, Castaldo VL, Pisello AL. Thermochromic materials for indoor thermal comfort improvement: Finite difference modeling and validation in a real case-study building. Appl Energy 2020;262:114147. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114147.

[14] Santamouris M, Yun GY. Recent development and research priorities on cool and super cool materials to mitigate urban heat island. Renew Energy 2020;161:792–807. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.109.

[15] Ceroni P. Design of Phosphorescent Organic Molecules: Old Concepts under a New Light. Chem 2016;1:524–6. https://doi.org/10.1016/j.chempr.2016.09.011.

[16] Chiatti C, Fabiani C, Pisello AL. Long Persistent Luminescence: A Road Map Toward Promising Future Developments in Energy and Environmental Science. Annu Rev Mater Res 2021;51:409–33. https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-091520-011838.

[17] He M, Jia J, Zhao J, Qiao X, Du J, Fan X. Glass-ceramic phosphors for solid state lighting: A review. Ceram Int 2021;47:2963–80. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.227.

[18] Xia Z, Xu Z, Chen M, Liu Q. Recent developments in the new inorganic solid-state LED phosphors. Dalt Trans 2016;45:11214–32. https://doi.org/10.1039/C6DT01230B.

[19] Fabiani C, Chiatti C, Pisello AL. Development of photoluminescent composites for energy efficiency in smart outdoor lighting applications: An experimental and numerical investigation. Renew Energy 2021;172. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.071.

[20] Bacero R, To D, Arista J, Dela Cruz MK, Villaneva JP, Uy FA. Evaluation of Strontium Aluminate in Traffic Paint Pavement Markings for Rural and Unilluminated Roads. J East Asia Soc Transp Stud 2015;11:1726–44. https://doi.org/https://doi.org/10.11175/easts.11.1726.

[21] Chiatti C, Rosso F, Fabiani C, Pisello AL. Integrated energy performance of an innovative translucent photoluminescent building envelope for lighting energy storage. Sustain Cities Soc 2021;75. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103234.

[22] Berdahl P, Chen SS, Destaillats H, Kirchstetter TW, Levinson RM, Zalich MA. Fluorescent cooling of

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

objects exposed to sunlight – The ruby example. Sol Energy Mater Sol Cells 2016;157:312–7. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.058.

[23] Kousis I, Fabiani C, Pisello AL. A study on the thermo-optical behaviour of phosphorescent coatings for passive cooling applications. E3S Web Conf 2021;238:06002. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123806002.

[24] Kousis I, Fabiani C, Gobbi L, Pisello AL. Phosphorescent-based pavements for counteracting urban overheating – A proof of concept. Sol Energy 2020;202:540–52. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.092.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Biomimetic envelope: a new strategy for limiting surface overheating in buildings

Silvia Cavagnoli [1], Claudia Fabiani [1,2,*], Franco Cotana [1,2], and Anna Laura Pisello [1,2]

[1] CIRIAF – Interuniversity Research Center, University of Perugia, Via G. Duranti 67, Perugia, 06125, Italy
[2] Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 93, Perugia, 06125, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: claudia.fabiani@unipg.it

Abstract: In recent times, most of the energy consumed globally is attributed to the building sector. In this scenario, it is necessary to intervene at the building level with passive strategies to achieve indoor comfort levels by reducing energy use and getting closer to the idea of a Nearly Zero Energy Building (NZEB). These strategies, when applied at the building level, can reduce the amount of energy used in buildings, as well as the amount of GHG emissions in the atmosphere, consequently decreasing the large-scale phenomenon of Urban Heat Island (UHI). In this context, solutions focusing on the imitation of nature, i.e. biomimetic architecture, have recently gathered large attention among researchers and practitioners worldwide. In line with this, based on research studies showing that black and white stripes of the zebra have a thermoregulatory function in the animal, this study tackles the possible application of zebra-inspired stripes to the external walls of the building envelope. Indeed, due to the different absorption coefficients of the white and black stripes, differential surface overheating could be generated locally. This would lead to the production of small convective motions thanks to the different air densities, as the air near the black stripes would tend to rise while heating and the air near the white stripes would tend to stay at the bottom being cooler. The aim of the present work is to investigate the production of a real cooling effect that can be applied to achieve improved indoor comfort levels.

Keywords: Biomimetic architecture; zebra stripes; thermoregulation; passive strategies; urban heat island; convective motions; absorption coefficient.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

In Europe, most of the total energy consumption is attributable to the residential sector [1]. Indeed, this energy is used for all the activities that take place inside a building, in particular for heating and cooling of the internal environments. Due to the continuous increase in population and the consequent increase in building growth, whereby it is increasingly difficult to find undeveloped land, especially in metropolitan cities, it is necessary to find a solution aimed at containing energy consumption and the related emissions into the atmosphere. To this end, the European Commission has developed proposals to reduce greenhouse gas emissions by 2030 by setting out a series of steps to be followed, pursuing the goal of clean and affordable energy and combating climate change [2]. Shifting from non-renewable to renewable energy sources is an important goal to set but there may be other several solutions to follow, and one of these is the application of passive strategies in the construction sector [3]. Thanks to their application, it is possible to achieve a number of benefits by making the building energy efficient. Some passive strategies examples include the shape and orientation of buildings, efficient insulation characteristics and properties of external walls, or the use of new efficient installations. In this line, Nearly Zero Energy Buildings (NZEB), characterized by very low energy consumption, fit in [4, 5]. Indeed, these types of buildings aim at sustainability and energy saving, representing an environmentally friendly solution by promoting the growth of efficient and sustainable urban centers. Some of the most frequent applications concern the building envelope, whether through the use of ventilated cavities, or the use of plant species for walls creating green façades capable of limiting the urban heat island phenomenon [6, 8]. Limiting this phenomenon is important as it can have negative effects on both climate change and human health [9]. As a matter of fact, the building sector is considered one of the first fields in which to act in order to achieve sustainable development, retrofitting buildings where possible or constructing new and more efficient ones.

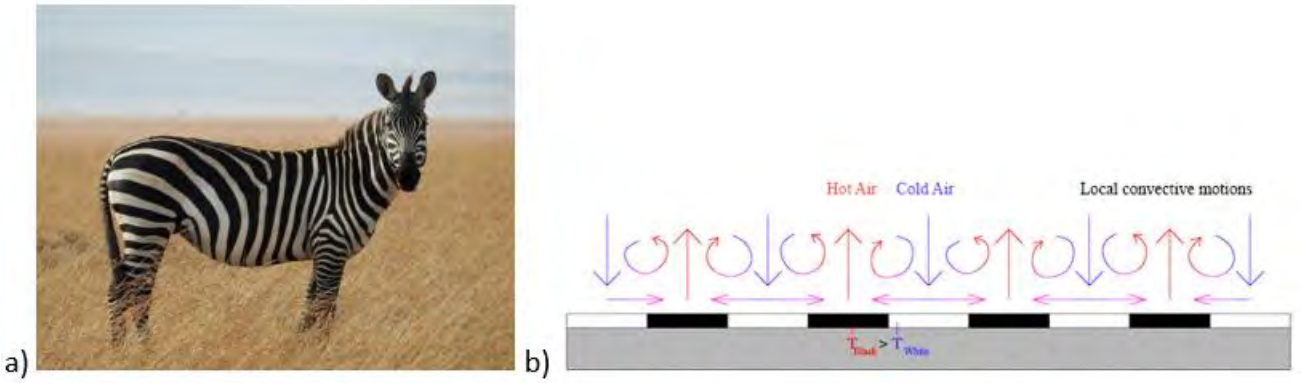
One of the recent developments and studies within the sphere of passive strategies is biomimetic architecture [10, 11]. That is the study of the functioning and characteristics of nature with the aim of imitating it in the building context for the realization of more sustainable buildings [12]. Following this path, nature becomes an example to follow. Several examples in the literature follow this strategy with good results. An example is the roof of the Crystal Palace in London designed by architect Joseph Paxton whose shape is inspired by the plant Victoria Amazonica [13]. Inspired by its structure, he tried to imitate it in the roof structure characterized by a light but strong structure. The Eastgate Building Center in Harare in Zimbabwe is another biomimetic architecture where the building, thanks to its design, does not need any kind of ventilation system [14]. Thanks to natural ventilation inspired by African termite burrows, this building can reduce to zero all consumption from plant engineering.

Taking inspiration from the cases mentioned above, the present work aims to find a strategy to limit the energy consumption of buildings by intervening in the external envelope. To do so, the coat of the zebra is imitated in the external envelope of a building, equipped with alternating black and white stripes. This characteristic striped coat, in addition to being a natural defense against insect bites and a sort of mimicry, also acts as thermoregulation for the animal itself [15]. The idea is to recreate this thermoregulation effect in the building. Indeed, due to the different absorption coefficients of solar

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

radiation, this work aims to evaluate the existence of a cooling effect given by the creation of small convective motions that would be established thanks to the different temperatures of the air adjacent to the stripes of different colors. As a matter of fact, the air temperature close to the black stripes is hotter than the one close to the white stripes. Due to this, the hot air tends to rise while the colder one descends, replacing the hot one and, in this way, small convective motions could be created. The idea of this application is therefore to get these micro-motions that could keep the whole building cooler.

Figure 1. Zebra coat (a) and micro-convective motions (b).



To carry out this study, both a virtual and a real model were created. Once tested and analyzed, another objective is the validation of the virtual model. Indeed, validation is an important step as once obtained, it would allow testing of different types of samples with different properties and characteristics, without necessarily having to make a real model given the accuracy and precision of the virtual one.

2. Models and methods

In order to carry out analyzes and studies to evaluate whether micro convective motions are actually created, it was necessary to produce scale models of a hypothetical building component. In this study, we moved in two parallel paths, on the one hand, a real model is created and analyzed in a climatic chamber, and on the other a virtual model is produced and analyzed with the COMSOL Multiphysics software.

2.1 Real model

With regard to the physical model to be tested in the laboratory, this is characterized by the following materials/components:

- Concrete slab
- Aluminum sheet;
- Layer of plaster;
- EPS insulation;
- Transparent synthetic glass.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

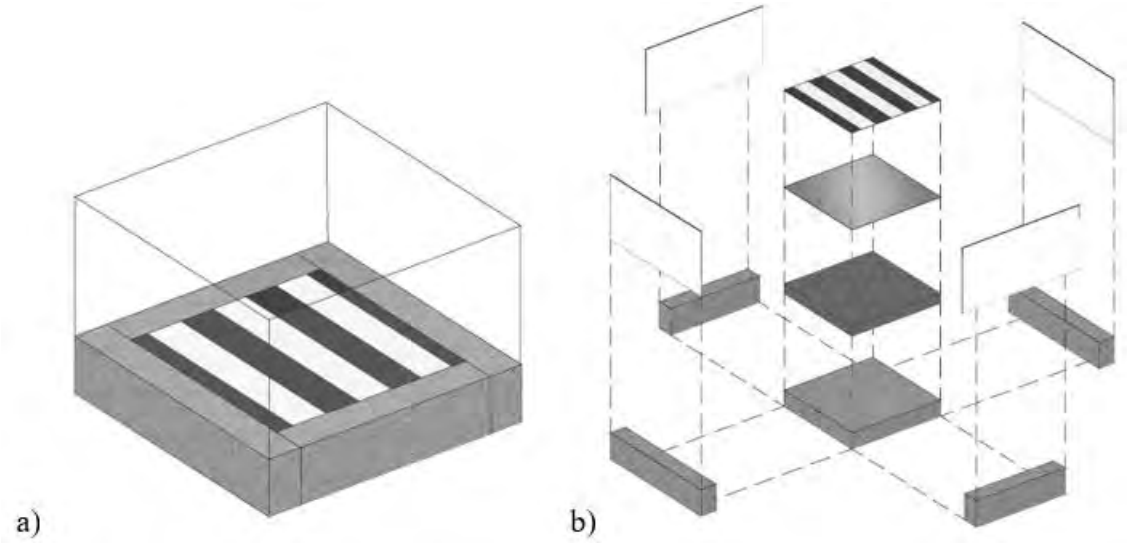
Of the materials listed, the thermal conductivity, density, and specific heat were defined. Some of these parameters listed in Table 1 were evaluated by analysis with the Hot Disk TPS 2500S instrument while others were taken from data sheets by a literature search.

Table 1. Material parameters.

Material	Thermal conductivity W/(m*K)	Density kg/m^3	Specific heat J/(kg*K)
Concrete slab	1.500	2265	880
Aluminum sheet	210	2720	895
Plaster	0.750	1542	1033
EPS	0.035	12.850	1450
Synthetic glass	0.150	850	1855

The concrete slab has a surface area of 30 cm x 30 cm and a thickness of 3 cm. Above the concrete slab rests an aluminum slab, also with a surface area of 30 cm x 30 cm, on which a 0.15 cm plaster is applied. This block of materials is then inserted into a case of EPS insulation material for obtaining a one-dimensional heat flow through the thickness of the sample. The aluminum sheet with the plaster on top was used to make more than one physical sample by applying the layer of plaster and painting in various colors. In this way, three samples are produced: two monochrome samples (one white and one black) and a black and white striped sample (each stripe is 5 cm wide). Two water-based paints were used to paint the irradiated surface in different colors. In this case, a spectrophotometer was used to characterize the radiant properties of the two paints, enabling us to evaluate the reflection coefficient of the black and white colors at wavelengths between 300 and 2500 nm. A reflection coefficient (r) of 0.89 was obtained for the white paint and 0.04 for the black.

Figure 2. Real model (a), split axonometry (b).



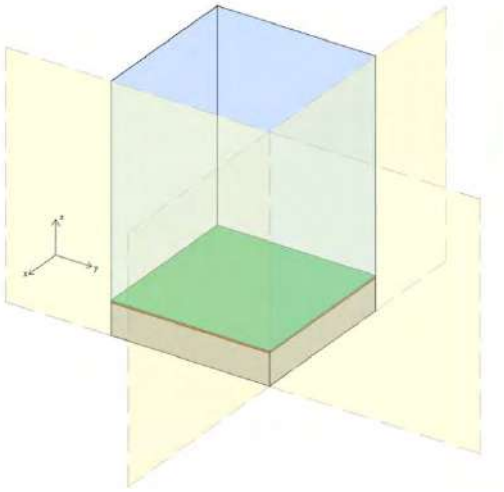
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2 Virtual model

As mentioned before, in addition to a real sample, a virtual one with the same characteristics was also modeled in COMSOL Multiphysics. Indeed, this model reproduces the real one and in the software, it is possible to simulate a real environment, by choosing the various parameters to set. In this case, in addition to the same material, the temperature setpoint is the same as the ones set in the climate chamber when analyzing the real model.

To create the model, we took advantage of the model's double symmetry. Thanks to this, only 1/4 of the real dimensions are modeled significantly reducing simulation time (Figure 3).

Figure 3. Model made in COMSOL Multiphysics.



Starting from the top, the parts of the model in light blue represent the plexiglass sheets enclosing the air domain under test, in green is the layer of plaster variously painted according to the model to be analyzed (also in this case a white and black monochromatic model and a black and white striped model are simulated), in orange is the aluminum sheet and in grey the concrete slab. In yellow, the symmetry planes of the model are represented to indicate that everything that happens in this portion of the model must also happen symmetrically in the other parts. Table 2 shows the various specifications of each block of material inserted.

Table 2. Model geometry.

Material	Width (cm) – direction x	Depth (cm) – direction y	Height (cm) – direction z
Concrete slab	15.00	15.00	3.00
Aluminum sheet	15.00	15.00	0.05
Plaster	15.00	15.00	0.15
Synthetic glass (1)	15.00	0.20	20.00
Synthetic glass (2)	0.20	15.00	20.00
Air	14.80	14.80	20.00

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Experimental and numerical campaign

3.1 Experimental analyses

As mentioned above, the real model was tested in the climate chamber and underwent a simulation cycle of one hour (the same duration as set for the simulation in Comsol Multiphysics for the virtual model). The climate chamber is able to reproduce a real environment by being able to insert the setpoints for temperature, relative humidity, and radiation. To decide the setpoints in the climate chamber, the values recorded on the hottest day of 2018, i.e. 30 July in the period between 12:30 and 13:30, were averaged. The results obtained set in the chamber are 33 °C for temperature, 30 % for humidity, and 1064 W/m^2 for radiation.

The sample inside the chamber was equipped with thermocouples used to monitor the temperature at various positions and heights of the model. In particular, their position for the two monochromatic samples is the same: 3 sensors were inserted between the polystyrene base and the concrete slab to monitor the temperature of the latter, 3 sensors were placed on the dyed surface, 4 sensors were fixed along the ideal central vertical of the sample to record the air temperature trend at different heights and 2 more sensors were placed on the outer sides of the sample to monitor the external temperature. For the striped model, the sensor position is a little bit different: 3 sensors were placed between the EPS base and the concrete surface, 5 sensors were placed on the striped surface (one for each white and black stripe), 3 sensors were fixed along the ideal central vertical of the sample and 1 was placed outside the sample.

3.2 Numerical investigations

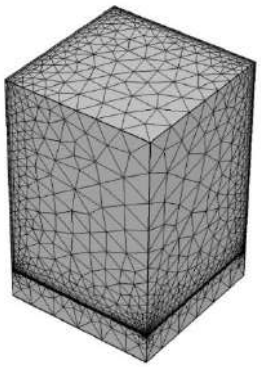
To do this study, it is necessary to include the combination of heat transfer and fluid motion. For this purpose, the phenomenon of radiation has been included, where the sample surface simulating zebra stripes and totally white and totally black surfaces (in Figure 3 the surface in green) will be irradiated. To do this, an external irradiation source was set up at an infinite distance with a vertical direction from top to bottom (x = 0, y = 0 and z = -1). It is also important to consider heat transfer in solids and fluids. This phenomenon encompasses all elements of the model and the contour sides are set as adiabatic sides at the presence of EPS insulation in the real model, i.e. at the outer sides and at the base of the concrete slab.

In addition to the inclusion of symmetry planes, a condition of null flow of the fluid in contact with the internal walls, i.e. on the synthetic glass walls and in the colored surface is set. The materials set are the same as in the real model with the same density, specific heat, and thermal conductivity characteristics. However, in this case the solid representing the polystyrene case has not been inserted as only the sides where the EPS is in contact with the concrete slab have been made adiabatic. At the time of analysis, for the materials involved in radiation, i.e. the multi-colored surface, it is necessary to define the surface emissivity, while for those involved in laminar flow it is necessary to specify the dynamic viscosity. The surface emissivity was assumed to be ε = 0.88 for the white color and ε = 0.98 for the black color. The properties of air are taken from the software's material library. Once all these

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

parameters have been defined, we move on to the creation of the model mesh (Figure 4), defining the desired size and fineness in the software. The study carried out, in this case, is of the transient type lasting one hour with the results obtained every minute.

Figure 4. Model mesh.



4. Results

4.1 Results from the experimental campaign

As explained in the previous paragraphs, the different samples were tested within the controlled environment of a climatic chamber. Results show that the white monochrome model has a large temperature rise at the beginning of the simulation cycle. As a matter of fact, in the first 5 minutes it has a temperature increase of about 7 °C, while as the simulation continues, this increase is less and less. The final average surface temperature value is about 44 °C. The heat absorbed by the dyed surface is then transmitted by conduction to the concrete slab below, where other sensors monitor the temperature. At the beginning of the cycle, the slab tends to heat up slowly to speed up during the simulation. At the end of the simulation cycle, the temperature measured on the concrete slab is approximately 35 °C. The increase in temperature of the surface produces heating of the air layer adjacent to it due to the convection phenomenon. Probes placed along the ideal central vertical of the sample measure air temperatures at various heights and outside the sample at opposite sides. At a height of 10 cm and 20 cm, there is a rapid increase in temperature in the first few minutes, recording a temperature of approximately 41 °C for the 10 cm height and 42 °C at the 20 cm height at the end of the simulation. On the outside of the sample, the probes register a fast increase at the beginning of the simulation. The same behavior is also recorded at a height of 30 cm and 40 cm where, due to the fact that the probe at 40 cm height is the furthest from the sample, at the end of the simulation the temperature recorded is a little bit lower (about 36°C). Figure 5 shows all the values recorded during the simulation.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Temperatures were recorded by the various probes for concrete slab (CS) and dye in left (l), center (c) and right (r) and the air – white model.

Time	1_CS (l)	2_CS (c)	3_CS (r)	Avr. CS	4_Dye (l)	5_Dye (c)	6_Dye (r)	Avr. Dye
0 m	24.40	24.29	24.39	24.36	28.18	27.70	27.40	27.76
1 m	24.50	24.37	24.48	24.45	28.23	27.80	27.50	27.84
2 m	24.60	24.46	24.57	24.54	28.92	28.50	28.30	28.57
3 m	24.70	24.53	24.65	24.63	31.65	30.70	31.10	31.15
4 m	24.70	24.61	24.74	24.68	34.06	32.60	33.50	33.39
5 m	24.80	24.69	24.82	24.77	35.54	33.70	35.00	34.75
10 m	25.50	25.32	25.54	25.45	38.46	36.00	37.80	37.42
15 m	26.50	26.25	26.63	26.46	39.65	37.20	39.00	38.62
20 m	27.60	27.24	27.79	27.54	40.30	37.90	39.80	39.33
25 m	28.70	28.26	28.95	28.64	40.89	38.50	40.50	39.96
30 m	29.60	29.17	29.99	29.59	41.55	39.10	41.30	40.65
35 m	30.60	30.10	31.04	30.58	42.21	39.80	41.90	41.30
40 m	31.60	30.98	32.04	31.54	42.65	40.20	42.60	41.82
45 m	32.50	31.85	32.99	32.45	43.21	40.80	43.10	42.37
50 m	33.30	32.65	33.86	33.27	43.80	41.40	43.70	42.97
55 m	34.20	33.46	34.74	34.13	44.19	41.80	44.30	43.43
60 m	35.00	34.22	35.57	34.93	44.64	42.40	44.90	43.98

Time	7_Air behind	8_Air ahead	9_Air 10 cm	10_Air 20 cm	11_Air 30 cm	12_Air 40 cm
0 m	33.00	33.54	32.70	32.80	32.93	33.13
1 m	32.99	33.50	32.69	32.80	32.91	33.10
2 m	33.30	33.87	33.37	33.70	33.36	33.35
3 m	34.77	35.43	35.94	36.90	35.19	34.45
4 m	36.13	36.69	38.06	39.40	36.60	35.37
5 m	36.82	37.19	39.07	40.40	37.13	35.66
10 m	37.79	37.70	40.27	41.70	37.66	36.01
15 m	38.12	37.91	40.67	42.00	38.00	36.26
20 m	38.13	37.74	40.59	41.90	37.88	36.10
25 m	38.10	37.89	40.76	41.80	37.84	36.14
30 m	38.19	37.91	40.93	42.10	37.94	36.22
35 m	38.15	37.94	41.09	42.10	38.01	36.18
40 m	38.19	37.93	40.99	41.90	38.01	36.20
45 m	38.19	37.99	41.12	42.10	38.02	36.23
50 m	38.24	37.97	41.19	42.10	38.09	36.20
55 m	38.32	38.02	41.25	42.20	38.05	36.29
60 m	38.30	37.95	41.35	42.20	38.00	36.23

As for the black sample, the sensors measure the same parameters at the same positions as the white monochrome sample. During this simulation cycle at time 0, the probes measuring the air temperature at the various points all record a temperature of around 33°C, while up to about minute 5, the average concrete temperature recorded is around 24°C, while the average temperature of the dyed surface already tends to rise faster in the first 5 minutes of simulation, reaching more than 40°C. Generally, it is possible to see how all the probes record a sharp increase in temperature at the beginning of the simulation and then continue to increase but at a slower rate. All the values recorded at various times during the simulation are listed in Figure 6.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 6. Temperatures were recorded by the various probes for concrete slab (CS) and dye in left (l), center (c) and right (r) and the air in various positions – black model.

Time	1_CS (l)	2_CS (c)	3_CS (r)	Ave. CS	4_Dye (l)	5_Dye (c)	6_Dye (r)	Ave. Dye
0 m	24.50	24.30	24.39	24.40	28.12	27.60	27.50	27.74
1 m	24.60	24.38	24.48	24.49	28.17	27.70	27.60	27.82
2 m	24.70	24.47	24.56	24.58	28.72	28.30	28.20	28.41
3 m	24.80	24.55	24.64	24.66	33.54	32.40	33.10	33.01
4 m	24.80	24.64	24.72	24.72	38.91	36.60	38.40	37.97
5 m	24.90	24.74	24.83	24.82	42.75	39.50	42.20	41.48
10 m	26.50	26.05	26.31	26.29	49.59	45.10	49.10	47.93
15 m	29.00	28.37	28.93	28.77	51.41	47.30	51.40	50.04
20 m	31.70	30.92	31.76	31.46	53.10	48.80	53.20	51.70
25 m	34.20	33.46	34.53	34.06	54.38	50.10	54.90	53.13
30 m	36.60	35.80	37.10	36.50	55.81	51.50	56.40	54.57
35 m	38.90	38.00	39.47	38.79	56.71	52.60	58.00	55.77
40 m	40.90	40.03	41.64	40.86	58.24	53.90	59.20	57.11
45 m	42.90	41.91	43.68	42.83	59.39	55.00	60.20	58.20
50 m	44.70	43.73	45.64	44.69	60.51	56.20	61.50	59.40
55 m	46.40	45.43	47.40	46.41	61.65	57.10	62.70	60.48
60 m	47.90	46.92	48.93	47.92	62.58	57.90	63.70	61.39

Time	7_Air behind	8_Air ahead	9_Air 10 cm	10_Air 20 cm	11_Air 30 cm	12_Air 40 cm
0 m	33.00	33.51	32.70	32.80	32.91	33.12
1 m	32.99	33.50	32.69	32.80	32.90	33.11
2 m	33.19	33.71	32.99	33.30	33.19	33.23
3 m	34.64	35.00	35.10	36.20	34.81	34.17
4 m	35.98	36.09	36.91	38.40	36.10	35.05
5 m	36.78	36.69	37.81	39.40	36.10	35.43
10 m	37.79	37.11	39.24	40.70	37.19	35.73
15 m	38.13	37.29	39.60	40.90	37.46	35.88
20 m	38.10	37.28	39.73	41.00	37.37	35.79
25 m	38.07	37.27	39.81	41.10	37.36	35.78
30 m	38.26	37.37	40.01	41.20	37.54	35.88
35 m	38.31	37.40	40.26	41.40	37.53	35.91
40 m	38.38	37.37	40.33	41.30	37.52	35.91
45 m	38.28	37.37	40.15	41.30	37.50	35.87
50 m	38.39	37.44	40.46	41.60	37.58	35.92
55 m	38.40	37.39	40.57	41.50	37.62	35.91
60 m	38.42	37.51	40.75	41.60	37.68	35.96

When comparing the white sample with the black one, the difference between the two dyed surfaces is evident from the start of the simulation. In the first few minutes, the temperature rise of the black surface is faster than the one of the white surface and it heats up more. On the other hand, with regard to the probes placed below the concrete slab, between minute 20 and minute 30 there is a greater rate of increase in heating with a rate of approximately 0.55 °C per minute for the black model and 0.20 °C for the white model. At the end of the simulation, the black sample shows a temperature of approximately 48 °C and the white one 35°C. For the probes measuring the air temperature, on the other hand, at the various heights, the trend of the two tests is similar, with a marked increase in temperature in the first few minutes and then became milder during the simulation.

The black and white striped sample, on the other hand, as described above, has its sensors positioned differently from the monochrome samples. The probes placed on the black stripes in the

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

first 5 minutes record an increase of about 14°C, while the white stripes record just under 13°C. Then, in the course of the simulation, the temperature increase is ever so slight, until it reaches an average of around 52 °C for the black stripes and 51 °C for the white ones. As in the previous cases, the overheating of the dyed surface has a conduction effect on the underlying concrete slab. In the case of the concrete slab, the probes initially register a slight temperature rise, only to increase in the following minutes. In the second half of the simulation, the growth rate begins to fall with a final value of approximately 39°C. On the other hand, the temperature recorded by the probes along with the central ideal vertical of the model, at a height of 10 cm in the first 5 minutes of the simulation the temperature rises by approximately 9°C, while at a height of 20 cm an increase of almost 12 °C is recorded. From minute 10 onwards both trends become more constant. On the other hand, it can be seen that the two probes monitoring the air temperature outside the sample have a similar trend to the probe monitoring the air at 30 cm, but with lower final values. Figure 7 shows all the values recorded.

Figure 7. Temperatures were recorded by the various probes for concrete slab (CS), air, and stripes in left (l), center (c) and right (r) – stripe model.

Time	1_CS (l)	2_CS (c)	3_CS (r)	Avr. CS	9_Air (r)	10_Air 10 cm	11_Air 20 cm	12_Air 30 cm
0 m	20.11	20.20	20.25	20.19	31.19	27.85	28.17	29.03
1 m	20.18	20.20	20.29	20.22	32.96	29.51	29.79	30.63
2 m	20.22	20.30	20.33	20.28	34.18	31.06	31.55	31.87
3 m	20.31	20.30	20.41	20.34	35.95	33.47	35.2	33.67
4 m	20.43	20.40	20.51	20.45	37.16	35.62	38.18	35.19
5 m	20.57	20.50	20.65	20.57	37.76	36.94	39.74	36.15
10 m	21.88	21.90	22.03	21.94	37.18	38.4	41.14	36.78
15 m	23.77	23.90	24.19	23.95	36.83	38.64	41.46	36.81
20 m	25.72	26.10	26.32	26.05	36.68	38.83	41.58	37.00
25 m	27.58	28.20	28.48	28.09	36.69	39.09	41.76	37.12
30 m	29.40	30.20	30.48	30.03	36.68	39.25	41.91	37.19
35 m	31.08	32.00	32.37	31.82	36.51	39.08	41.64	36.95
40 m	32.72	33.80	34.13	33.55	36.63	39.19	41.67	37.04
45 m	34.27	35.40	35.83	35.17	36.58	39.26	41.73	37.07
50 m	35.74	37.00	37.42	36.72	36.71	39.27	41.82	37.17
55 m	37.13	38.40	38.88	38.14	36.68	39.38	41.85	37.18
60 m	38.38	39.70	40.18	39.42	36.73	39.42	41.89	37.18

	Black stripes				White stripes			
Time	4_Stripe (l)	6_Stripe (c)	8_Stripe (r)	Avr. black	5_Stripe (l)	7_Stripe (r)	Avr. white	ΔT (black-white)
0 m	22.17	22.10	21.90	22.06	22.30	22.01	22.16	-0.10
1 m	22.90	22.90	22.70	22.83	23.10	22.79	22.95	-0.11
2 m	24.22	24.20	24.10	24.17	24.50	24.19	24.35	-0.17
3 m	28.13	27.90	28.90	28.31	28.10	28.07	28.09	0.23
4 m	32.11	31.60	34.20	32.64	31.80	32.14	31.97	0.67
5 m	34.91	34.20	38.00	35.70	34.30	35.06	34.68	1.02
10 m	40.12	39.10	45.40	41.54	39.10	40.86	39.98	1.56
15 m	41.90	40.90	47.30	43.37	40.80	42.78	41.79	1.58
20 m	43.20	42.30	48.70	44.73	42.10	44.28	43.19	1.54
25 m	44.50	43.70	49.90	46.03	43.40	45.68	44.54	1.49
30 m	45.73	45.00	51.00	47.24	44.60	46.87	45.74	1.51
35 m	46.64	46.00	52.00	48.21	45.50	47.92	46.71	1.50
40 m	47.50	46.80	53.00	49.10	46.30	48.88	47.59	1.51
45 m	48.46	47.80	53.90	50.05	47.20	49.82	48.51	1.54
50 m	49.23	48.60	54.90	50.91	47.90	50.83	49.37	1.55
55 m	50.08	49.50	55.60	51.73	48.90	51.65	50.28	1.45
60 m	50.81	50.30	56.40	52.50	49.50	52.56	51.03	1.47

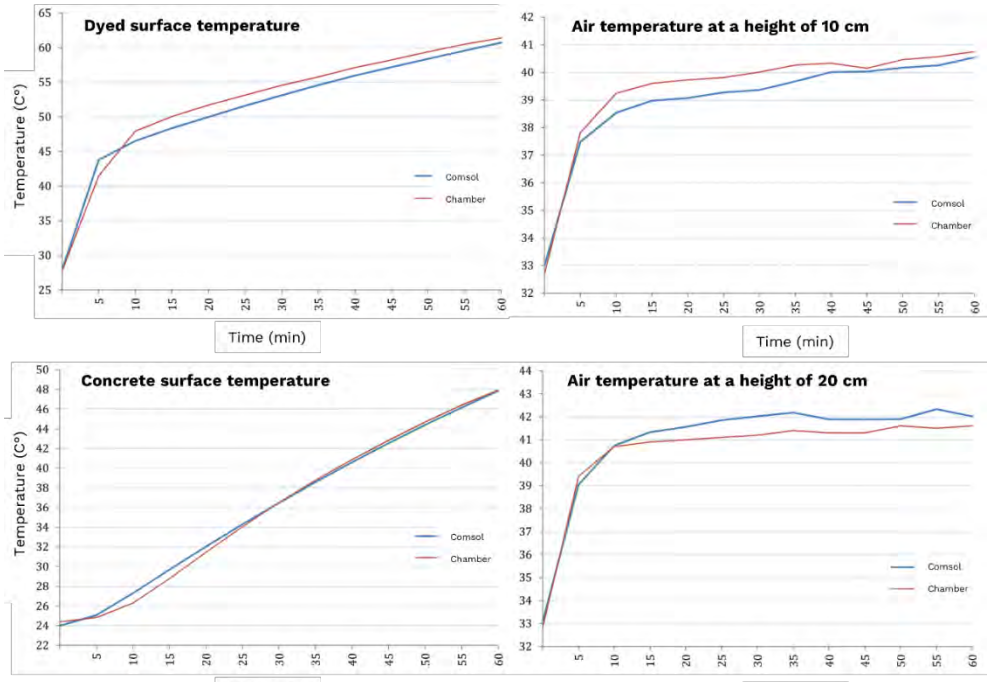
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4.2 Model validation

Validation of the model is one of the aims of this research work. As a matter of fact, the first result to check is the correspondence between the temperature values recorded by the probes during the tests in the climatic chamber and those calculated by the software during the simulation to ensure the realism and correctness of the virtual model. It is therefore necessary to refer to the average temperatures of the dyed surface, the concrete slab and the air temperature measured at the various points.

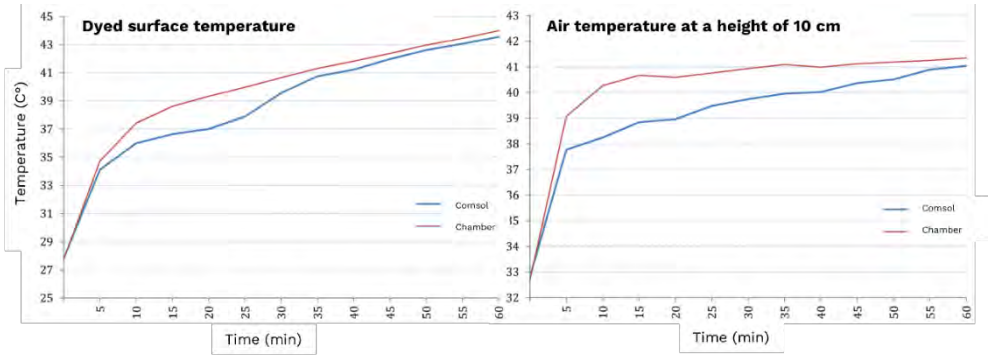
Having found that the temperatures recorded for the various samples in some time ranges are the same and coincide while in other cases they differ slightly, as shown in Figure 8, the model is validated.

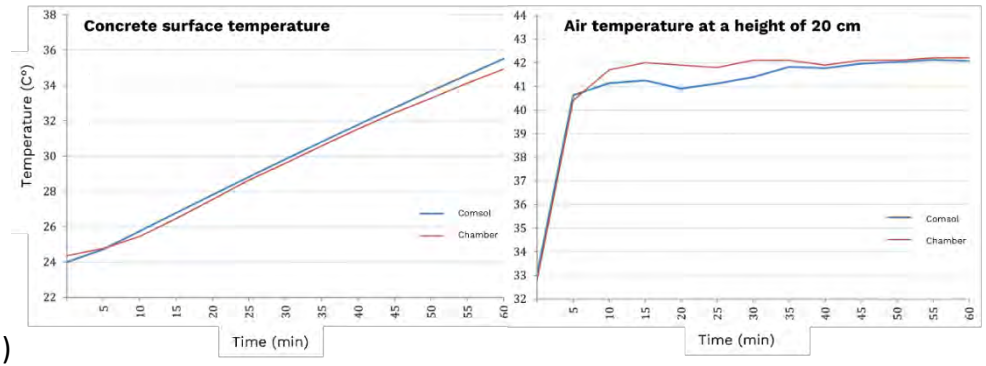
Figure 8. Model validation for black model (a), white model (b) and stripe model (c).



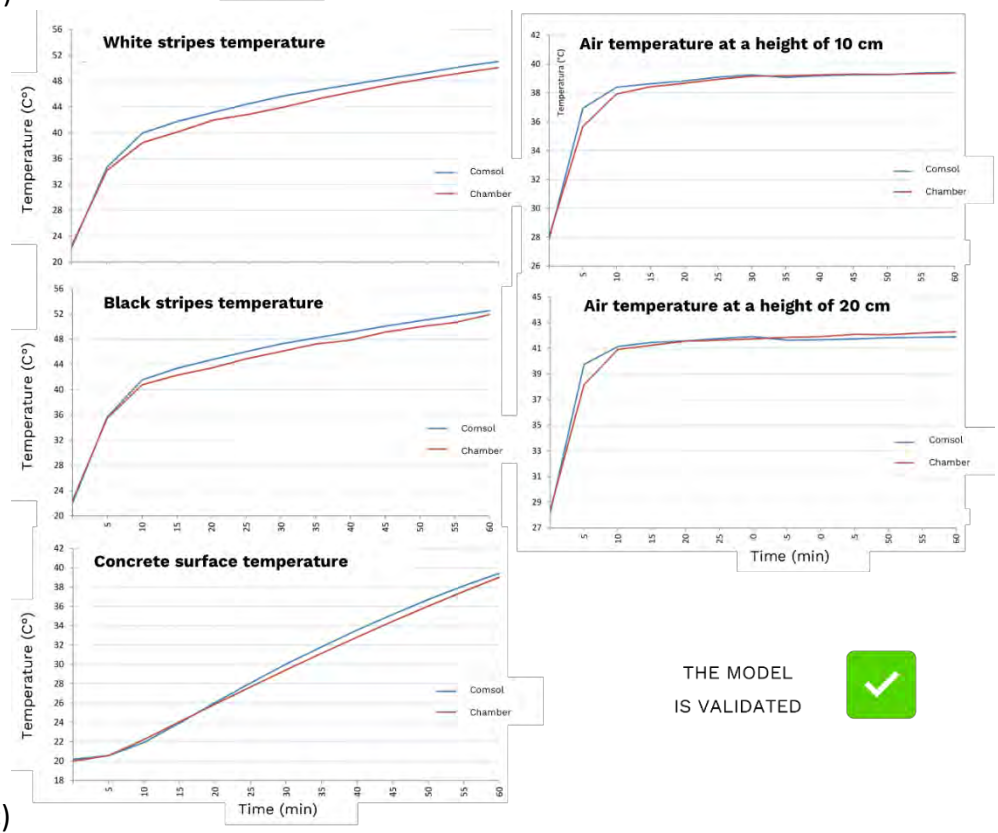
a)

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.





b)



c)

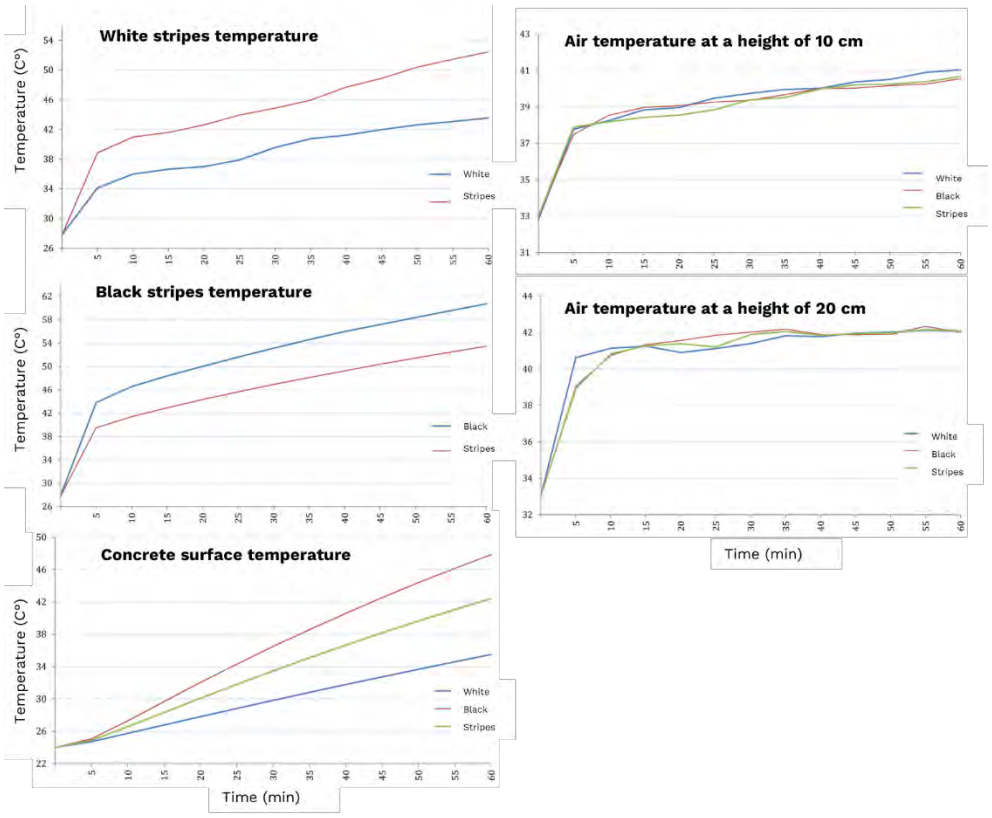
Next, we compared the results obtained with the striped sample against the two monochrome samples through Comsol Multiphysics. The temperatures measured are compared on the white dye of the monochrome white and striped model, the black dye of the monochrome black and striped model and the temperatures of the concrete slab and air.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

As far as the white surfaces are concerned, it is possible to notice that the white parts of the striped sample heat up more compared to the monochrome white surface. For black surfaces, on the other hand, the graphs obtained show a smaller temperature difference, but still the surfaces of the monochrome model heat up more than the striped one.

The heating of the upper surface is also reflected in the lower concrete slab where the temperature trend in the concrete below the striped surface lies between the graphs of the white and black models. With regard to the temperatures recorded in the air at a height of 10 cm and 20 cm above the colored surface, the trends of the three models, while taking into account the fluctuations of each, are substantially similar.

Figure 9. Compared results.



4.3 Fluid-dynamics analysis

To perform the fluid-dynamic analysis, we reused the software to understand how different thermal trends trigger natural convective motions in the air adjacent to the various samples. In particular, the directions and the verses of the convective motions that are triggered were investigated for each model.

The 3 models were cut by a series of vertical planes parallel to the coordinate plane yz. It is possible to evaluate that at the different coordinates of x, the closer we move to the center of the model, the more the convective motions become accentuated as the air velocity increases.

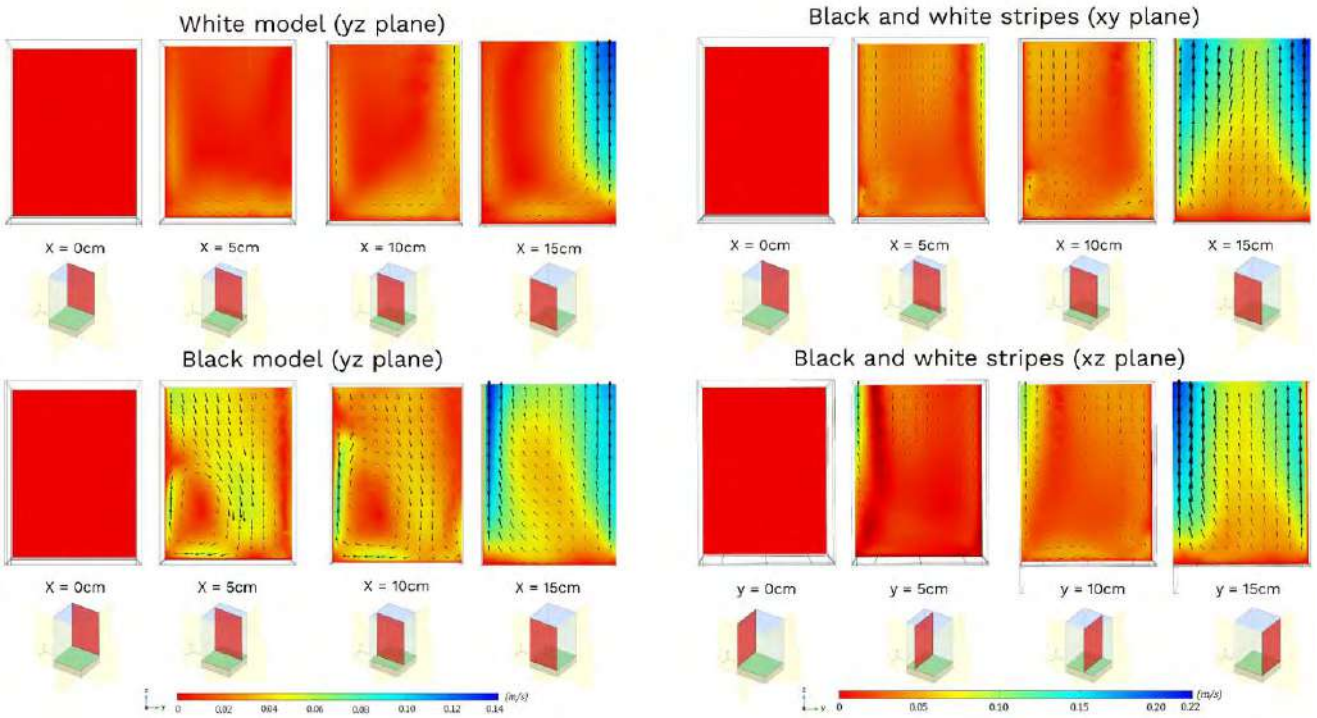
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In particular, for the white model at the x-coordinate = 0, the air is stationary as it is characterized by the condition of null flow. At the x = 5 cm coordinate, a small convective motion begins to occur with the air flowing downwards and then running horizontally parallel to the white dyed surface and rising upwards in the central zone of the model. At the x = 10 cm coordinate, the motion becomes more pronounced, while at the x = 15 cm coordinate the direction and modulus of the downward and horizontal velocities remain essentially unchanged but the rapidity of the upward motion intensifies. Also along the xz planes, the situation is similar.

As far as the black model is concerned, the motions become more marked and complex. At 5 cm from the edge of the sample, a circular convective motion sets in at the bottom left while towards the center of the model the air rises in a similar way to what happens in the white sample. At 15 cm, the circular convective motion is no longer present and the air from below convects upwards.

In the striped model, which reaches intermediate temperatures between the two monochrome versions, the air currents behave accordingly, i.e. they are not as elementary and simple as in the white model, but neither do they reach the complexity of those in the black sample. Also in this case, at the x = 0 coordinate there is zero velocity, while at x = 5 cm (above the black line) the air penetrates downwards, with the exception of the area closest to the center where a thin ascending column is created, while at the bottom left there is a small cell of circular convective motion, characterized by very low velocities. Finally, in the plane of coordinate x = 15 cm (above a black strip), it can be observed that from the whole of the dyed surface the air moves upwards, and exits the volume touching the highest velocities at the center of the model. In the vertical planes relative to the xz plane, similar situations are observed.

Figure 10. Fluid dynamics analysis.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5. Conclusion and future developments

From the analysis of the various results obtained from the various tests carried out, in the light of the comparison of the two monochrome and striped samples, it is possible to state that the alternation of black and white colors does not produce any significant effects on the surface temperatures and the surrounding air in such a model. On the other hand, however, it cannot be ruled out that models made with different stratigraphy or materials with other physical characteristics or alternative configurations may lead to different results. In line with this, as a future development one could evaluate the substitution of the materials used and assess whether different results are obtained with the same stripes, thus analyzing the influence of one material over another.

From the fluid-dynamic analysis, we found that the air in the black model reaches the highest velocities near the synthetic glass wall, whereas in the striped model this occurs towards the center of the sample. In general, higher velocities were analyzed for the air in the black sample. As far as the motions are concerned, a circular convective motion is observed in the white model while in the other two samples, the air movement is only upward, although, in the striped sample, the air outflow is more evenly distributed over the entire development of the model although the two ascending columns are more pronounced at the ends.

As a future study, we can think to produce a grey model to compare with a model painted 50% white and 50% black to assess whether there is a real advantage from alternating these two colors. In addition, we might consider changing the geometry of the model by studying different configurations, e.g. widening the geometry of the stripes and analyzing the effects.

References

[1] European Commission, “Energy performance of buildings directive,” 2018. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en.

[2] Camera dei deputati, Servizio Studi, and XVIII Legislatura, “Governance europea e nazionale su energia e clima,” 2021.

[3] S. Stevanovi, “Optimization of passive solar design strategies : A review,” vol. 25, pp. 177–196, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.04.028.

[4] D. D. Agostino and L. Mazzarella, “What is a Nearly zero energy building ? Overview, implementation and comparison of definitions,” *J. Build. Eng.*, vol. 21, no. October 2018, pp. 200–212, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2018.10.019.

[5] P. Moran, J. O. Connell, and J. Goggins, “Sustainable energy efficiency retrofits as residenial buildings move towards nearly zero energy building (NZEB) standards,” *Energy Build.*, vol. 211, p. 109816, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.109816.

[6] G. Vox, I. Blanco, and E. Schettini, “Green façades to control wall surface temperature in buildings,” *Build. Environ.*, vol. 129, no. November, pp. 154–166, 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.12.002.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[7] V. L. Castaldo, A. L. Pisello, C. Piselli, C. Fabiani, F. Cotana, and M. Santamouris, “How outdoor microclimate mitigation affects building thermal-energy performance: A new design-stage method for energy saving in residential near-zero energy settlements in Italy,” *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 920–935, 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.090.

[8] P. A. Mirzaei, “Recent challenges in modeling of urban heat island,” vol. 19, pp. 200–206, 2015.

[9] C. Heaviside, H. Macintyre, and S. Vardoulakis, “The Urban Heat Island : Implications for Health in a Changing Environment,” pp. 296–305, 2017, doi: 10.1007/s40572-017-0150-3.

[10] I. Mazzoleni, *Architecture follows nature - Biomimetic principles for innovative design*. 2017.

[11] H. Aldersey-Williams, “Towards biomimetic architecture,” *Nat. Mater.*, 2004.

[12] E. B. Kennedy, D. C. Fecheyr-Lippens, B.-K. Hsiung, and P. H. Niewiarowski, “Biomimicry: A Path to Sustainable Innovation,” *Des. Issues*, vol. 31, 2015, doi: doi: 10.1162/DESI_a_00339.

[13] G. A. N. Radwan and N. Osama, “Biomimicry, an Approach, for Energy Effecient Building Skin Design,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 34, pp. 178–189, 2016, doi: 10.1016/j.proenv.2016.04.017.

[14] M. I. Nkandu and H. Z. Alibaba, “Biomimicry as an Alternative Approach to Sustainability,” *Bull. Polytech. Inst. Jassy, Constr. Archit. Sect. 8(1)*, vol. 8, no. 1, pp. 1–11, 2018, doi: 10.5923/j.arch.20180801.01.

[15] T. Caro, *Zebra Stripes*. University of Chicago Press, 2016.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Materiali termoisolanti sostenibili: analisi sperimentale delle prestazioni termiche di un sistema di isolamento a cappotto con pannelli in fibra di legno

Marta Roncone[1,*], Francesco Asdrubali[1], Paola Marrone[2] e Claudia Guattari[3]

[1] Dipartimento di Ingegneria Industriale, Elettronica e Meccanica, Università degli Studi Roma Tre
[2] Dipartimento di Architettura, Università degli Studi Roma Tre
[3] Dipartimento di Filosofia, Comunicazione e Spettacolo, Università degli Studi Roma Tre

* Marta Roncone. E-Mail: marta.roncone@uniroma3.it

Abstract: Negli ultimi decenni l'attenzione verso i problemi energetici ed ambientali è cresciuta in modo rilevante, così come lo sviluppo di politiche nazionali ed internazionali volte a garantire un futuro sostenibile per il pianeta. Nel settore delle costruzioni, una delle migliori e più diffuse strategie di efficientamento energetico edilizio consiste nella coibentazione termica realizzata mediante l'utilizzo di pannelli isolanti, spesso montati a cappotto esterno. Tra questi, la fibra di legno si distingue come materiale isolante dalla struttura naturale, ecosostenibile e biodegradabile, proveniente dal riciclo del legno di scarto da segherie. Nel presente lavoro è stata condotta una campagna sperimentale presso il cantiere scuola del CEFMECTP (Organismo paritetico per la formazione e la sicurezza in edilizia di Roma e provincia) con la finalità di caratterizzare termicamente un piccolo edificio interamente isolato con pannelli in fibra di legno. E' stata installata in situ un'apposita strumentazione comprensiva di sonde di temperatura superficiale e dell'aria interne ed esterne, nonché piastre termoflussimetriche disposte sulle pareti in esame. Le prestazioni dell'edificio isolato sono state confrontate con quelle di un edificio limitrofo "di riferimento", privo di alcun tipo di isolamento, quantificando i due diversi comportamenti dal punto di vista termico. La sperimentazione ha evidenziato numerosi vantaggi forniti dalla soluzione ecosostenibile dei pannelli isolanti in fibra di legno. Infatti, questi ultimi garantiscono ottime prestazioni termiche grazie a migliori valori in termini di attenuazione e sfasamento rispetto a quelli ottenuti per l'edificio di riferimento e a una trasmittanza termica inferiore, garantendo pertanto una maggiore stabilità della temperatura dell'aria interna e delle performance particolarmente favorevoli al risparmio energetico.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Keywords: fibra di legno, materiali sostenibili, edilizia sostenibile, comportamento termico, campagna sperimentale.

1. Introduzione

I gas climalteranti (GHG), favorendo l'effetto serra, sono considerati oggi come i principali responsabili del surriscaldamento globale e del conseguente cambiamento climatico (CC) [1].

In questo contesto, gli edifici giocano un ruolo fondamentale, essendo responsabili a livello mondiale di una percentuale significativa dei consumi totali di energia, producendo circa il 40% di emissioni di CO_2 e il 38% dei rifiuti. Anche a livello europeo i dati risultano preoccupanti, determinando un consumo energetico pari a circa il 40% e la produzione di circa il 36% delle emissioni di gas a effetto serra, dovute principalmente alla necessità di riscaldare e raffrescare gli ambienti, alla produzione dei materiali per la costruzione e all'utilizzo degli stessi [2-4].

Migliorare l'efficienza energetica del settore delle costruzioni ed i suoi consumi energetici, favorire l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, rendere più sostenibili i processi di produzione e trasporto dei materiali edili sono oggi dunque delle misure urgenti e cruciali in un'ottica di decarbonizzazione per conseguire l'ambizioso obiettivo di neutralità in termini di emissioni di carbonio entro il 2050, così come definito nel Green Deal europeo [5-12].

Tra le possibili azioni incentivate, anche da accordi internazionali, troviamo le strategie di riduzione dei consumi energetici degli edifici attuabili attraverso il miglioramento delle prestazioni termiche dell'involucro edilizio in termini sia di riduzione delle dispersioni termiche sia di incremento dello sfasamento termico.

In quest'ottica, l'utilizzo di materiali isolanti naturali e sostenibili potrebbe rivelarsi una soluzione vincente. In particolare, la fibra di legno risulta uno degli eco-materiali più utilizzati in edilizia. Infatti, è un prodotto di origine vegetale completamente riciclabile e biocompatibile, utilizzato principalmente come materiale isolante, sia termico che acustico. I pannelli in fibra di legno si contraddistinguono per le eccellenti qualità termoisolanti, la biodegradabilità e il basso impatto ambientale, la leggerezza e la durevolezza. Sul mercato sono disponibili prodotti contenenti fibre di legno da foreste certificate e dotati di etichettature ambientali quali la Environmental Product Declaration (EPD) [13-18].

Lo studio, condotto attraverso una sperimentazione su un caso reale, si prefigge l'obiettivo di analizzare le prestazioni termiche di un materiale termoisolante sostenibile, la fibra di legno, e le sue applicazioni mediante pannelli di spessore contenuto per interventi a cappotto esterno in regioni caratterizzate da un clima mite.

Dunque, presso il cantiere scuola del CEFMECTP -Organismo paritetico per la formazione e la sicurezza in edilizia di Roma e provincia- è stata condotta una sperimentazione su un piccolo edificio interamente isolato con pannelli in fibra di legno sia in regime estivo che invernale.

Il paper presenta la seguente struttura: sezione 2, descrizione degli obiettivi e della metodologia; sezione 3 risultati e discussione; sezione 4, conclusioni.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Obiettivi dello studio e Metodologia

In questo studio è stata condotta una campagna sperimentale di lungo periodo su due identici prototipi edilizi in muratura, di cui uno coibentato con uno strato d'isolante in fibra di legno, con l'obiettivo di confrontare e quantificare i diversi comportamenti termici delle pareti ed analizzare i benefici derivanti dall'installazione del materiale isolante naturale, ecosostenibile e biodegradabile.

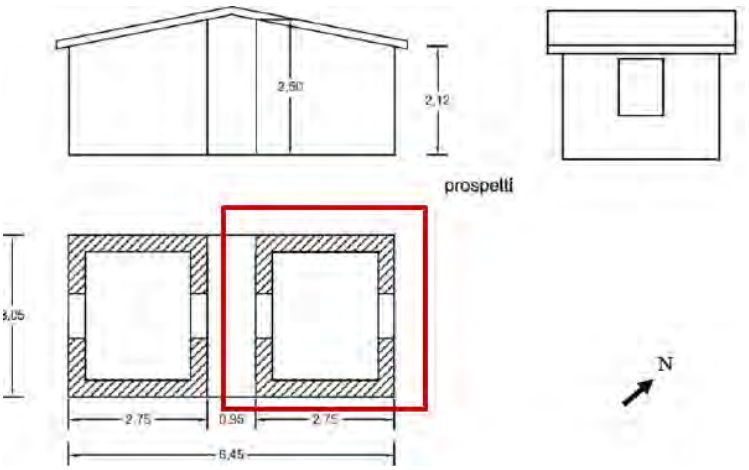
Tale sperimentazione, condotta con la collaborazione dei Dipartimenti di Architettura e Ingegneria dell'Università degli Studi Roma Tre e del CEFMECTP, Organismo paritetico per la formazione e la sicurezza in edilizia di Roma e provincia, è avvenuta sul piazzale esterno del cantiere scuola del CEFMECTP situato a Pomezia (Roma, zona climatica D) (Fig. 1).

Figura 1. Localizzazione dell'area di cantiere.



Infatti, in quest'area esterna sorgono alcuni edifici che si contraddistinguono per le loro dimensioni contenute e per la stessa modalità costruttiva muraria caratterizzata da soletta in calcestruzzo armato e blocchi di tufo con rivestimento interno ed esterno mediante intonaco cementizio (Fig. 2).

Figura 2. Geometria degli edifici test utilizzati nello studio.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

I due edifici esistenti usati come strutture di supporto per la sperimentazione si diversificano per la presenza, in uno dei due casi, di un cappotto esterno realizzato mediante l'utilizzo di pannelli isolanti in fibra di legno dello spessore di 8 cm applicati sulle pareti perimetrali; l'edificio test privo di isolamento è stato invece utilizzato come struttura di riferimento e confronto (Fig. 3).

Figura 3. Edificio test isolato con pannelli in fibra di legno (a) e di riferimento (b).


(a)

(b)

I pannelli monostrato, omogenei, rigidi e idrofughi in fibra di legno selezionati per la sperimentazione appartengono alla casa produttrice 3THERM [19] e risultano prodotti in Germania con una composizione di abete bianco e rosso riciclato di pre-consumo proveniente dalle foreste del Baden-Württemberg. Nello specifico, i pannelli semirigidi, prodotti a secco ed intonacabili "S WALL 140" utilizzati per la coibentazione termica presentano dimensioni pari a 1250 mm x 600 mm con spessore di 80 mm e sono caratterizzati da una densità volumetrica pari a 140 kg/m³, da una conduttività termica pari a 0,040 W/mK e da un calore specifico pari a 2100 J/kgK.

Inoltre, tali pannelli si distinguono sul mercato per le certificazioni ottenute, tra le quali il marchio di bioedilizia NaturePlus [20], l'elevata resistenza meccanica che conferisce alla facciata una stabilità garantita nel tempo ed il rispetto dei Criteri Ambientali Minimi [21], tra i quali: "Basse emissioni dei materiali" (art. 2.3.5.5); "Materia recuperata e riciclata" (art.2.4.1.2); "Assenza di sostanze pericolose" (art. 2.4.1.3); "Sostenibilità e legalità del legno" (art. 2.4.2.4); "Criteri per gli isolanti termici ed acustici" (art. 2.4.2.9) ed "Utilizzo di materie prime rinnovabili" (art. 2.6.4).

I pannelli in fibra di legno utilizzati in questo studio oltre ad essere sostenibili ed attenti all'impatto ambientale, possiedo anche la Dichiarazione Ambientale di Prodotto -Environmental Product Declaration (EPD)- dell'Institut Bauen und Umwelt e.V. [22], in accordo con la ISO 14025:2006 [23] e la EN 15804 [24]. I pannelli si caratterizzano per valori contenuti di potenziale di riscaldamento globale (GWP -Global Warming Potential-) pari a -1,1346 $kgC0_2$ eq/kg, consumo totale di risorse energetiche non rinnovabili (PENRT -Primary Energy Non-Renewable, Total-), pari a 9,76 MJ/kg, e rinnovabili (PERT -Primary Energy Renewable, Total-), pari a 29,83 MJ/kg.

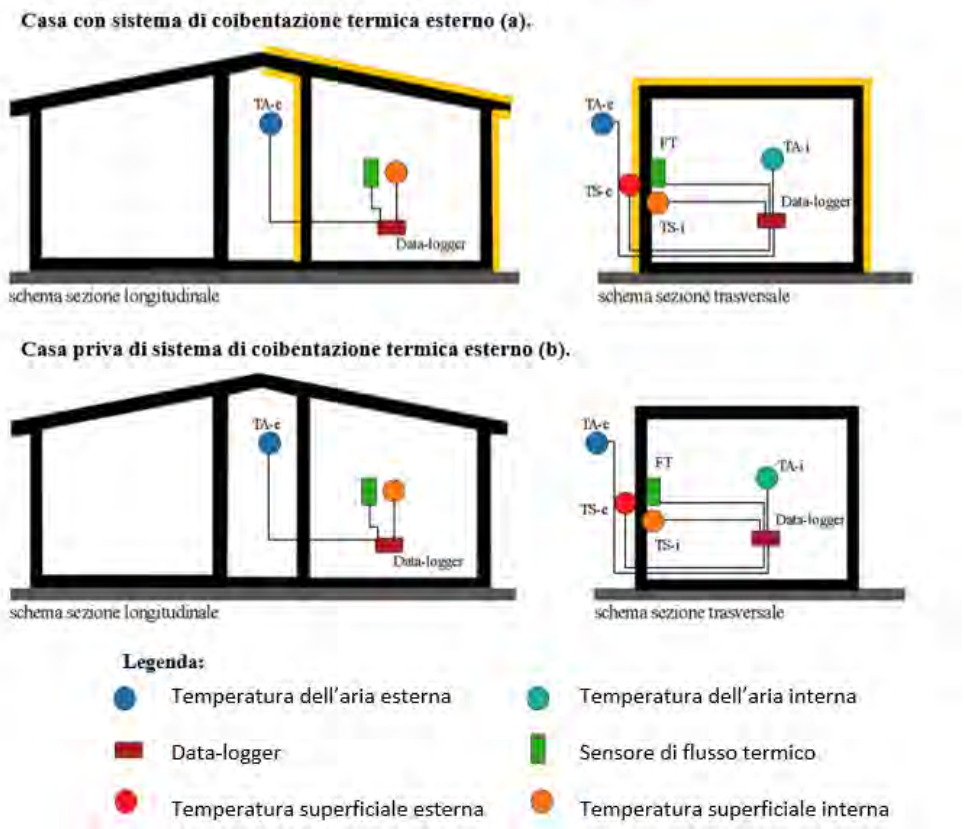
Per caratterizzare dal punto di vista termico l'edificio coibentato con pannelli in fibra di legno e quello di riferimento, sono state eseguite misure del flusso termico (q) e, dunque, di trasmittanza termica (U), oltre alla valutazione dell'andamento delle temperature esterne ed interne alle due

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

strutture e delle temperature superficiali interne ed esterne delle pareti esposte a Nord-Ovest per il calcolo dei fattori di attenuazione (DF) e sfasamento (PS).

La strumentazione installata in situ e rappresentata in Figura 4 risulta comprensiva di sonde di temperatura dell'aria disposte internamente ed esternamente ai due edifici di studio mentre sulle due pareti esposte a Nord-Ovest sono state istallate le sonde della temperatura superficiale (interne ed esterne all'edificio) e piastre termoflussimetriche. Tutti i sensori sono stati inoltre opportunamente collegati al rispettivo data-logger per la registrazione dati.

Figura 4. Schema di misura utilizzato nello studio.



La campagna sperimentale è stata condotta sia in regime estivo, nel periodo compreso tra luglio 2021 ed ottobre 2021, sia in quello invernale, tra novembre 2021 e febbraio 2022.

In particolare, nel regime invernale sono stati analizzati i comportamenti termici dei due casi di studio considerando differenti scenari in termini di tempi di accensione e spegnimento del sistema di riscaldamento, realizzato mediante l'utilizzo di termoventilatori elettrici schermati per evitare effetti disturbanti diretti sui sensori. In tal caso la sperimentazione è avvenuta sia con sistemi di riscaldamento all'interno dei due casi di studio mantenuti ininterrottamente accesi (scenario denominato "On"), sia valutando al termine della fase di riscaldamento la successiva fase di raffreddamento delle due strutture (fase di "transizione"), sia mantenendo i sistemi di riscaldamento spenti all'interno dei due edifici i sistemi di riscaldamento (scenario definito di "*Free-floating* ").

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Nella fase di elaborazione dei dati acquisiti lo sfasamento delle onde termiche (PS -Phase Shift-) è stato determinato come differenza temporale fra l'ora di registrazione della massima temperatura superficiale esterna rispetto all'ora con la massima temperatura superficiale interna registrata (1).

$$PS = h_{Tsup_max_ext.} - h_{Tsup_max_int.} \quad (1)$$

Invece, l'attenuazione delle onde termiche (DF- Decrement Factor) è stata calcolata come differenza tra la temperatura superficiale interna massima ($Tsup_max_{int.}$) rispetto a quella media ($Tsup_media_{int.}$), rapportata alla differenza tra la temperatura superficiale esterna massima ($Tsup_max_{est.}$) rispetto a quella media ($Tsup_media_{est.}$), ovvero secondo quanto definito nella seguente espressione (2):

$$DF = \left[\frac{Tsup_max_{int.} - Tsup_media_{int.}}{Tsup_max_{est.} - Tsup_media_{est.}}\right] (2)$$

Infine, la misura delle trasmittanze termiche delle pareti è avvenuta in accordo con la norma ISO 9869-1 [25]. I dati acquisiti sono stati elaborati attraverso il metodo delle medie progressive, applicando la relazione seguente (3):

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} qj}{\sum_{j=1}^{n} (T_{air-int} - T_{air-ext})_j} \quad (3)$$

in cui $T_{air-int}$ e $T_{air-ext}$ sono rispettivamente la temperatura dell'aria interna ed esterna all'edificio analizzato mentre q_j è il flusso termico specifico.

Di seguito vengono presentati e commentati i risultati della sperimentazione.

3. Risultati e discussione

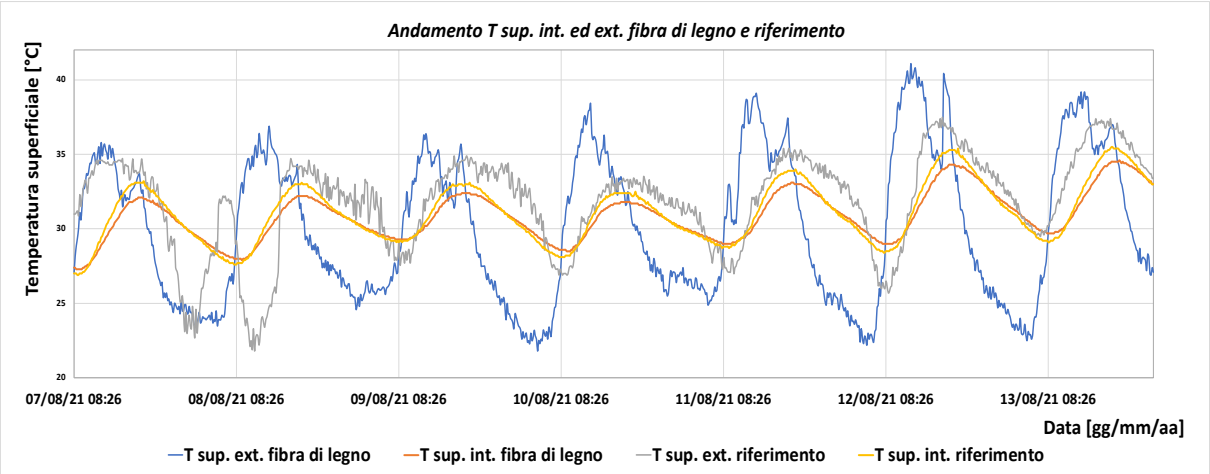
3.1. Sperimentazione estiva

La prima parte della campagna sperimentale è avvenuta nel periodo estivo compreso tra il mese di luglio e quello di ottobre 2021 in regime di puro "*free-floating* ", ossia in assenza di sistemi di raffrescamento nei due edifici di studio. In questa fase, l'elaborazione dei dati acquisiti si è focalizzata principalmente nell'individuazione delle attenuazioni e degli sfasamenti medi nell'intervallo di misurazione. In particolare, in Figura 5 vengono riportati gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne ai due edifici test registrate in una settimana caratterizzata da temperature particolarmente elevate (7-13 agosto 2021).

La Fig. 5 evidenzia come le temperature superficiali interne risultino assumano nel peridio di registrazione un andamento più stabilizzato e da fluttuazioni più contenute rispetto a quanto si verifica per le temperature superficiali esterne dei due edifici di studio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 5. Andamento della temperatura superficiale interna ed esterna all'edificio coibentato e di riferimento (periodo compreso tra il 7 ed il 13 agosto 2021).



La Tabella 1 riporta i valori medi mensili dei fattori di attenuazione (DF) e sfasamento (PS). Sia le attenuazioni che gli sfasamenti sono stati calcolati rispetto a un intervallo giornaliero, mentre il valore finale medio è stato determinato come media delle attenuazioni e degli sfasamenti giornalieri individuati.

Tabella 1. Valori medi dei fattori di attenuazione (DF) e sfasamento (PS) ottenuti dal monitoraggio in regime passivo.

Mese	Edificio	Attenuazione (DF)	Sfasamento (PS)
Luglio 2021	Isolato	0,3	5 h 32 m
	Riferimento	0,7	3 h 13 m
	Scarto %	52%	2 h 20 m
Agosto 2021	Isolato	0,2	5 h 06 m
	Riferimento	0,9	3 h 23 m
	Scarto %	75%	2 h 01 m
Settembre 2021	Isolato	0,3	5 h 10 m
	Riferimento	0,6	3 h 27 m
	Scarto %	48%	1 h 43 m
Ottobre 2021	Isolato	0,3	5 h 11 m
	Riferimento	0,7	2 h 54 m
	Scarto %	58%	2 h 17 m
Valori medi		60 %	2 h

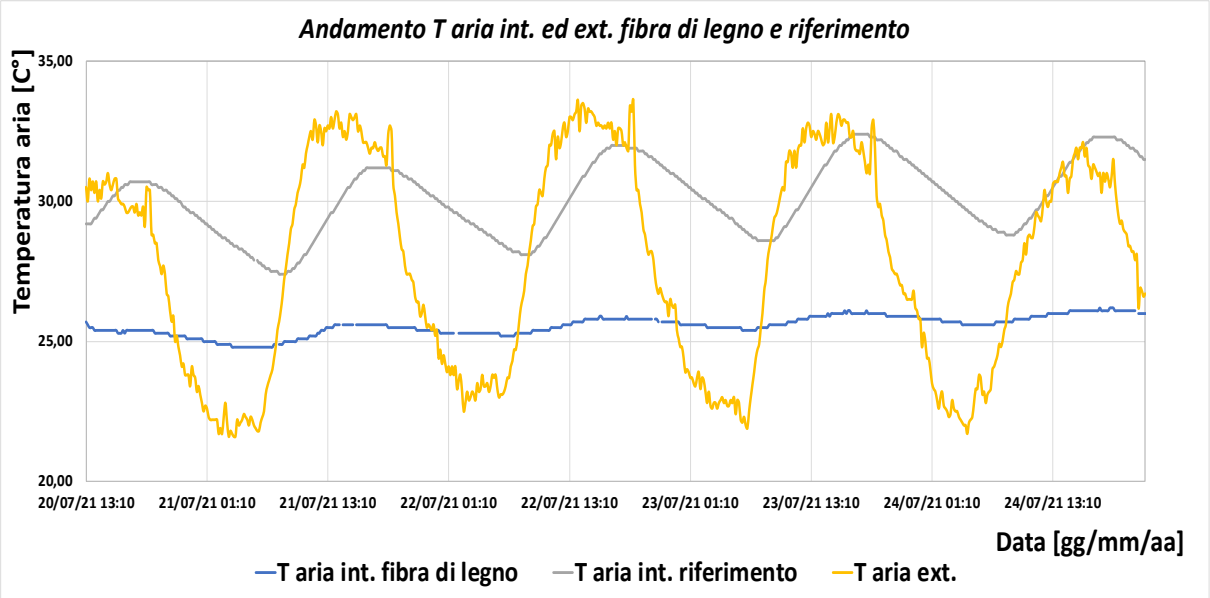
Dall'analisi è emersa una riduzione del fattore di attenuazione del 60 % nella struttura coibentata rispetto a quella di riferimento, dimostrando in tal modo una conseguente maggiore stabilità della temperatura dell'aria interna. Invece, relativamente al fattore di sfasamento, sono stati registrati valori medi della struttura test isolata superiori di circa 2 h rispetto a quelli della struttura di riferimento.

Si osserva pertanto il miglioramento del comportamento dinamico della struttura a seguito dell'installazione di uno strato di fibra di legno, con impatti significativi anche nei confronti del comfort interno.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Successivamente, si sono analizzati gli andamenti delle temperature dell'aria interna ed esterna ai due edifici. In Figura 6 ne è rappresentato un esempio relativo al periodo compreso tra il 20 ed il 24 agosto 2021 da cui è possibile osservare in modo immediato la maggior stabilità dell'aria interna della struttura isolata con pannelli in fibra di legno oltre alla presenza di valori più bassi, differentemente da quanto avviene nell'edificio di riferimento, in cui le oscillazioni risultano molto accentuale e prossime ai valori di picco della temperatura dell'aria esterna.

Figura 6. Andamento della temperatura dell'aria interna ed esterna all'edificio coibentato e di riferimento (periodo compreso tra il 20 ed il 24 agosto 2021).



Inoltre, considerando due giornate particolarmente calde del mese di luglio (22 luglio 2021) e di agosto (12 agosto 2021), si è voluto analizzare la differenza tra la temperatura massima esterna e quella interna ai due edifici isolati (Tab. 2).

Tabella 2. Confronto tra i valori di temperatura massima esterna ed interna ai due edifici test.

Giorno	Temperatura [°C]	Edificio isolato	Edificio riferimento
22 luglio 2021	Temp. est. max.	32,9	
	Temp. int. max.	26,0	32,4
	delta T [°C]	6,9	0,5
12 agosto 2021	Temp. est. max.	35,2	
	Temp. int. max.	27,6	34,3
	delta T [°C]	7,6	0,9
Valori medi		7,3	0,7

Come si può notare dalla Tabella 2, mediamente è stata registrata una differenza di temperatura pari a 7,3 °C tra la temperatura dell'aria esterna e quella dell'edificio isolato, mentre quella registrata per l'edificio di riferimento presenta un valore decisamente più basso, pari a 0,7 °C, confermando l'ottima capacità isolante ed inerzia termica ottenuta mediante l'ausilio dei pannelli in fibra di legno selezionati.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Inoltre, con la finalità di analizzare la stabilità termica registrata nel giorno i-esimo, è stata calcolata anche la differenza di temperatura interna registrata nei due edifici test di studio.

La Figura 7 riporta l'andamento della temperatura dell'aria interna ed esterna all'edificio coibentato e di riferimento nel periodo compreso tra il 7 ed il 13 agosto 2021, evidenziando le differenze di temperatura dell'aria interna del riferimento (in verde) e della struttura isolata (in rosso), caratterizzate da valori rispettivamente pari a 5°C e a 0,3°C.

Invece, in Tabella 3 si riportano le variazioni di temperatura indoor nei due edifici in alcuni giorni tipo di ogni mese, determinando complessivamente nel periodo di registrazione estiva variazioni della temperatura interna pari a 0,5 °C per l'edificio isolato e di 4°C per quello di riferimento, evidenziando, anche in assenza di alcun sistema di raffrescamento, il raggiungimento di condizioni di stabilità dell'aria e confort interno della struttura isolata.

Figura 7. Andamento della temperatura dell'aria interna ed esterna all'edificio coibentato e di riferimento (periodo compreso tra il 7 ed il 13 agosto 2021).

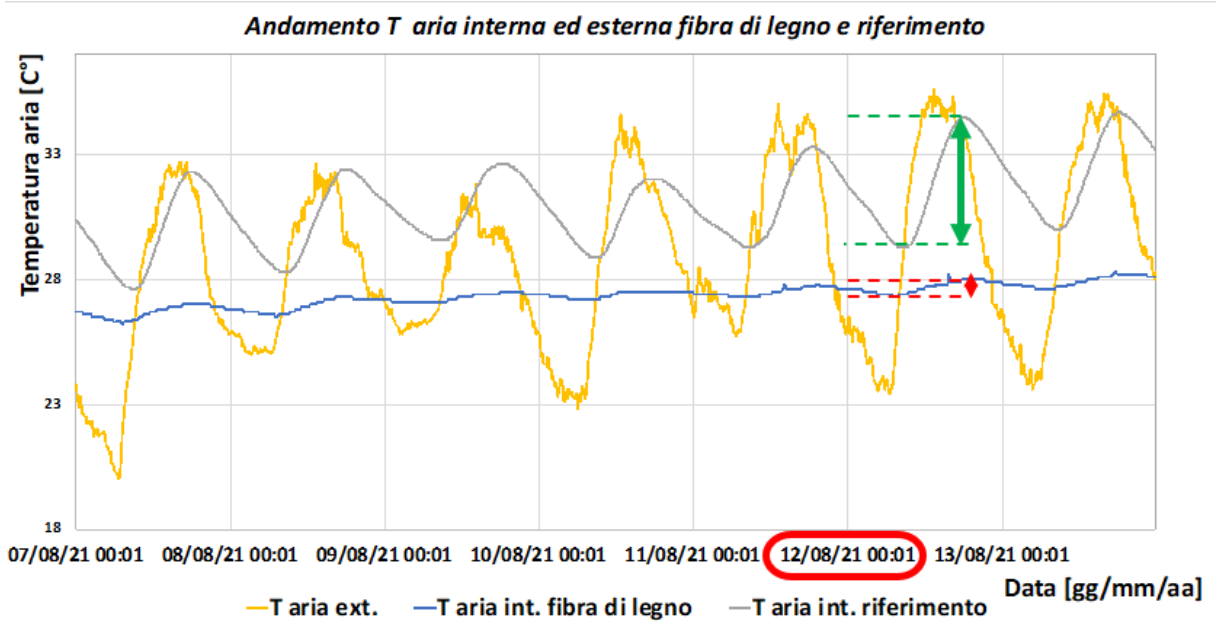


Tabella 3. Confronto tra le variazioni di temperatura dell'aria interna nei due edifici test.

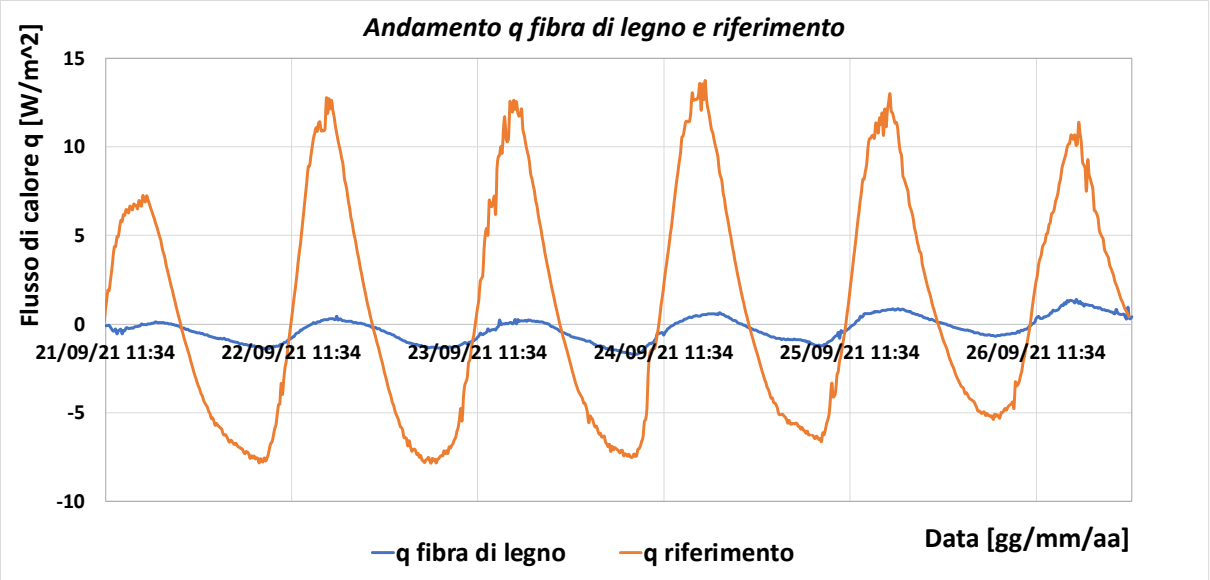
delta T [°C]		
Giorno	**Edificio isolato**	**Edificio riferimento**
22 Luglio 2021	0,6	3,8
12 Agosto 2021	0,3	5,0
24 Settembre 2021	0,7	3,7
3 Ottobre 2021	0,4	3,0
Valori medi	0,5	4,0

Infine, La Figura 8 riporta l'andamento del flusso termico che attraversa la parete esposta a Nord-Ovest sia nell'edificio isolato che in quello di riferimento nel periodo compreso tra il 21 settembre ed il 27 settembre 2021.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

I pannelli in fibra di legno permettono una riduzione del flusso termico di circa il 90 % ed una minore ampiezza di oscillazione nell'arco temporale selezionato, garantendo una maggiore stabilità della temperatura nel tempo, conseguentemente, maggiori livelli di comfort indoor.

Figura 8. Andamento del flusso termico dell'edificio coibentato e di riferimento.



Dunque, dall'analisi e dal confronto dei dati ottenuti dalla campagna sperimentale nel periodo estivo si è potuto osservare:

- un miglioramento complessivo del comportamento dinamico della struttura isolata, testimoniato sia dall'aumento dello sfasamento termico medio di circa 2 ore, sia dalla riduzione dell'attenuazione media del 60% rispetto alla casa di riferimento;
- mediante la misurazione della temperatura media dell'aria è stato registrato il raggiungimento di valori prossimi a quelli di confort termico nella casa isolata. Tale condizione è stata raggiunta in assenza di impianto di raffrescamento, confermandone il semplice conseguimento in presenza di accensione degli impianti;
- la casa isolata ha evidenziato una significativa stabilità della temperatura dell'aria interna con una differenza media di 0,5 °C rispetto alla differenza di 4 °C della casa di riferimento;
- una riduzione media di circa il 90% del flusso di calore attraverso la parete della casa isolata rispetto a quella di riferimento.

3.2. Sperimentazione invernale

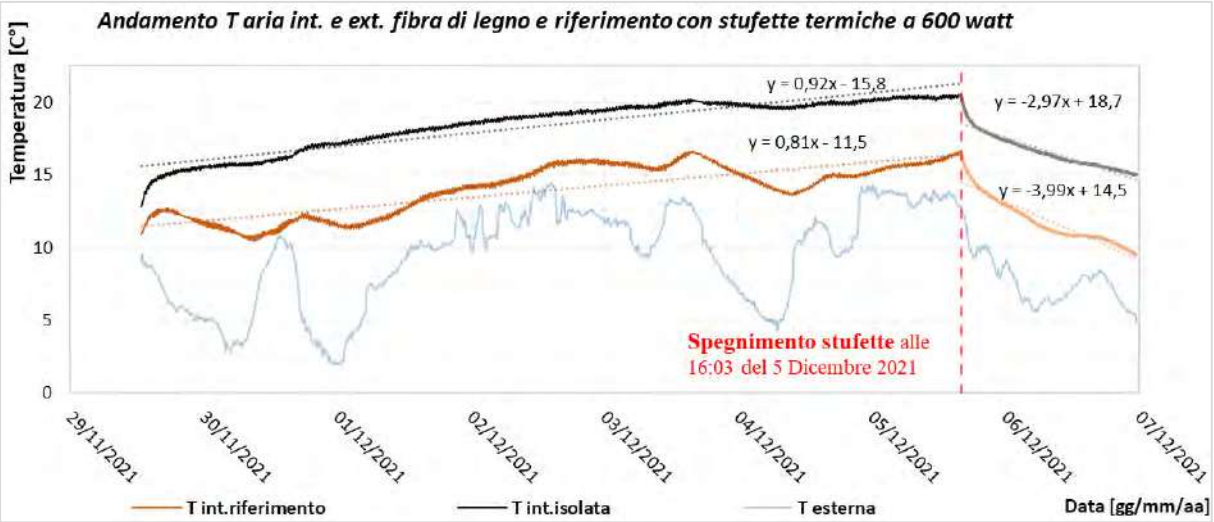
La seconda parte della campagna sperimentale è avvenuta nel periodo invernale compreso tra il mese di novembre 2021 e quello di febbraio 2022 sia in regime di puro "*free-floating*", sia in presenza di accensione dei sistemi di riscaldamento nei due edifici di studio.

La Figura 9 mostra l'andamento della temperatura dell'aria nell'edificio coibentato ed in quello di riferimento. Nello specifico, nel periodo rappresentato l'acquisizione dei dati è iniziata il 29 novembre

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2021 alle ore 12:43 con i termoventilatori elettrici impostati a 600 Watt e mantenuti ininterrottamente accesi sino al loro spegnimento (rappresentato con una linea verticale in rosso), avvenuto alle 16:03 del 5 dicembre 2021.

Figura 9. Andamento della temperatura dell'aria dell'edificio coibentato e di riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 600 Watt.



Nella Figura 9 sono rappresentate anche le rette di regressione lineare relative ai due andamenti della temperatura interna con lo scopo di valutare, attraverso i loro coefficienti angolari, la differente velocità di riscaldamento e raffrescamento delle due strutture. Infatti, si può osservare come la casetta isolata, grazie alla sua inerzia termica, riesca a trattenere in modo più efficace il calore all'interno dell'edificio e, in presenza di una fonte di calore esterna, aumenti più rapidamente la sua temperatura. In modo analogo, una volta spenti i sistemi di riscaldamento, nella struttura isolata il decadimento della temperatura interna si verifica in modo meno rilevante.

Nella Tabella 4 vengono riportati i valori delle temperature dell'aria interna dell'edificio isolato e del riferimento al momento dell'accensione del sistema di riscaldamento ("T iniziale"), del suo spegnimento ("T spegnimento") ed infine al termine del periodo analizzato ("T finale"). Dalla tabella emerge una differenza significativa tra le due strutture, soprattutto nelle fasi di spegnimento del riscaldamento e finali, caratterizzate rispettivamente da una variazione di temperatura interna pari a 4 °C ("T spegnimento") nel primo caso e di 5,5°C nel secondo ("T finale").

Tabella 4. Confronto tra le variazioni di temperatura dell'aria interna nei due edifici test.

Temperatura dell'aria (stufette termiche impostate a 600 watt)			
Edificio di studio	**T iniziale [C°]**	**T spegnimento [C°]**	**T finale [C°]**
Edificio di riferimento	10.9	16.5	9.5
Edificio isolato	12.8	20.5	15.0
ΔT [C°]	1.9	4.0	5.5
%ΔT [-]	17.4	24.2	57.9

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Successivamente, è stato analizzato il comportamento termico dei due edifici test variando la potenza dei termoventilatori elettrici utilizzati ad un valore pari ad 800 Watt.

In Figura 10 vengono rappresentati gli andamenti della temperatura dell'aria esterna ed interna alle due strutture nell'intervallo temporale compreso tra il 26 dicembre 2021 ed il 20 gennaio 2022 mentre nella Tabella 5 si riassumono i valori massimi, minimi e medi delle suddette temperature.

Figura 10. Andamento della temperatura dell'aria dell'edificio coibentato e di riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 800 Watt.

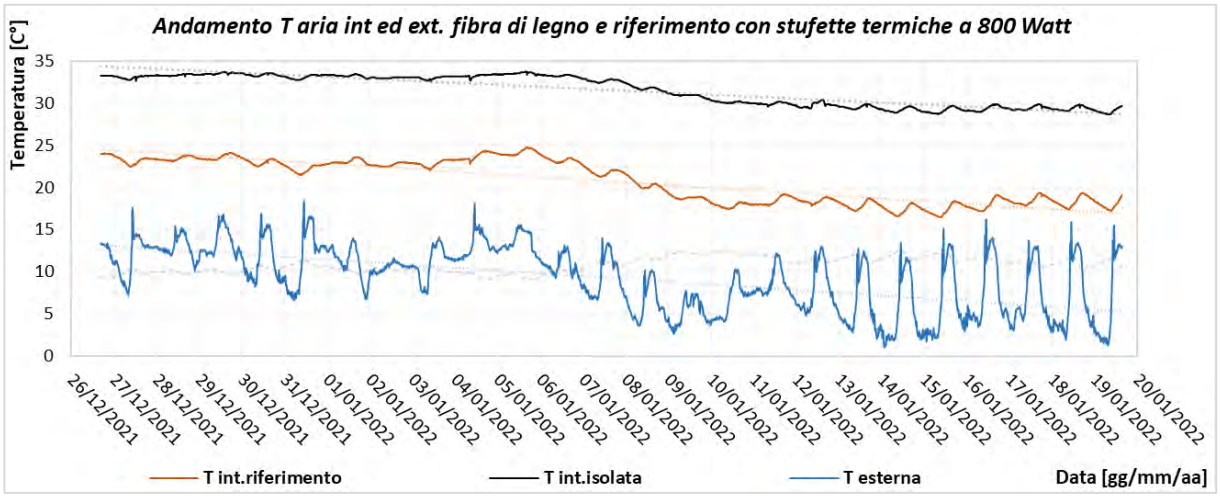


Tabella 5. Confronto tra le variazioni di temperatura dell'aria interna ed esterna nei due edifici test riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 800 Watt.

Temperatura dell'aria					
Edificio di studio	**T min. [C°]**	**T max. [C°]**	**T med. [C°]**	**ΔT max.-min. [C°]**	**%ΔT max. - min. (rif-iso) [-]**
Edificio di riferimento	16.5	24.8	20.8	8.3	-38.6
Edificio isolato	28.7	33.8	31.6	5.1	
Esterno	1.0	18.4	9.2	17.4	-
ΔT rif. - iso. [C°]	-12.2	-9.0	-10.8		
%ΔT rif. - iso. [-]	73.9	36.3	52.1		
ΔT rif. - ext. [C°]	15.5	6.4	11.6		
ΔT iso. - ext. [C°]	27.7	15.4	22.4		

Dalla Tab. 5 emergono notevoli differenze tra le variazioni di temperatura interna ed esterna registrate in presenza ed assenza del sistema di isolamento esterno; nello specifico, la variazione di temperatura media registrata nell'edificio di riferimento risulta pari a 11,6 °C mentre in quello isolato il valore assunto è pari a circa il doppio, ovvero pari a 22,4°C.

Nello stesso intervallo temporale sono state effettuate misure anche dei flussi termici e delle trasmittanze termiche; con riferimento ai primi si riportano i risultati in Fig. 11 e in Tab. 6.

Come si osserva dal grafico in Fig. 11, l'andamento del flusso termico dell'edificio di riferimento presenta oscillazioni più ampie e valori più elevati, mentre lo scostamento tra i valori medi (Tab. 6) risulta più basso rispetto al regime estivo, se pur con un valore significativo pari a circa il 17 %.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'ultima analisi effettuata in questo intervallo temporale è stata rivolta alla valutazione e al confronto delle trasmittanze termiche dei due edifici di studio.

Figura 11. Andamento del flusso termico dell'edificio coibentato e di riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 800 Watt.

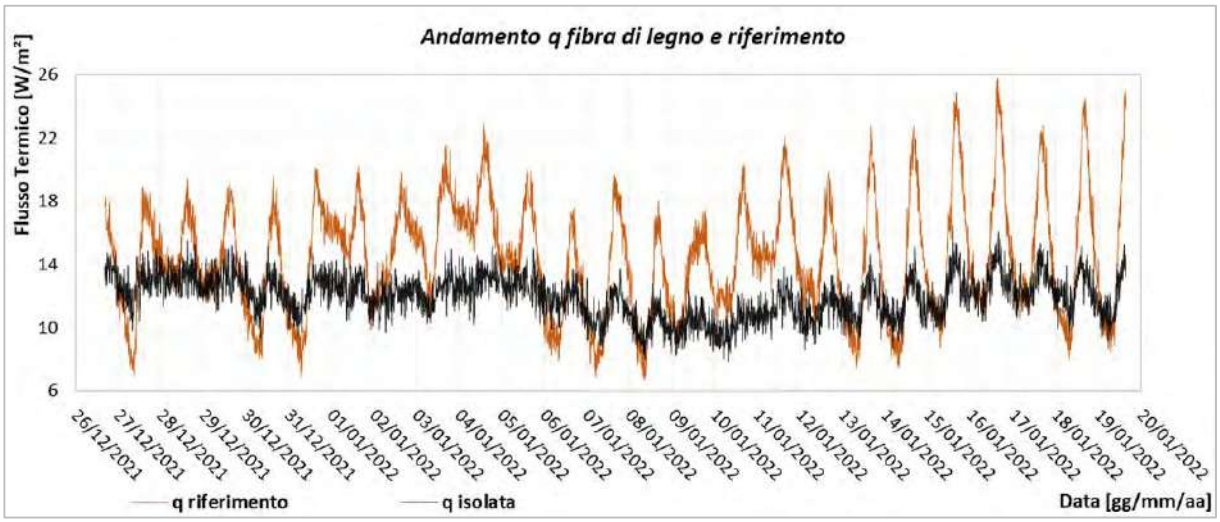


Tabella 6. Confronto tra le variazioni del flusso termico nei due edifici test.

Flusso Termico [W/m²]	
Edificio di studio	**q med [W/m²]**
Edificio di riferimento	14.350
Edificio isolato	11.930
Δq. Rif-iso	2.420
%Δq. Rif-iso	-16.9

La figura 12 mostra l'andamento delle trasmittanze termiche risultanti dall'elaborazione attraverso il metodo delle medie progressive (paragr. 2, eq. 3) mentre la Tabella 7 riporta i valori stabilizzati di trasmittanza e la differenza percentuale tra i valori calcolati. Il sistema di coibentazione termica mediante pannelli in fibra di legno permette di ottenere una trasmittanza termica pari a 0,53 W/m^{2}K con una riduzione percentuale di circa il 37% rispetto alla casetta di riferimento (1,24 W/m^{2}K).

La seconda fase della sprimentazione invernale si è focalizzata sullo studio del comportamento termico delle due strutture a seguito dello spegnimento dei sistemi di riscaldamento nel periodo compreso tra il 19 ed il 31 Gennaio 2022.

La Figura 13 mostra l'andamento della temperatura dell'aria esterna e di quella interna dell'edificio coibentato e del riferimento con indicato l'inizio e la fine del periodo di transizione dal regime di riscaldamento a quello di *free-floating* mentre in Tabella 8 vengono invece riportati i valori in prossimità di ciascuna variazione di regime.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 12. Andamento delle trasmittanze termiche dell'edificio coibentato e del riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 800 Watt.

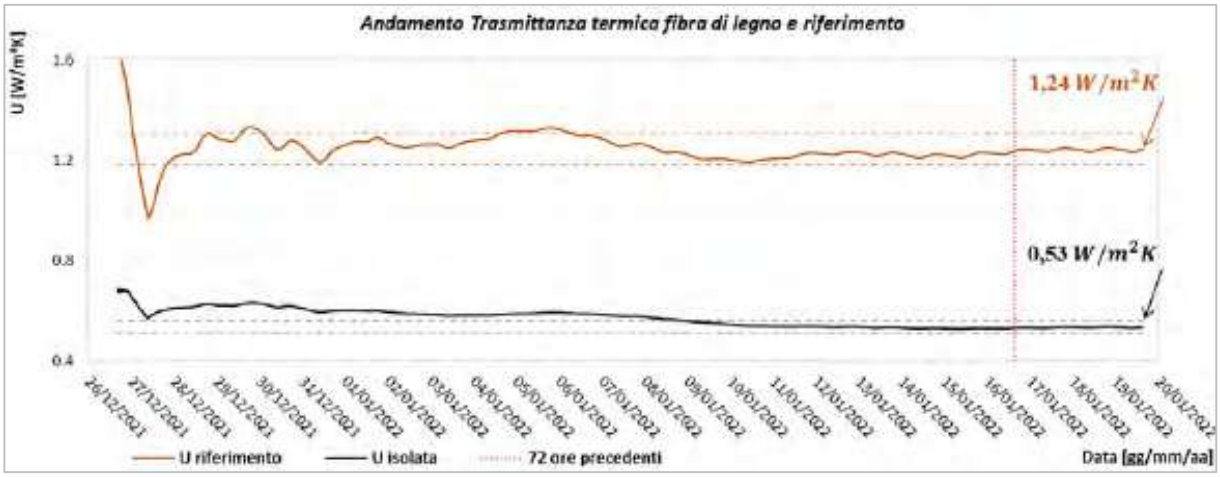
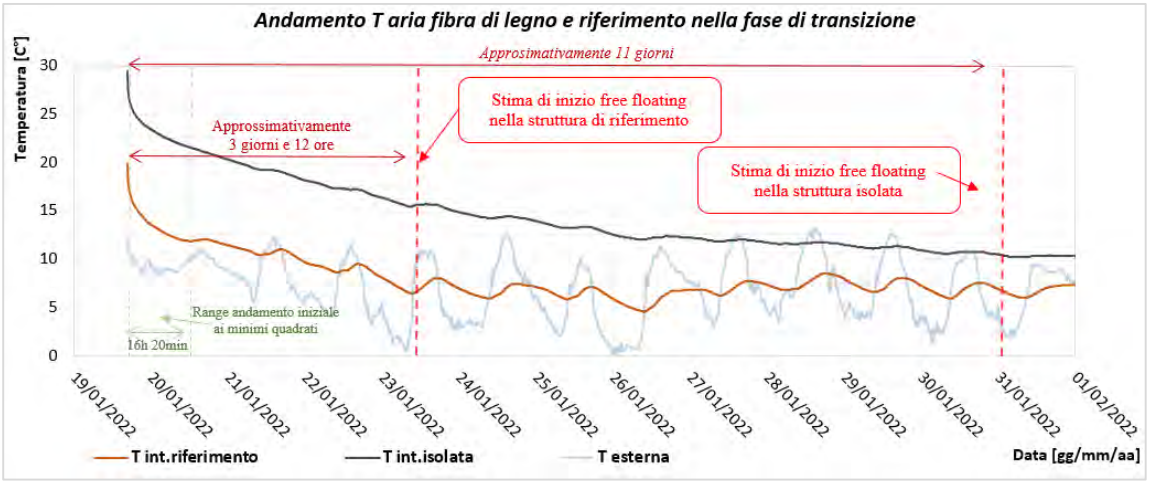


Tabella 7. *Confronto tra le variazioni del flusso termico nei due edifici test* riferimento con termoventilatori elettrici impostati a 800 Watt.

Trasmittanza termica	
Edificio di studio	**U [W/m²K]**
Edificio di riferimento	**1.24**
Edificio isolato	**0.53**
ΔU rif-iso [W/m²K]	0.71
%ΔU rif-iso [-]	-57.0

Come si può osservare dal grafico, in questo periodo uno sfasamento temporale tra la stima di inizio della condizione di *free-floating* della casa di riferimento rispetto a quella isolata, a conferma della maggiore stabilità della temperatura dell'aria indoor e dell'inerzia termica di quest'ultima.

Figura 13. Andamento della temperatura dell'aria interna dell'edificio coibentato e del riferimento in fase di transizione dal regime di riscaldamento a quello di *free-floating*.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 7. Confronto tra le variazioni del flusso termico nei due edifici test nella fase di transizione dal regime di riscaldamento a quello di *free-floating*.

Edificio di studio	T aria (inizio) [°C]	T aria (16h 20 min.) [°C]	T aria (3,5 giorni) [°C]	T aria (11 giorni) [°C]
Edificio di riferimento	19.8	12.0	6.4	6.9
Edificio isolato	29.4	21.9	15.5	10.5
Esterno	11.8	8.9	7.4	4.8
ΔT aria rif-iso [°C]	-9.6	-9.9	-9.1	-3.6
ΔT% aria rif-iso [-]	48.5	82.5	142.2	52.2

In particolare, nel regime di puro *free-floating*, oltre a valutare gli andamenti delle temperature interne ed esterne ai due edifici, sono stati valutati anche i parametri dinamici di attenuazione (DF) e sfasamento (PS) (pag.2, eq. 1 e 2).

La Figura 14 e la tabella 8 riportano rispettivamente gli andamenti ed i valori delle temperature dell'aria esterna ed interne dell'edificio coibentato e del riferimento in regime di *free-floating* .

A livello percentuale, si verifica fra le curve della temperatura dell'aria interna ai due edifici una differenza media del 14,2 %, mentre fra i picchi della temperatura massima e minima si raggiunge una differenza percentuale pari al 66,7 %.

Figura 14. Andamento della temperatura dell'aria interna nei due edifici in regime di *free-floating*.

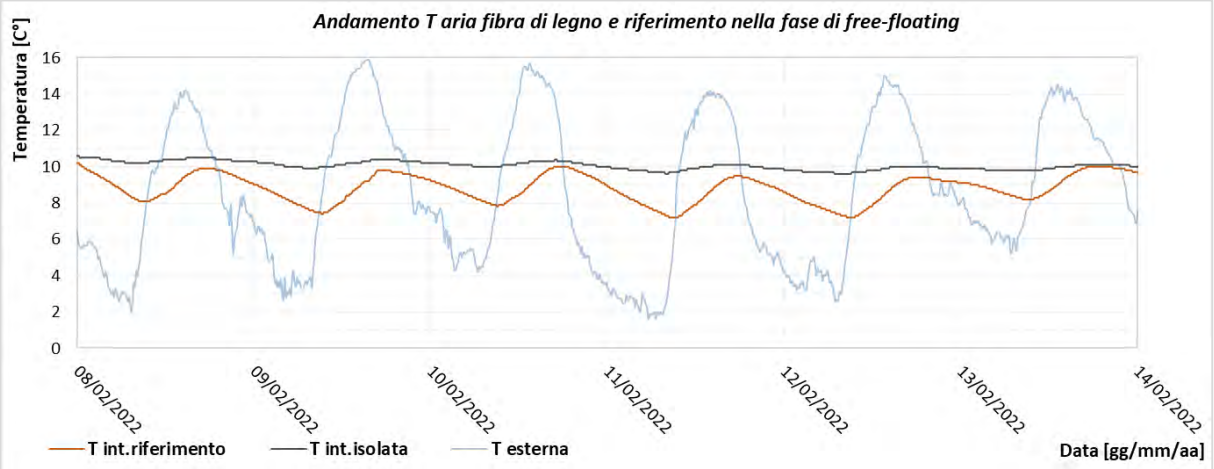


Tabella 8. Confronto tra le temperature dell'aria interna ed esterna nei due edifici test in regime di *free-floating*.

Temperatura dell'aria					
Edificio di studio	**T min. [C°]**	**T max. [C°]**	**T med. [C°]**	**ΔT max.-min. [C°]**	**%ΔT max. - min. (rif-iso) [-]**
Edificio di riferimento	7.2	10.2	8.8	3.0	-66.7
Struttura isolata	9.6	10.6	10.1	1.0	
Esterno	1.6	15.9	8.5	14.3	-
ΔT rif.-iso. [C°]	-2.4	-0.4	-1.3		

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

%ΔT rif.-iso. [-]	33.3	3.9	14.2

Gli andamenti ed i valori delle temperature superficiali interne ed esterne ai due edifici, in regime di *free-floating,* sono riportati in fig. 15 e in tab. 9.

Figura 15. Andamento della temperatura dell'aria interna dell'edificio coibentato e del riferimento in regime di *free-floating*.

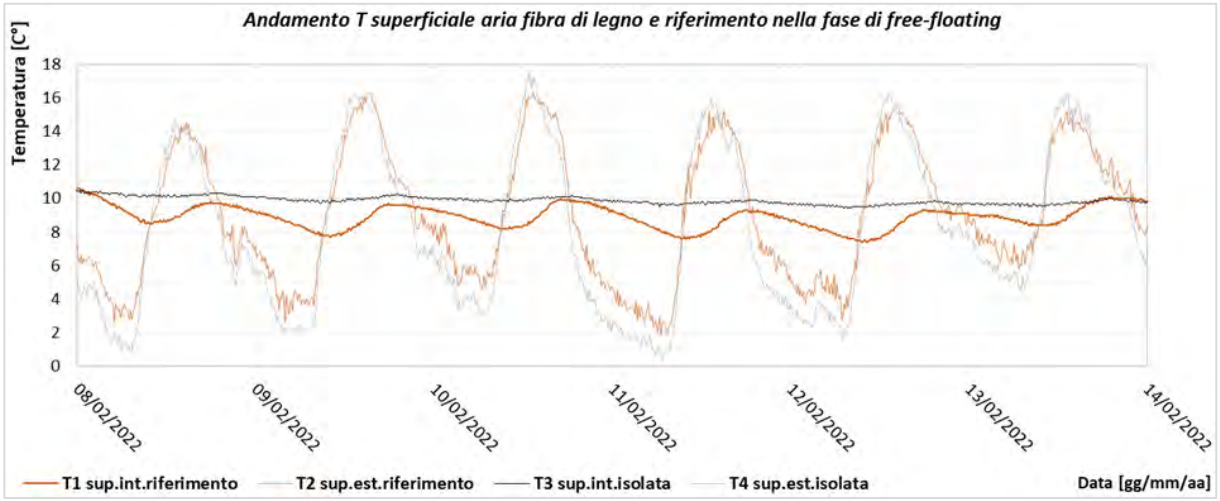


Tabella 9. Confronto tra le temperature superficiali dell'aria interna ed esterna nei due edifici in regime di *free-floating*.

Temperature Superficiali					
Edificio di studio	**T min. [C°]**	**T max. [C°]**	**T med. [C°]**	**ΔT max.-min. [C°]**	**%ΔT max. - min. (rif-iso) interne [-]**
Edificio di riferimento (interno)	7.4	10.6	8.9	3.2	-65.6
Edificio di riferimento (esterno)	1.8	16.3	8.9	14.5	
Edificio isolato (interno)	9.4	10.5	9.9	1.1	
Edificio isolato (esterno)	0.4	17.6	8.1	17.2	
ΔT int-est. rif. [C°]	5.6	-5.7	0.0		
ΔT int-est. iso. [C°]	9.0	-7.1	1.8		

Dalla Tabella 9 si può osservare come la differenza di temperatura media superficiale interna ed esterna dell'edificio isolato raggiunga quasi i 2°C, a differenza del riferimento nel quale la temperatura superficiale rimane pressochè invariata. Infine, vengono riportati in Tabella 10 i valori dei parametri dinamici di attenuazione (DF) e sfasamento (PS) delle due strutture in regime di *free-floating*.

Dall'analisi è emersa una riduzione del fattore di attenuazione del 74% ed un incremento dello sfasamento dell'edificio isolato del 75% rispetto al riferimento, confermando il raggiungimento di una maggiore stabilità della temperatura dell'aria interna e del conseguimento delle condizioni di comfort.

Dunque, anche dalla sperimentazione invernale il sistema d'isolamento termico a cappotto esterno ottenuto con i pannelli in fibra di legno ha permesso di determinare:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

- una maggiore stabilità delle temperature interne ed il raggiungimento di temperature interne notevolmente più elevate;

Tabella 10. Confronto tra i parametri dinamici di attenuazione (DF) e sfasamento (PS) delle due strutture in regime di *free-floating*.

Confronto Attenuazione (DF) e Sfasamento (PS) delle due strutture		
Edificio di studio	**Attenuazione DF**	**Sfasamento PS [ore: min.]**
Edificio di Riferimento	0.129	3:16
Edificio isolato	0.033	5:44
Δ	0.095	2:28
Δ%	287.1	75.2

- una minore influenza rispetto alle fluttuazioni di temperatura esterna, grazie alle minori dispersioni e alla maggiore inerzia termica garantite dal sistema di isolamento;
- una maggiore velocità di riscaldamento interna in presenza di riscaldamento ed una diminuzione della velocità di smorzamento dell'energia termica dovuta allo spegnimento degli stessi;
- una riduzione significativa della trasmittanza termica, pari al 57%, e del fattore di attenuazione (pari a circa il 74%), oltre ad un incremento dello sfasamento dell'onda termica del 75%.

4. Conclusioni

Il presente studio ha avuto come obiettivo la caratterizzazione dal punto di vista termico un piccolo edificio test coibentato mediante pannelli in fibra di legno, confrontando i risultati con quelli di un piccolo edificio test di riferimento.
Dallo studio è stata confermata l'efficacia di tale soluzione passiva, in grado di restituire, pur con uno spessore ridotto, ottime performance di isolamento termico e miglior comfort termico per gli utenti sia in regime estivo che invernale. I pannelli in fibra di legno presentano inoltre vantaggi in termini di sostenibilità, essendo prodotti con ridotte emissioni ed impatti sull'ambiente.
Dunque, risulta necessaria una maggiore sensibilizzazione per l'utilizzo su vasta scala di materiali ecosostenibili, quali quelli naturali o di riciclaggio, con il fine di decarbonizzare il settore delle costruzioni, anche mediante l'utilizzo di materiali con ridotto carbonio incorporato.
Come sviluppi futuri si prevede di quantificare i fabbisogni energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento di un edificio reale caratterizzato dalle medesime stratigrafie e modalità costruttive dell'edifico test, al fine di valutare i risparmi energetici, ambientali (mediante analisi LCA) ed economici legati all'utilizzo di tale soluzione.

Riferimenti

1. IPCC, "IPCC REPORT 2018," 2018.
2. United Nations, "UNSD Environmental Indicators," 2018. [Online]. Available: https://unstats.un.org/unsd/envstats/qindicators.cshtml. [Accessed: 14-Nov-2018].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. European Commission, “Accordo di Parigi,” 2015. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_it. [Accessed: 14-Nov-2018].
4. UNEP, The Emissions Gap Report 2018, United Nat. 2018.
5. Sanson A.and Giuffrida L. G., Decarbonizzazione dell’economia italiana, il catalogo delle tecnologie energetiche. 2017.
6. Pomponi F. and Moncaster A., Circular economy for the built environment: A research framework, J. Clean. Prod., vol. 143, pp. 710–718, 2017.
7. M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, “The Circular Economy – A new sustainability paradigm?,” J. Clean. Prod., vol. 143, pp. 757–768, 2017.
8. De los Rios I. C. and Charnley F. J. S., Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design, J. Clean. Prod., vol. 160, pp. 109–122, 2017.
9. Winans K., Kendall A., and Deng H., The history and current applications of the circular economy concept, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 68, no. October 2015, pp. 825–833, 2017.
10. Orsini F. and Marrone P., Approaches for a low-carbon production of building materials: a review, J. Clean. Prod., vol. 241, p. 118380, 2019.
11. Orsini F. and Marrone P., Prodotti a basse emissioni di carbonio: potenzialità e limiti della manifattura della regione Lazio, in XIX Congresso Nazionale CIRIAF - ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE, 2019, pp. 173–186.
12. Chitnis M., Sorrell S., Druckman A., Firth S., and Jackson T., Estimating Direct and Indirect Rebound Effects for U.S. Households, 2011.
13. IEA, Energy and CO2 emissions in the OECD, 2018.
14. ONU, United Nations framework on climate change, UNFCCC, Kyoto, Jappan, 1998.
15. McKinsey & Company, Pathways to a low-carbon economy: Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. 2009.
16. Janda K. B. and Busch J. F., Worldwide status of energys tandards for buildings, Energy, vol. 19, no. 1, pp. 27–44, 1994.
17. Papadopoulos A. M., State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments, Energy Build., vol. 37, no. 1, pp. 77–86, 2005.
18. Cuce E. and Riffat S. B., A state-of-the-art review on innovative glazing technologies, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 41, pp. 695–714, 2015.
19. https://www.3therm.it/wall-140/],
20. https://www.natureplus.org/index.php?id=43&L=2
21. https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2017/01/28/17A00506/sg
22. https://ibu-epd.com/en/published-epds/
23. https://www.iso.org/standard/38131.html Etichette e dichiarazioni ambientali — Dichiarazioni ambientali di tipo III — Principi e procedure
24. Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto http://store.uni.com/catalogo/uni-en-15804-

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2019?josso_back_to=http://store.uni.com/josso-security-check.php&josso_cmd=login_optional&josso_partnerapp_host=store.uni.com

25. UNI ISO 9869-1:2015, Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro http://store.uni.com/catalogo/uni-iso-9869-1-2015

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Governance Territoriale Strategica per implementare l'uso energetico delle biomasse boschive in territori fragili. Il caso studio del Sud Ovest Orvietano

Luca Fondacci[1, 2,*], Andrea Nicolini[3], Franco Cotana[3], Tommaso Giannoni[3], Giacomo Fabrizi[3], Laura Maria Becchetti[3] and Leandro Lunghi[4]

[1] Ciriaf, via G. Duranti 67, 06125 Perugia
[2] Dipartimento di Architettura Ferrara, Via della Ghiara 36, 44121 Ferrara
[3] Ciriaf-CRB, via G. Duranti 67, 06125 Perugia
[4] Dipartimento di Ingegneria, via G. Duranti 93, 06125 Perugia

***** Autore di riferimento. E-Mail: luca.fondacci@unipg.it

Abstract: Sulla base di dati originali e di prima mano, l'articolo delinea una strategia territoriale integrata per mezzo della quale attivare una filiera corta agro-energetica a partire dalla valorizzazione delle biomasse boschive, quale volano per la valorizzazione socio-economica dell'area interna del Sud Ovest dell'Orvietano. La strategia è replicabile in altre aree interne e per questo costituisce un modello fondamentale per la tenuta del sistema Paese Italia. Si tratta di un modello che in un'ottica spazialista e di governance multilivello tiene in considerazione contemporaneamente aspetti di sostenibilità ambientale, aspetti sociali e aspetti economici. L'articolo si inserisce pertanto in maniera inedita nel filone di studi di politiche di sviluppo territoriale strategico e partecipativo, perché considera le biomasse come catalizzatori di concreti processi di governance sostenibile e partecipativa di scala locale per l'aumento della resilienza e la riduzione della vulnerabilità territoriale. Questo lavoro è parte del progetto *Adattamento ai cambiamenti climatici ed azioni di resilienza nelle aree interne del Sud-Ovest dell'Orvietano*, denominato "A.C.A.R.O" di cui l'Alta scuola di Orvieto era project manager[1]. L'articolo è diviso in 4 parti. Nella prima parte si introducono i concetti di governance e resilienza in ottica spazialista e si fornisce un quadro dei consumi delle biomasse legnose in Italia e Umbria. Nella seconda parte si presenta il caso studio del Bosco di Monterubiaglio, presso Castel Viscardo, Terni. Nella terza parte si dimostra che nel Sud-Ovest dell'Orvietano è concretamente realizzabile

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

la filiera corta legno-energia quale volano per la valorizzazione socio-economica del territorio. Nella quarta e ultima parte si espone la metodologia per realizzare la filiera corta legno e energia a partire dalla buona pratica del Comune di Camporgiano, area interna della Garfagnana in provincia di Lucca Toscana.

Keywords: governance territoriale strategica1; biomassa legnosa2; filiera corta legno energia3; Sud Ovest Orvietano4; ottica spazialista5;

1. Introduzione

La superficie forestale italiana è di circa 11 milioni di ettari[2], copre più del 35% del territorio nazionale ed in alcune regioni, come Trentino-Alto Adige, Liguria, Toscana, Sardegna e Umbria, occupa circa il 50% o più del territorio regionale [2]. La più grande infrastruttura verde del Paese costituisce un interesse collettivo [3] che richiede politiche strategiche necessarie a tutelare e valorizzare il patrimonio boschivo a promuovere la filiera foresta-legno e a sviluppare la bio-economia forestale [4]. In Italia le politiche forestali sono in capo agli enti regionali e di conseguenza sono caratterizzate dagli aspetti ambientali, sociali, economici, culturali e dalle esigenze di ciascuna regione. Il principio interesse collettivo del patrimonio boschivo è strettamente connesso al principio di coesione territoriale, che come noto si afferma nel 1988 con la prima riforma Delors della politica strutturale [5-6]. Assieme al principio di coesione territoriale prende piede il metodo della *governance* territoriale [7-8]. La Tabella 1, da noi elaborata su [9] mostra le cause che hanno determinato lo sviluppo della governance. Si tratta di cause che risalgono alla metà degli anni Settanta, quando con l'entrata in crisi dell'impianto del Welfare State, saltano alcuni diritti sociali e la società civile si riorganizza in senso partecipativo.

Tabella 1. Le cause originarie dello sviluppo della *governance*

	Cause strutturali	**Cause processuali**
Cause Interne	**Crisi fiscale dello Stato:** eliminazione Welfare State, devoluzione, deregolazione, deindustrializzazione	**Partecipazione della società civile nazionale:** ONG, associazioni di volontariato, PPP
Cause Esterne	**Globalizzazione:** creazione e rafforzamento di istituzioni inter-e sovra-nazionali: UE, GATT, WTO, ONU, FMI, ecc.	**Partecipazione della società civile internazionale:** ONG, associazioni e movimenti transnazionali; governi sub-nazionali di altri Paesi

In base al quale gli interventi della Comunità Europea devono essere definiti con i livelli di governo più vicini ai cittadini, in modo da favorire le politiche mirate ai luoghi (*place-based*) [10-11] ed uno sviluppo di tipo endogeno, vale a dire volto a dare continuità alle attività esistenti e ad introdurne di nuove, nel rispetto delle potenzialità evolutive dei contesti.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Lo sviluppo endogeno comporta il coinvolgimento di attori privati e di nuovi attori istituzionali che contribuiscono a ridefinire tanto lo spazio politico e giuridico europeo, quanto lo stesso sistema europeo di governance. Come mostra la Tabella 2, i processi di governance sono quindi i processi con cui le democrazie contemporanee riescono a coordinare attori, gruppi sociali e istituzioni per il raggiungimento di decisioni attuative e scopi definiti in maniera partecipata e condivisa in ambienti incerti [12], come ad esempio un contesto urbano o un'area interna[3].

Tabella 2. I principi della nuova *governance* europea

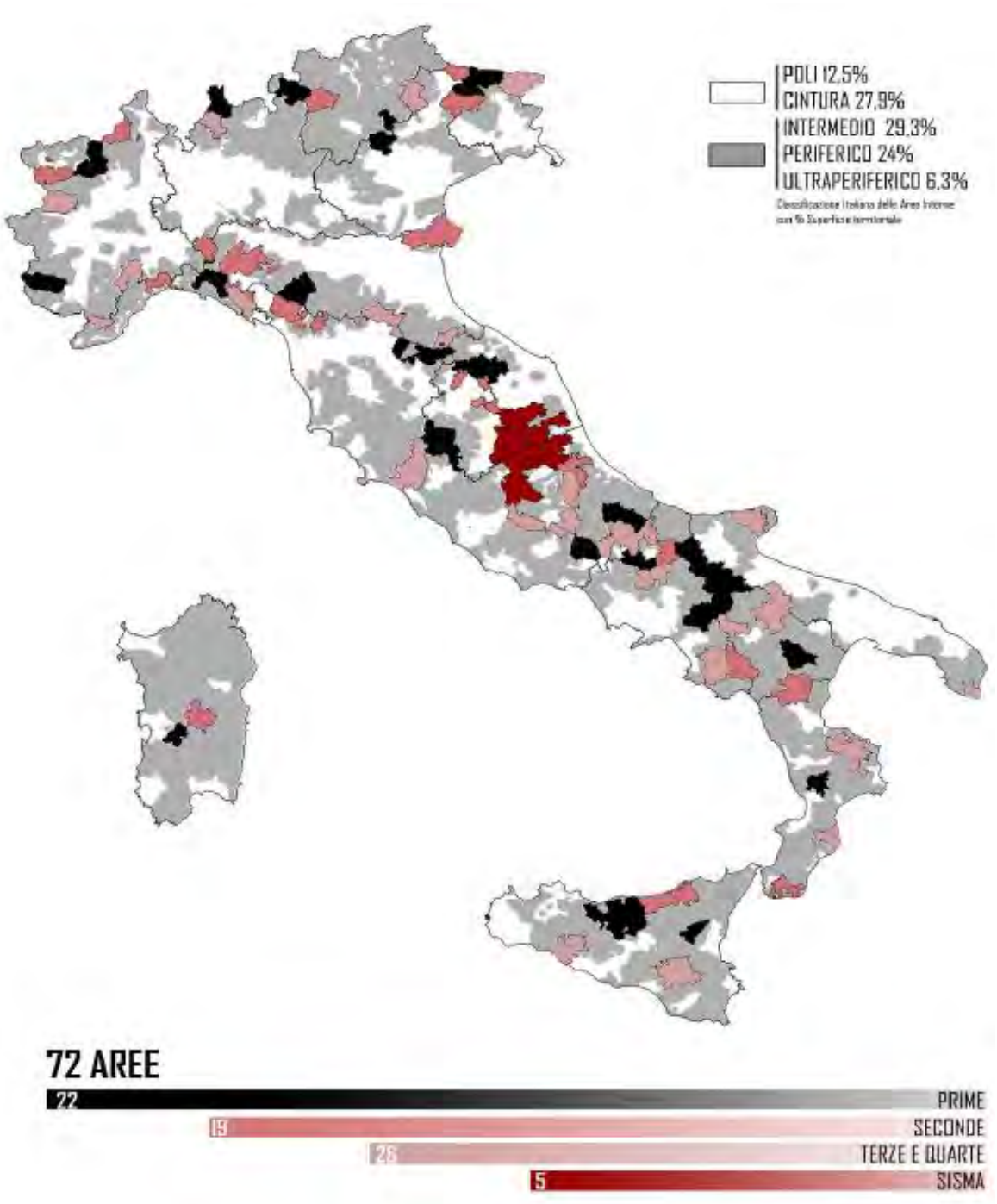
Principi	Descrizione
Apertura	Le istituzioni assieme agli Stati membri, devono spiegare con un linguaggio accessibile e comprensibile al grande pubblico che cosa fa l'Unione Europea.
Partecipazione	La Commissione deve organizzare un dialogo approfondito con le amministrazioni e associazioni nazionali, regionali e locali, rispettando al tempo stesso le disposizioni costituzionali e amministrative di ciascuno Stato.
Responsabilità	Vi è esigenza di maggiore chiarezza dei ruoli e maggiore responsabilità all'interno delle istituzioni UE, degli Stati membri e di tutti coloro che partecipano all'elaborazione e all'attuazione delle politiche dell'Unione Europea.
Efficacia	Le politiche dell'UE devono essere efficaci e tempestive, producendo i risultati richiesti in base a obiettivi chiari, alla valutazione del loro impatto futuro e, ove possibile, delle esperienze acquisite in passato.
Coerenza	L'ampliamento della gamma dei compiti da assolvere, l'allargamento dell'Unione ed il coinvolgimento di più settori nelle scelte richiede una leadership politica capace di assicurare un'impostazione coerente.

La Strategia nazionale delle aree interne-Snai prevista nella programmazione dei fondi comunitari 2014-2020, è un insieme di politiche *place-based* che ha consentito di sperimentare nuovi modelli di governance. In particolare ha consentito di sperimentare uno sviluppo locale partecipativo, vale a dire basato sul coinvolgimento degli attori locali (pubblici e privati) nella costruzione di visioni strategiche e condivise, nelle aree periferiche rurali, semi rurali e di montagna del nostro paese [13].

Le aree interne che si caratterizzano principalmente per la lontananza dai servizi essenziali, custodiscono il capitale territoriale, i patrimoni ambientali, la biodiversità e le risorse storico artistiche necessarie per ridurre i divari che caratterizzano il territorio nazionale [14]. La Snai infatti è una politica nazionale partecipativa per promuovere la ricchezza e la diversità del nostro Paese, a partire dal miglioramento dei servizi pubblici della mobilità, della istruzione e della salute, in quanto leve per l'incremento delle opportunità economiche. Nello stesso tempo la Snai si pone l'obiettivo di combattere l'emorragia demografica in una porzione del territorio nazionale, quella delle aree lontane dai poli di servizio essenziale primario e avanzato, che corrisponde al 60% della superficie territoriale, al 52% dei Comuni e al 22% della popolazione. Sull'intero territorio nazionale la Snai ha selezionato 72 aree, composte da 1.077 comuni, poco più di 2 milioni di abitanti e un territorio di 51 mila kmq [15].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1. Le 72 aree interne selezionate per la costruzione della strategia locale



Si tratta di luoghi cruciali per la tenuta idrogeologica e ambientale del Paese, perché sono incorporati nelle strutture territoriali molto di più che le periferie urbane tradizionali. Secondo la Snai le aree interne costituiscono un serbatoio di resilienza che può essere utilizzata nei rapporti con le aree più centrali, non dotate di sufficiente capacità di adattamento a situazioni di shock. Promuovere aree interne consapevoli della propria resilienza, pertanto, significa produrre effetti sistemici per tutto il territorio italiano.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Risulta ora utile soffermarsi sul concetto di resilienza, sviluppato nel XIX secolo in Inghilterra nell'ambito delle scienze chimiche, fisiche e ingegneristiche, come mezzo per misurare le proprietà dei materiali, usati per scopi militari e civili, di resistere a condizioni difficili. Negli ultimi 150 anni di studi di meccanica dei materiali è cambiato ben poco sull'applicazione della resilienza come proprietà dei materiali [16]. Tuttavia, a partire dagli anni Settanta del XX secolo, gli studi in ecologia consentono di legare il concetto di resilienza a quello di ambiente, aprendo così le porte all'applicazione di tale concetto alle scienze umane:

I propose that the behaviour of ecological systems could well be defined by two distinct properties: resilience and stability. Resilience determines the persistence of relationships within a system and is a measure of the ability of these systems to absorb changes of state variables, driving variables, and parameters, and still persist [17].

Nello studio degli eco-sistemi, non è sufficiente preoccuparsi di rispondere in maniera immediata e costante ad un evento esterno, come avviene, ad esempio, nel caso della progettazione di sistemi di abitazione o di trasporto, perché gli ecosistemi possono essere profondamente influenzati da eventi imprevedibili ed inaspettati. Nei casi in cui lo stato esistente diventa insostenibile a causa delle potenti pressioni esterne, più che l'immediatezza e la costanza della risposta, conta la capacità dell'eco-sistema di persistere ed adattarsi al cambiamento, assorbendo i disturbi, senza cioè modificare in modo radicale le proprie funzioni e strutture, poiché ciò determinerebbe la fine di quel dato eco-sistema.

La capacità di trarre beneficio dai cambiamenti è la caratteristica principale dei sistemi socio-ecologici, come ad esempio un'area interna, in cui le dinamiche naturali e antropiche sono strettamente interconnesse [18]. Gli studi sulla resilienza dei sistemi socio-ecologici hanno dimostrato che essi non hanno, né tendono, dopo una data alterazione, verso alcuno stato di equilibrio [19]. I sistemi socio-ecologici sono dinamici ed in continua evoluzione per rispondere alle sollecitazioni esterne e modellarle in base alle esigenze ed in modo da non perdere nessuna delle possibili opzioni future [20]. La sfida è pertanto di adattare le strutture sociali ed economiche in modo da intercettare la direzione del cambiamento in corso e mantenere la capacità degli ecosistemi di generare beni e servizi essenziali per lo sviluppo della comunità [21-22-23]. Sotto questi profili, un ruolo cruciale può essere svolto dai decisori pubblici e privati che dovrebbero puntare ad una gestione coordinata e qualitativa delle risorse e cioè ad una governance in grado di rispondere in maniera organizzata e sostenibile al cambiamento in corso.

Il pensiero sulla resilienza è pertanto alternativo alla gestione convenzionale delle risorse naturali, perché non le considera come entità fra loro slegate e disposte in un contesto statico. Al contrario, esso ci pone di fronte ad un mondo in cui i sistemi sono interconnessi in senso orizzontale (ad esempio, sistema naturale e sistema antropico), e verticale (ad esempio, lo Stato e le Regioni). In questo modo, occorre tenere conto delle interazioni che avvengono alle diverse scale e del fatto che la costruzione della resilienza ad una scala grande dipende dalle trasformazioni che avvengono a scale più piccole [24]. Il pensiero sulla resilienza riconosce la variabilità della interdipendenza tra i sistemi ed i sub-sistemi e dell'autonomia degli stessi. Tale variabilità è la fonte principale di scelte per affrontare al meglio le condizioni future, dato che la capacità di un sistema di adattarsi ad una gamma di circostanze

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

diverse ed imprevedibili è dato esattamente dalla diversità [25-26].

A livello spazialista, le realtà territoriali sono componenti di sistemi di rete via via sempre più ampi [27-28]. Le aree interne italiane sono sistemi a rete di scala locale – rurale, semirurale e di montagna - dalla cui resilienza nell'ambito della gestione ambientale, della pianificazione urbana e dell'adattamento climatico, dipende la tenuta economica, sociale e ambientale di sistemi a rete di scala territoriale [29-30-31]. In queste aree è concentrato il 74% della superfice forestale nazionale ed il concetto di resilienza è considerato come la pietra angolare dello sviluppo sostenibile.

Le più recenti politiche europee e nazionali riconoscono alle biomasse di essere i vettori nella transizione energetica e nei processi di decarbonizzazione [32-33-34-35-36], perché sono risorse energetiche rinnovabili, sostenibili, decentrate e relativamente economiche [37].

Tabella 3. Quadro comparativo del costo di 1 MWh di energia tra diverse fonti

	Cippato (UM30%)	**Legna in pezzi (UM20%)**	**Pellet**	**Gasolio da riscaldamento**	**Metano**	**GPL**
Costo Medio Materia prima	100 €/t	164 €/t	223 €/t	1.170 €/mc	1,05 €/mc	5,04 €/mc
Potere Calorifico Inferiore	2900 kWh/t	3900 kWh/t	4600 kWh/t	9800 kWh/mc	9,7 kWh/mc	24,3 kWh/mc
Costo Energia €/MWh	34.5	42	48.5	119	108	207

Esse sono fonti rinnovabili perché il tempo di sfruttamento della sostanza è paragonabile a quello di rigenerazione della stessa; sono fonti energetiche sostenibili poiché le operazioni di gestione e manutenzione boschiva o forestale, da cui si ricavano le biomasse considerate nel presente studio, producono impatti ambientali trascurabili o nulli; sono risorse decentrate perché basate su modelli di produzione in cui è il consumatore a produrre in modo autonomo l'energia di cui ha bisogno. In questo ultimo caso, la struttura del sistema energetico non è rappresentata da grandi poli di generazione, ma dalle comunità locali, oltre che dai singoli individui [38-39-40].

A livello nazionale, Figura 2, l'impiego di biomassa solida (legna da ardere, pellet, carbone vegetale) per il riscaldamento delle abitazioni è un fenomeno diffuso in tutte le regioni del Paese. Il Piemonte, il Veneto (circa 10% del totale nazionale), la Campania (9,4%), la Lombardia (8,9%) ed il Lazio (7,6%) sono le 5 regioni caratterizzate dai maggiori consumi di biomassa, seguite da Calabria (7,3%) e Toscana (6,7%). Con le Marche (2,6%), la Sicilia (2,5%) la Basilicata (2,4%) ed il Molise (1,5%), l'Umbria è tra le regioni che consumano meno biomassa solida per il riscaldamento domestico [41].

Se però guardiamo ai consumi di biomassa solida correlata ad impianti industriali [41, cit.] di medio-grandi dimensioni che impiegano tale fonte per produrre elettricità e acqua calda, Figura 3, l'Umbria risulta essere tra le prime 5 regioni italiane che impiegano maggiormente tale fonte: provincia di Bolzano (24,6%), Lombardia (16,3%), Veneto (10,4%), Piemonte (10,2), Umbria (7,5%). Tuttavia, come si vedrà in seguito, le biomasse usate negli impianti industriali umbri non provengono dalla stessa regione.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 2. Consumi diretti di biomassa solida nel settore residenziale (TJ)

TJ	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2019 (%)	Variaz. % 2019/2018
Piemonte	24.468	25.888	27.249	27.229	26.624	25.413	9,7%	-4,6%
Valle d'Aosta	1.408	1.375	1.456	1.501	1.450	1.375	0,5%	-5,2%
Lombardia	21.647	23.774	24.959	25.436	24.049	23.272	8,9%	-3,2%
Liguria	4.760	5.289	5.720	6.150	6.028	5.225	2,0%	-13,3%
Provincia di Trento	4.947	5.080	5.300	5.476	5.149	5.269	2,0%	2,3%
Provincia di Bolzano	4.859	4.872	5.141	5.240	5.023	5.307	2,0%	5,6%
Veneto	21.261	25.785	26.150	27.107	25.832	25.107	9,6%	-2,8%
Friuli Venezia Giulia	7.572	8.804	8.929	9.341	8.636	8.468	3,2%	-2,0%
Emilia Romagna	10.205	12.562	12.845	13.013	12.857	11.893	4,6%	-7,5%
Toscana	15.657	18.592	18.059	19.932	18.395	17.576	6,7%	-4,5%
Umbria	8.778	9.767	9.784	10.564	9.427	9.098	3,5%	-3,5%
Marche	6.869	7.413	7.570	7.621	7.714	6.904	2,6%	-10,5%
Lazio	19.174	21.311	19.294	21.845	19.045	19.847	7,6%	4,2%
Abruzzo	13.110	13.724	12.488	14.079	13.739	13.375	5,1%	-2,6%
Molise	3.173	3.460	3.185	3.594	3.276	3.353	1,3%	2,3%
Campania	20.735	24.197	21.966	25.310	22.811	24.687	9,4%	8,2%
Puglia	9.568	11.748	10.393	12.081	10.591	11.353	4,3%	7,2%
Basilicata	5.909	6.568	6.058	6.902	6.182	6.366	2,4%	3,0%
Calabria	17.957	19.304	16.574	21.743	18.531	19.175	7,3%	3,5%
Sicilia	5.216	6.122	5.178	6.307	5.501	6.625	2,5%	20,4%
Sardegna	10.352	12.048	10.167	12.442	10.885	11.688	4,5%	7,4%
ITALIA	**237.623**	**267.682**	**258.465**	**282.916**	**261.746**	**261.375**	**100%**	**-0,1%**

Figura 3. Consumi diretti di biomassa solida nel settore non residenziale (TJ)

TJ	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2019 (%)	Variaz. % 2019/2018
Piemonte	544	566	1.198	1.154	886	902	10,2%	1,9%
Valle d'Aosta	82	115	136	139	140	165	1,9%	17,7%
Lombardia	875	1.581	1.877	1.378	1.397	1.449	16,3%	3,7%
Liguria	42	46	48	48	51	53	0,6%	3,2%
Provincia di Trento	148	189	198	294	432	453	5,1%	4,8%
Provincia di Bolzano	2.496	2.353	2.006	1.960	2.046	2.187	24,6%	6,9%
Veneto	945	944	971	947	916	922	10,4%	0,7%
Friuli Venezia Giulia	77	136	113	84	91	91	1,0%	0,3%
Emilia Romagna	98	109	114	114	124	118	1,3%	-4,7%
Toscana	473	895	845	837	348	475	5,3%	36,7%
Umbria	101	1.327	891	802	719	666	7,5%	-7,4%
Marche	190	163	205	205	209	201	2,3%	-4,0%
Lazio	29	35	35	37	39	43	0,5%	10,7%
Abruzzo	15	15	15	17	20	24	0,3%	19,4%
Molise	2	6	6	6	7	9	0,1%	26,7%
Campania	36	40	37	195	235	192	2,2%	-18,2%
Puglia	18	278	38	43	39	40	0,5%	3,5%
Basilicata	18	18	18	18	20	22	0,3%	11,2%
Calabria	265	347	388	412	234	215	2,4%	-7,8%
Sicilia	314	399	354	274	469	437	4,9%	-6,8%
Sardegna	104	97	83	143	216	217	2,4%	0,4%
ITALIA	**6.871**	**9.660**	**9.576**	**9.109**	**8.637**	**8.882**	**100%**	**2,8%**

L'analisi Swot delle funzioni produttive dei boschi dell'Umbria, è stata elaborata su dati reperiti direttamente dall'Agenzia forestale Regionale Umbria e in [42], evidenzia, da un lato, la sostenibilità

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

della gestione forestale, poiché i prelievi legnosi annui, utilizzati per lo più come legna da ardere, sono in media inferiori all'incremento medio annuo del bosco di circa. Dall'altro, evidenzia invece la carenza di approcci gestionali in grado di favorire la diversificazione delle funzioni del bosco e a migliorare il settore dei prodotti forestali.

Tabella 4. Analisi Swot delle funzioni produttive dei boschi dell'Umbria

Dati generali	
Superficie boschiva complessiva	372.000 ha
Quantità complessiva di legno	29 milioni di m^3
Incremento medio annuo dei boschi	800.000 m^3
Prelievi legnosi annui	420.000 m^3
Volume medio di legna ad ettaro	78 m^3
Composizione formazioni boschive	87% bosco ceduo composto da formazioni di rovere, roverella, carpino, orniello e leccio, 13% fustaie
Punti di forza	**Punti di debolezza**
- Espansione continua della risorsa bosco (ceduo in particolare). - Incremento della provvigione legnosa. - Organizzazione per la lotta agli incendi boschivi. - Mercato locale legno vitale	- Incentivazione di approcci gestionali sostenibili nei boschi cedui. - Limitata estensioni dei boschi ad alto fusto. - Contrasto effetti legati al riscaldamento globale. - Carenza filiere di approvvigionamento prodotti legnosi rispetto alle esigenze del mercato.
Opportunità	**Minacce**
- Incremento della programmazione e della pianificazione nella gestione delle attività selvicolturali - Filiera corta bosco-legno-energia ad uso locale. - Miglioramento attività di previsione, prevenzione lotta agli incendi boschivi. - Condizioni favorevoli per valorizzare produzioni legnose locali	- Abbandono aree rurali montane. - Aumento importazioni prodotti legnosi da lavoro e per fini energetici. - Deperimento boschi per effetti dovuti alla scarsa conoscenza dello stato di salute delle foreste. - Aumento urbanizzazione e conseguente frammentazione delle aree boscate.

Alcune delle principali soluzioni per contrastare queste tendenze possono venire da gestioni pianificate in ottica di governance, in grado di sviluppare la resilienza delle risorse boschive e consentire di indirizzare l'Umbria verso la transizione energetica e la decarbonizzazione mediante la sostituzione dei combustibili tradizionali con fonti energetiche rinnovabili come le biomasse legnose in [43-44].

2. Il caso studio del bosco di Monterubiaglio-Castel Viscardo. Verifica delle potenzialità di implementazione dell'impiego delle biomasse ligno-cellulosiche.

L'Umbria è una delle regioni italiane dove è maggiore la incidenza del governo a ceduo che interessa circa l'85% della superficie forestale regionale (60% è il dato nazionale). In base ai dati forniti dal Servizio Foreste della Regione Umbria, i 20 comuni dell'area interna del Sud Ovest dell'Orvietano hanno una superfice forestale complessiva di circa 56.000 ha, caratterizzata dalla prevalenza di boschi misti di latifoglie, per lo più cerro e roverella.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 5. La superfice forestale complessiva del Sud Ovest Orvietano

N.	Comuni	Superfice forestale (ha)
1	Allerona	5.105
2	Alviano	693
3	Attigliano	128
4	Baschi	3.109
5	Castel Giorgio	1.014
6	Castel Viscardo	983
7	Città della Pieve	4.148
8	Fabro	1.238
9	Ficulle	3.180
10	Giove	400
11	Guardea	2.023
12	Lugnano in Teverina	1.096
13	Montecchio	2.378
14	Montegabbione	3.081
15	Monteleone di Orvieto	904
16	Orvieto	11.806
17	Parrano	2.604
18	Penna in Teverina	231
19	Porano	365
20	San Venanzo	11.776
TOTALE		**56.262**

Come indicato dalla Partecipanza agraria di Castel Viscardo-Viceno, Orvieto, Tabella 6, la principale forma di governo dei boschi rimane il ceduo secondo il ciclo di rotazione previsto (20 anni) che non genera quantitativi di scarti tali da giustificare la loro raccolta.

Tabella 6. Comparazione quantità prodotti e sottoprodotti di governo a ceduo e a fustaia in un ciclo di rotazione ventennale

Bosco a ceduo Massa legnosa t/ha		**Bosco a fustaia Massa legnosa t/ha**	
Prodotti e sottoprodotti	**t/ha**	Prodotti e sottoprodotti	**t/ha**
Legna da ardere	60	Legname da lavoro	50
Ramaglie	20	Rami e cimali	30
Residui minuti e perdite	20	Residui minuti e perdite	20

Confrontando le tabelle 5 e 6, e considerando un ciclo di rotazione ventennale, risulta che la biomassa ricavabile ogni anno dai boschi del Sud Ovest dell'Orvietano è pari a 168.786 tonnellate: circa 14.000 tonnellate al mese di biomassa legnosa.

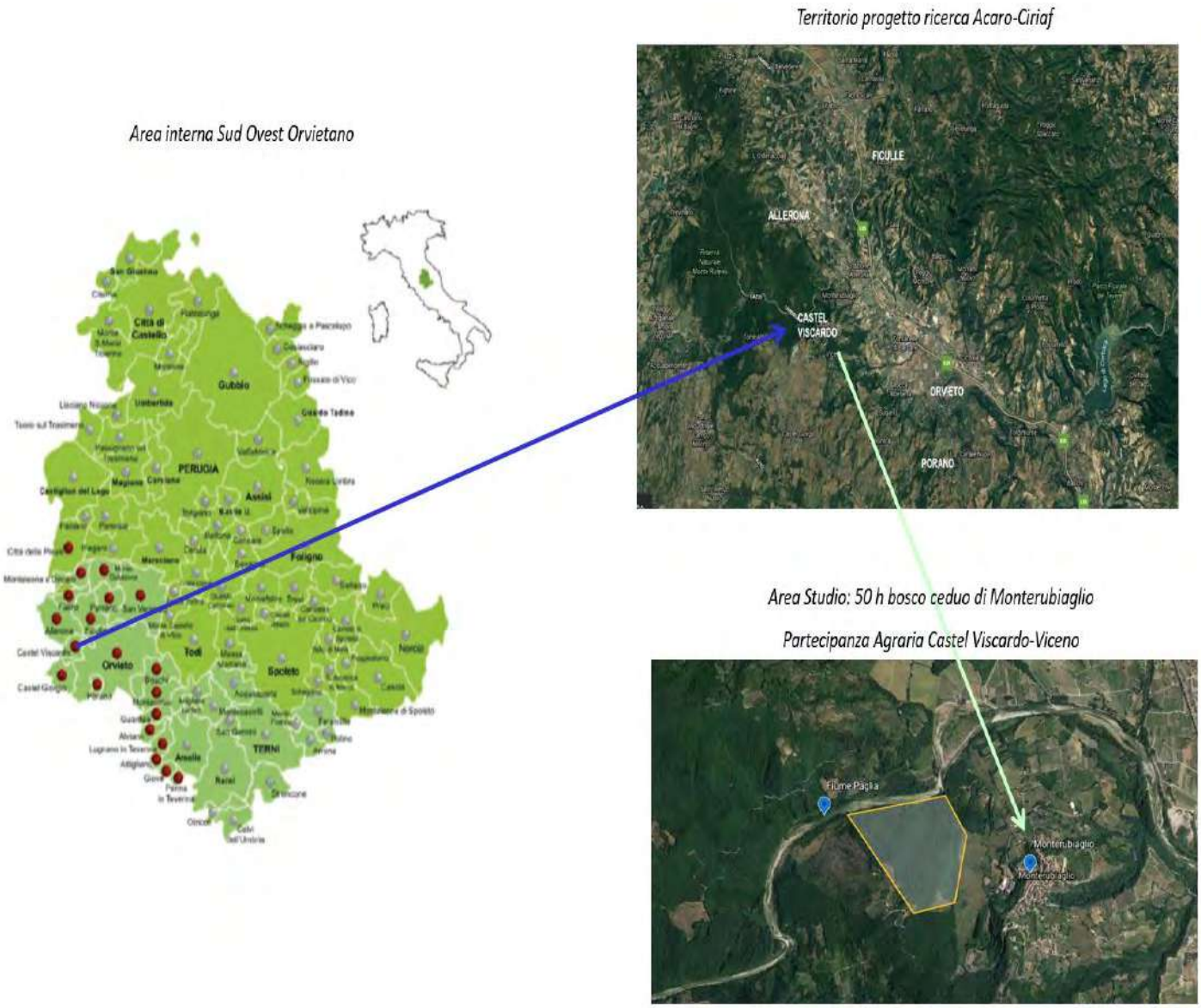
Gli interventi selvi-colturali di questi boschi sono basati essenzialmente su schemi planimetrici e trattamenti standardizzati volti ad ottenere legna da ardere destinata a sodisfare in parte il diritto di legnatico delle famiglie del luogo. Si tratta di approcci gestionali in linea con il concetto di sostenibilità della gestione forestale, poiché, come già evidenziato, i prelievi legnosi annui, sono inferiori

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

all'incremento medio annuo del bosco. Tuttavia essi non favoriscono né l'attivazione di processi di governance territoriale, né tanto meno sono in grado di promuovere comunità in grado di incentivare l'uso consapevole delle proprie risorse e resilienti al clima. Si è pertanto concluso che nell'area del Sud-Ovest dell'Orvietano non esistono modalità gestionali delle biomasse boschive di particolare efficienza ed efficacia. Per tale ragione non è stato possibile realizzare gerarchizzazione delle predette aree.

Dai contatti diretti con la Partecipanza agraria Castel Viscardo Viceno, il soggetto proprietario dei 50 ettari di area studio, è emerso che il bosco ceduo presso Monterubiaglio, presso Castel Viscardo, da intendersi come rappresentativo di tutti i boschi del Sud Ovest dell'Orvietano è gestito per mezzo di piani di taglio - il prossimo sarà pronto per la prima metà del 2022 - finalizzati ad ottenere legna da ardere per le famiglie del luogo.

Figura 4. Ubicazione aree studio e area campione del progetto di ricerca Ciriaf



Le analisi per la caratterizzazione chimico fisica dei campioni di biomassa prelevati nell'area studio, svolta dai laboratori del Centro Ricerche Biomasse-CRB del Ciriaf e l'analisi Swot del bosco di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Monterubiaglio, elaborata sui dati forniti dalla Partecipanza Agraria di Castel Viscardo-Viceno evidenziano tuttavia la effettiva possibilità di valorizzare energeticamente le biomasse locali.

Tabella 7. Analisi Swot bosco Monterubiaglio di Castel Viscardo, area studio rappresentative Sud-Ovest Orvietano

Dati generali	
Superficie boschiva	50 ha (area studio)
Quantità complessiva di legno	3.900 m^3 (area studio)
Volume medio di legna ad ettaro	78 m^3
Composizione formazioni boschive	100% bosco ceduo composto da formazioni di rovere, roverella, carpino, orniello e leccio
Punti di forza	**Punti di debolezza**
- Espansione continua della risorsa bosco (ceduo in particolare). - Incremento della provvigione legnosa. - Potere calorifico inferiore nella media.	- Incentivazione di approcci gestionali sostenibili nei boschi cedui. - Limitata estensioni dei boschi ad alto fusto. - Contrasto effetti legati al riscaldamento globale. - Carenza filiere di approvvigionamento prodotti legnosi rispetto alle esigenze del mercato.
Opportunità	**Minacce**
- Incremento della programmazione e della pianificazione nella gestione delle attività selvi-colturali. - Filiera corta bosco-legno-energia ad uso locale. - Miglioramento attività di previsione, prevenzione lotta agli incendi boschivi. - Condizioni favorevoli per valorizzare produzioni legnose locali.	- Abbandono aree rurali montane. - Deperimento boschi per effetti dovuti alla scarsa conoscenza dello stato di salute delle foreste.

A partire dai risultati dell'analisi Swot, il gruppo di lavoro Ciriaf ha ipotizzato un processo di governance per la valorizzazione energetica delle biomasse legnose e lo sviluppo della resilienza dell'area interna del Sud-Ovest dell'Orvietano, attraverso una filiera corta di legno-energia.

Ai sensi del Regolamento U.E. n. 1305/2013 sul sostegno allo sviluppo rurale, le filiere corte sono formate da un numero limitato di operatori economici che si impegnano a promuovere la cooperazione, lo sviluppo economico locale e stretti rapporti socio-territoriali tra produttori, trasformatori e consumatori. In questo senso, le filiere corte di approvvigionamento sono considerate come strumento di governance territoriale per perseguire politiche di sviluppo sostenibile nelle aree interne. Utilizzare lo strumento della filiera corta significa pertanto avviare un processo di cambiamento che fa leva sulle risorse endogene e che è caratterizzato da una leadership pubblica, da partenariati pubblico-privati e da percorsi di democrazia deliberativa.

La scelta di ipotizzare questo processo è derivata dal fatto che come ha mostrato la tabella 3, l'Umbria è la quinta regione in Italia per consumo di biomasse legnose per la produzione di energia elettrica e acqua calda a scopo industriali. Un esempio concreto viene proprio da Castel Viscardo, che è un territorio conosciuto a livello internazionale per la importantissima tradizione del cotto artigianale.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 5. Laterizi di Castel Viscardo lavorati a mano in fase di preparazione per la “cotta”





Nel comune di Castel Viscardo sono presenti circa 11 fornaci che producono laterizi utilizzando l'argilla presente nelle cave locali. Si è verificato che ad eccezione di 2 aziende che utilizzano forni a metano, le altre 9 alimentano i propri forni tramite scarti di lavorazione di segherie, che però non provengono dai boschi dell’Umbria, ma dai boschi delle contermini, in particolare Lazio e Toscana.

Figura 6. Cataste scarti di segheria pronte all’uso per una fornace di Castel Viscardo





In passato tali aziende utilizzavano i residui dei tagli boschivi locali, ma le cotte dei mattoni erano nella media di 2 all'anno e solo durante il periodo estivo. Oggi le aziende lavorano tutto l'anno ed il

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

fabbisogno complessivo delle 9 aziende è di circa 720 tonnellate di biomasse all'anno. A titolo esemplificativo, un processo di cottura (se ne fanno 8 all'anno) richiederebbe un quantitativo di biomassa intesa come legna da ardere pari a 10 tonnellate, con un potere calorifico medio di circa 3,4 kWh/kg considerando una stagionatura almeno per un'estate. Tale quantitativo è in grado di produrre, al netto dell'efficienza della caldaia di circa il 90%, una quantità di calore di circa 30 MWh a ciclo. La combustione di biomassa non produce direttamente alcuna emissione di anidride carbonica, pertanto la produzione di circa 30 MWh di energia termica tramite biomassa consente il risparmio di circa 3.300 m^3 di metano e conseguentemente circa 6,5 tonnellate di CO2 per ogni ciclo di cottura (fattore di emissione del metano: 1,96 kg CO2 per ogni m^3 di metano bruciato).

Tabella 8. Quadro sintetico della produzione di mattoni per una fornace

Quantità di mattoni prodotti a cotta	Numero cotte annue	Biomassa legnosa necessaria per cotta	Argilla naturale necessaria per cotta	Energia sviluppata ad ogni cotta
18.000	8	10 tonnellate	36 mc	30 MWh

Ciò richiede una filiera corta legno-energia che sia in grado di garantire la quantità annua necessaria di combustibile rinnovabile, delle forniture sicure e regolari, e una materia prima di qualità rispondente alle esigenze del consumatore. Si tratta di un approccio gestionale che abbiamo visto non essere attuato nell'area campione di Castel Viscardo. L'area studio è però rappresentativa dell'intera area del Sud Ovest dell'Orvietano, di conseguenza, come anche confermato dai gestori delle 9 fornaci a legna, si può affermare che in questo territorio dell'Umbria, non esiste una filiera corta legno-energia in grado di rispondere alla domanda di biomassa legnosa delle imprese che utilizzano questo combustibile.

Figura 7. Bocca del forno in funzione e barcaccia





ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Le aziende del laterizio di Castel Viscardo rappresentano dei formidabili strumenti per chiudere il ciclo del legno in maniera virtuosa perché non attingono al taglio indiscriminato dei boschi, ma come evidenziato fanno ricorso agli scarti della lavorazione. Considerando che i piani di taglio hanno un orizzonte temporale di 20 anni, se si considerano i 50 ettari del bosco ceduo di Monterubiaglio presso Castel Viscardo si comprende che è possibile ottenere circa 150 tonnellate all'anno, pari a circa il 21% del fabbisogno complessivo delle 9 aziende che a Castel Viscardo alimentano i propri forni con biomassa legnosa.

3. Verifica su scala regionale dell'impiego delle biomasse ligno-cellulosiche per la valorizzazione del Sud-Ovest Orvietano.

Quanto fin qui emerso indica le potenzialità derivanti da un percorso di governance per la valorizzazione delle biomasse boschive locali in ottica di resilienza. In base a questi risultati e ai dati della Figura 3 del presente articolo, il gruppo di ricerca Ciriaf ha allargato il suo campo di ricerca con l'obiettivo di conoscere su scala regionale la situazione delle realtà industriali che utilizzano biomasse per produrre energia rinnovabile. È stata così effettuata una mappatura degli impianti a biomassa presenti in Umbria, utilizzando in prima battuta i dati dell'archivio informatico del Gestore servizi elettrici-GSE, in base al quale, è emerso che per la produzione di energia elettrica in Umbria esistono 17 impianti a biomassa legnosa.

Tabella 9. Gli impianti a biomassa solida presenti in Umbria da archivio GSE

Provincia	N.	Ubicazione	Tipologia impianto	Pot. nom. (kW)
Perugia	1	Castiglione del Lago	Termoelettrico	199 kWe
	2	Città della Pieve	Termoelettrico	99 kWe
	3	Collazzone	Termoelettrico	360 kWe
	4	Gubbio	Termoelettrico	50 kWe
	5	Gubbio	Termoelettrico	50 kWe
	6	Magione	Termoelettrico	50 kWe
	7	Marsciano	Termoelettrico	200 kWe
	8	Marsciano	Termoelettrico	200 kWe
	9	Nocera Umbra	Termoelettrico	45 kWe
	10	Perugia	Termoelettrico	50 kWe
	11	Sigillo	Termoelettrico	54 kWe
	12	Spoleto	Termoelettrico	999 kWe
	13	Umbertide	Termoelettrico	50 kWe
Terni	14	Avigliano Umbro	Termoelettrico	999 kWe
	15	Narni	Termoelettrico	100 kWe
	16	Narni	Termoelettrico	100 kWe
	17	Stroncone	Termoelettrico	199 kWe

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Questi dati sono stati ricontrollati attraverso 3 passaggi:

1) dapprima, è stato contattato il servizio energia della Regione Umbria che ha fornito alcune precisazioni;
2) successivamente, tali indicazioni sono state verificate con le seguenti Amministrazioni comunali di riferimento:
   Comune di Castiglione del Lago, area governo del territorio,
   Comune Città della Pieve, area lavori pubblici e patrimonio,
   Comune di Collazzone, area opere pubbliche, patrimonio e tutela dell'ambiente,
   Comune di Gubbio, servizio ambiente,
   Comune di Magione, servizio urbanistica,
   Comune di Marsciano, controllo del territorio,
   Comune di Narni, area gestione del territorio,
   Comune di Nocera Umbra, area governo del territorio,
   Comune di Orvieto, area governo del territorio,
   Comune di Perugia, area energia,
   Comune di Sigillo, servizio urbanistica,
   Comune di Spoleto, Direzione Ambiente e Turismo,
   Comune di Stroncone, Area Urbanistica,
   Comune di Umbertide, servizio tecnico.

Questo doppio controllo ha consentito di raggiungere 2 importanti risultati. In primo luogo, è emerso che alcuni degli impianti mappati da GSE non sono mai stati realizzati, mentre altri seppur realizzati hanno cessato l'attività. In secondo luogo, sono stati individuati altri 8 impianti a biomassa legnosa, tutti operativi, non presi in considerazione dal GSE in quanto dedicati esclusivamente alla produzione di energia termica.

3) Il terzo passaggio di controllo dei dati, è avvenuto contattando direttamente i gestori degli impianti esistenti. Al fine di accertare l'effettivo funzionamento dell'impianto e raccogliere le informazioni tecniche necessarie per la ricerca, sono state contattate le seguenti aziende:
   Angelantoni Industries, Massa Martana;
   Agricola Molino Novo, Magione;
   Agraria Giannetti, Umbertide;
   Fattoria autonoma Tabacchi-FAT Soc. Coop. Agr., Città di Castello;
   Genera SpA, Avigliano Umbro;
   Luna s.r.l., Marsciano;
   Tarkett Group, Narni;
   Mariani s.r.l., Sigillo;
   Ediltermica Castrianni, Orvieto;
   Unicalce S.p.A. Narni.
   Non è stato possibile contattare i gestori dell'impianto di Gubbio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Sulla base di queste informazioni originali e di prima mano, si è definito il quadro quantitativo e qualitativo degli impianti a biomassa legnosa. La seguente tabella, elaborata sui dati forniti direttamente dalle Amministrazioni comunali e dai gestori degli impianti, ad oggi rappresenta l'unica mappatura esistente aggiornata e verificata sugli impianti a biomassa legnosa presenti in Umbria.

Tabella 10. Mappatura verificata impianti a biomassa legnosa presenti in Umbria

Provincia	N.	Ubicazione e Proprietà	Tipologia impianto	Potenza nominale (kW)	Realizzazione e Operatività
Perugia	1	Castiglione del Lago dato mancante	Termoelettrico	199 kWe	SI Non più operativo
	2	Città della Pieve	Termoelettrico	99 kWe	NO - NO
	3	Collazzone	Termoelettrico	360 kWe	NO - NO
	4	Gubbio dato mancante	Termoelettrico	50 kWe	SI dato mancante
	5	*Magione, Agricola Molino Novo	Termoelettrico	50 kWe	SI - SI
	6	Marsciano, Luna s.r.l	Termoelettrico	199 kWe	SI - SI
	7	Marsciano, Luna s.r.l.	Termoelettrico	199 kWe	SI - SI
	8	Massa Martana, Industrie Angelantoni	Termico	928 kWt	SI - SI
	9	Massa Martana, Industrie Angelantoni	Termico	928 kWt	SI - SI
	10	Nocera Umbra	Termoelettrico	45 kWe	NO - NO
	11	Perugia	Termoelettrico	50 kWe	NO - NO
	12	Sigillo, Impresa Mariani	Termoelettrico	54 kWe	SI non più operativo
	13	Spoleto	Termoelettrico	999 kWe	NO
	14	Stroncone	Termoelettrico	199 kWe	NO
	15	*Umbertide, Agraria Giannetti	Termoelettrico	50 kWe	SI - SI
	16	Umbertide, FAT, Soc. Coop. Agr.,	Termico	5.000 kWt	SI - SI
Terni	17	Avigliano Umbro, Genera S.p.A.	Termoelettrico	999 kWe	SI - SI
	18	Narni, Unicalce	Termico	34.000 kWt	SI - SI
	19	Narni dato mancante	Termoelettrico	75 kWe	SI non più operativo
	20	Narni dato mancante	Termoelettrico	75 kWe	SI non più operativo
	21	Narni dato mancante	Termoelettrico	75 kWe	SI non più operativo
	22	Narni, Tarkett Group	Termico	500 kWt	SI - SI
	23	Orvieto Ediltermica	Termico	150 kWt	SI - SI
	24	Orvieto Ediltermica	Termico	150 kWt	SI - SI
	* Questi 2 impianti da 50 kWe di agricola Molino Novo Magione e agricola Giannetti Umbertide sono autonomi nell'approvvigionamento di cippato.				

Dal punto di vista quantitativo, in Umbria sono stati censiti 24 impianti a biomassa solida. Di questi, 12 sono realizzati e operativi, 6 non sono mai stati realizzati, e gli altri 5 sebbene realizzati, non sono più operativi. Dell'impianto di Gubbio, elencato come n. 4 nella precedente tabella, non è stato

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

possibile verificare se sia mai entrato in funzione, mentre gli impianti n. 5 e 15 sono autosufficienti.

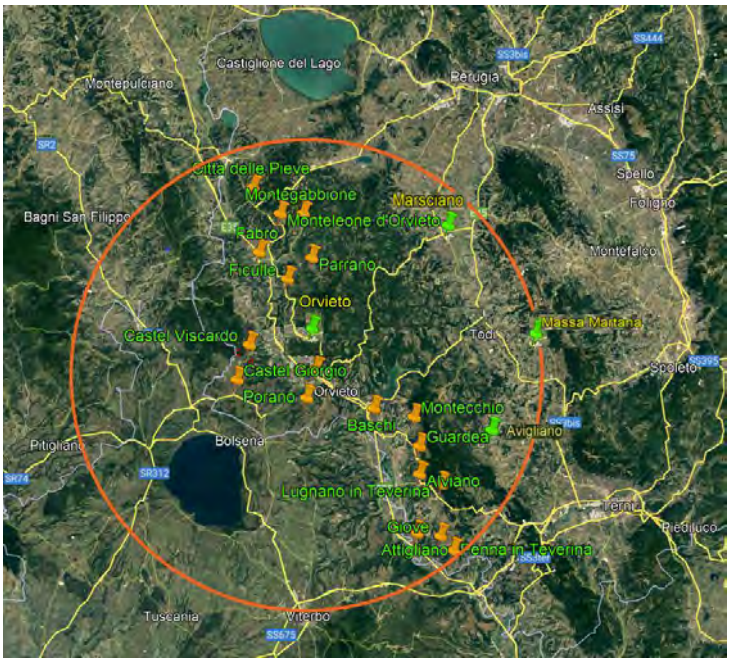
Nella Tabella 11 sono riportati gli impianti realizzati, operativi e che necessitano di forniture di cippato, con indicata la distanza in linea d'aria da Orvieto ed il nominativo del soggetto gestore.

Tabella 11. Manifestazioni interesse per biomasse forestali Sud-Ovest Orvietano

N.	Ubicazione	Raggio da Orvieto (Km)	Soggetto Gestore	Tipologia impianto	Potenza nominale (kW)
1	Orvieto	0	Ediltermica Castrianni	Termico	150 kWt
2	Orvieto			Termico	150 kWt
3	Avigliano Umbro	26	Genera S.p.A.	Termoelettrico	999 kWe
4	Marsciano	27	Luna s.r.l.	Termoelettrico	199 kWe
5	Marsciano	27		Termoelettrico	199 kWe
6	Massa Martana	29	Industrie Angelantoni	Termico	928 kWt
7	Massa Martana			Termico	928 kWt
8	Narni	37	Unicalce S.p.A.	Termico	34.000 kWt
9	Narni	40	Tarkett Group	Termico	500 kWt
10	Umbertide	69	FAT Soc. Coop. Agr.	Termico	5.000 kWt
Totale				kWt	41.656 kWt
				kWe	1.397 kWe

Poiché oggi sussistono serie problematiche relative ai costi di trasporto, il gruppo di lavoro Ciriaf ha ritenuto che fosse necessario minimizzare la distanza tra il luogo di produzione e quello di impiego. Per questa ragione, si è individuato un bacino di riferimento, Figura 8, per la biomassa legnosa di 32 km da Orvieto, il baricentro dell'area interna Sud Ovest Orvietano. Il bacino è stato individuato considerando la distanza in linea d'aria tra Orvieto e Penna in Teverina, che è il comune più lontano dal centro.

Figura 8. Bacino di approvvigionamento di biomassa solida per il Sud Ovest dell'Orvietano



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

All'interno di quest'area rientrano i seguenti 7 impianti a biomassa legnosa: gli impianti di Genera S.p.A. presso Avigliano Umbro (termoelettrico), le 2 caldaie di Luna S.r.l. presso Marsciano (termoelettrico), le 2 caldaie di Ediltermica ad Orvieto (termico), e l'impianto (2 elementi) di Angelatoni Industrie nei pressi di Massa Martana (termoelettrico), indicati nella Tabella 12, elaborata con i dati forniti direttamente dai gestori degli impianti.

Tabella 12. Specifiche impianti a biomassa legnosa all'interno del bacino dell'orvietano

	Angelantoni Industrie	**Ediltermica**	**Genera S.p.a.**	***Luna s.r.l.**
Taglia impianto (kW)	2 caldaie, ciascuna da 928 kWt	2 caldaie, ciascuna da150 kWt	1 impianto da 999 kWe	2 impianti, ciascuno da 199 kWe - 400 kWt
Tipologia impianto	Termico	Termico	Termoelettrico	Termoelettrico
Energia totale prodotta (al mese)	1.340 MWht	****38,2 MWht	650 MWhe	230 MWhe 460 MWht
Periodo funzionamento caldaia	6 mesi anno	12 mesi anno	12 mesi anno	12 mesi anno
Ore funzionamento	720 h/m	Caldaia 1: 315 h/m Caldaia 2: 215 h/m	650 h/m	580 h/m
Qualità cippato	Da legna vergine stagionata	Da legna vergine stagionata	Da legna vergine stagionata	Da legna vergine stagionata
Consumo cippato (al mese)	272 T/m	Caldaia 1: 10,5 T/m Caldaia 2: 7 T/m	1.300 T/m	400 T/m
Pezzatura cippato	medio < 60 mm	fine < 30 mm	medio < 60 mm	grossolano <=100mm
Umidità cippato	Tipica: 25%-35%	Tipica: 35%-40%	Tipica: 25%-35%	8%-12%
Smaltimento ceneri impianti	Riutilizzo in agricoltura e smaltimento in discarica	Riutilizzo in agricoltura	Riutilizzo in agricoltura e smaltimento in discarica	Riutilizzo in agricoltura
****Disponibilità a rifornirsi di cippato dall'area interna dell'Orvietano**	SI	SI	SI	SI
* Luna s.r.l. possiede un impianto per la gassificazione di biomassa solida che ha esigenze diverse dagli altri impianti (ad es. le polveri del cippato (parte fina) non devono essere superiori al 15%; l'umidità deve essere tra l'8% e il 12%)				
** Le caldaie lavorano a potenza ridotta (es. circa 65-70 kW) in base all'umidità del cippato				
*** Previa valutazione economica				

Dal punto di vista qualitativo, i colloqui svolti direttamente con i gestori degli impianti a biomasse hanno portato alla luce il fatto che a causa della mancanza di filiere legno-energia capaci di fornire le quantità di cippato necessarie in modo regolare e con una qualità rispondente alle esigenze dell'impianto, i gestori degli impianti ricorrono a fornitori delle regioni contermini, con un notevole aggravio dei costi delle forniture. Per queste ragioni, le 4 aziende contattate hanno manifestato un concreto interesse per l'avvio di un processo di governance territoriale nell'area interna del Sud Ovest dell'Orvietano finalizzato alla realizzazione di una filiera legno energia per la produzione di cippato da legna vergine.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. La buona pratica di filiera corta legno-energia nell'area interna della Garfagnana come esempio di governance per lo sviluppo socio-economico del Sud Ovest dell'Orvietano e dell'Umbria.

La ricerca Ciriaf ha dimostrato che in Umbria esiste una reale domanda di biomasse ligno-cellulosica e ha evidenziato le concrete possibilità di incentivare l'uso efficiente delle risorse endogene sostenibili (biomassa legnosa) nell'area del Sud Ovest dell'Orvietano che consentono anche la transizione verso una economia a basse emissioni di carbonio e resiliente al clima, in linea con i principi fondamentali della politica di sviluppo rurale comunitaria, i principi guida della Strategia nazionale delle aree interne (Snai), del Piano nazionale integrato energia e clima (Pniec) e del Piano nazionale di ripresa e resilienza (Pnrr), delle indicazioni contenute nel programma di sviluppo rurale regionale dell'Umbria (PSR). In questo quadro, il gruppo di lavoro Ciriaf ha definito una metodologia per la realizzazione della filiera corta legno-energia.

Come mostra la Tabella 13, una filiera corta legno energia è anzitutto un processo integrato di cooperazione per lo sviluppo endogeno economico sostenibile di un determinato territorio [45-46-47-48-49-50].

Tabella 13. Gli elementi caratterizzanti la filiera corta come processo di *governance* territoriale

Leadership	Partenariato pubblico-privato	Partecipazione
Autorevolezza delle Amministrazioni locali, trasparenza e responsabilità nelle scelte decisionali; capacità di mediazione politica; rendicontazione attività svolte	Regole chiare, condivise, non negoziabili; equa distribuzione compiti; leadership pubblica con stakeholder forti; valutazione e monitoraggio del pubblico	Concentrarsi su problemi specifici e locali; regolazione degli interessi consensuale e pluralista; considerare gli interessi collettivi di livello superiore

In quanto processo di governance territoriale, Tabella 14, il funzionamento di una filiera corta foresta-legno-energia si basa inoltre sui principi fondamentali della sostenibilità, della accettazione sociale e dello sviluppo economico, e sulle dimensioni della prossimità geografica, sociale ed economica [51-52-53-54].

Tabella 14. I principi e le dimensioni della filiera corta delle biomasse legnose a fini energetici

I principi fondamentali		
Sostenibilità	**Accettazione sociale**	**Sviluppo economico**
In termini di gestione: - del bosco e della sua biomassa - della biodiversità - della salute e del benessere collettivo	Coinvolgimento degli abitanti e dei principali attori pubblici e privati locali nel processo di governance	Definire accordi tra i diversi attori delle catene di produzione, prendendo in considerazione gli ostacoli e le peculiarità del territorio
Le dimensioni della prossimità		
Geografica	**Sociale**	**Economica**
La misura della distanza fisica, generalmente è un raggio di 70 km, tra luogo di produzione e consumo	La condivisione di sapere e valori tra produttore e consumatore	La crescita e lo sviluppo all'interno del territorio di riferimento

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

A partire da queste premesse, è stato elaborato lo schema metodologico per la realizzazione della filiera corta legno-energia che può essere replicato in altri contesti rurali, semirurali e di montagna. La metodologia è stata definita sulla base di una buona pratica di filiera corta legno energia, individuata grazie al Gruppo di azione Locale (GAL) Trasimeno Orvietano e al GAL Ternano, i partenariati pubblico-privati cofinanziati dai fondi Sie, che in forza di legge europea da 30 anni realizzano lo sviluppo locale partecipativo, integrato e multisettoriale previsto dal metodo Leader per le aree rurali, semirurali e montane [55], in questo caso nell'area interna del Sud Ovest dell'Orvietano. Per mezzo di questi due GAL[4], è stato possibile venire a conoscenza di una serie di buone pratiche di valorizzazione delle biomasse locali attraverso filiere corte legno energia realizzate tramite progetti cooperazione transfrontaliera [56-57-58].

Tra le esperienze esaminate, il Ciriaf ha selezionato la buona pratica realizzata a partire dal 2000 e tutt'ora funzionante nel comune di Camporgiano, in provincia di Lucca, che rientra tra i comuni dell'area interna del Nord Toscana denominata Garfagnana, Lunigiana, Media Valle del Serchio e Appennino Pistoiese[5]. Come il Sud Ovest Orvietano, si tratta di un territorio cerniera con le regioni contermini, in questo caso Liguria ed Emilia Romagna, con un consolidato valore turistico legato alla presenza diffusa di elementi di grande rilevanza culturale - borghi murati, torri, chiese conventi e abbazie, archivi, musei e biblioteche di eccezionale interesse, - e con una superfice territoriale prevalentemente boschiva.

All'inizio del 2000, il Comune di Camporgiano ha deciso di effettuare investimenti nella produzione di energia da fonti rinnovabili locali al fine di avviare un percorso di autonomia energetica capace di generare vantaggi per la popolazione, benefici all'ambiente e porsi come esempio virtuoso per altre piccole amministrazioni di aree rurali e semi-rurali e di montagna.

Il progetto di Camporgiano è stato uno dei primi progetti pilota realizzati in Toscana diretti a mostrare concretamente le potenzialità derivanti dall'impiego della biomassa legnosa (cippato) locale mediante una filiera corta foresta-energia che alimenta impianti di piccola taglia che rispondono alle caratteristiche del patrimonio forestale locale.

Il percorso di Camporgiano si è svolto in due step.

Il primo step è avvenuto in concomitanza della programmazione europea 2000-2006. I finanziamenti sono stati reperiti nell'ambito del progetto di cooperazione transnazionale "Lo sviluppo della filiera foresta-legno-energia attraverso il rafforzamento dell'associazionismo forestale", nella programmazione Leader Plus. La scelta è stata di realizzare una filiera corta bosco-legna-energia a scala locale necessaria ad approvvigionare le caldaie a biomassa legnosa (cippato) e una piccola rete di teleriscaldamento. Questo impianto ha soddisfatto il fabbisogno energetico di riscaldamento di edifici pubblici e privati tra cui la Scuola Media statale, la Scuola Elementare, l'Edificio Casa Comunale, il Centro Museale, 9 edifici privati. Si tratta di uno dei primi impianti di teleriscaldamento toscani con utenze private, alimentato con materia prima proveniente dalle foreste locali.

Il secondo step ha riguardato l'attuazione del progetto Potenziamento, miglioramento e ampliamento dell'impianto a cippato e della rete di teleriscaldamento ad esso collegata realizzato nell'ambito del PSR-Toscana 2007-2013, Asse 4 - Leader MISURA 321 c) "Servizi essenziali per

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

l'economia e la popolazione rurale". Sottomisura c) "Realizzazione di impianti alimentati a biomassa di origine forestale"

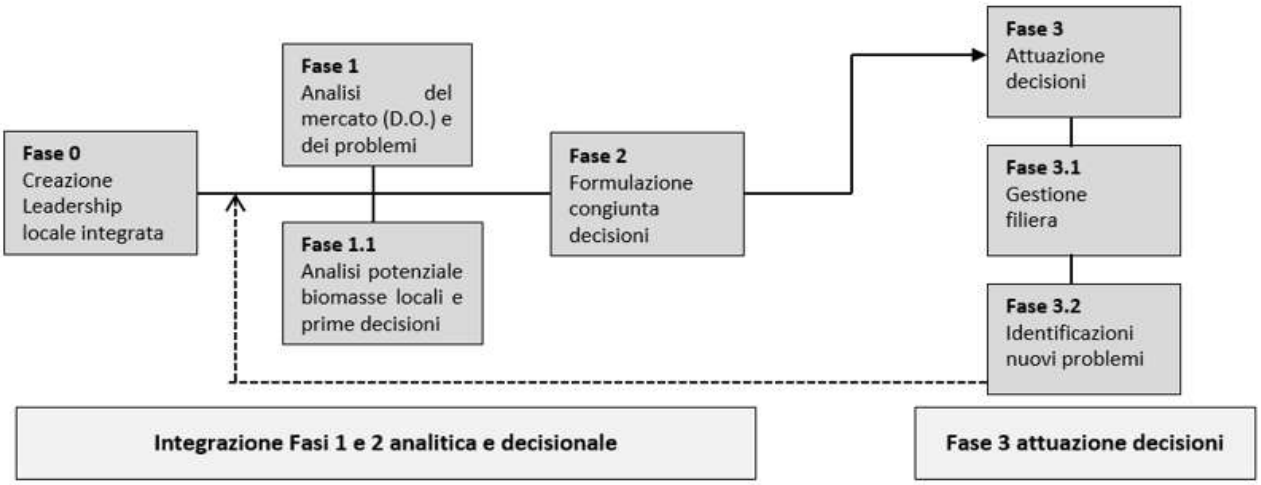
Il progetto, interamente realizzato e tutt'ora funzionante ha consentito la costruzione di un nuovo impianto a biomasse, con due generatori di calore da 300 kW, che potenzia l'impianto esistente e amplia la rete di teleriscaldamento a 39 utenze private. L'impianto potenziato è sempre approvvigionato grazie all'utilizzo di biomasse prodotte localmente, mediate la filiera bosco-legno-energia che coinvolge produttori locali di legno cippato, agricoltori e imprese boschive. Di seguito si riporta l'analisi Swot della pratica di Camporgiano, su dati forniti da GAL Montagna Appennino e Consorzio Forestale Villa Basilica che gestisce la centrale a cippato di Pariana e la relativa piattaforma di stoccaggio.

Tabella 15. Analisi SWOT buona pratica di Camporgiano

Punti di forza	**Punti di debolezza**
Leadership Pubblico Privata forte Progetto chiaro e condiviso Strategia di crescita e sviluppo locale sostenibile Affermazione di un modello positivo di sviluppo economico sostenibile e duraturo	Approvvigionamento rispetto alla costanza della fornitura e alla qualità del cippato Iniziale carenza logistica: piattaforme stoccaggio e strade forestali in particolare Corretta sostituzione tra risorse rinnovabili al fine di evitare criticità nel mercato locale della legna da ardere
Opportunità	**Minacce**
Rilancio economico del settore legno Risparmio ed autonomia energetica per l'intero territorio della Garfagnana Creazione di posti di lavoro Gestione sostenibile del patrimonio forestale e manutenzione degli assetti idrogeologici	Mancanza di formazione professionale addetti forestali Deboli investimenti pubblici in azioni di animazione territoriale Processi decisionali inefficienti per la gestione concordata e coordinata degli impianti

La metodologia elaborata dal Ciriaf, Figura 9, si basa un processo di governance territoriale di tipo integrato.

Figura 9. Metodologia di governance territoriale integrata per la filiera corta legno energia



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Un processo di governance locale si articola sempre secondo tre passi: 1) analisi e individuazione dei problemi; 2) formulazione delle decisioni; 3) attuazione delle scelte. Questi passi non sono però compiuti solo dalla leadership, poiché essa deve interagire con gli altri soggetti locali che faranno parte della filiera e dovranno attuare le decisioni. Sotto questi profili, la metodologia integrata proposta dal Ciriaf prevede anzitutto che leadership locale, composta da soggetti pubblici (Enti locali) e operatori privati, diventi il committente aggregato della filiera corta legno energia. In questa metodologia, inoltre, le analisi del mercato e del potenziale delle biomasse locali con la identificazione di eventuali problemi (fase 1) e la concreta formulazione delle decisioni (fase 2) non avvengono in maniera sequenziale, ma in modo integrato: la leadership e i soggetti pubblici e privati coinvolti nel processo di governance identificano insieme le questioni più rilevanti per una data area.

Anche le analisi di mercato e del potenziale della biomassa avvengono in maniera collegiale (leadership, portatori di interessi, consulenti) e in questo stesso modo si perviene alla formulazione delle decisioni. La scelta di formulare in maniera aggregata soluzioni e, soprattutto, gestire congiuntamente la loro attuazione nel tempo, ha il notevole vantaggio di creare fiducia tra i diversi attori, rafforzare lo spirito di squadra e far crescere il sistema di relazioni nell'area interna, dove come noto, a mancare è esattamente lo spirito relazionale.

Il metodo decisionale integrato migliora l'efficienza e l'efficacia del processo di governance locale nelle aree interne. Questo metodo è molto utile nel momento in cui occorre fronteggiare una serie di problemi che per essere risolti sono necessarie le conoscenze e le risorse di molteplici attori, sia pubblici che privati.

La preparazione del processo di governance integrata per la realizzazione della filiera corta legno energia prevede due scadenze principali:

1. la prima è la data entro la quale si concludono le analisi di mercato e del potenziale delle biomasse. La consegna delle analisi è supportata da un'indagine diagnostica dell'area, vale a dire da un documento che contiene:
   a) i punti di forza e di debolezza, delle minacce e delle opportunità dell'area;
   b) una bozza delle principali decisioni strategiche sulle quali avviare la fase di attuazione e gestione del progetto di filiera corta;
2. la seconda scadenza è molto importante, perché è la data di presentazione del progetto finale, partecipato e condiviso, di filiera corta legno-energia. Questa data è generalmente definita e annunciata nell'evento di avvio del processo di governance territoriale integrata.

Conclusioni

La ricerca *Governance Territoriale Strategica per implementare l'uso energetico delle biomasse boschive in territori fragili. Il caso studio del Sud Ovest Orvietano*, ha dimostrato che la valorizzazione delle biomasse boschive presenti nell'area del Sud Ovest dell'Orvietano può avvenire realizzando una filiera corta legno-energia attraverso il coinvolgimento dei principali decisori pubblici e privati dell'area.

La ricerca ha stimato che dai circa 56.000 ettari di boschi nel Sud Ovest dell'Orvietano si possono ottenere circa 14.000 tonnellate al mese di biomassa legnosa, in grado di coprire il fabbisogno mensile

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

di cippato (1989,5 tonnellate) da parte delle 4 aziende individuate nel raggio di 32 chilometri da Orvieto, e il fabbisogno annuo di biomassa delle 9 fornaci che producono laterizi artigianali a Castel Viscardo. Inoltre, tali quantitativi consentono di procedere alla realizzazione di ulteriori piccole caldaie a biomassa legnosa per il fabbisogno di acqua calda sanitaria e calore di operatori privati e edifici pubblici nell'area dell'orvietano, capaci di ridurre l'utilizzo di combustibili fossili, le emissioni di anidride carbonica e di implementare ulteriormente l'economia locale.

La ricerca ha inoltre evidenziato l'interesse delle 4 aziende (Angelantoni Industries, Ediltermica, Genera S.p.A., Luna s.r.l.) per la creazione di una filiera corta e sostenibile legno-energia nell'area oggetto della ricerca, che è anzitutto un processo di governance territoriale integrata.

In questo senso, la metodologia messa a punto dal gruppo di ricerca Ciriaf prevede:

1) una leadership pubblico e privata che segue dall'inizio alla fine il processo di governance per la realizzazione della filiera corta legno energia;
2) un progetto tecnico chiaro, comprensibile, condiviso dal privato e dal pubblico e coerente con le potenzialità delle risorse locali;
3) delle accurate analisi di mercato per comprendere la effettiva esistenza di una domanda di biomassa e le reali potenzialità dei boschi di fornire tale biomassa, anche al fine di evitare problemi di disponibilità di materia prima nei momenti di picco di domanda termica (gennaio-febbraio);
4) una particolare attenzione, fin dalle prime fasi di avvio del progetto, per gli aspetti logistici, (immediata realizzazione della piattaforma per lo stoccaggio del cippato, indispensabile per gli approvvigionamenti nel pieno periodo invernale e la verifica dello stato delle strade forestali) e per la formazione professionale degli addetti alla filiera.

Il gruppo di ricerca Ciriaf raccomanda agli stakeholder locali dell'area del Sud Ovest dell'Orvietano di intraprendere un percorso di gestione dei boschi basata sul concetto di "multifunzionalità", vale a dire una gestione attiva e sostenibile, finalizzata a perseguire gli obiettivi di interesse pubblico e la creazione di nuovi posti di lavoro duraturi e sostenibili mediante l'attivazione di filiera corte foresta energie rinnovabili, così come anche indicato nel Decreto del 23 Dicembre 2021 di Approvazione della strategia forestale nazionale.

Note

1 Del progetto Acaro si dà ampiamente conto in [1]

2 Il ceduo e la fustaia sono i tipi colturali più comuni ed occupano rispettivamente il 42% ed il 36% della superficie forestale. Le formazioni attribuite al tipo colturale speciale, come castagneti da frutto, noceti e sugherete, si estendono su circa l'1.4% della superfice che per il restante 20,6% è occupata da una forma di governo del bosco non definita o non classificabile. In questo scritto i termini bosco, foresta e selva sono utilizzati con lo stesso significato fornito dall'Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi di carbonio: area con una estensione minima 2000 m^2, larga almeno 20 m, con una copertura (selva, bosco, foresta) di almeno il 20%.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3 In questa sede, il termine governance è usata in maniera intercambiabile con quello di multilevel governance. Vale la pena, accennare al fatto che rispetto alla governance, la governance multi-livello si caratterizza per la partecipazione oltre che di attori privati, dei diversi livelli di istituzioni governative anche al di fuori delle gerarchie istituzionali e, quindi, quasi in qualità di attori privati.

4 Si ringraziano, Francesca Caproni, Direttrice del GAL Trasimeno Orvietano, e Paolo Pennazzi, Direttore GAL Ternano.

5 Si ringraziano, Stefano Stranieri, Responsabile Tecnico Amministrativo GAL Montagna Appenino, e Giovanni Ciniero presidente del consorzio forestale che gestisce la centrale a cippato di Pariana nel comune di Villa Basilica e la relativa piattaforma di stoccaggio per il cippato, già responsabile per l'Ufficio Politiche Comunitarie della Provincia di Lucca, della governance delle biomasse nell'ambito dei progetti Biomass e Biomass+ [56-57-58, cit.].

Riferimenti

1 Fondacci L., Nicolini A., Cotana, F. Manni. M., Lunghi L., Governance e resilienza in territori fragili. Analisi degli impatti socio-economici e ambientali derivanti dall'impiego delle biomasse da manutenzione boschiva nell'area del Sud-Ovest Orvietano *XXI Congresso nazionale Ciriaf, Sviluppo sostenibile, tutela dell'ambiente e della salute umana*, Perugia 8-9 Aprile, 2021, Morlacchi editore, University Press, pp. 336-350 [https://www.morlacchilibri.com/universitypress/index.php?content=scheda&id=1111].

2 Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali e del tursimo-Mipaaft, *RafItalia, 2017-2018, Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia*, 2019, Compagnia delle foreste, Arezzo [https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/19231].

3 Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali-Mipaaf, Decreto Legislativo, 3 aprile 2018, n. 34, "Testo unico in materia di foreste e filiere forestali", Gazzetta Ufficiale n. 92 del 20-2018.

4 Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali-Mipaaf, Decreto 23 Dicembre 2021, "Approvazione Strategia Forestale Nazionale", in Gazzetta Ufficiale, serie generale n. 33, 9 Febbraio 2022.

5 Ross. G., *Jacques Delors and European Integration*, Polity, Cambridge, 1995.

6 Predieri A, eds., *Fondi strutturali e coesione economica e sociale nell'Unione Europea*, Giuffrè, Milano, 1996.

7 Hooge L. Marks G., A postfunctionalist theory of multilevel governance. *The British Journal of Politics and International Relations* **2020**, 22 (4), 820–826.

8 Barca F., "An agenda for a reformed cohesion policy: a place-based approach to meeting European Union challenges and expectations". Independent report prepared at the request of Danuta Hübner, Commissioner for Regional Policy, 2009 [https://ec.europa.eu/regional_policy/archive/policy/future/pdf/report_barca_v0306.pdf].

9 Piattoni S., La governance multilivello: sfide analitiche, empiriche e normative. *Rivista italiana di scienza politica* **2005**, 3, 417-445.

10 Angelini A., Bruno A., *Place-Based. Sviluppo locale e programmazione 2014-2020*, Franco Angeli,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Milano, 2016.
11 Celata F., Coletti R., Place-based strategies or territorial cooperation? Regional development in transnational perspective in Italy. *Local Economy* **2017**, 29 (4-5), 394-411.
12 Comunità Europea, "La Governance europea - Un Libro Bianco", Comunicazione della Commissione, del 25 luglio 2001, COM (2001) 428 def. - Gazzetta ufficiale C 287 del 12.10.2001, [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM%3Al10109].
13 Agenzia per la coesione territoriale-ACT, "Accordo di Partenariato 2014-2020, Strategia nazionale per le Aree interne: definizione, obiettivi, strumenti e governance", Documento tecnico collegato alla bozza di Accordo di Partenariato trasmessa alla CE il 9 dicembre 2013, [https://www.agenziacoesione.gov.it/wpcontent/uploads/2020/07/Strategia_nazionale_per_le_Aree_interne_definizione_obiettivi_strumenti_e_governance_2014.pdf].
14 Galderisi A., Guida G., Territori periurbani oltre la sostenibilità: luoghi snodo per l'attivazione di strategie rigenerative, *Archivio di Studi Urbani e Regionali* **2020**, 127, 72-95.
15 Strategia nazionale aree interne-Snai, "Relazione annuale sulla strategia nazionale per le aree interne", presentata al CIPE dal Ministro per il SUD, 31 dicembre 2018, [http://old2018.agenziacoesione.gov.it/opencms/export/sites/dps/it/documentazione/Aree_interne/Presentazione/Relazione_CIPE_ARINT_311218.pdf].
16 McAlsan A., "The concept of resilience. Understanding its origins, meaning and utility", *Strawman paper*, Torrens Resilience Institute, 14 March 2010, Adelaide, Australia, [https://www.flinders.edu.au/content/dam/documents/research/torrens-resilience-institute/resilience-origins-and-utility.pdf].
17 Holling C.S., Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* **1973**, 4:1- 23.
18 Berkes, F., Folke C., (Eds.), *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience*, Cambridge University Press, New York, 1998.
19 Klein R.J.T., Smit M. J., Goosen H., Hulsbergen C. H., Resilience and Vulnerability: Coastal Dynamics or Dutch Dikes? *The Geographical Journal* **1998**, 164, 3, 259-268. [https://www.jstor.org/stable/pdf/3060615.pdf].
20 Klein R.J.T., Nicholls R.J., Thomalla F., Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Environmental Hazards* **2004**, 5, 1-2, 35-45 [https://www.researchgate.net/publication/222394834_Resilience_to_natural_hazards_How_useful_is_this_concept].
21 Walker B., Holling. C.S., Carpenter, S.R., Kinzig A., et al., Resilience, Adaptability and Transformability in Social–ecological Systems. *Ecology and Society* **2004**, 9 (2): 5 [http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5/].
22 Chaffin, B. C., Gosnell H., Cosens B. A., A decade of adaptive governance scholarship: synthesis and future directions. *Ecology and Society* **2014**, 19(3): 56 [https://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss3/art56/].
23 Walker B., Salt D., "A Crash Course in the Science of Resilience", in Lerch D. (ed), *The Community*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Resilience Reader. Essential resources for an era of Upheaval, Island Press, Washington|Covelo London, 2017 [https://reader.resilience.org/introduction/].

24 Folke et al., Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society* **2010**, 15(4): 20 [https://www.ecologyandsociety.org/vol15/iss4/art20/].

25 Walker B., Salt D., *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*, Island Press, Washington, D.C., 2006.

26 Allan P., Bryant M., Resilience as a framework for urbanism and recovery. *Journal of Landscape Architecture* **2011**, vol. 6 (2), 43, [https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/18626033.2011.9723453].

27 Curti F., Diappi L., a cura di, *Gerarchie e reti di città: tendenze e politiche*, Angeli, Milano, 1990.

28 Dematteis G., a cura di, *Il fenomeno urbano in Italia: interpretazioni, prospettive, politiche*, Angeli, Milano, 1993.

29 Wilson, G., Multifunctional 'quality' and rural community resilience. *Transactions of the Institute of British Geographers* **2010**, 35(3), 364-381, [https://www.jstor.org/stable/pdf/40890993.pdf?refreqid=excelsior%3Ad1a13fb545e607c32168c5d822e0a899].

30 McManus, P., et al., Rural community and rural resilience: What is important to farmers in keeping their country towns alive? *Journal of Rural Studies* **2012**, 28(1), 20-29, [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016711000854].

31 Schouten, M. A. H., van der Heide, C. M., Heijman, W. J. M. y Opdam, P. F. M., A resilience based policy evaluation framework: Application to European rural development policies. *Ecological Economics* **2012,** 81, 165-175. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800912002686].

32 Governo Italiano, *Italia Domani, Piano nazionale di ripresa e resilienza, Next Generation Italia*, 2021, Presidenza del Consiglio dei Ministri, [https://italiadomani.gov.it/it/home.html].

33 Ministero dello sviluppo economico, Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Piano nazionale integrato per l'energia e il clima-Pniec*, dicembre 2019, [https://www.mise.gov.it/index.php/it/198-notizie-stampa/2040668-pniec2030].

34 Comunità Europea-CE, *Un traguardo climatico 2030 più ambizioso per l'Europa Investire in un futuro a impatto climatico zero nell'interesse dei cittadini*, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, 17.9.2020 COM(2020) 562 final, Bruxelles.

35 Comunità Europea-CE, *Il Green Deal europeo*, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al Comitato delle regioni, 11.12.2019 COM (2019) 640 final, Bruxelles.

36 Comunità Europea-CE, *Un pianeta pulito per tutti. Visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra*, Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato economico e sociale europeo e al

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Comitato delle regioni e alla Banca europea per gli investimenti, 28.11.2018 COM (2018) 773 final, Bruxelles.

37 Agriforenergy, Mercati e prezzi. Prezzi aggiornati aprile 2021. *Rivista tecnica. Energia rinnovabile dall'agricoltura e dalle foreste* **2021,** 2, https://www.aielenergia.it/public/pubblicazioni/198_M_P_2-2021.pdf].

38 Scarascia Mugnozza G. et al., La filiera corta del legno: un'opportunità per la bio-economia forestale in Italia. *Forest@* **2021**, 18, 64-71 [https://www.agenziacoesione.gov.it/wp-content/uploads/2020/07/Intervento_Lucatelli.pdf].

39 Cavalaglio G. et al, Characterization of Various Biomass Feedstock Suitable for Small-Scale Energy Plants as Preliminary Activity of Biocheaper Project. *Sustainability* **2020**, 12, 6678 [https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6678/htm~].

40 Corona, et. al, Produzioni agricole e forestali per biomassa a impiego energetico *Forest@* **2019**, 16: 26- 31 [https://foresta.sisef.org/contents/?id=efor3001-016].

41 Gestore Servizi Energetici-GSE, "Rapporto statistico 2019. Energia da fonti rinnovabili", Direzione Studi e Monitoraggio di Sistema, Funzione Statistiche e Monitoraggio Target, 2021.

42 Piano forestale regionale-Pfr, "Piano forestale regione Umbria 2008-2017", Regione Umbria, servizio foreste ed economia montana, 2009, [https://www.regione.umbria.it/documents/18/1932463/piano+regionale+forestale+2008_2017/23268182-013e-46f6-904a-90e2306cbf9c].

43 Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali-Mipaaf, "Bozza preliminare della Strategia Forestale Nazionale redatta a cura del Gruppo di lavoro incaricato dal Mipaaf" in attuazione dell'art. 6, comma 1, del Decreto legislativo 3 aprile 2018, n.34. Febbraio 2020, Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali Dipartimento delle Politiche Europee ed Internazionali e dello Sviluppo Rurale, Direzione Generale delle Foreste, 2020 [https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeAttachment.php/L/IT/D/c%252Fb%252Ff%252FD.886a3490e3f32aed8b5c/P/BLOB%3AID%3D15339/E/pdf].

44 Agenzia regionale protezione ambiente-Arpa (2004) Relazione sullo stato dell'ambiente, Regione Umbria [https://www.arpa.umbria.it/pagine/relazione-sullo-stato-dellambiente-dellumbria].

45 Fondacci L., Nicolini A., Cotana F., Manni M., Lunghi L., Governance e resilienza in territori fragili. Analisi degli impatti socio-economici e ambientali derivanti dall'impiego delle biomasse da manutenzione boschiva nell'area del Sud-Ovest Orvietano. *XXI Congresso nazionale Ciriaf, Sviluppo sostenibile, tutela dell'ambiente e della salute umana*, Perugia 8-9 Aprile 2022, Morlacchi editore, University Press, pp. 336-350 [https://www.morlacchilibri.com/universitypress/index.php?content=scheda&id=1111].

46 Galli F., Brunori G., (eds.), "Short Food Supply Chains as drivers of sustainable development. Evidence Document", *Document developed in the framework of the FP7 project FOODLINKS* (GA No. 265287), Laboratorio di studi rurali Sismondi, 2013, [https://orgprints.org/id/eprint/28858/1/evidence-document-sfsc-cop.pdf].

47 Krajnc N. *et al*, "Linee guida. Le fasi della creazione di una filiera di approvvigionamento di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

biomassa legnosa nelle aree protette". Capacity building, capitalizzazione dei risultati e disseminazione, BioEUparks, 2015.

48 Romano R., Plutino M., (a cura di), "Biomasse legnose, microfiliere di autoconsumo da biomasse legnose", Consiglio per la Ricerca e l'economia agraria, Centro Politiche e Bioeconomia, Roma, 2018.

49 Federazione italiana produttori di energia da fonti rinnovabili-Fiper, "Teleriscaldamento a biomassa: un investimento per il territorio analisi delle ricadute economiche, energetiche e ambientali su scala locale e nazionale", Fiper, 2018 [https://www.fiper.it/wp-content/uploads/libro-FIPER-teleriscaldamento-a-biomassa-un-investimento-per-il-territorio.pdf].

50 Masiero M., Andrighetto N., Pettenella D., *Linee-guida per la valutazione sistematica della filiera corta delle biomasse legnose a fini energetici*. Agriregionieuropa **2013**, 33 [https://agriregionieuropa.univpm.it/it/print/3551].

51 Notarangelo G., Paletto A., Sacchelli S., De Meo I., "Biomasse legnose di origine forestale per impieghi energetici in trentino. Potenzialità, prodotti, mercato ed aspetti sociali", Biomasfor, 2013, [https://www.legnotrentino.it/documenti/Pubblicazioni/2013/biomasfor.pdf].

52 Grisotto S., (a cura di), Analisi sulle potenzialità di approvvigionamento di cippato da biomassa forestale nella comunità di Primiero-Vanoi, Biomasse Primero, 2011, [https://www.primiero.tn.it/media/files/Urbanistica-e-Paesaggio/Legno-Bosco/studioGrisotto.PDF].

53 Versiglioni et al. (2010), Pianificazione economico-finanziaria di impianti a biomassa. *10° Congresso Nazionale CIRIAF – Atti*, Perugia 9/10 aprile 2010, p.343-348, [https://www.santuccipartners.it/wp-content/uploads/2021/09/Biomassa_Ciriaf-1.pdf].

54 Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici-Apat, "Le biomasse legnose. Un'indagine sulle potenzialità del settore forestale italiano nell'offerta di fonti di energia" Rapporti 30/2003, APAT, 2004.

55 Fondacci L., L'evoluzione del programma Leader e dei gruppi di azione locale (Gal). 30 anni di politiche di sviluppo territoriale partecipativo. *Urbanisica,* **2022**, 164, Roma.

56 Provincia di Lucca, "Politiche e strumenti per la valorizzazione delle biomasse come fonte energetica rinnovabile. Le biomasse nell'area di cooperazione transfrontaliera: disponibilità di risorse a proposte di governance". Progetto Biomass politiche e strumenti per la valorizzazione delle biomasse come fonte energetica rinnovabile, Provincia di Lucca, Office du Development Agricole et Rural de Corse, Provincia di Nuoro, Provincia di Massa Carrara, Provincia di Pisa, Provincia di Grosseto, 2011.

57 Provincia di Lucca, "L'esperienza del progetto Biomass nei territori dell'area di cooperazione transfrontaliera". Progetto Biomass politiche e strumenti per la valorizzazione delle biomasse come fonte energetica rinnovabile, Provincia di Lucca, Office du Development Agricole et Rural de Corse, Provincia di Nuoro, Provincia di Massa Carrara, Provincia di Pisa, Provincia di Grosseto, 2011.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

58 Provincia di Lucca, “La valorizzazione delle biomasse attraverso l’attivazione delle filiere corte ed il controllo di qualità”. Progetto Biomass+ cofinanziato dal Programma di cooperazione Transfrontaliera “Marittimo”, Provincia di Lucca, Consorzi per la valorizzazione delle risorse agro-forestali di Villa Basilica e delle Colline Lucchesi, Cosorzio Co.l.ti.va.pra, Comune di Castel Nuovo Magra, Office du Development Agricole et Rural de Corse, Provincia di Nuoro, Provincia di Massa Carrara, Provincia di Pisa, Provincia di Grosseto, 2011.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Realizzazione e sperimentazione di un sistema innovativo per il controllo e la riduzione delle polveri sottili in caldaie a pellet di piccola taglia

Franco Cotana[1], Ramoon Barros Lovate Temporim[2,*], Alessandro Petrozzi[2], Silvia Garlatti[2], Valentina Coccia[1], Andrea Nicolini[1], Leandro Lunghi[1], Giacomo Fabbrizi[2], and Tommaso Giannoni[2]

[1] Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti, 93-06125 Perugia, Italia

[2] CIRIAF—Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli", Via G. Duranti, 67-06125 Perugia

***** Ramoon Barros Lovate Temporim. E-Mail: barroslovate@crbnet.it; +39-075-5853574

Abstract: Il presente lavoro descrive le prestazioni di un sistema innovativo per il retrofit della cattura delle polveri sottili (PM - Particulate Matter) emesse da stufe a pellet residenziali, in accordo a quanto previsto dal progetto PRIN BIOCHEAPER. Il sistema proposto è composto da un ciclone passivo che può essere facilmente accoppiato all'impianto di scarico della stufa senza grandi interventi strutturali. Questo sistema è stato testato in un impianto di riscaldamento composto da una stufa a pellet da 6,73 kW funzionante in continuo per 4 ore, e in alternanza, per 4 cicli da 2 ore. Durante i due test sono stati misurati il tempo, la temperatura, la quantità di pellet consumata e il PM fine catturato. Il sistema ha catturato circa 0,05 g e 0,13 g per kg di pellet in modalità continua e alternata rispettivamente. La composizione in termini di metalli del PM fine mostra una maggiore concentrazione di cadmio, cromo, rame, piombo, nichel e zinco per il particolato catturato in modalità alternata rispetto alla modalità continua. Il maggior tasso di emissione di particolato, nonché la maggiore concentrazione di metalli nel funzionamento alternato, era probabilmente dovuto alla maggiore perturbazione in camera di combustione nel momento delle fasi di accensione/spegnimento.

Parole Chiave: Polveri sottili; Combustione; Retrofitting; Ciclone Passivo; Biomassa; Caldaia a pellet; Materiale Lignocellulosico; Sistema di Riscaldamento

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduzione

La presente memoria descrive le attività sviluppate nell'ambito del Progetto PRIN (BIO-CHEAPER) - Biomass Circular Holistic Economy Approach to Energy Equipment. Il progetto mira a ottenere una maggiore efficienza energetica e una riduzione delle emissioni di inquinanti lungo le filiere per la biomassa, compreso il pellet. Comprende lo studio di potenziali miglioramenti tecnologici per ridurre le emissioni di sistemi su piccola scala [1].

Attualmente, l'implementazione di fonti energetiche alternative ad alto livello di sostenibilità è stata adottata come percorso per la transizione energetica. In questa circostanza ha acquisito importanza l'energia ottenuta attraverso la biomassa, con il suo grande potenziale come risorsa programmabile e sostenibile per la produzione di energia. Inoltre, la biomassa viene definita combustibile carbon neutral poiché non vi è alcun apporto netto di anidride carbonica nell'ambiente [2].

Le biomasse si dividono in due principali categorie o frazioni, lignocellulosiche ed i semi. Il materiale lignocellulosico può essere utilizzato direttamente o indirettamente per produrre diverse fonti di energia, come sostanze chimiche, biocarburanti, biomateriali, riscaldamento, raffreddamento, elettricità, ecc [3,4]. La combustione è la tecnologia più utilizzata per la sua semplice implementazione. La biomassa solida può essere bruciata in forni o caldaie. Questo processo produce calore, che può essere utilizzato direttamente negli impianti termici [3,4].

La pellettizzazione del materiale combustibile è un approccio diffuso per utilizzare biomasse lignocellulosiche nei sistemi di combustione., ottenendo un prodotto molto denso con un contenuto di umidità molto basso (< 10%), consentendo una grande efficienza di conversione energetica, nonché un facile stoccaggio e movimentazione. Inoltre, emette meno PM rispetto ai combustibili da biomassa standard [5,6]. L'uso del pellet come combustibile ha consentito lo sviluppo di forni automatizzati basati con un funzionamento facile rispetto ai sistemi di riscaldamento a olio o gas [7].

Il pellet, a differenza dei chips di legno, sono più in grado di fluire, consentendo il funzionamento automatizzato di un forno o di una stufa. Poiché i pellet hanno un contenuto di umidità e una dimensione costanti, possono essere regolati in modo più preciso rispetto al cippato [7].

Il particolato fine (PM10 o PM2,5) è particolarmente dannoso per la salute umana ed è risaputo che la combustione della biomassa residenziale crea notevoli quantità di PM fino. I due principali fattori per la formazione di PM sono la combustione incompleta, che crea fuliggine e carbone incombusto, e i componenti inorganici che compongono la cenere della biomassa [5,8–12].

La quantità di particolato prodotta è proporzionale alla quantità di cenere nel combustibile e alla sua composizione. Inoltre, l'emissione di PM è correlata alle instabilità nel letto di combustione [11,13]. I pellet sono estremamente adattabili e possono essere utilizzati in un'ampia gamma di sistemi, dai forni di piccola scala con capacità fino a 100 kW ai forni di grandi dimensioni con capacità superiori a 1000 kW. Il focus di questo studio è sull'uso di stufe a pellet residenziali nella gamma di piccole dimensioni [7]. In particolare, in questo studio è stata utilizzata una stufa con una capacità di 6,73-2,34 kWh.

In aggiunta al problema relativo alle maggiori emissioni di PM fino legate alle piccole stufe a pellet installate in ambiente residenziale, è stato proposto un prototipo di sistema innovativo per ridurre le

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

emissioni di queste particole in atmosfera. Il sistema proposto è un ciclone passivo di piccola scala che può essere accoppiato al sistema di scarico dei gas e può essere installato in strutture residenziali che hanno poco spazio fisico a disposizione. Inoltre, essendo un sistema passivo, riduce la necessità di installazioni più complesse che richiedono installazione elettrica e più spazio fisico.

Pertanto, l'obiettivo di questo lavoro è quello di presentare la progettazione e la realizzazione di un retrofitting per stufe a pellet residenziali per la cattura del PM fine. Questo sistema è stato testato in impianti di piccola taglia con tiraggio forzato, puntando ad un dispositivo autopulente, a basso costo e a bassa richiesta di manutenzione, per impianti nuovi o esistenti, in grado di ridurre il particolato nell'aria, con facile installazione in spazi ridotti.

2. Materiali e Metodi

2.1 Pellets

Il materiale combustibile utilizzato in questo studio è pellet di abete con un diametro medio di 6 mm e lunghezza di 10-30 mm. Come si può vedere nella Figura 1, le caratteristiche dichiarate dal fornitore sono un'umidità dell'8%, un potere calorifico basso di 5,2 kWh/kg e un contenuto di ceneri < 0,6%.

Figura 1. Pellets impiegato nella sperimentazione.



La materia prima è stata caratterizzata in termini di umidità attraverso un calorimetro (LECO AC-350) [14]; contenuto di ceneri, residuo fisso e solidi volatili con un analizzatore termogravimetrico (LECO TGA 701) [15]; basso potere calorifico tramite calorimetro (LECO AC-350) [16]; e carbonio, idrogeno e azoto attraverso un analizzatore CHN [17] (LECO TruSpec CHN).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2 Layout e operazioni del sistema

2.2.1 Caldaia a Pellet

L'impianto analizzato è costituito da una stufa a pellet (mod. SOFIA, della Last Calor) [18] con una potenza di 6,73-2,34 kW, a cui è collegato un sistema di scarico composto da un ciclone passivo per la cattura di PM fino. L'attrezzatura può essere osservata in Figura 2.

Figura 2. Caldaia a Pellet.



Il sistema di scarico della stufa a pellet è collegato al sistema di rimozione del particolato (ciclone passivo), come si osserva in Figura 3.

Figura 3. Sistema a Ciclone Passivo.

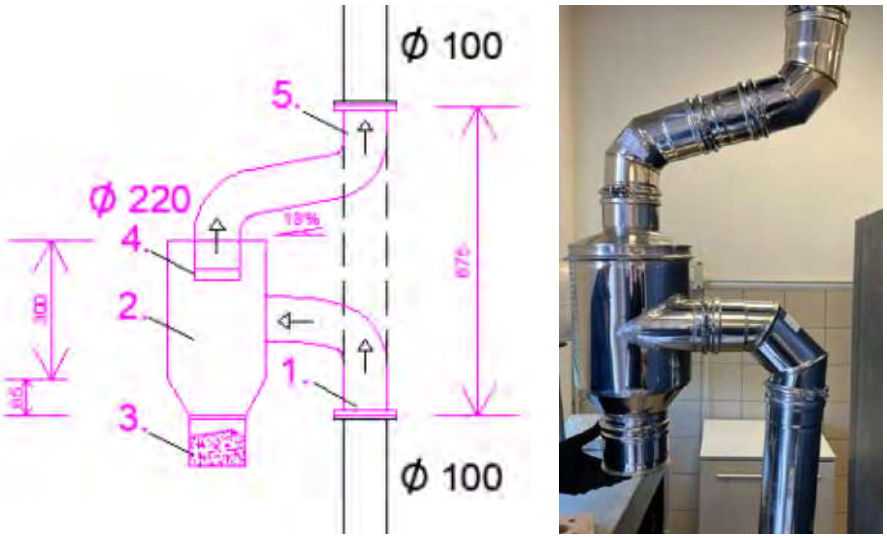


2.2.2 Retrofitting

Il sistema di rimozione del particolato fino è stato dimensionato in base alla portata in uscita dal processo di combustione. La vista frontale e l'impianto reale, con le dimensioni adottate nel progetto, sono visibili in Figura 4.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 4. Ciclone Passivo – Vista Frontale.



Come mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, il sistema a ciclone passivo occupa lo spazio di 675 mm della normale struttura del tubo di scarico, spazio compreso tra i punti 1 e 5. Negli stessi punti, collegati al sistema di esaustione, i giunti sono composti da connessioni di ingresso e uscita e connessioni di 100 mm di diametro. Il ciclone stesso è una struttura che misura 220 mm di diametro e 365 mm di altezza. Nella parte inferiore del ciclone si trova il contenitore del particolato, punto 3. Tutto il sistema è stato realizzato con INOX, Figura 5.

Figura 5. Passive Cyclone – Container System.



Nella parte inferiore del sistema, il contenitore del particolato, può essere rimosso per mezzo di cerniere, e il materiale accumulato può essere rimosso e smaltito o immagazzinato per altri scopi.

2.2.3 Regime Operativo

Il sistema è stato testato in due diversi regimi. Inizialmente, è stato testato un regime continuo di 4 ore e 43 minuti. Successivamente il sistema è stato testato in regime alternato con accensione e spegnimento in un ciclo di 4 fasi, ciascuna della durata di circa 2 ore, per un totale di circa 8 ore. Per entrambe le campagne sono state registrate tutte le operazioni in termini di temperatura, tempo, pellet consumato e particolato catturato.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2.4 Caratterizzazione del PM e dei residui di combustione

Il particolato fino catturato dal sistema, così come i residui di combustione (ceneri), sono stati entrambi analizzati in termini di composizione dei metalli, quali arsenico, cadmio, cromo, rame, piombo, mercurio, nichel e zinco attraverso un'emissione ottica spettroscopica (Optima 8000 ICP-OES) [19].

3. Resultati e Discussioni

3.1 Caratterizzazione Pellet

La caratterizzazione del pellet ha presentato le seguenti caratteristiche fisiche, Tabella 1.

Tabella 1. Caratterizzazione dei Pellets.

Campione	Proximate analysis				Alto Potere Calorifico	Ultimate analysis		
	Umidita	Volatili	Cenere	Residuo Fisso		Carbonio	Azoto	Idrogeno
	wt% wb	wt% wb	wt% wb	wt% wb	(MJ/Kg) db	wt% db	wt% db	wt% db
1	5.35	82.33	0.43	17.24	20.19	57.60	0.71	6.65
2	5.67	82.00	0.41	17.60	20.23	58.70	0.87	6.39
3	5.48	82.32	0.41	17.26	20.16	58.00	0.36	6.57
Media	5.50	82.22	0.42	17.37	20.20	58.10	0.65	6.54
Valore di tabella	8.00	-	< 0.60	-	-	-	-	-

wb – wet basis / db – dry basis

Nella caratterizzazione, i pellet hanno mostrato circa il 2,5% in meno di umidità rispetto a quanto riportato dal fornitore, un contenuto medio di umidità del 5,35%. Questo parametro ha un impatto significativo sullo stoccaggio, nonché sul potere calorifico netto, sulla temperatura di combustione e sull'efficienza di combustione. Inoltre, i pellet hanno mostrato un valore inferiore al criterio massimo stabilito del 10% di umidità, così come la misura media di Garcia et al. [20] per numerosi tipi di pellet intorno al 7,6-10,1%.

Oltre all'umidità, il contenuto medio di ceneri testato è stato inferiore al valore riportato di < 0,6%, con un valore di circa 0,42%. La percentuale di ceneri di altri tipi di pellet varia dallo 0,8 al 5,5%. Vale notare che il contenuto di ceneri è collegato all'emissione di particolato fine. Un basso contenuto di ceneri è vantaggioso per il funzionamento della stufa in quanto elimina la necessità di continue asportazioni del letto di combustibile durante la combustione e non altera il flusso d'aria nel bruciatore. Inoltre, il fatto che il letto di combustibile non venga agitato continuamente, riduce i disturbi che portano all'emissione di particolato fino [20].

Dall'analisi finale, i contenuti di carbonio, idrogeno e azoto presentati sono valori simili a quelli riportati in letteratura per altre biomasse lignocellulosiche [20–22]. Il potere calorifico superiore medio è stato di 20,20 MJ/kg, in linea con i valori riportati in letteratura. Inoltre, dalla proximate analysis il materiale presentava una media di carbonio fisso di circa il 17,37%, volatile solido dell'82,22% e carbonio fisso del 17,37%.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.3 Parametri Operativi e Risultati

Durante la prima prova, nel funzionamento continuo, sono stati campionati i parametri tempo, temperatura e quantità di pellet consumati. I risultati sono visibili nella Tabella 2. .

Tabella 2. Risultati del regime di funzionamento continuo.

Stato Operativo	Tempo	Temperatura fumi (°C)	Peso (Kg wb)
Accensione	09:15	-	113.54
accensione degli elettrodi	09:22	-	113.48
Fiamma a regime	09:35	-	112.88
Fiamma a regime	09:50	-	112.38
Fiamma a regime	10:14	133,5 °C	111.92
Fiamma a regime	10:27	133,2 °C	111.64
Fiamma a regime	10:40	137,0 °C	111.18
Fiamma a regime	11:00	135,2 °C	110.84
Fiamma a regime	11:15	135,6 °C	110.46
Fiamma a regime	11:30	136,3 °C	110.20
Fiamma a regime	11:54	135,9 °C	109.56
Fiamma a regime	12:10	139,5 °C	109.12
Fiamma a regime	12:22	141,2 °C	108.84
Fiamma a regime	12:37	139,8 °C	108.62
Fiamma a regime	12:51	140,4 °C	108.20
Fiamma a regime	13:07	141,0 °C	107.78
Fiamma a regime	13:22	140,6 °C	107.42
Spegnimento	13:30	137,7 °C	107.32
Spegnimento	13:33	126,8 °C	107.32
Spegnimento	13:35	117,2 °C	107.32
Spegnimento	13:50	55,8 °C	107.32
Spegnimento ventilatore	13:58	-	107.32

Tempo di funzionamento	4 ore e 43 minuti
Pellet consumato	6,08 kg
PM fino catturato	0,32 g

Il test operato in modalità continua è durato 4 ore e 43 min. Sono stati consumati in totale 6,08 kg di pellet e sono stati accumulati un totale di 0,32 g di PM fino attraverso il sistema a ciclone passivo. Durante la prova è stata catturata una tassa di 0,05 g di PM fino / kg di pellet.

Nell'operazione eseguita in modalità alternata sono stati campionati gli stessi parametri. I risultati ottenuti sono riportati nella Tabella 3.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 3. Risultati del regime di funzionamento alternato.

1° Ciclo			
Stato Operativo	**Tempo (ore)**	**Temperatura dei fumi (°C)**	**Peso (Kg)**
Accensione	12:20	18,3	110.30
Attivazione fiamma e ventola	12:25	18,4	110.30
Attivazione fiamma e ventola	12:30	19,7	110.38
Attivazione fiamma e ventola	12:35	21,2	
Attivazione fiamma e ventola	12:40	22,5	
Fiamma	12:46	25,1	
Fiamma	12:50	33,2	
Fiamma a regime	12:52	70,5	110.28
Fiamma a regime	13:03	122,2	109.78
Fiamma a regime	13:10	129,8	109.52
Fiamma a regime	13:20	138,8	109.32
Fiamma a regime	13:30	141,3	109.08
Fiamma a regime	13:40	142,7	108.82
Fiamma a regime	13:50	142,6	108.54
Spegnimento	13:51	138,1	108.54
Fiamma spenta	13:54	124,3	108.54
Fiamma spenta	13:58	107,7	108.54
Sistema spento			
Intervallo	38 min		

2° Ciclo			
Stato Operativo	**Tempo (ore)**	**Temperatura dei fumi (°C)**	**Peso (Kg)**
Accensione	14:36	28,0	108.74
Attivazione fiamma e ventola	14:41	38,2	108.78
Attivazione fiamma e ventola	14:52	37,6	108.76
Caricamento pellet	14:59	37,6	108.76
Fiamma a regime	15:21	138,3	107.92
Fiamma a regime	15:35	137,2	107.64
Fiamma a regime	15:45	138,0	107.24
Fiamma a regime	16:00	140,2	106.84
Fiamma a regime	16:10	142,4	106.60
Fiamma a regime	16:20	145,8	106.40
Spegnimento	16:21	145.8	106.40
Fiamma spenta	16:22	137,8	106.38
Fiamma spenta	16:28	108,2	106.42
Fiamma spenta	16:38	68,5	106.46
Ventilatore spento	16:51	37,4	106.54
Sistema spento			

3° Ciclo			
Stato Operativo	**Tempo (ore)**	**Temperatura dei fumi (°C)**	**Peso (Kg)**
Accensione	7:47	17,9	106.62
Attivazione fiamma e ventola	7:51	18,5	106.62
Attivazione fiamma e ventola	7:53	18,9	106.60
Caricamento pellet	8:10	24,7	106.56
Caricamento pellet	8:15	37,0	106.54
Fiamma a regime	8:18	60,0	106.40
Fiamma a regime	8:40	110,8	105.42
Fiamma a regime	8:50	131,2	105.12
Fiamma a regime	9:00	127,0	104.82
Fiamma a regime	9:10	126,4	104.58
Spegnimento	9:22	122,0	104.32
Fiamma spenta	9:25	107,8	104.38
Ventilatore spento	9:49	40,8	104.50
Sistema spento			
Intervallo	39 min		

4° Ciclo			
Stato Operativo	**Tempo (ore)**	**Temperatura dei fumi (°C)**	**Peso (Kg)**
Accensione	10:28	27,5	104.60
Attivazione fiamma e ventola	10:32	28,5	104.60
Caricamento pellet	10:40	28,9	104.60
Caricamento pellet	10:48	30,5	104.60
Fiamma a regime	10:53	46,1	104.52
Fiamma a regime	10:56	66,2	104.42
Fiamma a regime	11:00	115,0	104.08
Fiamma a regime	11:15	130,2	103.60
Fiamma a regime	11:30	130,8	103.24
Fiamma a regime	11:45	127,6	102.96
Spegnimento	12:00	130,1	102.64
Fiamma spenta	12:03	121,4	102.62
Ventilatore spento	12:28	40,2	102.76
Sistema spento			

Risultati finali	
Pellet consumato	7,54 kg
Tempo di operazione	7 h e 55 min
PM fino catturato	0,952 g

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'operazione alternata è durata 7 ore e 55 min. Sono stati utilizzati in totale 7,54 kg di pellet e il sistema è stato in grado di rimuovere 0,952 g di PM fino. In operazione alternata il tasso di cattura di particolato è stato di 0,13 g di PM fino / kg di pellet.

L'esperimento ha mostrato che quando il sistema funzionava in regime alternato, presentava il 143% in più di produzione di particolato fino. Il maggior tasso di produzione e cattura di PM fino per kg di pellet nel regime alternato è stato probabilmente causato da un maggior disturbo nella camera di combustione della stufa nelle fasi di accensione/spegnimento dell'impianto, quando i sistemi di ventilatore e carico lavorano più intensivamente.

3.4 Combustion Residues and Fine Particulate Characterisation

La Tabella 4 mostra i risultati della composizione elementare di una varietà di metalli del residuo di combustione e del PM catturato dal ciclone retrofitting.

Tabella 4. Caratterizzazione dei metalli dei residui di combustione e del PM.

Metalli	PM mg/Kg or ppm db	Cenere mg/Kg or ppm db
Arsenico	-	-
Cadmio	0.52	0.91
Cromo	-	83.10
Rame	1.61	118.39
Piombo	1.37	6.10
Mercurio	-	-
Nichel	-	26.60
Zinco	13.15	162.41

* ” - “ = Inferiore al limite di rilevamento dello strumento

Gli elementi principali della cenere, in ordine decrescente, erano zinco, rame, cromo, nichel, piombo e cadmio. Allo stesso modo, escludendo cromo e nichel, l'analisi del metallo del PM fine presentava la stessa composizione, tuttavia, in una scala molto inferiore. È stato possibile osservare che il residuo della combustione aveva un contenuto di metalli totali superiore al particolato fine catturato. Per i metalli cadmio, rame, piombo e zinco, il residuo di combustione ha mostrato concentrazioni di questi metalli circa del 77-7262% superiori rispetto al PM.

4. Conclusioni

Lo studio del sistema innovativo a ciclone passivo per la cattura del particolato fino dalle caldaie residenziali a pellet ha dimostrato potenziale per ridurre efficacemente queste emissioni dannose per la salute umana. In entrambe le prove implementate, a regime continuo e alternato, è stato catturato il materiale particolato che sarebbe stato emesso nell'atmosfera. In regime continuo è stata osservata una minore produzione di particolato, mentre in regime alternato è stata osservata una produzione di circa il 143% in più di particolato fino per kg di pellet consumato. Inoltre, il particolato catturato in entrambi i regimi presentavano all'incirca gli stessi elementi presenti nelle ceneri del processo di combustione, ma a concentrazioni molto inferiori, avendo un maggiore potenziale di riutilizzo e una maggiore sicurezza per il suo smaltimento.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Referenze

1. Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della R. PRIN (BIO-CHEAPER) Project - Research Projects of Relevant National Interest - Biomasses Circular Holistic Economy Approach to Energy Equipment.
2. Mehmood, M.A.; I.M.; R.U.; N.M.; A.S.; H.A.; G.M. Biomass Production for Bioenergy Using Marginal Lands. *Sustainable Production and Consumption* **2017**, *9*, 3–21.
3. Haq, I.; Qaisar, K.; Nawaz, A.; Akram, F.; Mukhtar, H.; Zohu, X.; Xu, Y.; Mumtaz, M.; Rashid, U.; Ghani, W.; et al. Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation. *Catalysts* **2021**, *11*, 309, doi:10.3390/catal11030309.
4. Paraschiv, L.S.; Serban, A.; Paraschiv, S. Calculation of Combustion Air Required for Burning Solid Fuels (Coal / Biomass / Solid Waste) and Analysis of Flue Gas Composition. *Energy Reports* **2020**, *6*, 36–45, doi:10.1016/j.egyr.2019.10.016.
5. Ghafghazi, S.; Sowlati, T.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Melin, S. Particulate Matter Emissions from Combustion of Wood in District Heating Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*, 3019–3028, doi:10.1016/j.rser.2011.04.001.
6. Shen, G.; Tao, S.; Wei, S.; Zhang, Y.; Wang, R.; Wang, B.; Li, W.; Shen, H.; Huang, Y.; Chen, Y.; et al. Reductions in Emissions of Carbonaceous Particulate Matter and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Combustion of Biomass Pellets in Comparison with Raw Fuel Burning. *Environmental Science & Technology* **2012**, *46*, 6409–6416, doi:10.1021/es300369d.
7. Thek, G.; Obernberger, I. *The Pellet Handbook - The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets*; Routledge.; 2010;
8. García-Maraver, A.; Popov, V.; Zamorano, M. A Review of European Standards for Pellet Quality. *Renewable Energy* **2011**, *36*, 3537–3540, doi:10.1016/j.renene.2011.05.013.
9. Rabaçal, M.; Fernandes, U.; Costa, M. Combustion and Emission Characteristics of a Domestic Boiler Fired with Pellets of Pine, Industrial Wood Wastes and Peach Stones. *Renewable Energy* **2013**, *51*, 220–226, doi:10.1016/j.renene.2012.09.020.
10. Carvalho, L.; Wopienka, E.; Pointner, C.; Lundgren, J.; Verma, V.K.; Haslinger, W.; Schmidl, C. Performance of a Pellet Boiler Fired with Agricultural Fuels. *Applied Energy* **2013**, *104*, 286–296, doi:10.1016/j.apenergy.2012.10.058.
11. Verma, V.K.; Bram, S.; Delattin, F.; Laha, P.; Vandendael, I.; Hubin, A.; de Ruyck, J. Agro-Pellets for Domestic Heating Boilers: Standard Laboratory and Real Life Performance. *Applied Energy* **2012**, *90*, 17–23, doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.079.
12. Fernandes, U.; Costa, M. Formation of Fine Particulate Matter in a Domestic Pellet-Fired Boiler. *Energy & Fuels* **2013**, *27*, 1081–1092, doi:10.1021/ef301428m.
13. Fernandes, U.; Costa, M. Particle Emissions from a Domestic Pellets-Fired Boiler. *Fuel Processing Technology* **2012**, *103*, 51–56, doi:10.1016/j.fuproc.2011.08.020.
14. Mettler Toledo Instruments Moisture Analyzer HB43-S.
15. LECO Instruments Thermogravimetric Analyzer TGA701.
16. LECO Instruments Calorimeter AC-350.
17. LECO Instruments Calorimeter TruSpec CHN.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

18. Last Calor SOFIA.
19. Optima 8000 ICO-OES: Monochromator Optical System.
20. Garcia-Maraver, A.; Zamorano, M.; Fernandes, U.; Rabaçal, M.; Costa, M. Relationship between Fuel Quality and Gaseous and Particulate Matter Emissions in a Domestic Pellet-Fired Boiler. *Fuel* **2014**, *119*, 141–152, doi:10.1016/j.fuel.2013.11.037.
21. Ryu, C.; Yang, Y. bin; Khor, A.; Yates, N.E.; Sharifi, V.N.; Swithenbank, J. Effect of Fuel Properties on Biomass Combustion: Part I. Experiments—Fuel Type, Equivalence Ratio and Particle Size. *Fuel* **2006**, *85*, 1039–1046, doi:10.1016/j.fuel.2005.09.019.
22. Vassilev, S. v.; Baxter, D.; Andersen, L.K.; Vassileva, C.G. An Overview of the Chemical Composition of Biomass. *Fuel* **2010**, *89*, 913–933, doi:10.1016/j.fuel.2009.10.022.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Legno e stampa 3D per la regolazione passiva del comfort igrometrico. Valutazione delle deformazioni igroscopiche attraverso l'analisi per immagini

Fabio Bianconi [1], Marco Filippucci [1] and Giulia Pelliccia [1,*]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

***** Autore di riferimento. E-Mail: giulia.pelliccia@outlook.it

Abstract: La realizzazione di materiali compositi che reagiscono passivamente a determinati stimoli esterni consente di adattare l'architettura alle variazioni ambientali circostanti. I compositi in legno igroscopici possono essere impiegati nella regolazione passiva dell'umidità relativa in ambienti dove l'umidità raggiunge valori elevati, come elementi per il controllo dei flussi d'aria tra interno ed esterno. A tal scopo, può essere utilizzato il legno naturale, sottoforma cioè di tranciati di vari spessori incollati tra loro a formare dei compositi a doppio strato con la fibratura incrociata, ma anche il legno stampato in 3D. La finalità della ricerca è quella di sviluppare un composito che reagisca alle variazioni di umidità in tempi brevi e, attraverso l'analisi per immagini, è possibile confrontare i diversi campioni realizzati al fine di individuare quelli maggiormente responsivi. In questo articolo vengono presentate due diverse modalità di analisi impiegate per importare il confronto dei provini, entrambe basate sull'uso del time-lapse. In un caso, il time-lapse viene elaborato attraverso il software Kinovea per il tracking del movimento e per ricavare i dati relativi agli angoli di curvatura e alle velocità. Nel secondo caso, è stato sviluppato un algoritmo in Grasshopper che consente di tracciare automaticamente, a partire dai fotogrammi, le geometrie deformate, permettendo così di rappresentare i provini e il loro comportamento in ambiente digitale.

Keywords: 3-10: legno; compositi igroscopici; stampa 3D; materiali responsivi; architettura adattiva; time-lapse; analisi per immagini; modellazione parametrica.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduzione

La progettazione di edifici energeticamente efficienti è diventata negli ultimi anni fondamentale per ridurre complessivamente i consumi energetici a livello globale. Il comfort termico ottenuto con i sistemi HVAC, che rappresentano circa i 2/3 del consumo totale di energia negli edifici residenziali [1], ha un impatto significativo sulla qualità dell'ambiente interno. I sistemi tradizionali di riscaldamento e ventilazione vengono rapidamente sostituiti da modelli più recenti che consumano meno energia e le soluzioni integrate di progettazione passiva possono contribuire a ridurre i consumi. La ventilazione naturale, ad esempio, può ridurre i consumi del 30-40% rispetto alla ventilazione meccanica, rendendola una delle caratteristiche più essenziali della progettazione passiva degli edifici [2]. Tuttavia, la ventilazione naturale è spesso associata alla riduzione della temperatura, mentre l'umidità è meno considerata. L'umidità non cambia così rapidamente come la temperatura e le sue variazioni sono appena percettibili, soprattutto nell'intervallo 40%-70%, per cui ha spesso ricevuto meno attenzione [3]. Un ambiente interno con valori di umidità troppo alti o bassi può causare effetti negativi sulla salute. In generale, si ritiene che l'umidità relativa ottimale sia compresa tra il 40% e il 50%: al di sotto del 30% possono insorgere problemi di disseccamento delle mucose, mentre valori superiori al 60% possono aumentare lo sviluppo degli acari della polvere [4]. Inoltre, valori di umidità superiori al 70% aumentano la sensazione di caldo con le alte temperature [5].

In tale contesto, l'applicazione di strategie passive può portare a ridurre il consumo energetico degli edifici in modo sostenibile e non impattante. A tali strategie si può inoltre aggiungere l'uso di materiali responsivi che sono in grado di adattarsi passivamente a determinati stimoli provenienti dall'ambiente circostante. Ciò non comporta alcun costo aggiuntivo dal punto di vista dei consumi, poiché questo tipo di meccanismi passivi sfrutta le proprietà naturali intrinseche del materiale. Nello specifico, uno dei materiali igroscopici più diffusi e facilmente reperibili è il legno che, in virtù di tali proprietà, può essere considerato un materiale intelligente naturale [6]. Esso infatti scambia umidità con l'ambiente passando da un minimo di contenuto di umidità pari a 0%, detto stato anidro, a un massimo pari a 30%, detto punto di saturazione delle fibre [7–9]. In questo che viene definito campo igroscopico si registrano le variazioni volumetriche del materiale a seguito dell'assorbimento o del desorbimento, che portano rispettivamente il legno a rigonfiarsi o ritirarsi.

La natura attua da sempre strategie responsive per adattarsi alle variazioni ambientali. Ne sono un chiaro esempio le pigne, che aprono e chiudono le squame in funzione dell'umidità relativa per proteggere i semi [10]. La loro struttura a doppio strato può essere replicata sfruttando i principi della biomimetica [11] e realizzando dei compositi in legno in cui i due strati hanno la fibratura incrociata. Questo consente di sfruttare la differenza tra i coefficienti di espansione igroscopica delle due diverse direzioni anatomiche del legno degli strati sovrapposti, in modo da avere uno strato attivo che si espande/contrae per effetto dell'umidità e uno passivo che rimane pressoché invariato, forzando il composito a flettersi [12,13]. Gli stessi principi possono essere applicati alla stampa 3D utilizzando filamenti a base di legno. Nello specifico, tali filamenti sono composti da una certa percentuale di farina di legno immersa in un polimero legante che, generalmente, è PLA [14]. Lo scopo della ricerca è quindi quello di identificare le migliori configurazioni e combinazioni di materiali e processi per lo sviluppo di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

un attuatore igroscopico passivo la cui reazione all'umidità relativa circostante sia sufficientemente rapida da seguire le fluttuazioni di umidità in un ambiente interno. Al fine di poter effettuare tale selezione, è necessario impostare un sistema di misurazione delle deformazioni e delle velocità di deformazione attraverso il confronto tra più campioni realizzati con materiali e caratteristiche diverse.

2. Materiali e metodi

Attraverso una stampante Prusa i3 MK3S+ sono stati realizzati numerosi provini stampati in 3D secondo la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) [15]. Si tratta di un processo di fabbricazione additiva basata sulla sovrapposizione di layer successivi e sull'aggiunta di materiale seguendo un preciso *toolpath*. Nel caso dei compositi igroscopici, è stato utilizzato un filamento contenente il 40% di polvere di legno riciclato in una matrice di PLA come strato reagente all'umidità e sono stati testati vari materiali per lo strato passivo. A seguito delle variazioni di umidità il composito modifica la propria configurazione originaria per assumere quella deformata, si parla quindi di stampa 4D poiché interviene anche la dimensione del tempo [16–18]. Si può parlare quindi di metamateriale poiché le deformazioni avvengono per la particolare struttura con cui i pannelli vengono realizzati, componendo materiali e pattern in base alla loro funzione nel composito [19].

Varie impostazioni di stampa influenzano la risposta igroscopica. Di queste, il *layer height* è la principale, poiché determina lo spessore degli strati e, quindi, l'entità della curvatura e la velocità di curvatura. Un secondo importante parametro è l'*infill*, cioè il tipo di riempimento interno ai confini perimetrali dell'oggetto. Il comportamento può essere influenzato sia dalla densità dell'*infill* sia dal pattern con cui viene realizzato. In particolare, il pattern varia a seconda che lo strato sia quello attivo o quello passivo, prediligendo pattern a zig-zag per il primo e pattern a linea o a griglia per il secondo. Questa differenziazione permette di sfruttare al meglio le proprietà del materiale, massimizzando l'espansione/ritiro nello strato attivo e massimizzando l'effetto vincolante nello strato passivo. Riveste un ruolo fondamentale anche la velocità di stampa, che influenza non soltanto l'accuratezza complessiva, ma anche la corretta aderenza al piano di stampa e soprattutto tra layer realizzati con materiali diversi. Un aspetto importante da considerare nelle stampe multi-materiale è infatti quello relativo alla delaminazione che può avvenire quando due livelli non aderiscono perfettamente e questo può portare al loro distacco. Al tal proposito anche la temperatura di stampa e il valore di *z-offset* influiscono. Quest'ultimo riguarda un eventuale abbassamento o innalzamento dell'*hotend* rispetto all'altezza predefinita in base al *layer height*, al fine proprio di regolare in questo tipo di stampe un'adesione ottimale tra gli strati.

Durante la fase di analisi delle deformazioni dei provini realizzati, è emersa la necessità di individuare una metodologia per il confronto delle curvature che permettesse di ottenere dati relativi alle curvature e alle velocità di curvatura, ma anche una trasposizione di tali deformazioni in un ambiente digitale. In una precedente ricerca, sulla base dei risultati provati da Abdelmohsen *et al.* [20] era già stato utilizzato il software Kinovea con questa precisa finalità [21]. L'analisi per immagini ha il vantaggio di richiedere come unico materiale un video che riprenda il processo di curvatura dei pannelli dallo stato non deformato alla configurazione finale. Nella ricerca precedentemente svolta erano stati

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

realizzati dei time-lapse registrando un fotogramma al minuto di provini ottenuti per laminazione di tranciati in legno posti in un box a umidità relativa del 90%. Successivamente, la ricerca si è evoluta con la stampa 3D e, in questo caso, i time-lapse sono stati realizzati nuovamente con un fotogramma al minuto riprendendo i compositi stampati in acqua, poiché mostrano una maggiore reattività in tali condizioni. I video sono quindi stati elaborati con Kinovea (Fig. 1) che ha permesso di ottenere un file .csv contenente gli angoli tra la base del provino e la sua estremità, dalla posizione iniziale indisturbata alla posizione registrata nel fotogramma successivo. Tali dati sono quindi stati elaborati per ottenere dei grafici di curvatura in funzione del tempo (Fig. 2).

Figura 1. Alcuni provini stampati in 3D e analizzati con Kinovea.

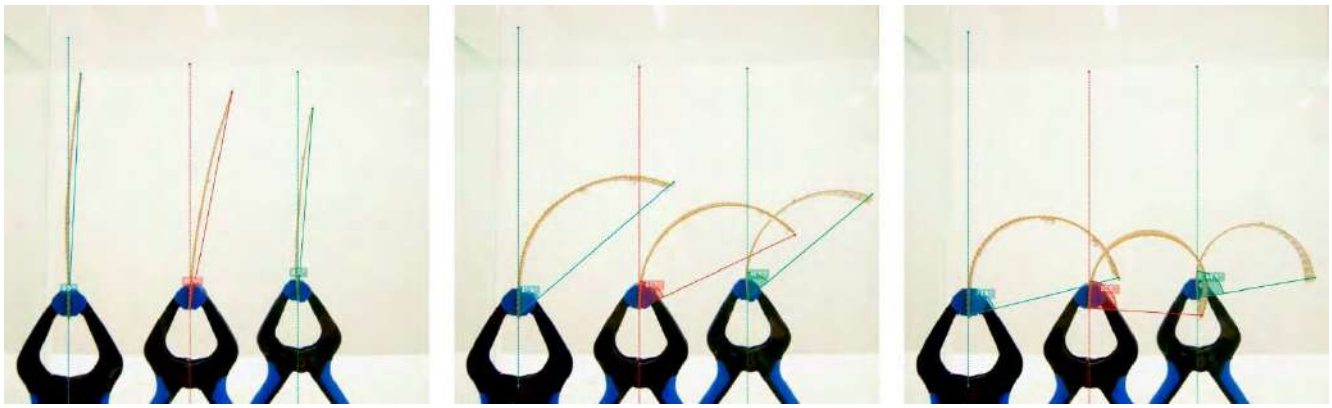
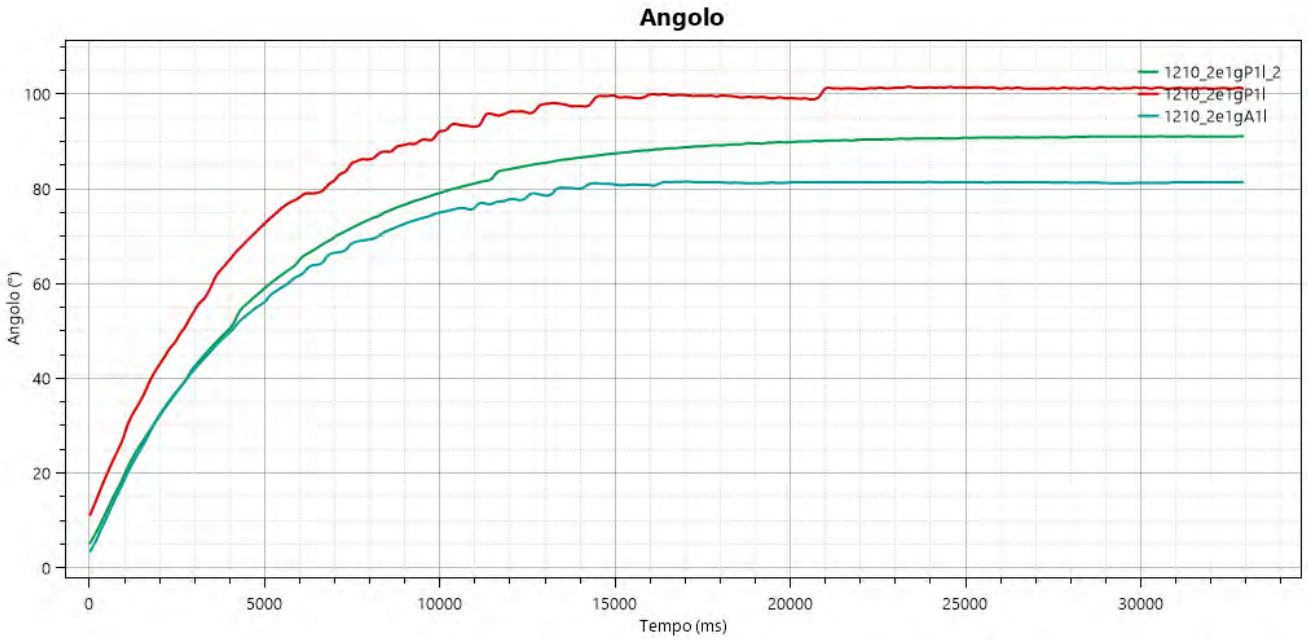


Figura 2. Il grafico ottenuto da Kinovea mette in relazione gli angoli e il tempo.



Nel caso dei prototipi stampati in 3D è stato inoltre sviluppato un algoritmo in Grasshopper per poter elaborare in maniera automatizzata i fotogrammi del time-lapse realizzato per Kinovea e

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

ottenere così all'interno di Rhinoceros le geometrie corrispondenti ai vari stati di curvatura dei provini in funzione del tempo (Fig. 3). In particolare, l'algoritmo individua i marker precedentemente disposti sui provini di un colore che di differenzi significativamente rispetto al resto dell'immagine. Localizzando la posizione dei pixel a cui corrisponde quel particolare colore, risulta quindi possibile individuare sull'immagine la posizione dei marker (Fig. 4).

Figura 3. L'algoritmo in Grasshopper realizzato per tracciare il movimento dei pannelli.

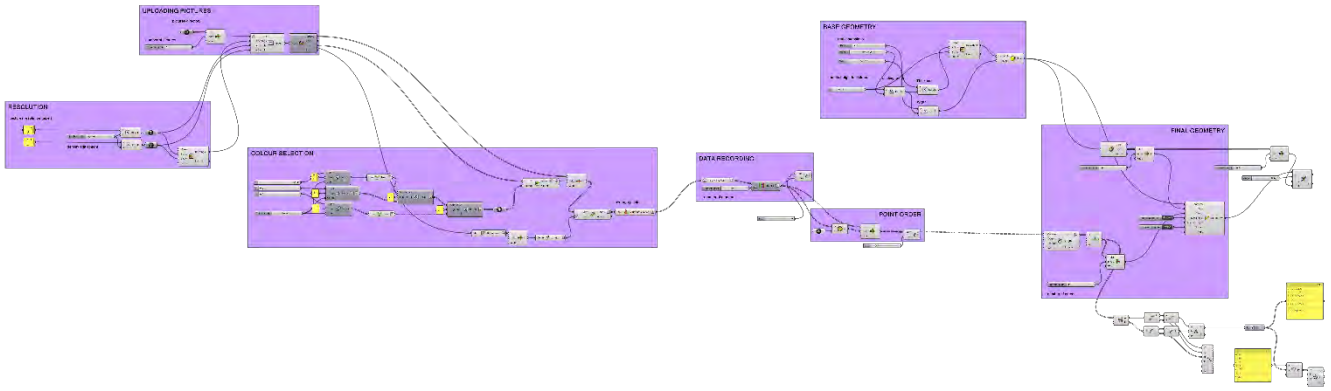
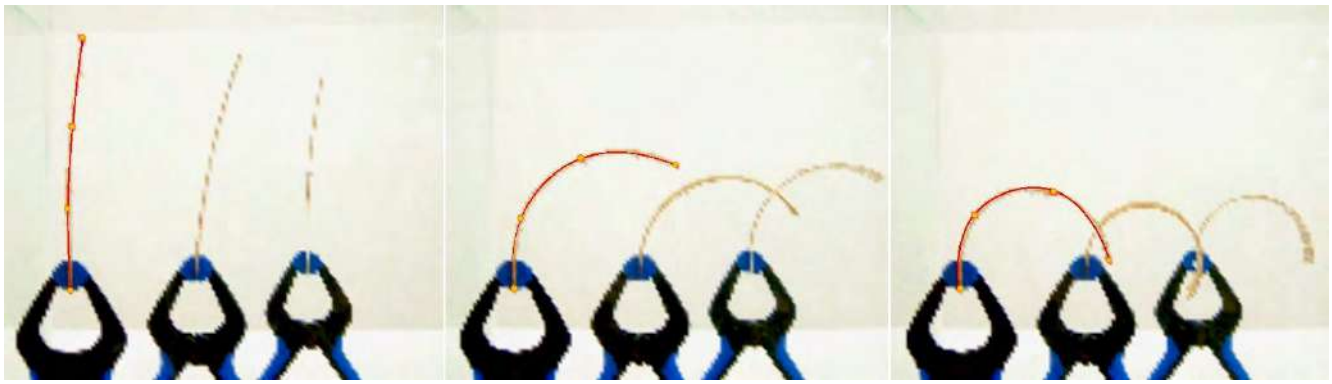


Figura 4. Gli stessi provini della Fig. 1 analizzati con lo script in Grasshopper.

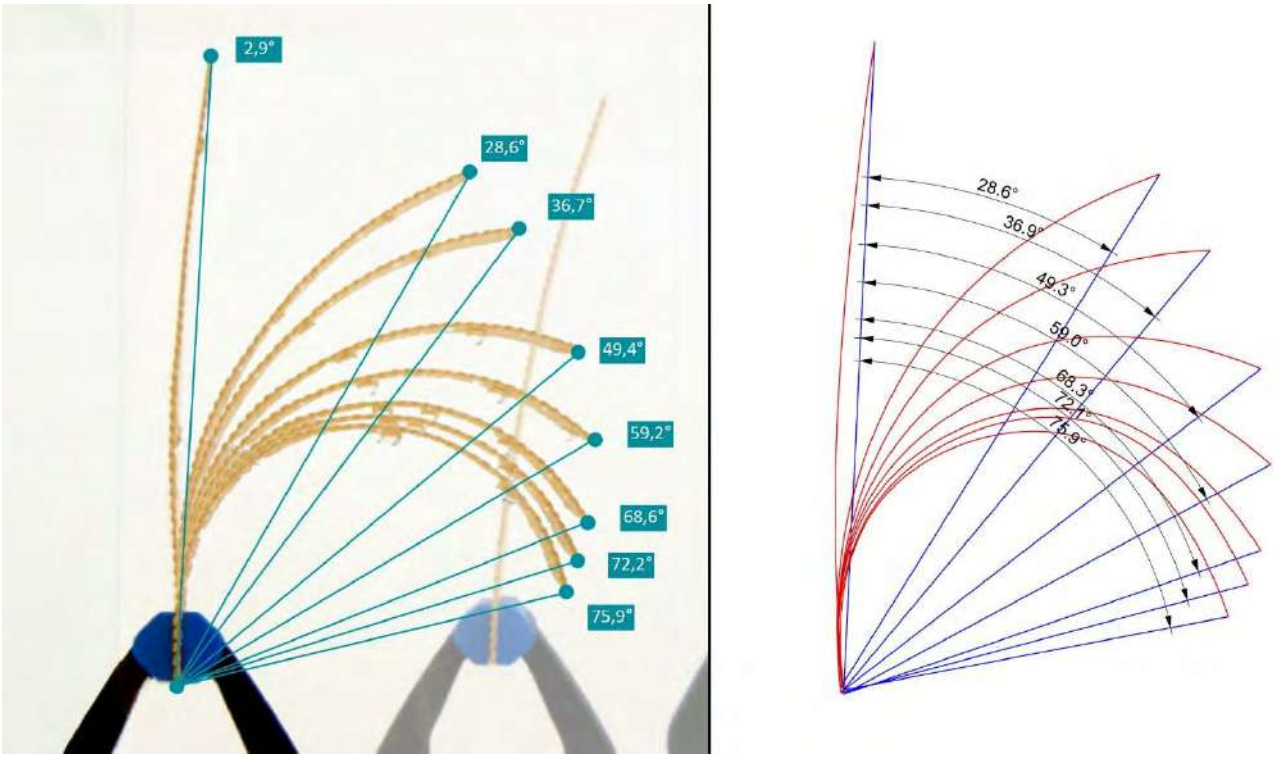


3. Risultati e discussione

A seguito delle analisi effettuate, sono stati ottenuti i dati relativi agli angoli tra la base e l'estremità dei provini che corrispondono a quelli ottenuti con Kinovea (Fig. 5). Attraverso un workflow totalmente automatizzato risulta quindi possibile non solo ricavare gli stessi dati e le stesse informazioni attraverso Grasshopper, ma anche e soprattutto averli a disposizione in ambiente digitale. Questo consente di effettuare delle simulazioni grafiche sulla base dei dati ottenuti sperimentalmente e relativamente ai provini analizzati.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

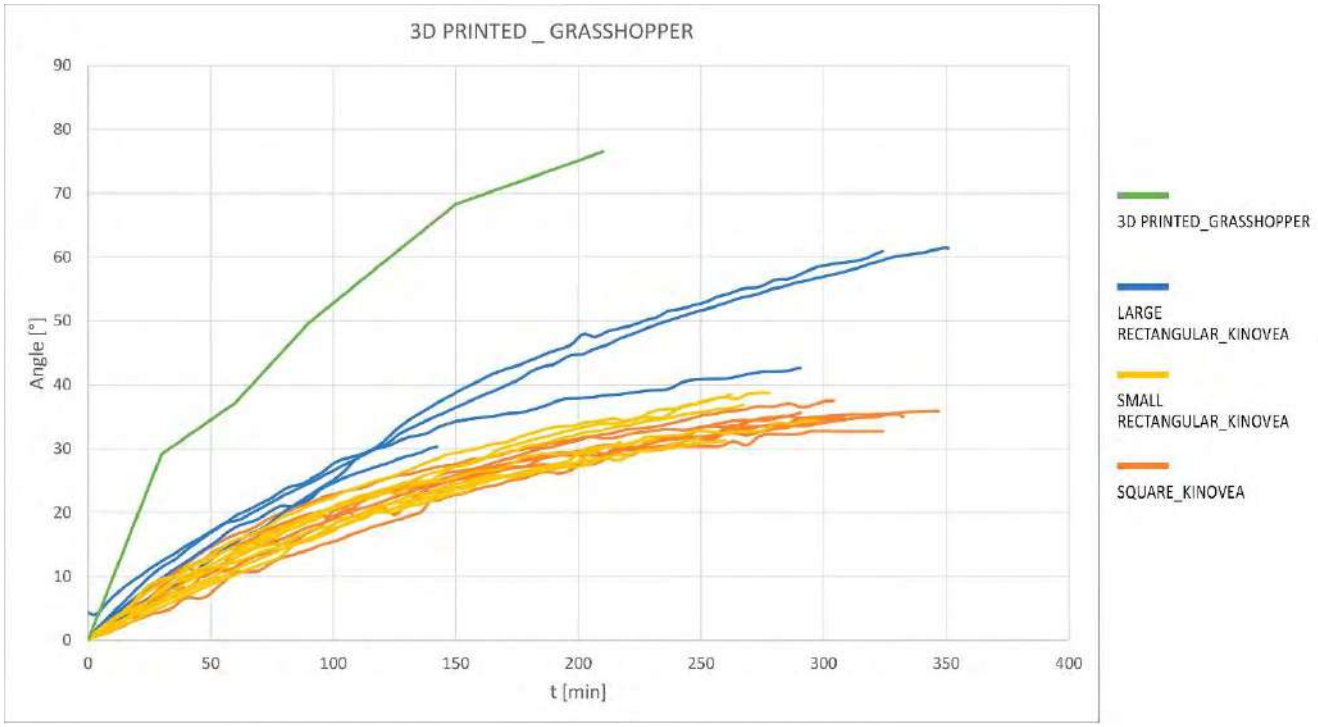
Figura 5. Confronto tra il tracciamento fatto con Kinovea (sinistra) e quello fatto con Grasshopper (destra).



Un secondo aspetto che è poi stato valutato riguarda il confronto tra il comportamento dei provini in legno e quello dei campioni stampati in 3D. Come si osserva dalla Fig. 6, infatti, i primi mostrano curvature di minore entità e in tempi maggiori rispetto ai compositi stampati. Ciò è riconducibile innanzitutto alle diverse dimensioni, dal momento che i pannelli in legno sono stati realizzati di dimensioni maggiori e, quindi, impiegano più tempo per raggiungere l'equilibrio igroscopico con l'ambiente. In secondo luogo, i provini stampati rispondono molto velocemente se immersi in acqua, ma non sono altrettanto reattivi alle variazioni di umidità relativa, alla quale sono invece esposti i pannelli in legno. Il grafico dimostra, tuttavia, come sia possibile, attraverso due metodologie di misura e confronto diverse, ottenere delle informazioni comparabili e da cui trarre delle conclusioni che possono essere utili ai fini progettuali.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 6. Grafico ottenuto confrontando gli angoli dei pannelli in legno rilevati con Kinovea con gli angoli dei pannelli stampati in 3D rilevati con Grasshopper.



4. Conclusioni

L'impiego di strategie passive per il miglioramento del comfort igrometrico è un obiettivo che ben si coniuga con l'uso di materiali responsivi. La ricerca sull'utilizzo di tali materiali per la realizzazione di attuatori passivi si sta negli ultimi anni evolvendo sempre più e l'utilizzo del legno in tale contesto aggiunge ai concetti di adattività ed efficienza energetica quello di sostenibilità dei materiali, essendo il legno facilmente reperibile, riciclabile e a basso costo.

L'utilizzo della stampa 3D rispetto alla laminazione dei tranciati in legno consente di evitare il problema relativo alle dimensioni limitate del tronco e, quindi, dei tranciati che difficilmente si trovano di dimensioni maggiori ai 20 cm di larghezza. Attraverso la stampa, inoltre, è possibile personalizzare totalmente la direzione della fibratura, creando pattern e deformazioni complesse difficilmente realizzabili seguendo il naturale orientamento delle direzioni anatomiche del legno. Trattandosi a tutti gli effetti di un materiale ingegnerizzato, il legno stampato consente di evitare quei difetti che sono tipici del legno in natura, quali per esempio discontinuità o eterogeneità nella fibratura, presenza di nodi o alterazioni dovute a microrganismi.

Al fine di poter sviluppare degli attuatori che effettivamente possano rispondere nelle condizioni termo-igrometriche tipiche di ambienti residenziali o uffici, il confronto tra le varie proprietà e risposte dei diversi provini realizzati è fondamentale per selezionare le combinazioni ottimali di materiali, spessori e impostazioni di stampa. L'uso di un sistema di analisi per immagini è risultato, in questo contesto, ottimale poiché innanzitutto non necessita di una particolare strumentazione se non di una fotocamera con risoluzione elevata. Tale tipo di analisi effettuata tramite Grasshopper ha inoltre il

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

vantaggio di essere totalmente automatizzata e di poter, quindi, analizzare un numero elevato di fotogrammi. Il confronto con l'analisi effettuata con Kinovea ha inoltre dimostrato come il livello di accuratezza dei dati registrati (angoli e velocità) sia del tutto paragonabile a quello ottenuto con lo script in Grasshopper. A ciò si aggiunge il fatto che, in questo processo, le geometrie vengono digitalizzate in ogni configurazione assunta, da quella iniziale indisturbata a quella totalmente deformata una volta raggiunto l'equilibrio igroscopico. Rimane la necessità, tuttavia, di dotare i provini di marker con un colore ben riconoscibile in modo che l'algoritmo sia in grado di tracciare gli spostamenti.

Tale approccio può in futuro essere ulteriormente sviluppato utilizzando un sistema di riconoscimento delle immagini più avanzato e associando, per esempio, agli spostamenti una mappa di colori che identificano direzione ed entità dello spostamento in modo da caratterizzare ancora meglio e in maniera più immediata i vari provini.

Bibliografia

[1] Orme, M, "*Estimates of the Energy Impact of Ventilation and Associated Financial Expenditures,*" Energy Build., 33(3), 2001, pp. 199–205.

[2] Omrani, Sara, Veronica Garcia-Hansen, Bianca R Capra, & Robin Drogemuller, "*Effect of Natural Ventilation Mode on Thermal Comfort and Ventilation Performance: Full-Scale Measurement,*" Energy Build., 156, 2017, pp. 1–16.

[3] Kong, Deyu, Hong Liu, Yuxin Wu, Baizhan Li, Shen Wei, & Mengwei Yuan, "*Effects of Indoor Humidity on Building Occupants' Thermal Comfort and Evidence in Terms of Climate Adaptation,*" Build. Environ., 155, 2019, pp. 298–307.

[4] Wolkoff, Peder, & Søren K Kjærgaard, "*The Dichotomy of Relative Humidity on Indoor Air Quality,*" Environ. Int., 33(6), 2007, pp. 850–857.

[5] Buonocore, Carolina, Renata De Vecchi, Veridiana Scalco, & Roberto Lamberts, "*Influence of Relative Air Humidity and Movement on Human Thermal Perception in Classrooms in a Hot and Humid Climate,*" Build. Environ., 146, 2018, pp. 98–106.

[6] Ugolev, Boris N, "*Wood as a Natural Smart Material,*" Wood Sci. Technol., 48(3), 2014, pp. 553–568.

[7] Bridgens, Ben, & Artem Holstov, "*Towards Sustainable Adaptive Building Skins with Embedded Hygromorphic Responsiveness.*"

[8] Holstov, Artem, Ben Bridgens, & Graham Farmer, "*Hygromorphic Materials for Sustainable Responsive Architecture,*" Constr. Build. Mater., 98, 2015, pp. 570–582.

[9] Giordano, Guglielmo., & Franca. Bandini Orlandi, *Tecnologia Del Legno. 1, La Materia Prima*, UTET, 1981.

[10] Song, Kahye, Eunseop Yeom, Seung-Jun Seo, Kiwoong Kim, Hyejeong Kim, Jae-Hong Lim, & Sang Joon Lee, "*Journey of Water in Pine Cones,*" Sci. Rep., 5(1), 2015, p. 9963.

[11] Mazzoleni, Ilaria., *Architecture Follows Nature : Biomimetic Principles for Innovative Design*, CRC Press, New York, 2013.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[12] Rüggeberg, Markus, & Ingo Burgert, "*Bio-Inspired Wooden Actuators for Large Scale Applications,*" PLoS One, 10(4), 2015, p. e0120718.

[13] Vailati, C, E Bachtiar, P Hass, I Burgert, & M Rüggeberg, "*An Autonomous Shading System Based on Coupled Wood Bilayer Elements,*" Energy Build., 158, 2018, pp. 1013–1022.

[14] Le Duigou, A, M Castro, R Bevan, & N Martin, "*3D Printing of Wood Fibre Biocomposites: From Mechanical to Actuation Functionality,*" Mater. Des., 96, 2016, pp. 106–114.

[15] Kariz, Mirko, Milan Sernek, Murčo Obućina, & Manja Kitek Kuzman, "*Effect of Wood Content in FDM Filament on Properties of 3D Printed Parts,*" Mater. Today Commun., 14, 2018, pp. 135–140.

[16] El-Dabaa, Rana, & Islam Salem, "*4D Printing of Wooden Actuators: Encoding FDM Wooden Filaments for Architectural Responsive Skins,*" Open House Int., 2021, p. .

[17] Correa, David, Simon Poppinga, Max D Mylo, Anna S Westermeier, Bernd Bruchmann, Achim Menges, & Thomas Speck, "*4D Pine Scale: Biomimetic 4D Printed Autonomous Scale and Flap Structures Capable of Multi-Phase Movement,*" Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 378(2167), 2020, p. .

[18] Sydney Gladman, A., Elisabetta A. Matsumoto, Ralph G. Nuzzo, L. Mahadevan, & Jennifer A. Lewis, "*Biomimetic 4D Printing,*" Nat. Mater. 2016 154, 15(4), 2016, pp. 413–418.

[19] Ryan, Kirstie R., Michael P. Down, & Craig E. Banks, "*Future of Additive Manufacturing: Overview of 4D and 3D Printed Smart and Advanced Materials and Their Applications,*" Chem. Eng. J., 403, 2021, p. 126162.

[20] Abdelmohsen, Sherif, Passaint Massoud, Rana El-Dabaa, Aly Ibrahim, & Tasbeh Mokbel, "*A Computational Method for Tracking the Hygroscopic Motion of Wood to Develop Adaptive Architectural Skins,*" *ECAADe 2018 Computing for a Better Tomorrow, Vol. 2*, A. Kępczyńska-Walczak, and S. Białkowski, eds., eCAADe, 2018, 2018, pp. 253–262.

[21] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Giulia Pelliccia, "*Pannelli Igroscopici in Legno per Il Controllo Passivo Dell'umidità Negli Ambienti Costruiti,*" *3D MODELING & BIM Digital Twin*, DEI s.r.l.Tipografia del Genio Civile, Roma, 2021, 2021, pp. 110–127.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Exploring the Influencing factors of a sustainable Urban green Renewal

Elena Tarpani[1,*], Lisa Bitossi[2], Roberta Cureau[1], Ilaria Pigliautile[1,3], Anna Laura Pisello[1,3] and Chiara Biscarini[2]

[1] CIRIAF – Interuniversity Research Centre of Pollution and Environment Mauro Felli, University of Perugia, via G. Duranti 67, Perugia, Italy

[2] University for Foreigners of Perugia, Piazza Braccio Fortebraccio 4, Perugia, Italy

[3] Department of Engineering, University of Perugia, via G. Duranti 93, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: elena.tarpani@studenti.unipg.it

Abstract: In urban contexts, green areas represent a useful resource for implementing multi-risk adaptation strategies and increasing socio-ecological resilience. Moreover, human health and people's outdoor comfort are strictly related to the environmental quality of urban green areas which need to be assessed from a multi-domain perspective. In this view, this contribution is part of a redevelopment project of a green area located near the historic center of Perugia. The project covers 634m^2 of outdoor spaces and 476 m of pedestrian paths situated between two educational buildings. The study aims at defining and designing potential wellness areas for people's leisure relying upon a multidisciplinary approach that combines both social and natural sciences to investigate how people use and experience outdoor spaces. More specifically, here are presented the results of the winter campaign based on two complementary analyses: (i) the environmental quality mapping of the area through hyperlocal monitoring and the investigation of people's environmental perception through a right here-right now survey; (ii) the identification of citizens habits, needs and ideas about a new possible social space through a dedicated social survey. The results showed that the maximum value for PM10 was 70.5 µg/m^3; otherwise, the long-term monitoring showed that the night-time ΔT values were 12.4°C for the points near an artificial and seated surface and were around 6.3°C for points near green areas. Furthermore, the study wants to rise citizens' awareness of the benefits of the green area, in order to reduce people's vulnerability while increasing local adaptation capacity to environmental risks.

Keywords: Green Renewal; Urban Resilience; Social Sustainability; Outdoor comfort; Urban air quality.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

By 2050, 68% of the world population is expected to live in cities [1]. This process leads to Land Use and Land Cover changes, with the replacement of the natural and permeable surfaces with artificial, unsealed pavements. Moreover, the increase in anthropogenic activities represents an important source of heat and air pollutants, which contribute to the urban energy balance modification [2]. Prolonged exposure to hot conditions and to high levels of pollutants can lead to several human health issues (e.g., cardiovascular, and respiratory diseases) [3]. In this view, heat mitigation strategies (e.g., usage of cool materials, the introduction of greenery and water bodies, etc.) are possible solutions to reduce the negative effects of climate change and their impacts on human health while improving the microclimatic conditions and the air quality. During the pandemic, green areas were the fulcrum of social aggregation and ecological and cultural services. A study conducted in the United States and Canada showed that people spend an average of 2-4% of their time in outdoor spaces during winter, whereas a 10% in the summertime [4]; moreover, studies provided that the different configurations of outdoor spaces lead different effects on human health and people outdoor comfort [5, 6]. In particular, vegetation has a cooling effect on the surrounding area and improves air quality and people's outdoor comfort and well-being [7-9]. Moreover, the design of outdoor spaces plays a key role in improving urban resilience to climate change and a proper design could support the achievement of sustainability goals in cities. However, urban greening does not necessarily produce social sustainability and inclusivity [10, 11]. While many studies mostly concentrate on the environmental and economic impacts, we still lack studies that focus on the social impact of adaptation strategies [12, 13].

In this view, this work presents a multidisciplinary approach to investigating potentialities of an under-deployed green area and thus identify the influencing factors for a sustainable urban green renewal, supporting community adaptation and well-being. More specifically, this is the preliminary phase of the research initiative aiming at redeveloping a green area near the city center of Perugia, a middle-size town in central Italy. Here, the analysis lies upon hyperlocal microclimate and air quality mapping of the area combined with the assessment of people’s environmental perception through a right here-right now survey. Simultaneously, a dedicated survey regarding mobility, green area accessibility, and the needs of the users is submitted to locals, to identify the citizens’ requirements and needs. The approach of the proposed study couples environmental and social surveys laying the foundation for a new local participatory approach that could engage citizens and legitimate the decision-making process.

2. Materials and methods

The study aims to redevelop a green area, located near the city center of Perugia (climate class CFA, according with Koppen-Geiger classification) [14]. Two types of experimental campaigns were carried out during the winter season, in order to understand the microclimatic and air quality conditions, people’s environmental perceptions and comfort, and their requirements and preferences. The first campaign regarded the environmental monitoring of the area through two different procedures (i.e.,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

long-term and short-term monitoring campaigns), and, simultaneously, the submission of a survey to locals about their environmental sensations and perceptions; the other campaign was a social survey, based on the preferences and needs of the locals. The integration between these two campaigns could be the first step for a redevelopment of the selected area. The following subsections present the two campaigns carried out in the outdoor spaces and the detailed surveys submitted during the campaign.

2.1. Environmental monitoring and multi-domain comfort survey

An experimental campaign was conducted in the selected area in winter 2022 to monitor the microclimatic conditions and the air quality of the outdoor spaces. The long-term monitoring campaign last for two weeks and was focused on seven points identified in the area of the analysis according to their different configurations and features. In each location, a thermohygrometer (temperature accuracy ±0.5°C; humidity accuracy ±3.0% at 25°C) was settled at 2 m height from the ground and recorded data every 10 minutes. Data retrieved by a fix weather station located on the roof of the CIRIAF institute (in the Engineering University campus of Perugia) were taken as a reference for the comparative analysis of microclimatic conditions monitored in the seven points. The short-term monitoring campaign last one hour and a half during the typical traffic rush hour (from 12.30 to 14.00 p.m.) and consisted in monitoring the microclimatic conditions of the area and the concentration of the pollutant. Three different devices are used for this short-term monitoring in order to monitor the conditions at pedestrian's perspective and from the vehicular point of view: a wearable miniaturizes weather station settled on a backpack which records pollutants concentration (i.e., CO_2, PM10 and PM2.5) and microclimatic parameters (i.e., air temperature, relative humidity, wind velocity and direction, barometric pressure, global solar radiation and illuminance) every five seconds [15], a portable weather station (MaxiMet GMX501) settled on a stroller to gather microclimatic parameters (i.e., air temperature, relative humidity, wind velocity and direction, pressure, global solar radiation) every second [16], and sensors specifically equipped on a van to register pollutants concentration (e.g. CO_2 and PM10) and microclimatic parameters (e.g. air temperature in four directions, relative humidity, wind velocity and direction, pressure, global solar radiation in four directions and illuminance) every ten seconds [17].

Simultaneously to the short-term environmental monitoring campaign, a right here-right now survey was submitted to locals, in order to assess qualitative data about their comfort and environmental perception in outdoor spaces. The survey was divided into two sections: the first is focused on demographic information (e.g., gender, age), the second is related to multi-domain comfort investigation focusing on thermal, visual, acoustic comfort and perception, and air quality perception. In the second part, subjective assessment of the environmental domains was provided through the ASHRAE 7-point scale, that links a specific sensation or perception to one specific vote (e.g., from -3 to +3).

2.2. Social acceptance

Greening strategies alone do not necessarily lead to a real improvement in the quality of life [10]. Scientific literature evidence general agrees that public participation determines the effectiveness of

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

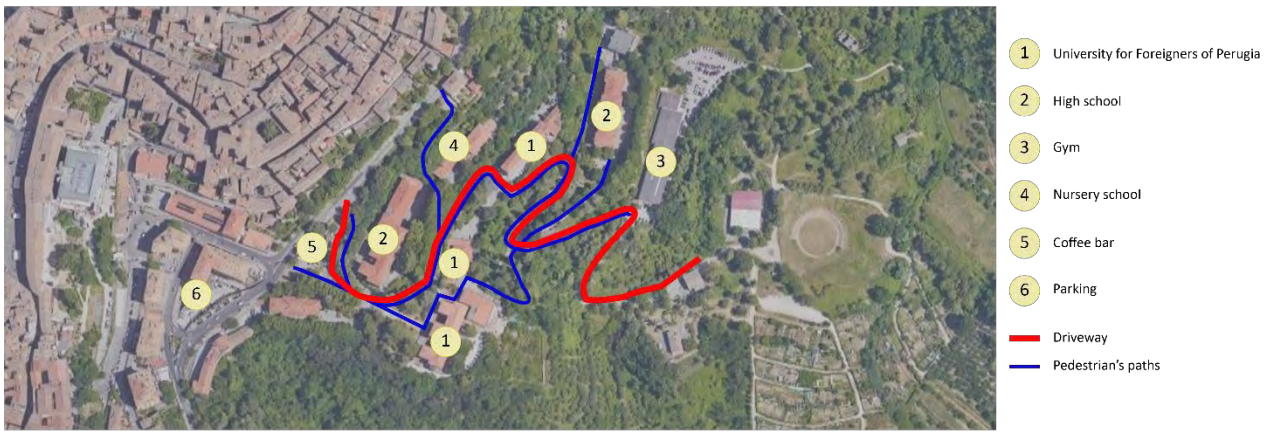
climate change adaptation and mitigation measures [18]. Engaging people in the design process of adaptation solutions can avoid maladaptation or social rejection of the planned interventions [19, 20]. Moreover, the use of a participatory approach to support decision-making generates shared goals leading to a climate resilient development that encompasses social equality and long-term sustainability [21, 22].

To inform and engage citizens a dedicated survey was proposed to the green space attenders. The survey included a brief introduction of the study aimed at informing locals about the purpose of the study and the relevance of their participation in the project. Then, 20 questions were framed into 4 main categories, namely “general information”, “mobility”, “green area accessibility”, and “needs and ideas”. The eight questions dedicated to collecting general information permitted us to identify the different user types and understand their needs, experiences, behaviors, and goals. Six queries addressed mobility issues following the structure of a national survey on university mobility carried out by the Mobility Working Group of the Italian University Network for Sustainable Development (RUS) [23]. The national survey aims at defining indicators to monitor the commitment of university institutions in terms of environmental sustainability. Including RUS questions within the survey allowed to collect of specific data relevant to both comparative analysis and internal monitoring. Moreover, the four questions that fall in the category “green area accessibility” were aimed at understanding users’ perceptions of the area. Finally, two questions were dedicated to collecting desires and ideas on how to redesign the space.

The survey aimed to inform people about the urban renewal project and to develop greening strategies that reflect the habits, preferences and needs of the respondents. Such a participatory approach could generate shared goals and produce sustainable solutions.

3. Case study

Figure 1. Point of interest and pathways of the case study area.



The study represents the preliminary analysis of an urban redevelopment project undertaken by the University for Foreigners of Perugia. The initiative covers 634 m^2 of green spaces and 476 m of pedestrian paths located near the historic center of Perugia. The area is delimited by educational

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

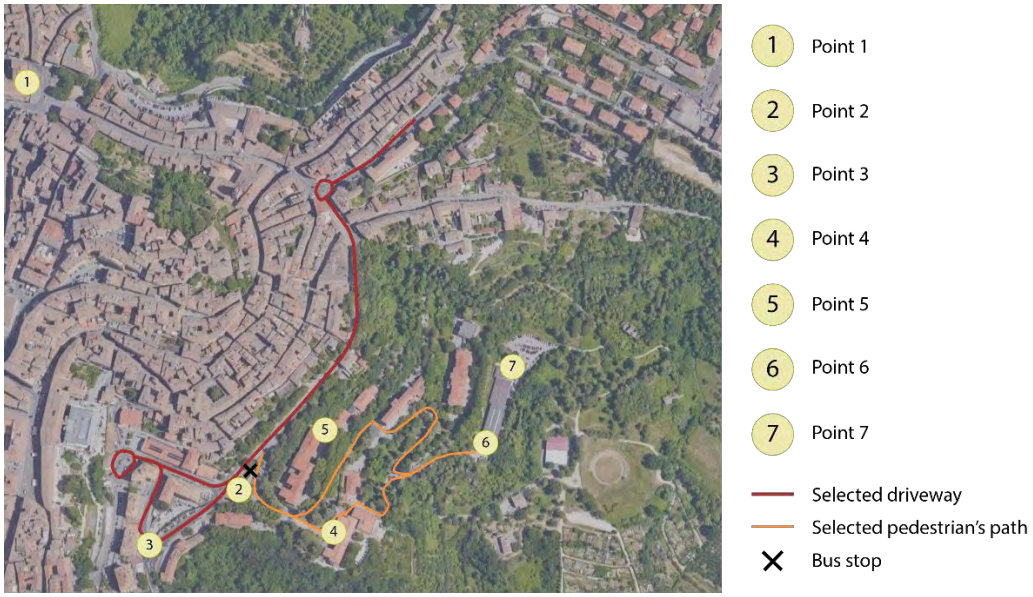
buildings pertaining to the University campus and a High School; hence, it was easier to disseminate the online survey within both the community of the University and the High School community. The area is situated in the proximity of several facilities, such as healthcare services, bars, parking, and bus stops (Figure 1). A relevant characteristic of the area is the wide difference in altitude that obstacles the use of the green space and discourages active mobility. This configuration induces most of the users to use private cars, causing traffic congestion during rush hours and impacting air quality. For this reason, the probes for long-term monitoring were settled in seven different points, selected for their configuration, features, and characteristics as summarized in Table 1. As can be seen in Figure 2, six points are located around the selected area, while one point (point 1) is fixed farther than the others (500 m as the crow flies), in order to consider the differences between the selected area (at the border of the densely built historical city center and the almost green down-hill area) and the inner city.

Table 1. Characteristics of the 7 points selected for the long-term monitoring.

Point	Altitude [m.a.s.l.]	Prevailing surface type	Facing trafficked area	Monitored parameters
1	470	Bricks and stones – sealed	No	Air temperature [°C], Relative Humidity [%]
2	410	Asphalted – sealed	Yes	Air temperature [°C]
3	410	Asphalted – sealed	Yes	Air temperature [°C], Relative Humidity [%]
4	390	Greenery – permeable	No	Air temperature [°C], Relative Humidity [%]
5	400	Greenery – permeable	No	Air temperature [°C]
6	360	Asphalted – sealed	Yes	Air temperature [°C]
7	360	Asphalted – sealed	Yes	Air temperature [°C]

Different pathways were therefore designed for the mobile monitoring systems adopted in the short-term monitoring: the wearable station was used along a specific pedestrian's path, the MaxiMet GMX501 was fixed at the bus station, and the equipped van was followed the main street open to vehicular traffic. Figure 2 shows these different paths and points selected for the campaign.

Figure 2. Selected points for installing probes and short-term monitoring paths



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

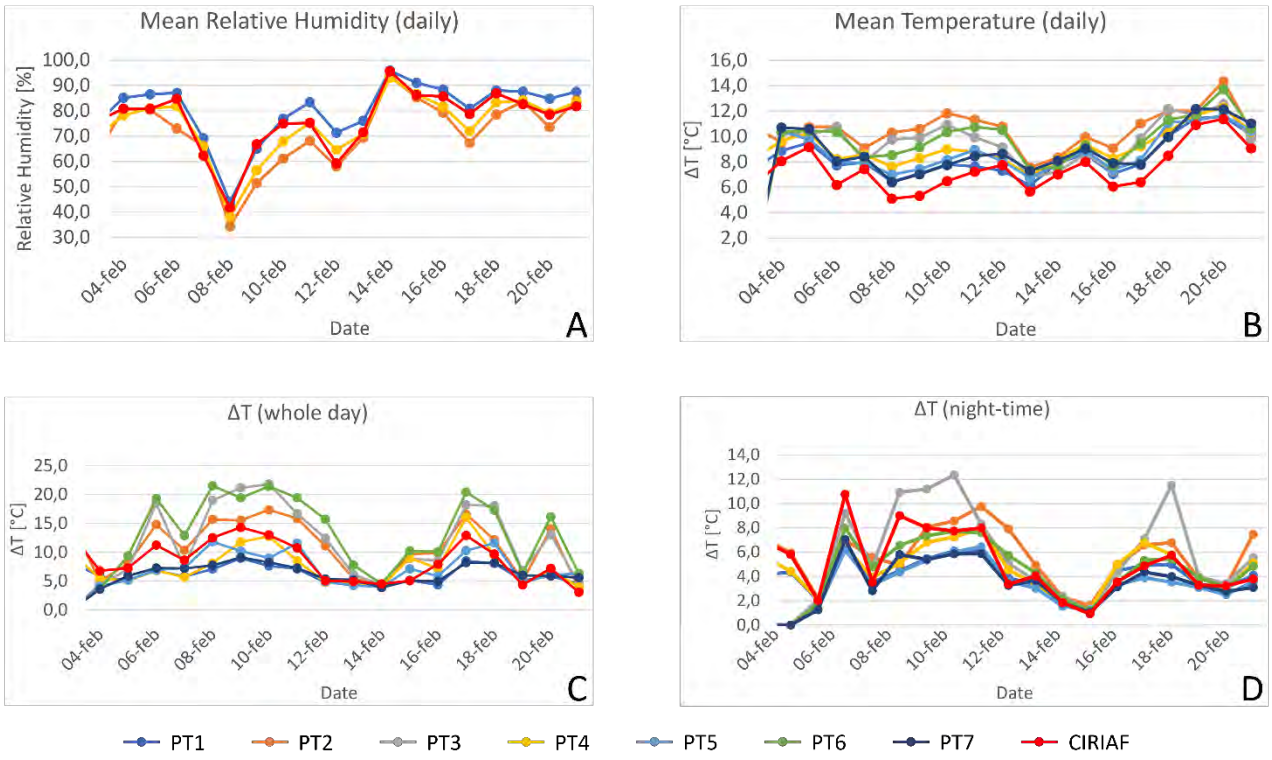
4. Results

4.1. Long-term monitoring

Figure 3 shows the daily mean trend observed during the two weeks of the long-term monitoring for the relative humidity (Figure 3A), and air temperature (Figure 3B) as monitored in all the selected points.

The observed values of relative humidity (Figure 3A) were similar in the three points with a range between 34,35% to 98,55%. The range of experienced daily mean temperature (Figure 3B) was between 5.1°C to 14.4°C. The daily mean air temperature in points 2 and 3 were the highest with a value of 14.4°C and 12.6°C, respectively, while the lowest was observed in point 5, i.e., 11.6°C. This was probably because points 2 and 3 are located near the asphalted surface facing the trafficked area, while point 5 is surrounded by greenery.

Figure 3. Parameters recorded during the long-term monitoring: (A) Mean relative humidity, (B) Mean temperature, (C) ΔT (whole day) and (D) ΔT (night-time).



Daily temperature fluctuations (i.e., differences between maximum and minimum temperature values observed in each day (ΔT) are summarized in the graph of Figure 3C while graph in Figure 3D focuses on night-time temperature fluctuations, from 5 PM (just after sunset) to 8 AM (just before sunrise), to better understand the influence of the different configurations and features on microclimate in absence of solar radiation. The observed daily temperature fluctuations were in between 3.1°C and 21.8°C (Figure 3C) where the highest values suggest possible effects of the direct

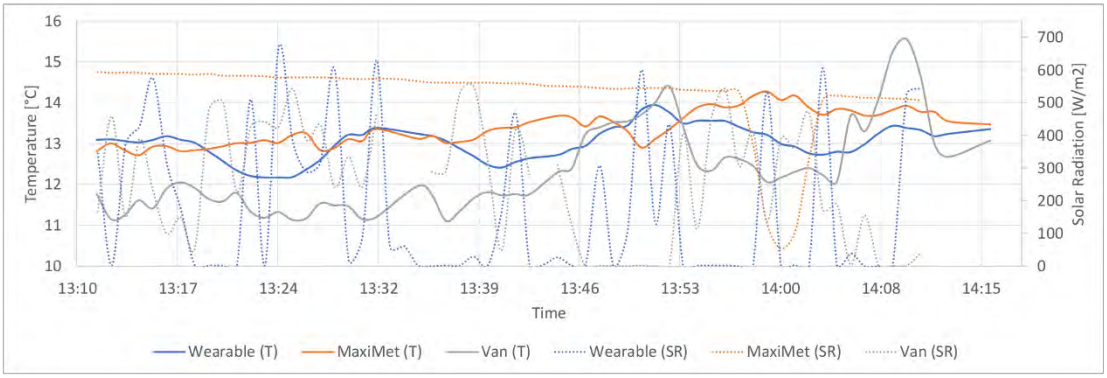
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

solar radiation on the probe despite the realized shielding systems. The higher night-time ΔT was observed in point 3, i.e., 12.4°C, while the points 1 and 5 gathered the lowest values, i.e., 6.2°C and 6.4°C, respectively. These differences suggest that the points near artificial and sealed surfaces are influenced by the capacity of the materials to storage thermal energy during the day and release it as sensible heat during the night, while the points near some green areas or generally permeable surfaces experience a narrower ΔT because greenery acts as thermal buffer.

4.2. Short-term monitoring

Figure 4 shows the air temperature and the solar radiation as collected throughout the short-term campaign from the three mobile monitoring systems used: the wearable station settled on a backpack, the MaxiMet GMX501 settled upon a stroller (that was monitoring in a fixed location during this study), and the equipped van.

Figure 4. Air temperature and solar radiation values recorded during the short-term monitoring.



Temperatures retrieved by the three devices were in the range between 10°C and 16°C with both minimum (i.e., 11.1 °C) and maximum (15.5 °C) extremes retrieved by the van around 1.30 PM and 2.10 PM, respectively. Air temperature values gathered from the other two systems were more stable, as summarized in Table 2. Despite these differences, the average temperature monitored by the three devices just differs by 1.4 °C. Solar radiation recorded by the three devices was in the range between 0 W/m^2 and 800 W/m^2, with the maximum extreme (802 W/m^2) retrieved by the wearable device. For the equipped van, the peaks of the temperature (i.e., 15.5°C) are registered during the lower values of the solar radiation (0 W/m^2): this suggested that the higher temperatures were due to the cars drainpipes inside the tunnel located near the selected area.

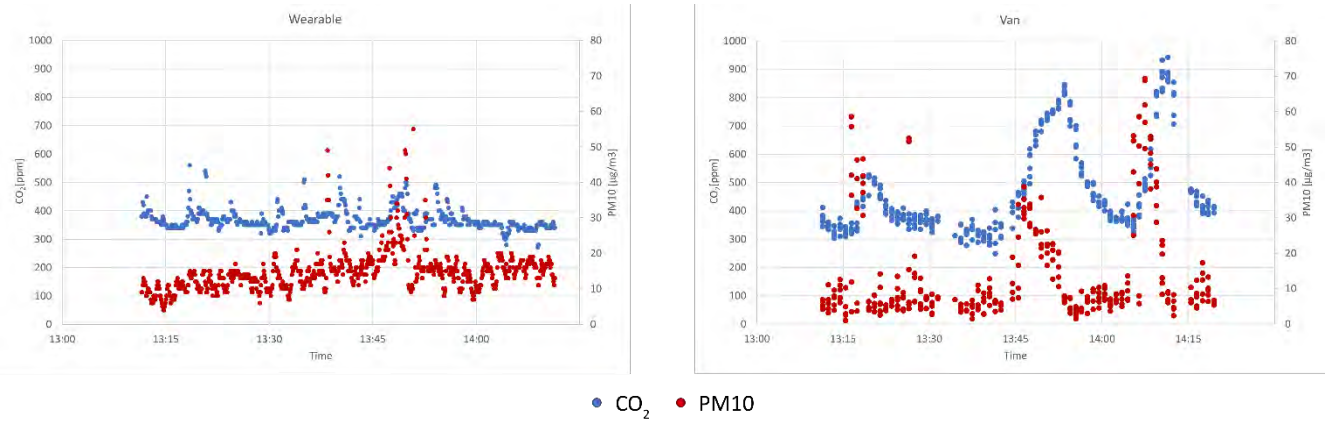
Table 2. Air temperature and solar radiation extremes as recorded by the three systems during the short-term monitoring.

System	Air temperature [°C]				Solar radiation peak [W/m^2]
	min.	max.	ave.	st. dev.	
Wearable	12.2	13.9	13.0	0.42	802,5
MaxiMet	12.7	14.3	13.4	0.42	643
Van	11.1	15.5	12.4	1.07	636

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5 presents the results of the air quality investigation. In this work, the CO_2 and the PM10 concentrations were recorded by both the wearable and the van systems, to record different levels of these two parameters at pedestrian height and along with the most trafficked route for highlighting possible criticalities for human health and thus suggesting interventions.

Figure 5. Recorded values of PM10 and CO_2 by the wearable and the equipped van.



The values recorded by the wearable were lower than the values gathered through the van. In detail, along the pedestrian path, the CO_2 concentration was varying in between 270 ppm and 560 ppm, while the PM10 was included between 4 µg/m^3 and 55 µg/m^3. Along the main trafficked street (where the van monitoring system insisted), the values of CO_2 were between 250 ppm and 942 ppm, while the PM10 concentration was between 1 µg/m^3 and 70.5 µg/m^3. The average value for CO_2 was 470 ppm for van and 367 ppm for wearable, while the mean value for PM10 was 12.4 µg/m^3 and 11.7 µg/m^3, respectively. Since both devices had a GPS, it was possible to plot the collected data in space, in order to understand the most polluted points and the risks to human health. Figures 6 show the specific values along the pedestrians' path, recorded with the wearable; peaks of pollutants concentration could be recognized at specific points along the path: in detail, the maximum values (560 ppm for CO_2 and 55 µg/m^3 for PM10) are recorded along the hill and where the ground presents a significant slope. This fact suggested that the pedestrians are influenced by the bad air quality during their walks, and they are forced to move and walk into the high levels of pollutants.

Figure 6. Environmental mapping through the wearable system along pedestrian's path: (A) CO_2 and (B) PM10 values.

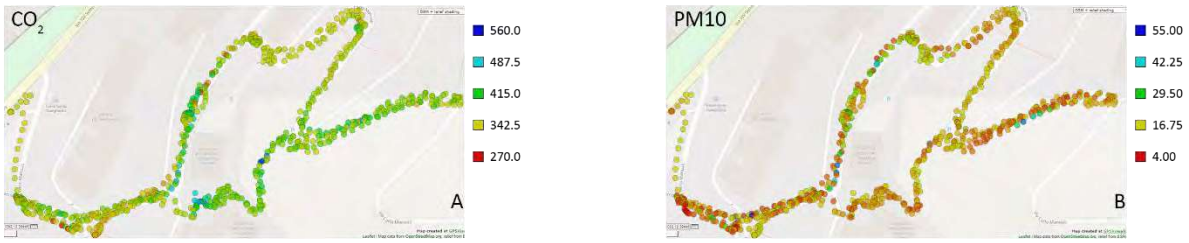
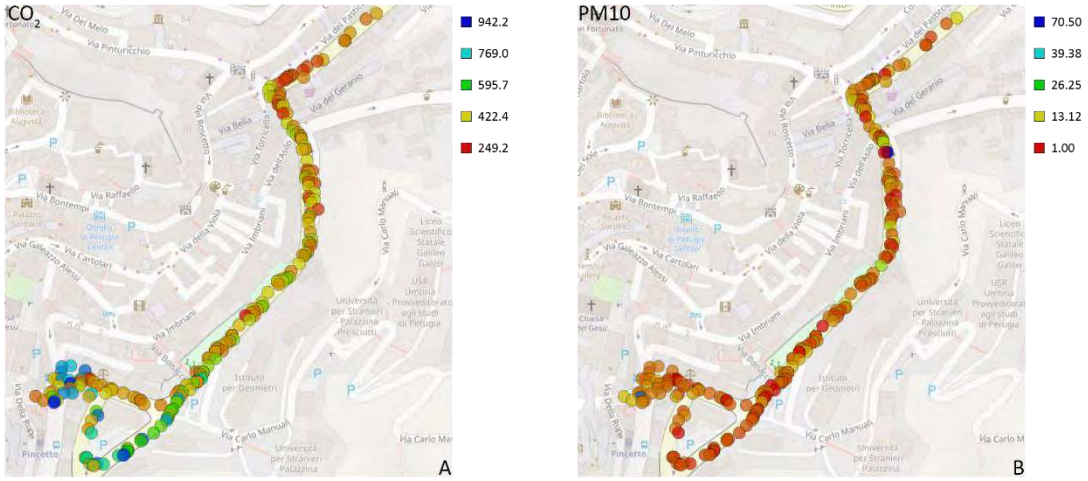


Figure 7 shows the recorded data along the vehicular main street, gathered through the sensors on the van; also, in this case, it was possible to identify the peaks of the CO_2 and PM10 concentrations,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

i.e., 942.2 ppm and 70.5 µg/m^3, respectively. The values are higher than the previous; this means that the pollutants along the street are higher, and the air quality is poorer.

Figure 7. Environmental mapping through equipped van along vehicular path: (A) CO_2 and (B) PM10 values.



4.3. Multi-domain survey

A total of 33 questionnaires were collected during the short-term period campaign. Sample respondents were 51.5% male and 48.5% female. Table 1 shows the number of respondents per gender and age.

Table 3. The collected surveys divided per gender and age.

Gender	Number of subjects	Age		
		<18	18-25	>35
Male	17	14	2	1
Female	16	15	1	0

As it was previously mentioned, the survey considered a multi-domain approach, with particular attention to thermal, acoustic, and visual perception and comfort, and air quality perception. In detail, the Thermal Sensation Vote (TSV) was concentrated in the “Cool”, “Neutral” and “Warm” categories, with a percentage of 23.9%, 32.4%, and 29.6%, respectively; a few samples selected “Hot” (7%) and “Cold” and “Very cold” (both 2.8%). Regarding the Thermal Comfort Vote (TCV), 32.4% of subjects were in “Bit uncomfortable”, 19.7% were in “Bit comfortable”, 18.3% were in “No change”, and 16.9% were in “Comfortable”. A little percentage of samples were in “Very uncomfortable”, “Uncomfortable” and “Very comfortable”. Figure 8A shows the thermal sensation and comfort data, gathered during the campaign.

The Acoustic Sensation Vote (ASV) was concentrated in the “neutral”, “Bit noisy” and “Noisy” classes, with a percentage of 22.5%, 21.1%, and 31%, respectively; a few subjects selected “Bit quiet”

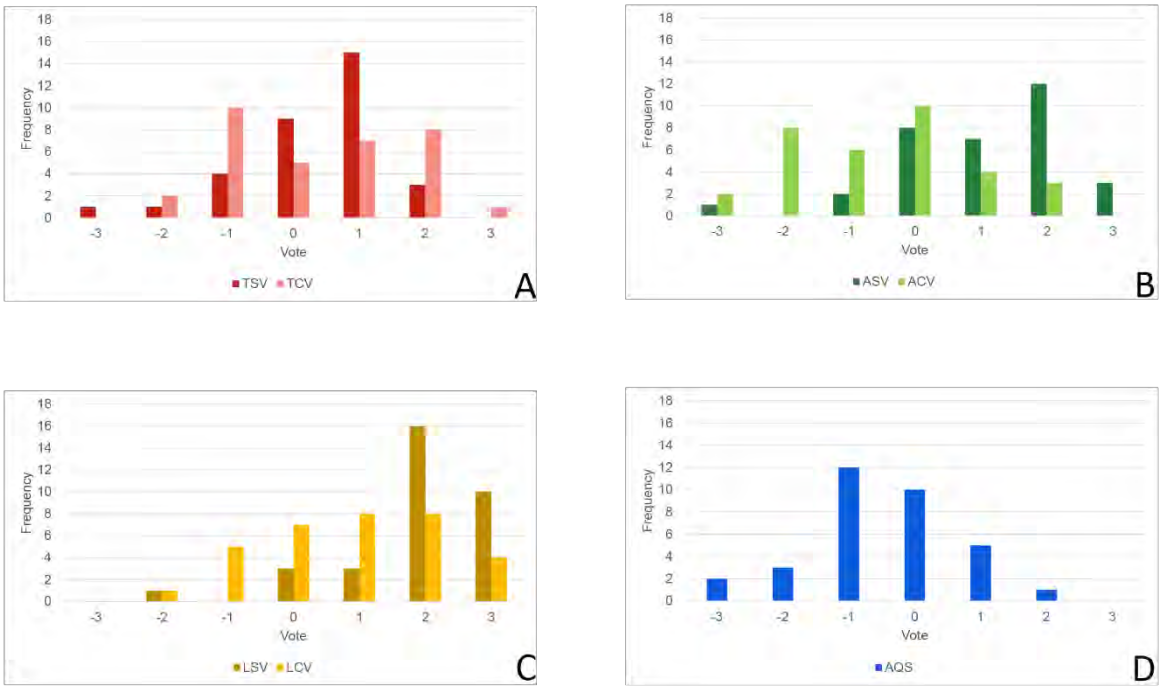
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

(9.9%) and “Very noisy” (5.6%). Regarding the Acoustic Comfort Vote (ACV), 29.6% were in “No change”, 18.3% were in “Bit uncomfortable” and 16.9% were in “Uncomfortable”. Figure 8B presents the acoustic sensation and comfort data with the frequency of the responses. As can be seen in the previous figure, the ASV was shifted to the values of 0, +1 and +2, while the ACV was the opposite (-2, -1 and 0): this condition suggests that the noisy outdoor spaces are considered as a discomfort area for the users.

Lighting Sensation Vote (LSV) was concentrated in the “Bright”, “Very bright” and “Bit bright” categories, with a percentage of 39.4%, 19.7%, and 16.9%, respectively; none of the subjects selected “Very dark” option. Regarding the Lighting Comfort Vote (LCV), 25.4% were in “Comfortable”, 23.9% were in “Neutral” and “Bit comfortable”, and 12.7% were in “Bit uncomfortable”. The other categories presented lower percentage. Figure 8C shows the lighting sensation and comfort data. As can be seen in the previous graph, the subjects considered the selected outdoor space with a vote between 0 to +3, but this situation is not considered a problem for the subjects’ comfort.

The Air Quality Sensation (AQS) was concentrated in the “Bit poor” and “Neutral” categories, with a percentage of 31% and 22.5%, respectively; there also was another important percentage, such as 16.9% and 12.7% for “Bit pure” and “Poor” categories, respectively. Figure 8D shows the AQS of the users, gathered through the survey; as can be seen in the graph, the users’ vote was very different and heterogeneous, and they had not the awareness of the real condition of the outdoor spaces where they live.

Figure 8. The results of surveys in terms of (A) thermal, (B) acoustic, (C) lighting and (D) air quality domain.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4.4. Social survey

From March 21st to April 1st, 2022, an online social survey was submitted to the area users. To reach a representative sample of respondents the High School and the University collaborated in the survey dissemination.

Table 4. Social survey participants.

Gender	Number of respondents	Age				
		<18	18-25	26-30	31-35	>35
Male	25	/	2	4	1	18
Female	64	1	9	7	4	43
Not Specified	1	/	/	/	/	1

A total of 90 persons completed the survey. Table 4 describes the number of respondents per gender and age.

The questions dedicated to general information reveal a high participation rate of females (72%). The most elevated participation rate is reached by respondents that fall in the >35 age group (69%); <18 respondents have the lowest participation rate, with only 1 survey submitted.

Most of the respondents study or work at the university, while only 30% belong to the High School.

Figure 9. Respondents by category.

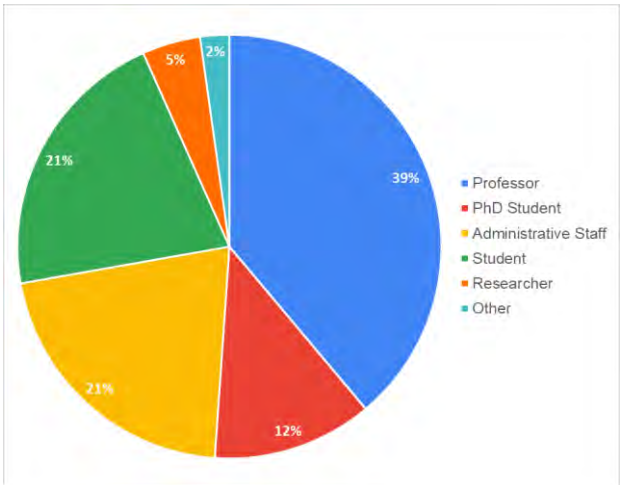
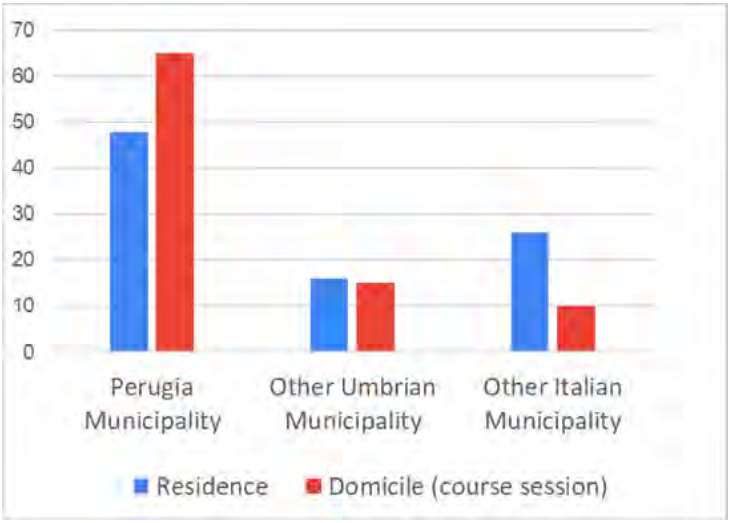


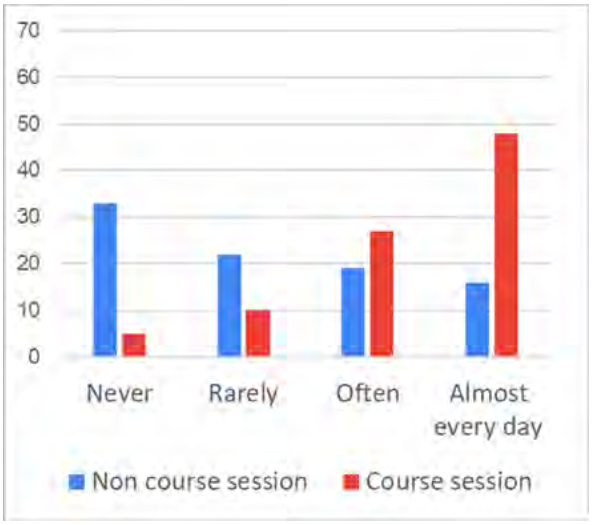
Figure 9 illustrates that the majority of respondents are high school and university professors (39%), followed by administrative staff (21%). Only 19 students and 11 Ph.D. students participated; the last category by participation rate (4%) is “researchers” with 4 respondents.

More than 50% of all the participants reside permanently in Perugia (Figure 10), while during the class session the percentage of people living in Perugia raise to 72%. Looking at the graph, it can be observed that 20% of people that live in Perugia during class sessions reside in a municipality located beyond the regional borders (other Italian municipalities). 15.6% of respondents affirm living in other Umbrian Municipalities even during class sessions. The chart in Figure 11 compares the presence of respondents in the area of interest during course sessions and non-course sessions (e.g., summer

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

break). During the class session, a peak of presence is registered. More than 60% of the respondents declare to frequent the area and the buildings out of course sessions (24% rarely, 21% often, and 17% almost every day); however, more than 36% never go to the area. On the other hand, during class sessions 53% of respondents spend 5 or 6 days a week at university or school (almost every day); 30% often (3-4 days), 11% rarely (1-2 days) and only the 5% never goes.





Approaching the questions related to mobility, answers on usual modes of transportation for commuting can be synthesized as follows.

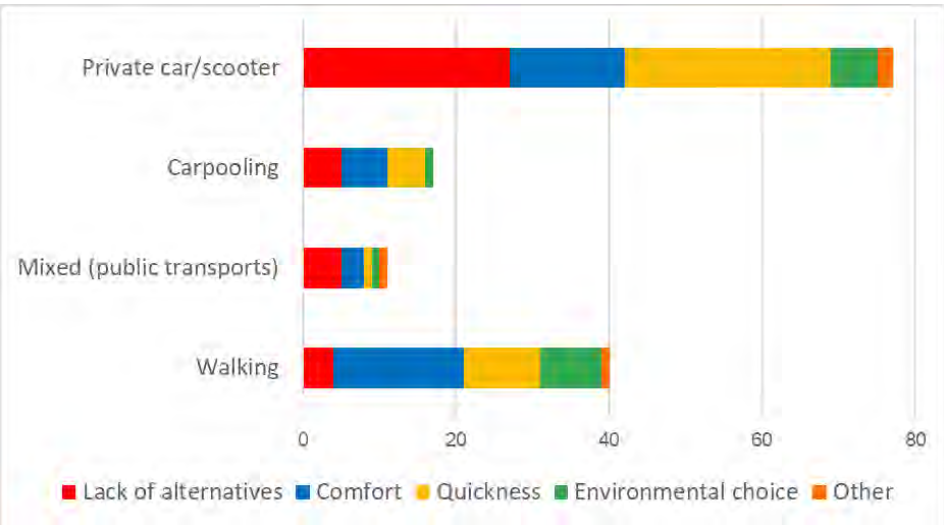
Figure 12 illustrates that most people (63%) use private non-electric cars to commute; 54% drive alone, and 9% share the ride with colleagues or family. The 11% declare to use public transport (minimetro, train and bus). Finally, 26% walk to and from the buildings.

When asked the reason for the mobility choice, 33% of those who use a private car or scooter claim a lack of viable alternative, while another 33% affirm that the chosen mean of transportation allows fast commuting. Moreover, 20% of drivers assert that personal comfort is a determinant of choice. Respondents that choose to carpool are almost equally motivated by comfort (35%), quickness (28%), and lack of viable alternatives (29%). The 45% of participants that use public transport declare a lack of alternatives; the 26% choose public transport for comfort and only the 9% for rapidity. The 11% that assert “other” motivations stated that they choose public transport because they do not own a personal car. Finally, the remaining 9% prefer public transport for environmental reasons. The 42% of those who walk do it for physical comfort, while the 25% think that is the fastest possibility. The 20% attribute the choice to environmental issues.

Overall, respondents motivate their daily mobility choice for quickness (30%), lack of choices (28%), comfort (28%), environmental choice (11%), and other personal reasons (3%).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

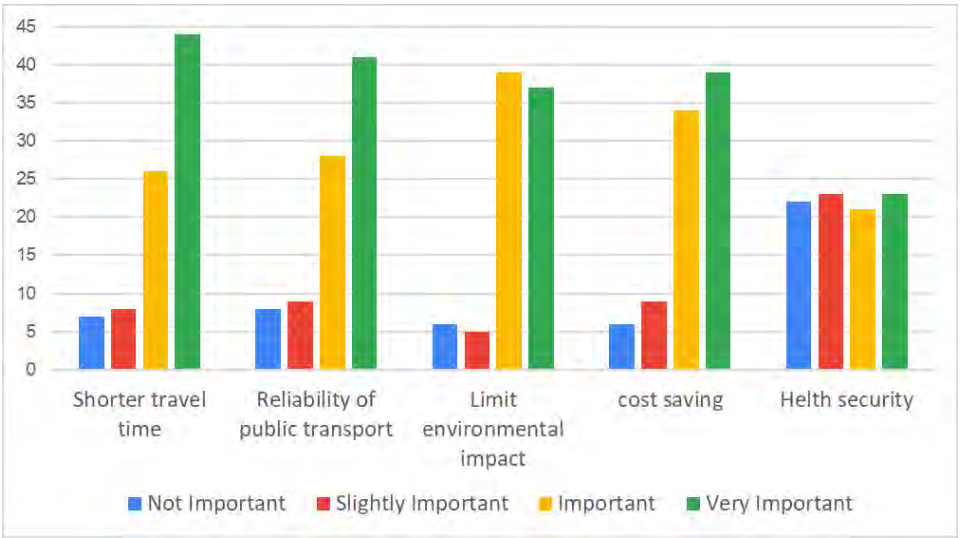
Figure 12. Respondents mobility choice and motivations.



A question on the duration of daily commuting reveals an increase in the duration of the return trip, proving that traffic congestions caused by intense use of private vehicles affect the rapidity of the travel.

A final mobility query investigated to what extent the following factors could encourage users to change mobility habits (Figure 13). 52% consider “very important” the duration of commuting, 31% “important”, 9% “slightly important”, and 8% “not important”. 48% agree that reliable public transport is “very important”, 33% “important”, 10% “slightly important”, and 9% “not important”. Cost savings are “very important” for 44%, “important” for 39%, “slightly important” for 10%, and “not important” for 9%. Health security factor was more dividing, and each category collected around 20% preferences (26% “very important”, 23% “important”, 26% “slightly important”, 25% “not important”).

Figure 13. Factors influencing mobility habits.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The accessibility section of the survey demonstrated that 64% of the respondents do not use the green area beyond working hours.

Moreover, Figure 14 shows the respondents' perception of the outdoor space. Most answers concentrated on the "Poor" (43%) and "Good" (34%) categories. Users show a positive perception of outdoor accessibility. 52% declare "Good" the green spaces and 5% "Very Good"; while 31% and 12% respectively "Poor" and "Very Poor". There is no clear accordance on "Security". 53% of respondents find "Poor" or "Very Poor" the area, and 47% "Good" or "Very Good". None of the users voted "Very Good" lighting; 49% fall in "Poor" category, 29% "Good" and 22% "Very Poor". The cleaning is perceived "Poor" by the majority of respondents (43%), "Good" by 26%, "Very Poor" by 22% and "Very Good" by 9%. Finally, street furniture is "Poor" or "Very Poor" by 76% and "Good" or "Very Good" by 24%.

Figure 14. Outdoor perception.

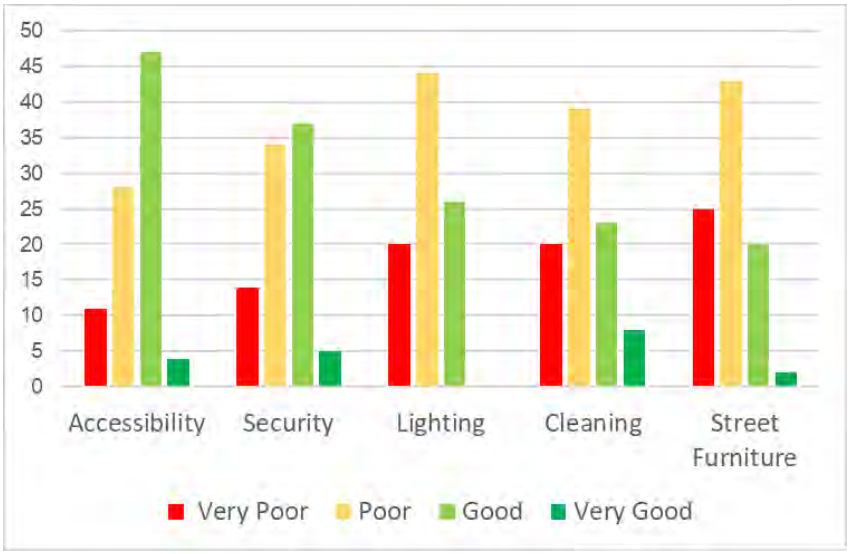
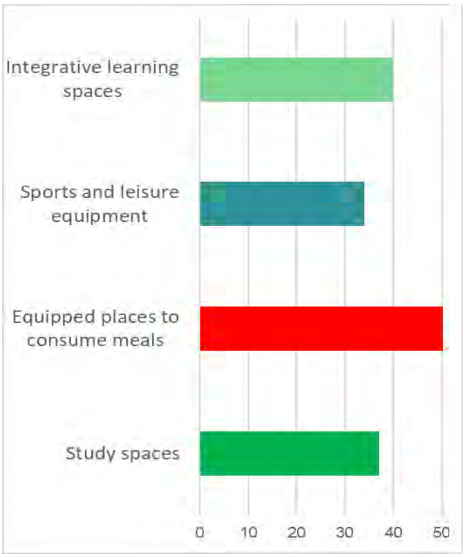


Figure 15. Users' interventions preferences.



38% of respondents declared that they would be very interested in using the green space beyond class and work hours.

When asked what would motivate them to spend more time in the outdoor areas, 57% express the need for equipped spaces where they could consume meals, 43% for integrative learning spaces where they could experiment with new teaching and learning approaches, 40% would use study spaces, and 37% goes for sports and leisure equipment (Figure 15).

5. Conclusions and future developments

This work presents a multi-disciplinary approach to investigate the needs and potentials of an under-deployed green area near the city center of Perugia. The environmental outdoor analysis was carried out through the combination of both a long- and a short-term monitoring campaign and the latter was conducted simultaneously to a right here-right now interviews with locals about their perception of

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

the surroundings. Along with the environmental analysis, a social survey about the users' needs and ideas for a new possible social space was developed and distributed to identified daily attendees of the place. The environmental analysis allowed us to depict microclimate variabilities across the area of intervention. Thermal buffer due to greenery was experimentally verified; indeed, the higher night-time ΔT was observed in point 3 (i.e., 12.4°C), while the points 1 and 5 gathered the lowest values, i.e., 6.2°C and 6.4°C, respectively. These differences suggest that the points near artificial and sealed surfaces are influenced by the technical properties of the materials, while the points near some green areas or generally permeable surfaces were influenced by the greenery acts. Concerning the air quality domain, the collected CO_2 and PM10 concentrations reached up to 942.2 ppm and 70.5 μg/m^3, respectively. These values are above the 24-mean thresholds suggested by the World Health Organization [24] are 400 ppm and 45 μg/m^3 for both CO_2 and PM10, respectively. These results highlight that observed poor air quality in the area during the traffic rush hours could bring negative effects on human health and cause health issues for the people attending the place (mainly high school students waiting at the bus stop). Regarding the right here-right now survey, the collected data are referred to a sample of 33 users, quite small for being representative of the whole attenders population. The implemented multi-domain approach suggested that people are able to perceive the thermal, acoustic, and lighting conditions, but, at the same time, they were not aware of the dangerous levels of pollutants that are exposed to.

The social survey investigates the needs and preferences of a 90-persons sample. Despite the little participation of students aged under 18 years old, the survey produced several relevant results. The majority of people that work and study at the University or Highschool drive private vehicles to commute (cars and scooters), contributing to traffic congestion during rush hours and worsening air quality. Most of them use private mobility for reasons related to commuting comfort, rapidity, and lack of valid alternatives. Participants' perception of the green area varies. However, many respondents are willing to use the renewed spaces whether equipped according to the needs expressed as follows: (i) equipped spaces to consume meals, (ii) integrative learning spaces, (iii) study spaces, (iv) sports and leisure equipment.

The results of this work can be useful for future developments and future research; the same study can be carried out for each season (e.g., spring, summer, and fall), in order to understand the different effects that the configuration and the features of spaces can lead to the environment and to the human health in different period of the year. The current study can be useful for architects, engineers, and designers in the planning of the outdoor spaces and in the choice of the materials used for the urban texture, such as a possible new construction or a renovation of buildings and spaces. Moreover, since the pollutants outcomes are higher than the reference thresholds, the recorded data can be the starting point for different mitigation strategies, such as the redevelopment of the selected area with the improvement of the common spaces and the addition of a green area, and the creation of sustainable paths for decreasing the human health issues and improving air quality. As already shown in different studies, these changes influence the well-being and the human comfort in outdoor spaces, and they could bring different benefits for people and for the environment. Likewise, the social survey

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

results serve as a starting point for the renewal project. To evaluate and monitor the success of the greening intervention, the same data should be collected over time.

References

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision* (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations, 2019.
2. Pioppi, B.; Pigliautile I.; Pisello A.L. Human-centric microclimate analysis of Urban Heat Island: Wearable sensing and data-driven techniques for identifying mitigation strategies in New York City. *Urban Climate*, 2020, 100716: 1-19.
3. Bai, L.; He, Z.; Li, C.; Chen Z. Investigation of yearly indoor/outdoor PM2.5 levels in the perspectives of health impacts and air pollution control: Case study in Changchun, in the northeast of China. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 101871: 1-10.
4. Leech, J.A et al. Outdoor air pollution epidemiologic studies. *Am. J. Respir. Crit. Care Med*., 2000, 161.
5. Lee, I.; Voogt, J.A.; Gillespie, T.J. Analysis and Comparison of Shading Strategies to Increase Human Thermal Comfort in Urban Areas. *Atmosphere*, 2018, 9, 91: 1-19.
6. Wang, Y.; de Groot, R.; Bakker, F.; Wörtche, H.; Leemans, R. Thermal comfort in urban green spaces: a survey on a Dutch university campus. *International Journal Biometerology*, 2017, 61: 87-101.
7. Picot, X. Thermal comfort in urban spaces: impact of vegetation growth. Case study: Piazza della Scienza, Milan, Italy. *Energy and Buildings*, 2004, Vol. 36, pp 329-334.
8. Shashua-Bar, L.; Hoffman, M.E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. *Energy and Buildings*, 2000, Vol. 31, pp 221-235.
9. Salata, F.; Golasi, I.; de Lieto Vollaro, A.; de Lieto Vollaro, R. How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study, *Energy and Buildings*, 2015, 99: 32-49.
10. Haase, D.; Kabisch, S.; Haase, A.; Andersson, E.; Banzhaf, E.; Baró, F.; Brenck, M.; Fischer, L. K.; Frantzeskaki, N.; Kabisch, N.; Krellenberg, K.; Kremer, P.; Kronenberg, J.; Larondelle, N.; Mathey, J.; Pauleit, S.; Ring, I.; Rink, D.; Schwarz, N.; Wolff, M. Greening cities – to be socially inclusive? About the alleged paradox of society and ecology in cities. *Habitat international*, 2017, 64, 41-48.
11. Eizenberg, E.; Jabareen, Y. Social sustainability: a new conceptual framework. *Sustainability*, 2017, 9 (1), 68.
12. Mengbing, D.; Xiaoling Z. Urban greening: A new paradox of economic or social sustainability?. *Land Use Policy*, 2020, Volume 92, 104487, ISSN 0264-8377,
13. Curran, W.; Hamilton, T. Just green enough: Contesting environmental gentrification in greenpoint, brooklyn. *Local Environment*, 2012, 17, 1027e1042.
14. Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3), 259–263.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

15. Cureau R.J.; Pigliautile I.; Pisello A.L. A New Wearable System for Sensing Outdoor Environmental Conditions for Monitoring Hyper-Microclimate, *Sensors*, 2022, 22(2):502.
16. Rosso F.; Pioppi B.; Pisello A.L. Pocket parks for human-centered urban climate change resilience: Microclimate field tests and multi-domain comfort analysis through portable sensing techniques and citizens' science. *Energy and Buildings*, 2022, 260, 1-20.
17. Kousis I.; Pigliautile I.; Pisello A.L. Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Scientific reports*, 2021, 11, 9732.
18. Hügel, S.; Davies, A. Public participation, engagement, and climate change adaptation: A review of the research literature. *WIREs Climate Change*, 2020, 11, e645. 10.1002/wcc.645.
19. Arriagada, R.; Aldunce, P.; Blanco, G.; Ibarra, C.; Moraga, P.; Nahuelhual, L.; O'Ryan, R.; Urquiza, A.; Gallardo L. Climate change governance in the Anthropocene: Emergence of Polycentrism in Chile. *Elem Sci Anth*, 2018, 6, 68.
20. Berkes, F.J.; Colding, C.; Folke, C., *Navigating Social- Ecological Systems: Building Resilience for Complexity and Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2003.
21. Fedele, G.; Donatti, C.; Harvey, C.A.; Hanna, L.; Hole, D. Transformative adaptation to climate change for sustainable social-ecological systems. *Environmental Science & Policy*, 2019, 101, 116-125.
22. Gupta, J.; Bergsma, E.; Termeer, C.J.A.M.; Biesbroek, G.R.; Van Den Brink, M.; Jong, P.; Klostermann, J.E.M.; Meijerink, S.; Nooteboom, S. The adaptive capacity of institutions in the spatial planning, water, agriculture and nature sectors in the Netherlands. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2016, 21(6), 883-903.
23. RUS - Rete delle Università per lo Sviluppo Sostenibile, White Paper 2021 - Le attività del Gruppo di lavoro Mobilità della Rete delle Università italiane per lo sviluppo Sostenibile. Available online: https://reterus.it/public/files/GdL/Mobilita/WhitePaper_GdLmobilita%CC%80_10giu_finale.pdf (accessed on 15 March 2022).
24. World Health Organization. 2021. Ambient (outdoor) air pollution. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-healt (accessed on 10 May 2022).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Potenzialità di produzione energetica da biomasse ligno-cellulosiche da frutticultura

Filippo Cardelli [1,*], Giacomo Fabbrizi [1], and Franco Cotana [1,2]

[1] Centro Interuniversitario di Ricerca sull' Inquinamento e sull'Ambiente CIRIAF, Via G. Duranti, 67 - 06125 - Perugia

[2] Dipartimento di Ingegneria, Università di Perugia, Via G. Duranti, 93 - 06125 Perugia

* Autore a cui indirizzare la corrispondenza. E-Mail: filippo.cardelli@outlook.it

Abstract: Questo lavoro si propone come un contributo agli studi sull'impiego delle biomasse per produzione energetica. Vengono in particolare esaminati i residui ligno-cellulosici provenienti dalla frutticoltura. Dopo un richiamo alle principali tipologie e caratteristiche dei prodotti del settore frutticolo in Italia, vengono riportate alcune stime sui quantitativi annui di residui ligno-cellulosici potenzialmente disponibili nel Paese. Tali residui provengono per lo più dalle operazioni di potatura, ma anche dallo smantellamento degli impianti di produzione obsoleti. Le stime indicate si riferiscono alle principali specie di fruttifere coltivate in Italia e sono state dedotte dall'analisi di differenti dati statistici e studi di settore, individuati con una approfondita ricerca bibliografica. Le metodologie utilizzate e il periodo di riferimento di queste stime sono descritte e discusse nel lavoro. Partendo dalle stime dei quantitativi di residui ligno-cellulosici annui potenzialmente a disposizione per le varie specie di colture fruttifere considerate, è stato stimato il contributo di produzione energetica che potrebbe essere derivato dall'uso di queste biomasse, in considerazione del fatto che la loro composizione chimica suggerisca un impiego energetico come combustibili solidi impiegati in impianti termici per la produzione di calore o mista di calore ed energia elettrica. Il lavoro presenta anche una serie di analisi chimiche, fisiche ed energetiche effettuate nei laboratori del Centro per la Ricerca sulle Biomasse (CRB) dell'Università di Perugia su campioni di residui ligno-cellulosici di frutticoltura raccolti nei campi sperimentali dell'Università di Perugia nel periodo che va da novembre 2021 a febbraio 2022. I risultati delle analisi riportati costituiscono un utile riferimento per gli studi di fattibilità di progetti per l'uso energetico di biomasse ligno-cellulosiche provenienti da frutticoltura.

Keywords: Biomasse ligno-cellulosiche; frutticoltura; biocarburanti.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_017_pp_180

Introduzione

Le ricorrenti crisi energetiche, inclusa quella che stiamo vivendo in questo periodo, indicano la necessità di diversificare le fonti di produzione energetica. Questa considerazione è ancor più vera per paesi come l'Italia, che fa massicciamente ricorso a fonti energetiche di origine fossile, pur essendo provvista di quantitativi di materie prime di questo tipo molto lontani dalla parità energetica [1].

L'uso di biomasse per la produzione di energia è da tempo indicato come una attività virtuosa e che potrebbe contribuire al raggiungimento della parità energetica per il nostro paese. Le biomasse sono a tutti gli effetti da considerarsi fonti di energia rinnovabile, perché non è considerata causa incrementale di emissioni in atmosfera di gas ad effetto serra [2].

Tra le varie tipologie di biomasse utilizzabili vi sono quelle prodotte dal comparto agricolo [3] [4].

Questo lavoro prende in considerazione le biomasse ligno-cellulosiche provenienti dalla frutticultura.

L'Italia è da sempre, per ragioni storiche, orografiche e climatiche, il principale paese frutticolo europeo e dell'area mediterranea [5]. Vi è dunque una abbondante quantità di residui ligno-cellulosici dal comparto della frutticoltura. Tali residui sono bruciati a bordo dei campi, o interrati, più raramente utilizzati come cibo per animali. La combustione dei residui di potatura, per quanto sia talvolta tollerata, è a tutti gli effetti uno smaltimento illegale di rifiuti, con possibili conseguenze negative sulla qualità dell'aria [6], [7]. Tale pratica è inoltre un rischio per l'innesco di incendi, in particolare nei periodi estivi o di siccità [8].

Secondo alcuni studi, la trinciatura in campo ha potenziali effetti negativi, come il favorire il manifestarsi di patologie fungine [9]. Inoltre, la pratica di interrare i residui della potatura può alterare negativamente la composizione del terreno, portando a diminuzione della fertilità e alla necessità di immissione di appositi fertilizzanti [10].

La raccolta dei residui delle potature, la loro conservazione e il successivo impiego per produzione energetica, sotto forma di calore e/o energia elettrica è una pratica ancora poco affermata, e che ha potenzialità di rilevo alla luce di una applicazione dei principi della economia circolare e dell'uso delle fonti di energia rinnovabili. I residui ligno-cellulosici, opportunamente conservati e trattati, sotto forma di cippato, pellet o bricchette, possono essere utilizzati come combustibile in caldaie, producendo il calore necessario al riscaldamento, ma anche vapore d'acqua da immettere in un circuito termodinamico turbina-alternatore per la produzione di energia elettrica [11], [12].

Un altro possibile impiego dei residui ligno-cellulosici è quello della produzione di biocombustibili liquidi come il biodiesel, i bioalcool (bioetanolo, biometanolo, biobutanolo), il biogas, il syngas [11], [13]. Tale impiego sembra più efficientemente applicabile a residui diversi da quelli da frutticoltura, che hanno un rapporto tra gli elementi costituenti che sembra più vantaggioso per utilizzo sotto forma di biocombustibile solido [14].

Questo lavoro intende essere un contributo allo studio delle potenzialità energetiche delle biomasse ligno-cellulosiche provenienti dalla frutticoltura ed è organizzato come segue. Nella sezione 1, dopo una breve descrizione della produzione frutticola in Italia, vengono presentati e discussi i quantitativi di biomasse ligno-cellulosiche prodotte nella frutticoltura e viene proposta una stima

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

delle potenzialità di produzione energetica correlate. Nella sezione 2 viene descritta la metodologia di analisi sperimentale, condotta nei laboratori CRB, utilizzata per la caratterizzazione fisica, chimica ed energetica di differenti campioni di biomasse ligno-cellulosiche raccolti nell'ambito di una campagna dedicata presso i campi di sperimentazione dell'Università di Perugia. Vengono inoltre presentati e discussi i risultati ottenuti, anche in relazione a dati reperiti in bibliografia. Seguono, nella sezione 3, le conclusioni.

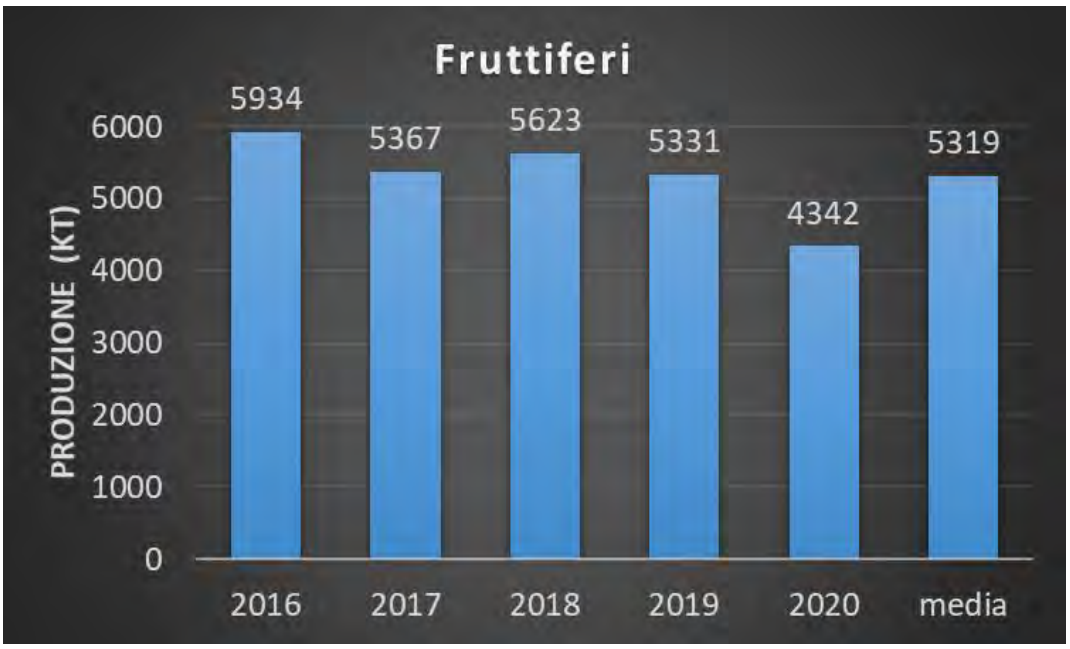
1. La biomassa ligno-cellulosica del comparto frutticoltura.

1.1. La produzione frutticola nazionale

I quantitativi di maggior produzione del comparto frutticoltura in Italia si riferiscono alla mela, agli agrumi, alle pesche e all'uva, anche in relazione ai quantitativi della produzione europea e mondiale di questi frutti. Il comparto della frutticoltura italiano produce, seppure con minori quantitativi anche ciliegie, susine, albicocche e altri frutti di minor produzione. La produzione frutticola in Italia è anche presente nel comparto della frutta secca, dove la produzione nazionale è tra le prime a livello europeo, con il nocciolo il mandorlo, la noce, ma anche, con quantitativi minori il pistacchio e il pecan.

Dall'analisi dei dati riportati nell'Annuario ISTAT 2021 [15] è stata ricavata la figura 1, nella quale viene rappresentata la produzione annua raccolta delle principali coltivazioni frutticole in Italia. I dati si riferiscono al quinquennio 2016-2020.

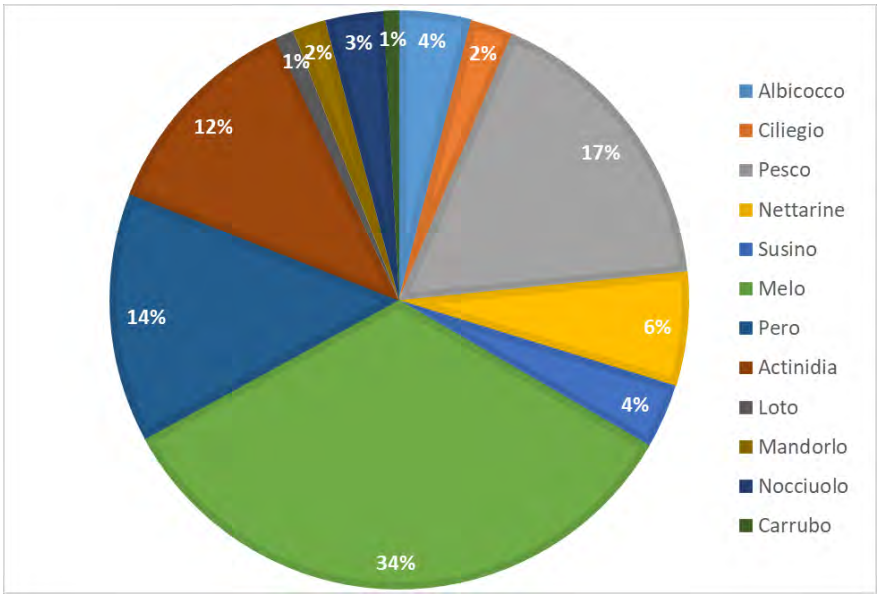
Figura 1. Produzione annua italiana dei principali fruttiferi.



La successiva figura 2 rappresenta, tramite un grafico a torta, la suddivisione della produzione italiana media del quinquennio 2016-2020 tra le principali specie frutticole censite [15].

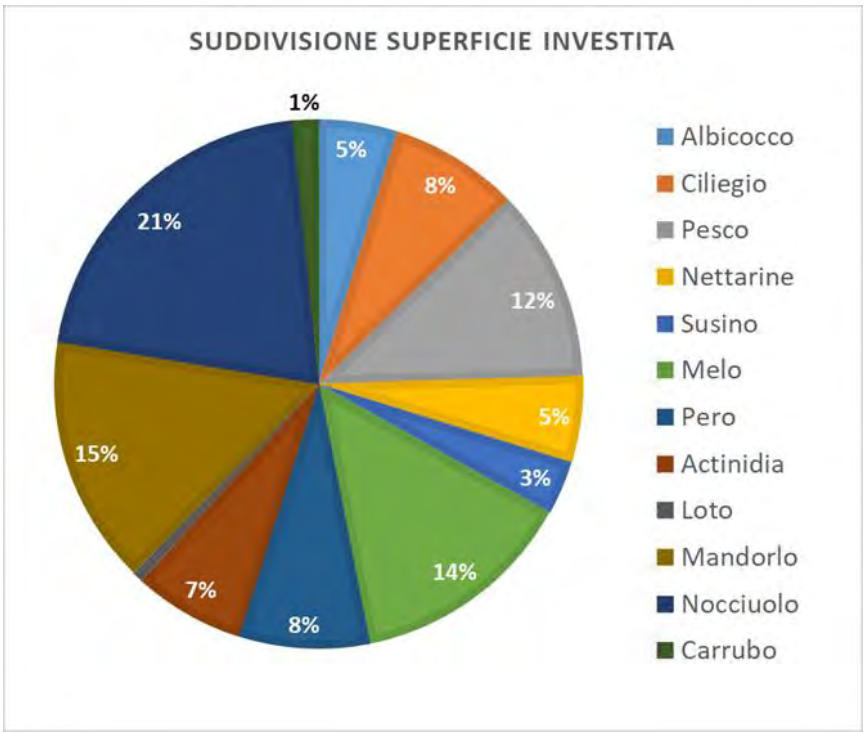
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 2. Ripartizione per specie della produzione media da frutticoltura nel periodo 2016-2020 in Italia.



Il grafico a torta della figura 3 rappresenta invece la distribuzione percentuale della superficie utilizzata per ciascuna delle principali specie frutticole censite [15].

Figura 3. Suddivisione percentuale della superficie investita per le principali specie utilizzate nella frutticoltura italiana.



Altri dati sulla superficie investita da specie utilizzate per la frutticoltura in Italia sono riportati nel Rapporto congiunto dell'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente ANPA e dell'Osservatorio Nazionale sui Rifiuti ONR "I rifiuti nel comparto agroalimentare - Studio di settore" [16]. In base a tale documento per l'albicocco è investita in Italia una superficie di 15 Mha, per il pesco una superficie di 95 Mha, per il susino 12 Mha, per il melo 65 Mha, per il pero 45 Mha, per il nocciuolo 70 Mha.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Il "Documento propedeutico alla redazione del piano nazionale biocarburanti e biomasse agroforestali per usi energetici" [17] redatto dal Centro di Ricerca sulle Biomasse CRB fornisce ulteriori dati sulla superficie utilizzate per frutticoltura ed indica che in Italia sono utilizzati per la produzione da pesco 93 Mha, per quella del melo 62 Mha, per quella del pero 43 Mha, per quella del mandorlo 87 Mha e per quella del nocciuolo 69 Mha (stima ITABIA).

Altri dati sono ricavabili da C. Di Blasi et Al. [18], melo 82 Mha, pero 39,9 Mha, pesco 78,7 Mha, mandorlo 118,2 Mha e nocciolo 69,3 Mha.

Si tratta di dati che, in considerazione dei differenti periodi a cui si riferiscono, possono essere considerati in accordo tra loro e che comunque costituiscono indicatori quantitativi attendibili.

1.2. I residui ligno-cellulosici da frutticoltura in Italia

I residui da potatura hanno tipologie e caratteristiche di raccolta variabili per specie di cultura frutticola. In genere hanno un tasso percentuale di umidità al momento della raccolta variabile tra il 35 e il 45% [11]. La stima corretta ed accurata dei quantitativi di biomasse residuali è di grande importanza ai fini della pianificazione delle strategie energetiche da biomassa.

Nella tabella 1 sono riportati alcuni dati reperiti sulle stime dei residui ligno-cellulosici annui dalle principali specie alcune specie utilizzate per la frutticoltura in Italia. I dati provengono da documenti diversi (vedi legenda) e si riferiscono a periodi diversi. Le cifre indicate sono tuttavia in molti casi di valore simile tra di loro e, anche in considerazione di quanto riportato in seguito, possono essere considerati un riferimento attendibile.

Tabella 1. Alcune stime dei residui ligno-cellulosici annui dalle principali colture frutticole in Italia. Dati in milioni di tonnellate per anno.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Vite	2,9	1,5	1,284	1,108	1,19	1,475	1,578	0,88
Olivo	2,4	1,2	1,138	1,074	1,147	1,343	1,433	0,8
Melo	0,2	0,1	0,087	0,132	0,118	0,286	0,284	0,09
Pero	0,1	0,05	0,052	0,055	0,035	0,181	0,17	0,05
Pesco	0,2	0,1	0,158	0,187	0,139	0,458	0,424	0,15
Limone	0,3	0,2	0,195	0,669	0,696	0,772	0,8	0,48
Mandorlo	0,2	0,1	0,148	0,12	0,119	0,223	0,12	0,095
Nocciolo	0,2	0,1	0,069	0,136	0,09	0,219	0,174	0,085

Dati riferiti ad agrumi

Legenda tabella I

A	Residuo verde [18]
B	Residuo secco [18]
C	Residuo secco senza apporto a fine ciclo produttivo. Stima ITABIA [17]
D	Residuo secco senza apporto a fine ciclo produttivo. Stima APAT-CRPA [17]
E	Residuo secco senza apporto a fine ciclo produttivo. Stima ANPA ONR [16]
F	Residuo secco con apporto a fine ciclo produttivo. Stima APAT-CRPA [17]
G	Residuo secco con apporto a fine ciclo produttivo. Stima ANPA ONR [16]
H	Residuo secco effettivamente disponibile. Stima ITABIA [19]

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

I dati della colonna A e B si riferiscono alla quantità totale di residui prodotti, rispettivamente allo stato umido subito dopo il taglio, e allo stato secco. La quantità totale dei residui verdi (colonna A) prodotti è stata stimata a partire dai dati sulla produzione specifica di residui (espressa in t/ha), moltiplicando tale dato per la superficie investita. I dati della tabella B sono stati desunti considerando opportunamente l'umidità percentuale del residuo verde.

I dati esposti in [18] si riferiscono ad un articolo pubblicato nel 1997, che fa a sua volta riferimento a dati del Centro Studi sull'Agricoltura l'Ambiente e il Territorio del 1990. Sono dunque numeri sicuramente attendibili, ma piuttosto datati.

I dati della colonna C sono stati stimati da ITABIA considerando il triennio 2000-2002. Essi si riferiscono al residuo secco che si stima poter essere effettivamente a disposizione per produzione energetica. In questa stima è stato tenuto conto di parametri di decremento dovuti a considerazioni di tipo logistico-economiche, quali il frazionamento delle differenti aree produttive, la dimensione delle aziende, la loro organizzazione. ITABIA stima ragionevole che la disponibilità effettiva di residuo secco da potature dei fruttiferi possa essere il 45-50% di quello potenziale.

I dati della colonna D sono stati elaborati dalla Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici APAT, confluita dal 2008 nell'Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale ISPRA, e dal Centro Ricerche Produzioni Animali CRPA. I dati rappresentano, così come quelli della colonna C, la disponibilità effettiva di residuo secco ma si riferiscono unicamente all'anno 2002. Inoltre, a differenza di quanto fatto per i dati della colonna C, dove l'elaborazione è stata fatta utilizzando il parametro resa di residui per ettaro, i dati della colonna D sono stati elaborati in relazione alla produzione frutticola primaria, dato che, se considerato su un unico anno di produzione, può essere soggetto a variazioni importanti.

I dati della colonna F sono stati elaborati con la stessa metodologia di quella utilizzata per i dati della colonna D, ma in questo caso sono state considerate anche le biomasse ligno-cellulosiche provenienti dai tagli di fine impianto. I dati delle colonne E e G sono stati elaborati dalla Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente ANPA e dall' Osservatorio Nazionale sui Rifiuti ONR. La valutazione si basa sul calcolo a livello regionale delle masse di residui a partire da dati statistici relativi alle produzioni agricole, integrati con dati bibliografici sul rapporto tra quantità di residui per unità di prodotto (rapporto sottoprodotto/prodotto). I dati di ingresso delle elaborazioni effettuate provengono da pubblicazioni ISTAT che si riferiscono a dati del 1997 [16]. Vale per questo la considerazione sulla sensibilità del dato elaborato alle variazioni produttive dell'anno di riferimento. L'elaborazione ha tenuto conto, per ciascuna coltura frutticola, della superficie in produzione, della quantità di prodotto raccolto, del rapporto scarto principale/prodotto, dell' umidità media al recupero dello scarto principale , della frazione dello scarto principale attualmente riciclata, dello scarto secondario, ovvero della massa dendrometrica (legna) disponibile al termine del ciclo produttivo, della durata media dell'impianto arboreo, dell' umidità media della legna al taglio e della frazione dello scarto secondario attualmente riciclata. La differenza tra i dati della colonna E e G è dovuta al fatto che ne primo caso sono stati considerati solamente gli scarti da potatura, mentre nel secondo sono stati considerati anche gli apporti della legna a fine ciclo produttivo.

Infine, i dati della colonna H riportano le stime di residuo secco effettivamente disponibile,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

effettuate nel 2008 dalla Italian Biomass Association ITABIA [19]. I dati sono stati elaborati prendendo in considerazione tutti gli scarti di matrice ligno-cellulosica che derivano dalla coltivazione di piante erbacee ed arboree presenti nel territorio nazionale. Per la valutazione sono stati analizzati i principali studi effettuati negli anni precedenti al 2008, sia su scala locale, che regionale e nazionale, al fine di verificare il grado di approssimazione dei coefficienti riduttivi adottati. È stato considerato che in molti casi i residui ligno-cellulosici trovano impiego nella stessa azienda produttrice, per esempio per lettiere di ricovero per animali, per alimentazione animale, per concimazione da interramento. Questa considerazione ha portato ai valori della colonna H, ridotti rispetto a quelli riportati nelle altre colonne.

Nel lavoro di M. Zivkovic et Al. [20] vengono indicati i quantitativi di residui specifici ligno-cellulosici di alcune specie della frutticoltura nella repubblica di Serbia nel periodo di potatura 2010-2011. Vengono indicati per tre cultivar di pesco un valore medio di 3,4 t/ha, per due cultivar di susino un valore medio di 3,73 t/ha per due cultivar di melo un valore medio di 3,3 t/ha e per sette cultivar di vite un valore medio di 2,6 t/ha. I valori si riferiscono a residui verdi, al momento del taglio.

In considerazione del fatto che le rese dei residui variano in funzione della tipologia di frutto e di impianto, delle tecnologie produttive, della zona geografica, dal terreno di produzione, dai tempi e dai metodi di raccolta, per ottenere dati attendibili e sufficientemente accurati occorrono specifici studi di settore insieme a estensive campagne di rilievo in campo e di classificazione dei rilievi effettuati. Questo rende la stima dei residui da biomasse ligno-cellulosiche della frutticoltura attività complessa e onerosa.

1.3. Stima della produzione energetica da residui ligno-cellulosici della frutticoltura in Italia

Per avere una stima della potenziale produzione energetica annua da biomasse ligno-cellulosiche della frutticoltura in Italia si sono considerati i valori delle rese annue stimati da ANPA e ONR [16] e i valori del potere calorifico del residuo secco indicati in [17] e si sono ottenuti i risultati riportati nella tabella II, espressi in tonnellate equivalenti di petrolio tep.

Tabella II. Potenzialità di produzione energetica annua da biomasse ligno-cellulosiche della frutticoltura in Italia.

Coltura	Resa annua secco (Mt)	Potere calorifico inferiore secco (kcal/kg)	Energia primaria (tep)	Energia elettrica equivalente (Gwh)
Vite	1,190	4000	475590,71	2544,32
Olivo	1,146	4400	503806,43	2695,26
Agrumi	0,695	4400	305537,06	1634,56
Melo	0,118	4500	53048,95	283,80
Pero	0,035	4500	15888,43	85,00
Pesco	0,139	4500	62478,23	334,25
Mandorlo	0,119	4500	53661,32	287,08
Nocciolo	0,090	4500	40528,57	216,82
Albicocco	0,006	4500	2777,26	14,86
Susino	0,007	4500	3087,04	16,52
Ciliegio	0,007	4500	3243,51	17,35
Kiwi	0,031	4500	13752,76	73,57
Totale	3,584		1533400,28	8203,38

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'Autorità italiana per l'energia elettrica e il gas AEEG (oggi Autorità di regolazione per energia reti e ambiente ARERA), con la Delibera EEN 3/08 [21], ha fissato il valore del fattore di conversione dell'energia elettrica in energia primaria in 0,187 x 10−3 tep/kWh. In pratica questo significa aver fissato il rendimento medio del sistema termoelettrico nazionale di produzione dell'energia elettrica al valore di circa il 46%. Infatti, poiché 1 tep di energia primaria equivale a 41,860 GJ, con il valore del fattore di conversione indicato si riesce a mettere a disposizione dell'utenza energia elettrica una quantità di $1/(0{,}187 \times 10^{-3})$ kWh/tep ovvero con 1 tep si ha 19,25 GJ, con un rendimento di trasformazione quindi pari a 19,25/41,86 = 0,46.
In base a questa considerazione è stata calcolata la potenzialità di energia elettrica equivalente riportata nella ultima colonna della tabella II. Considerando che nel 2020 la produzione nazionale lorda di energia elettrica è stata pari a 280,5 TWh e che la quota proveniente da fonti rinnovabili (eolica, geotermica, fotovoltaica e bioenergie) è stata del 24,7% [22], i dati elaborati indicano che la potenzialità di energia elettrica prodotta da biomasse ligno-cellulosiche della frutticoltura in Italia è stimata pari a una quota del 2,9% circa della produzione nazionale lorda di energia elettrica e pari a una quota dell'11,8% della produzione nazionale di energia elettrica da rinnovabili (esclusa la fonte idroelettrica).

2. Caratterizzazione della biomassa residuale ligno-cellulosica.

La caratterizzazione della biomassa utilizzata è fondamentale nella gestione di un impianto di produzione di calore o cogenerativo che sfrutta questa risorsa, è a partire da essa, infatti, che si sviluppa l'intero processo ed è sempre in essa, nella maggior parte dei casi, che vanno ricercate le cause di eventuali malfunzionamenti. Questo perché i parametri fisico-chimici di cui necessita un processo di gassificazione sono più elevati rispetto a quelli che, per esempio, richiedono i processi di combustione che avvengono nelle caldaie utilizzate in ambito residenziale.

2.1. Raccolta provenienza e preparazione dei campioni

I campioni di residui ligno-cellulosici da frutticoltura sono stati raccolti presso gli impianti sperimentali dell'Università di Perugia, situati presso il Laboratorio Campi Sperimentali UR Arboree, Fosso di Provancio, Deruta (PG). La campagna di raccolta si è tenuta nel periodo che va da novembre 2021 a marzo 2022.

Le specie frutticole arboree campionate sono state, il pero varietà *Abate* il melo varietà *Florina*, il loto, il susino varietà *President*, il pesco varietà *Redhaven*, il nocciolo varietà *T. Giffoni*.

I campioni di olivo provengono da alcuni impianti nei pressi di Perugia e si riferiscono alle varietà *Frantoio*, *Moraiolo* e *Leccino*, molto diffuse nell'Italia centrale. Per ciascuna specie sono stati prelevati campioni che si riferiscono a piante di età diversa, compresa tra 8 e 25 anni, e sesti di impianto differenti: per ciascuna pianta sono stati raccolti sia rami di diverso spessore, sia polloni. Le ramaglie e i polloni sono stati privati di foglie e brattee. Per la vite varietà *Sangiovese* sono stati campionati tralci e sarmenti flessibili, anch'essi privati delle foglie. La campionatura è stata eseguita in modo da avere una composizione dei campioni il più possibile congruente con la composizione media delle potature di ciascuna specie.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

I campioni raccolti sono stati preventivamente essiccati, successivamente sono stati tagliati in piccoli pezzi e triturati tramite molinatura, infine stoccati e pesati prima della prova.

2.2. Metodologia sperimentale

Le analisi sperimentali di caratterizzazione dei campioni delle biomasse ligno-cellulosiche da frutticultura raccolti sono state effettuate presso i laboratori del Centro di Ricerca per le Biomasse CRB dell'Università di Perugia. Le analisi sperimentali sono state effettuate per determinare quale fosse l'utilizzo più adeguato per le biomasse prese in esame, in considerazione della loro composizione e proprietà.

I campioni, dopo essere stati raccolti, sono stati essiccati a temperatura ambiente per 3 settimane. Le potature sono state ridotte di pezzatura tramite una cippatrice industriale (pezzi di circa 25-40 mm). Il cippato è stato ulteriormente mulinato con un mulino a lame rotanti (RETSCH, Haan, Germany) e successivamente con un ultra-mulino (RETSCH, Haan, Germany) per ottenere particelle con un diametro compreso tra 0,5 e 1 mm, necessarie per i successivi processi di caratterizzazione. Ogni analisi è stata ripetuta in tre repliche per verificare la ripetibilità dei risultati.

La determinazione del potere calorifico è stata effettuata attraverso l'utilizzo del calorimetro LECO AC-350 (St. Joseph, Michigan, USA) che è in grado di determinare il Punto Calorifico Superiore (PCS).

Per poter essere analizzato, ogni campione, è stato preventivamente trasformato in pellet con l'ausilio di un pellettizzatore manuale. Il pellet è stato formato con la sola pressione del pistone, grazie alla umidità residua, senza aggiunta di additivi. Per ogni pellet analizzato è stata determinata la massa.

Per la determinazione del contenuto di umidità, sostanza secca, sostanza volatile e ceneri è stato utilizzato l'analizzatore Termogravimetrico TGA-701 LECO (St. Joseph, Michigan, USA), con questa rampa di temperature:

Step	Temperatura iniziale (°C)	Temperatura finale (°C)	Ramp Rate (°C/min)	Atmosfera interna	Misurazione peso finale
Umidità	25	105	6	Azoto	A costanza
Volatili	105	950	43	Azoto	Alla fine dello step
Ceneri	400	550	15	Ossigeno	Alla fine dello step

L'analisi elementare, ovvero la determinazione del contenuto di Carbonio, Idrogeno e Azoto, è stata effettuata con l'analizzatore Elementare Truspec CHN LECO conforme alla norma ASTM D-5373. Valutato il contenuto di idrogeno, è stato determinato Il Punto Calorifico Inferiore (PCI) della biomassa a partire dal PCS con l'utilizzo di questa equazione:

$$PCI\left(\frac{MJ}{kg}\right) = \left[\left(PCS\ \left(\frac{MJ}{kg}\right) * 1000\right) - (206 * \%H)\right]/1000 \qquad (1)$$

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Le tipologie di analisi descritte fino a questo punto sono indirizzate a valutare le potenzialità di utilizzo della biomassa ligno-cellulosica derivante da residui della frutticoltura come biocombustibile solido valorizzato termicamente.

Per valutare anche la possibilità di utilizzare queste biomasse come possibili fonti di glucosio per produrre biocombustibile liquido è stata effettuata una caratterizzazione dei campioni seguendo una procedura interna derivata dalla NREL 42618 [23]. La caratterizzazione avviene tramite idrolisi acida a due step del campione ed è stata replicata tre volte. L'idrolisi acida prevede l'utilizzo di acido solforico H_2SO_4 al 72% (w/w) (3 ml) su campioni del peso di 300±10 mg di biomassa secca. La procedura di idrolisi acida prevede un primo step di 60 minuti a 32 °C, ed un secondo step in cui la soluzione con H_2SO_4 viene diluita al 4%(w/w) e trattata a 121 °C in autoclave per 60 minuti.

Al termine del processo, nella frazione solida è stata determinata gravimetricamente la quantità di Lignina Insolubile in Acido (AIL), mentre nella fase liquida i monomeri di zuccheri derivanti dalla frazione cellulosica. La fase liquida è stata analizzata con un Dionex Ultimate 3000 HPLC (Thermo Fisher Scientifc, Sunnyvale, CA, USA) con rilevatore ad indice di rifrazione ERC RefractoMax (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). La colonna utilizzata è una Bio-Rad Aminex HPX-87H (Bio-Rad Laboratories, CA, USA).

2.3. Risultati

Nella tabella III sono indicati i valori del potere calorifico superiore e del potere calorifico inferiore per ciascuna specie esaminata. I valori riportati sono la media tra le misure effettuate. Il potere calorifico inferiore è stato desunto dal potere calorifico superiore conoscendo la percentuale in peso di idrogeno, anch'essa misurata per il campione, così come riportato in seguito.

Per comodità di comparazione con altri dati esistenti in bibliografia il potere calorifico superiore è stato riportato sia in cal/g o kcal/kg, sia in MJ/kg. Nella stessa tabella sono riportate le deviazioni standard delle misure.

Considerando i bassi valori percentuali delle deviazioni standard ottenuti i valori medi misurati possono essere considerati come valori da attribuire a ciascuna specie, almeno in relazione alla campionatura reperita.

Tabella III. Risultati delle prove per la stima del potere calorifico per i campioni esaminati.

Specie	PCS Medio (cal/g)	PCS Medio (MJ/kg)	PCI Medio (MJ/kg)	Dev.Std. PCS (cal/g)	Dev.Std. PCS (MJ/kg)	Dev.Std. PCI (MJ/kg)
Pero	4309,75	18,03	16,77	11,35	0,05	0,69
Loto	4451,65	18,63	17,38	22,35	0,09	0,72
Susino	4140,65	17,32	16,05	21,75	0,09	0,55
Pesco	4194,60	17,55	16,30	1,60	0,01	0,64
Nocciolo	4197,55	17,56	16,28	2,45	0,01	0,63
Olivo	4098,45	17,15	15,88	92,85	0,39	0,20
Vite	4357,75	18,23	17,13	3,95	0,02	0,54
Melo	4174,05	17,46	16,26	56,95	0,24	0,37

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

È possibile utilizzare dati reperiti in bibliografia per un confronto ed una validazione dei valori misurati.

Lo studio di W. Cichy et Al. [24] fornisce una prima serie di confronti. Si riferisce a campioni di biomasse ligno-cellulosiche da frutticoltura provenienti dalla regione di Poznan in Polonia e raccolti nel 2013. Nello studio vengono indicati i seguenti valori: pesco PCS 20,1 MJ/kg, PCI 18,8 MJ/kg, pero PCS 19,2 MJ/kg, PCI 17,8 MJ/kg, melo PCS 19,2 MJ/kg, PCI 17,9 MJ/kg, nocciolo PCS 19,6 MJ/kg, PCI 18,2 MJ/kg, susino PCS 19,6 MJ/kg, PCI 18,2 MJ/kg.

Nel lavoro di M. Zivkovic et Al. [20] vengono riportati i seguenti valori per il PCS susino 18,65 MJ/kg, melo 17,8 MJ/kg, pero 18,0 MJ/kg, pesco 19,4 MJ/kg, vite 18,3 MJ/kg.

Lo studio di Monarca D. et al. [25] riporta per campioni di nocciolo provenienti dalle aree dei monti Cimini e dei monti Sabatini nel viterbese e raccolti nel periodo dal 2003 al 2007 un PCS di 17,67 MJ/kg e un PCI di 16,45 MJ/kg. Nello studio presentato da Bilandzija N. et al [26], ancora per il nocciolo, i dati presentati si riferiscono alla produzione della repubblica di Croazia censita nel 2010, viene indicato un PCI di 17,47 MJ/kg, peraltro riferito a campioni secchi; quindi il dato sembrerebbe essere più vicino al valore del PCS. Un altro dato a disposizione, ancora per il nocciolo, viene dallo studio di Di Giacinto [27], che considera un campionamento raccolto negli anni 2012 e 2014 in aree di produzione localizzate all'interno del comprensorio dei Monti Cimini, in provincia di Viterbo. In questo studio vengono riportati i valori di 19,70 e 18,39 per il PCS e il PCI, rispettivamente. Anche in questo caso per il PCI ci si riferisce a campioni secchi.

Nel lavoro di I. Zambon et Al. [28] vengono riportati il PCS e PCI rilevati su pellet da residui di nocciolo provenienti dalla provincia di Viterbo. Lo studio è stato pubblicato nel 2016 ed indica un PCS di 19,02 MJ/kg e un PCI di 16,71 MJ/kg.

Altri confronti sono possibili con dati relativi all'olivo. Zambon et Al. [28] indica un PCS di 19,47MJ/kg e un PCI di 16,17 MJ/kg. Di Giacinto et Al. [27] riporta un PCS 19,93 MJ/kg e un PCI 17,85 MJ/kg. In M. Borja Velázquez et Al. [29] viene indicato un PCS di 15,23 MJ/kg.

Nella tabella IV sono riportati i valori percentuali medi rilevati di umidità, di sostanze volatili, di ceneri, e di Carbone.

Tabella IV. Risultati delle prove per la stima delle proprietà fisiche dei campioni di biomassa ligno-cellulosica da frutticoltura.

Specie	Umidità media (%)	Media Sostanze Volatili (%)	Media Ceneri (%)	Media Volatili secchi (%)	Media Ceneri secche (%)	Media Fixed Carbon (%)	Media Fixed Carbon Dry (%)
Pero	11,63	67,39	3,09	76,26	3,50	17,89	20,24
Loto	9,87	67,42	3,94	74,81	4,37	18,77	20,83
Susino	15,40	65,39	2,39	77,30	2,82	16,82	19,88
Pesco	9,30	69,80	4,28	76,96	4,71	16,62	18,33
Nocciolo	10,39	69,34	2,32	77,38	2,59	17,95	20,03
Olivo	10,75	69,53	2,67	77,91	2,99	17,05	19,11
Vite	17,83	63,18	3,00	76,90	3,65	15,99	19,46
Melo	10,23	69,58	3,16	77,50	3,53	17,03	18,97

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Nella Tabella V sono invece riportati le deviazioni standard delle serie di dati misurati. Come si vede anche in questo caso i valori medi rilevati possono essere considerati rappresentativi di tutti i campioni esaminati.

Tabella V. Deviazioni standard della serie di misure della tabella IV.

Dev.Std Umidità	Dev.Std Volatili	Dev.Std Ceneri	Dev.Std Volatili secchi	Dev.Std Ceneri secche	Dev.Std. Fixed Carbon	Dev.Std Fixed Carbon Dry
0,01	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02
0,03	0,26	0,08	0,28	0,09	0,19	0,21
0,01	0,15	0,02	0,19	0,03	0,15	0,18
0,03	0,10	0,06	0,09	0,07	0,07	0,08
0,05	0,15	0,07	0,13	0,07	0,06	0,07
0,07	0,40	0,04	0,38	0,05	0,32	0,38
0,07	0,06	0,01	0,11	0,01	0,10	0,12
0,09	0,13	0,02	0,08	0,02	0,06	0,07

Lo studio di W. Cichy et Al. [24] citato indica i seguenti valori percentuali per le ceneri: pesco 2,0%, pero 3,8%, melo 1,9%, nocciolo 2,5%, susino 1,5%. Nello studio, già citato, di Di Giacinto [27] viene riportato per il nocciolo ceneri% 6,57 e per l'olivo ceneri% 5,01.

Nella tabella VI sono riportati i valori percentuali medi di azoto, idrogeno e Carbonio rilevati per ciascuna specie di frutticole esaminata. Nella stessa tabella sono anche indicate le relative deviazioni standard.

Il rapporto tra carbonio percentuale e azoto percentuale, ben superiore a 30 conferma il vantaggio di utilizzare questo tipo di biomasse ligno-cellulosiche di essere impiegate in impianti di produzione del calore come biocombustibili solidi.

Confronti con bibliografia sono possibili per il nocciolo con lo studio di D. Monarca D. et al. [25] che indica C% 47,78 H% 5,61 N% 0,35 rispettivamente. Nello studio presentato da Bilandzija N. et al [26], sono invece indicate le seguenti composizioni percentuali: C% 46,46 H% 6,57 N% 0,78.

Un altro dato a disposizione, ancora per il nocciolo, viene dallo studio di Di Giacinto [27] che riporta C% 48,7 H% 6,17 N% 1,09.

Per l'olivo M. Borja Velázquez et Al. [29] riportano i seguenti valori: C% 37,97 H% 6,91 N% 0,55.

Lo studio di W. Cichy et Al. [24] citato indica i seguenti valori percentuali: pesco C% 51,1 H% 6,3 N% 0,9; pero C% 49,0 H% 6,3 N% 0,8; melo C% 48,6 H% 6,2 N% 0,5; nocciolo C% 49,8 H% 6,4 N% 0,8; susino C% 49,5 H% 6,3 N% 0,6.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella VI. Analisi elementare delle biomasse ligno-cellulosiche da frutticoltura campionate.

Nome Campione	%N Media	%C Media	%H Media	Dev.Std %N	Dev.Std %C	Dev.Std %H
Pero	0,37	42,87	6,10	0,16	0,79	0,14
Loto	0,39	42,87	6,10	0,03	0,62	0,05
Susino	0,03	41,07	6,34	0,01	0,66	0,23
Pesco	0,23	42,57	6,05	0,04	0,61	0,09
Nocciolo	0,16	43,83	6,14	0,03	0,83	0,10
Olivo	0,19	42,47	6,32	0,02	1,13	0,42
Vite	0,05	40,67	5,34	0,01	0,05	0,07
Melo	0,22	43,93	5,85	0,01	0,33	0,02

Infine, nella Tabella VII sono riportati i risultati delle analisi sui campioni di biomasse ligno-cellulosiche sottoposti al processo di caratterizzazione.

Tabella VII. Analisi preliminare dei campioni di biomassa residuale ligno-cellulosica da frutticoltura dopo il procedimento di caratterizzazione.

SPECIE	**% EMICELLULOSA**	**% CELLULOSA**	**%ACETILI**	**%HMF**	**%FURFURALI**	**%LIGNINA**	**%PECTINE**	**%CENERI**	**TOTALE**	**% NON IDENTIFICATI**
Olivo	16,45	34,60	2,20	0,00	4,78	19,90	0,00	1,86	79,80	20,20
Susino	14,98	35,55	2,30	0,00	1,01	28,24	0,00	2,05	84,12	15,88
Pesco	16,25	36,73	2,52	0,00	0,00	24,26	0,00	2,60	82,36	17,64
Pero	12,70	38,38	1,82	0,00	0,00	23,31	0,00	2,81	79,02	20,98
Nocciolo	16,78	39,88	3,09	0,00	1,21	22,98	0,00	0,96	84,90	15,10
Melo	15,52	40,00	2,36	0,00	0,00	23,12	0,00	2,03	83,03	16,97
Loto	12,93	40,33	2,33	0,00	0,00	22,93	0,00	2,04	80,58	19,42
Vite	13,70	40,90	2,51	0,00	0,00	25,31	0,00	3,23	85,65	14,35

Vi sono scarse indicazioni bibliografiche di riferimento. Tra queste è possibile un confronto con il lavoro di H. Senol [30] che riporta i seguenti valori percentuali per il nocciolo: Emicellulosa 33,20%, Cellulosa 47,78% e lignina 18,07%.

Un altro riferimento è dato dal lavoro di A. Mamanì et Al. [31], che si riferisce a residui di olivo e dove dono indicati i seguenti valori percentuali: Emicellulosa 17,26%, Cellulosa 31,88% ,lignina 9,26%, ceneri 3,29%.

Occorre tenere in considerazione nel paragone che si tratta di residui ligno-cellulosici provenienti da zone geografiche differenti. Inoltre la procedura di pretrattamento riferita differisce da quella utilizzata in questo studio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Dalla caratterizzazione emerge per tutte le biomasse una percentuale di lignina maggiore del 20% (22,93 – 28,24%), tranne che nel caso dell'olivo (19,90%). Come riportato da Yuan et al. [32], una percentuale di lignina superiore al 20% inibisce fortemente le rese del processo di idrolisi enzimatica necessario per trasformare la cellulosa ottenuta dopo il processo di Steam Explosion in monomeri di glucosio fermentabili rendendolo estremamente inefficiente. Per questa recalcitranza intrinseca di queste biomasse, sembrerebbero tutte più adatte ad un'applicazione rivolta verso la valorizzazione termica.

3. Conclusioni

In questo lavoro sono state esaminate le potenzialità di produzione energetica da biomassa proveniente dai residui ligno-cellulosici della frutticoltura italiana. In considerazione della composizione chimica attesa di questo tipo di residui si è ipotizzato il loro uso energetico sotto forma di combustibile solido (cippato, pellet, bricchette), prodotto tramite raccolta automatizzata dei residui, stoccaggio e trattamento meccanico. Sono state esaminate le principali colture frutticole italiane e per ciascuna specie sono state indicate le stime, provenienti da differenti studi di settore esaminati, sui quantitativi annui di residui ligno-cellulosici potenzialmente disponibili in ambito nazionale, provenienti da potature e da dismissione degli impianti produttivi a fine ciclo. La consistenza e la robustezza delle stime descritte è stata analizzata, anche in relazione alle metodologie utilizzate e ai periodi di campionamento dei differenti studi esaminati.

Utilizzando opportunamente alcuni dei dati relativi ai quantitativi di residui ligno-cellulosici annui potenzialmente a disposizione per le varie specie di colture fruttifere considerate è stato stimato il contributo di produzione energetica che potrebbe essere derivato dall'uso di queste biomasse, che appare non trascurabile, in particolare se raffrontato al quantitativo di energia elettrica prodotta attualmente da fonti rinnovabili in Italia.

I parametri fisici, chimici ed energetici determinati per i campioni di biomassa ligno-cellulosica da frutticoltura esaminati sono in generale accordo con altri dati reperiti in bibliografia. I dati esposti possono dunque essere considerati un utile contributo alla conoscenza ed alla ricerca nel settore. Tuttavia deve essere evidenziato che vi sono ampie variazioni di questi a seconda della localizzazione geografica, del tipo di impianto produttivo, del periodo di campionamento e di questo si deve tenere opportunamente conto per la stima dell'energia potenzialmente prodotta.

L'analisi dei risultati della caratterizzazione dei residui ligno-cellulosici da frutticultura esaminati consente inoltre di confermare alcuni concetti relativamente all'uso possibile di questo tipo di biomasse per produzione energetica.

Il rapporto favorevole e superiore a 30 della percentuale in peso di carbonio rispetto alla percentuale in peso dell'azoto e la percentuale in peso di lignina maggiore del 20% rilevati indicano una preferenza all'uso dei residui ligno-cellulosiche da frutticultura come biocarburante solido, sotto forma di cippato o pellet.

Il potere calorifico stimato, che quasi sempre supera la soglia di riferimento per il cippato, pari a 16 MJ/kg, indica la possibilità di utilizzare questo tipo di biocombustibile solido in impianti di produzione di calore o calore/energia elettrica, tenendo però adeguatamente conto della non trascurabile

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

produzione di ceneri di combustione che spesso supera il valore critico per il cippato, indicato nel 3% in peso, ceneri che devono essere adeguatamente rimosse ed asportate.

Bibliografia

[1] https://www.euractiv.com/wp-content/uploads/sites/2/2022/01/draft-CDA-31-12-2021.pdf
[2] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher, Andreas Wiese (ed): Renewable energy. Technology, economics and environment, Springer, Berlin/Heidelberg 2007, ISBN 978-3-540-70947-3.
[3] R. Gelleti, R. Jodice, G.Mauro, D. Migliardi, D. Picco, M. Pin, E. Tomasinsig, L. Tommasoni, D. Chinese, B. Monaco, G. Nardin, P. Simeoni, Energia dalle biomasse. Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali, AREA Science Park, 2006.
[4] M, Fiala, Energia da biomasse agricole – Produzione e utilizzo, Maggioli, 2012.
[5] C. Fideghelli, La frutticultura italiana alla vigilia del terzo decennio degli anni 2000 , I Tempi della Terra, n. 9, pp. 22-29, 2021.
[6] Decreto legislativo, 03/04/2006 n° 152, G.U. 14/04/2006
[7] LEGGE 13 luglio 1966, n. 615 Provvedimenti contro l'inquinamento atmosferico. G.U. n.201 del 13-08-1966.
[8] F. Militano, Incendi, emergenza e tutela dell'ambiente, Ali Ribelli Edizioni, 2022.
[9] G. Vannacci, Patologia Vegetale, Edises 2021.
[10] S. Amicabile, Manuale di agricoltura. HOEPLI 2016.
[11] Biomasse ed energia – Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei biocombustibili. ENAMA, 2011.
[12] G. De Feo, S. De Gisi, M. Galasso, Rifiuti solidi. Progettazione e gestione di impianti per il trattamento e lo smaltimento, Flaccovio 2012
[13] L. Bruzzi, S. Verità, Biocombustibili ed energia pulita, CLUEB 2013.
[14] D. Yuea, F. Youa, S. W. Snyderba , Biomass-to-bioenergy and biofuel supply chain optimization: Overview, key issues and challenges, Computers & Chemical Engineering, Volume 66, pp. 36-56, 2014.
[15] Annuario Statistico Italiano, ISTAT, 2021.
[16] I rifiuti nel comparto agroalimentare - Studio di settore, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente ANPA e Osservatorio Nazionale sui Rifiuti ONR, 2001.
[17] Documento propedeutico alla redazione del piano nazionale biocarburanti e biomasse agroforestali per usi energetici , Centro di Ricerca sulle Biomasse CRB, 2007.
[18] C. Di Blasi et Al. , A study on the production of agricultural residues in Italy, Biomass and Bioenergy, Vol. 12, N.5, pp. 321-331, 1992.
[19] I traguardi della bioenergia in Italia. Elementi chiave per gli obiettivi al 2020. Rapporto 2008 ITABIA.
[20] M. Zivkovic et al. Aspect of Using Potential Energy Production of Biomass after Pruning Fruit and Grape Plantations in the Republic of Serbia, Agriculture & Forestry, Vol. 59. Issue 1: 167-182, 2013,
[21] https://www.arera.it/it/docs/08/003-08een.htm

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[22] https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche
[23] G. Cavalaglio, M. Gelosia, T. Giannoni, R. Barros Lovate Temporim, A. Nicolini, F. Cotana, A. Bertini, Acid-catalyzed steam explosion for high enzymatic saccharification and low inhibitor release from lignocellulosic cardoon stalks, Biochemical Engineering Journal, 174, 2021.
[24] Cichy et al. Biomass from fruit orchard, Bioresources 13 (3) pp 6458-6470.
[25] D. Monarca, M. Cecchini, M. Guerrieri and A. Colantoni, Conventional and alternative use of biomasses kderived by hazelnut cultivation and processing, Acta Horticola, vol. 845, pp. 627-634, 2009.
[26] N. Bilandzija, N. Voca, T. Kricka, A. Matin, V. Jurisic, Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia, Spanish Journal of Agricoltural Reasearch, 10 (2), pp. 292-298, 2012.
[27] S. Di Giacinto, Modello di campionamento per le biomasse residuali: il caso del nocciolo nella provincia di Viterbo. Stima dei quantitativi di potature, caratterizzazione chimica, fisica ed energetica della biomassa e prospettive di utilizzo, Tesi di Dottorato, Università della Tuscia, 2014.
[28] I. Zambon, F. Colosimo, D. Monarca, M. Cecchini. Francesco Gallucci, A. R. Proto, A. Colantoni, An Innovative Agro-Forestry Supply Chain for Residual Biomass: Physicochemical Characterization of Biochar from Olive and Hazelnut Pellets, Energies, 9, 526, 2016.
[29] B. Velázquez-Martí, I. López-Cortés, D. Salazar- Hernández and Á. J. Callejón-Ferre, Modeling the Calorific Value of Biomass from Fruit Trees Using Elemental Analysis Data, Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy, 2017.
[30] H. Senol, Biogas potential of hazelnut shells and hazelnut wastes in Giresun City, Biotechnology Reports, 24, 2019.
[31] A. Mamanì et Al., Valorization of olive tree pruning. Application for energy storage and biofuel production, Industrial Crops & Products, 173, 2021.
[32] Y. Yuan, B. Jiang, H. Chen, W. Wu, S. Wu, Y. Jin, and H. Xiao, Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis, Biotechnology for Biofuels, 14, 205, 2021.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Green hydrogen for RES energy storage and natural gas system decarbonization: a case study in central-southern Italy

Fausto Arpino [1], Carmelo Fallone [2], Michele Bertone [1], Christian Canale [1], Gino Cortellessa [1], Marco Dell'Isola [1], Giorgio Grossi [1], Giorgio Ficco [1] and Linda Moretti [1,*]

[1] Department of Civil and Mechanical Engineering, University of Cassino and South Lazio, Cassino, Italy

[2] Società Gasdotti Italia S.p.A., Via dei Salci, 25, Frosinone, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: linda.moretti@unicas.it

Abstract: The increase of the electricity production from non-programmable RESs generates criticalities in the balance between the energy supply and demand, due to the intermittency and uncertainty of these energy sources. To tackle this problem, significant storage capacities of the electricity produced in excess of demand will be required in the coming years. These capacities could be ensured by exploiting the NG (Natural Gas) transport, distribution and storage infrastructures through the implementation of PtG (Power to Gas) technology. This technology can allow, on the one hand, the energy storage mitigating the asymmetries between renewable electricity production and energy demand and, on the other, the decarbonization of the NG infrastructure by the hydrogen injection into the gas grid. The objective of this work is to analyze the actual feasibility of distributed production systems of green hydrogen and its injection into the national NG transport network. In particular, a mathematical model has been developed to assess the dynamic operation of a PtH_2 integrated system for the production of hydrogen using photovoltaic-powered electrolyser and its injection into the NG transport network downstream of an RMS (Regulating and Metering Station) present in central-southern Italy. The model developed is based on the hourly radiation data and on the real NG consumptions of a section of the transport network. A scenario of increasing photovoltaic production is considered and the effects on NG infrastructure has been evaluated. The results show that the highest fractions of hydrogen in the NG mixture can be fed into the grid during the summer period, when the consumption of NG is lower and the production of electricity from photovoltaics is maximum, confirming the effectiveness of the PtG technology for the accumulation of excess electricity produced by distributed photovoltaic systems.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_020_pp_196

Keywords: decarbonization, green hydrogen, Power to Hydrogen (PtH_2), natural gas transportation network

1. Introduction

Renewable energy sources (RESs) are the keystone of the energy policy of European Union to replace fossil fuel and consequently, to fulfil the target of a carbon neutral economy by 2050. Most forecast expect an almost complete decarbonization of power generation, up to 95% compared to today. Due to the decrease in costs, non-programmable RESs (i.e., wind and photovoltaic) is expected to be the most promising renewable power sources. They will constitute between 30% and 60% of total electricity production. In addition to the increase of renewable energy power generation, a rise of electrification of energy end-use sectors is foreseen. Projections see rates increasing from currently 20% to 22% up to 30% of total energy demand in Poland, 50% in France and 65% in Spain by 2050 [1].

However, both these two trends do not have a zero impact on the energy system. The increase of power generation from RESs and electrification pose serious challenges to the stability of the energy system because the supply and demand of power are intermittent and random. On the supply side, non-programable RESs exhibit strong short-and long-term variations. On the demand side, hourly, daily, weekly, monthly, and seasonal variations are also significant, especially in the building sector. Therefore, the integration of a significant share of RESs will require storing large energy volumes over weeks, months and seasons, to match intermittent renewable supply with the pattern of energy consumption. Moreover, the direct electrification is not a viable option for all end-use sectors yet. Especially, owing to technological, logistical and economic barriers, it is particularly challenging for the so-called *Harder-to-Abate* Sectors (e.g., heavy transport, building heating, high-grade industry heat).

In this context, green hydrogen could play a crucial role as an energy vector in the transition to RESs by providing a mechanism to flexibly transfer energy across sectors, time and place. Hydrogen, in fact, provides a number of key benefits for the whole energy system, due to its intrinsic characteristics, first of all its versatility and integrability with other clean technologies for production and consumption of energy. Specifically, hydrogen offers the possibility of decarbonizing the final consumption sectors on a large scale: it can use existing assets and infrastructure, such as the natural gas (NG) transportation and distribution network, existing heaters, industrial assets, and fuel retail networks to decarbonize the NG grid, heavy transport, and high-grade heat. Green hydrogen, as well as carbon capture and storage (CCS) technologies, allows to reduce the carbon footprint of industry feedstock, especially in the production of steel and chemicals. With the long-term cost of renewables expected to decline, it could become a cost-effective feedstock to produce ammonia, methanol and other chemicals. Furthermore, since hydrogen is already an essential component of these products, the integration of green hydrogen requires limited modification, based only on changing the process for obtaining hydrogen from fossil fuels reforming or gasification to water electrolysis [2]. In such manner, hydrogen can accelerate the decarbonization process in the sectors for which electrification is not an efficient solution, the so-called Harder-to-Abate sectors, such as heavy industry, long-distance and heavy goods

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

transport, non-electrified rail transport and residential sector, taking advantage of flexibility and competitiveness of hydrogen transport and storage to meet the challenges of electrification. Hydrogen can also ensure the storage capacities required to guarantee the stability and flexibility of the electrical energy system by the application of Power to Gas (PtG) technologies. In fact, the hydrogen produced from surplus renewable energy can be injected into the NG pipeline system, providing balancing and regulation services to the electricity grid, as well as supporting the sector coupling between the NG and electricity sector. Exploiting the NG infrastructure, hydrogen allow to connect production and demand sites poles of production and demand across long distances, thus reducing supply costs and guaranteeing at the same time security and continuity of supplies through the development of an international market. Finally, it is expected that the production costs of hydrogen will decrease reaching competitive cost levels compared to other alternatives, in the next years, due to the development of green hydrogen production technologies and the increasing availability of renewable electricity.

Despite the government push driving the global uptake of renewable energy and green hydrogen, multiple barriers are challenging the scale-up of electrolysers and hydrogen transport infrastructure. Barriers include the high costs, sustainability issues, unclear future and lack of demand, unfit power system structures, and lack of technical and commercial standards [3,4].

The purpose of this paper is to assess the feasibility of Power to Hydrogen (PtH_2) integrated energy systems distributed next to the Regulation and Measurement Stations (RMSs) distributed on the national NG network, and to propose such a strategy as a possible step towards the NG system decarbonization. Specifically, in the present work, a mathematical model has been developed to simulate the hourly operation of an integrated multi-gas system for green hydrogen production via photovoltaic-powered electrolysers and its injection downstream of a RMS. The model relies on hourly radiation data and on natural gas consumptions of a NG transportation network section installed in central-southern Italy. A scenario of increasing photovoltaic production is considered and the effects on natural gas infrastructure are evaluated.

2. PtH_2 integrated energy system description

The PtH_2 plant proposed here consists of three sections: i) the electricity production unit based on a photovoltaic system, ii) the hydrogen generation unit based on the proton exchange membrane (PEM) electrolysis, iii) the hydrogen storage unit based on the pressure vessels technology. The schematization of the proposed PtH_2 integrated energy system is shown in Figure 1.

The electricity produced by the photovoltaic system is entirely absorbed by the electrolysis unit for the production of hydrogen, which is then stored in high-pressure cylinders. According to the NG demand of transportation network, the stored hydrogen is then sent to the RMS, where it is mixed with NG and injected into the NG transportation grid.

The hydrogen storage unit has been necessarily introduced to decouple the operation of the electrolysis unit, depending on the random electricity generation by the PV system, from the operation of NG transportation grid regulated by the end-users' consumption. In this way, a fixed and known that

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

the hydrogen percentage is ensured in the H_2-NG mixture.

The technical specifications of the components of PtH_2 integrated energy system are summarized in Table 1.

Figure 1. Schematization of the PtH_2 integrated energy system.

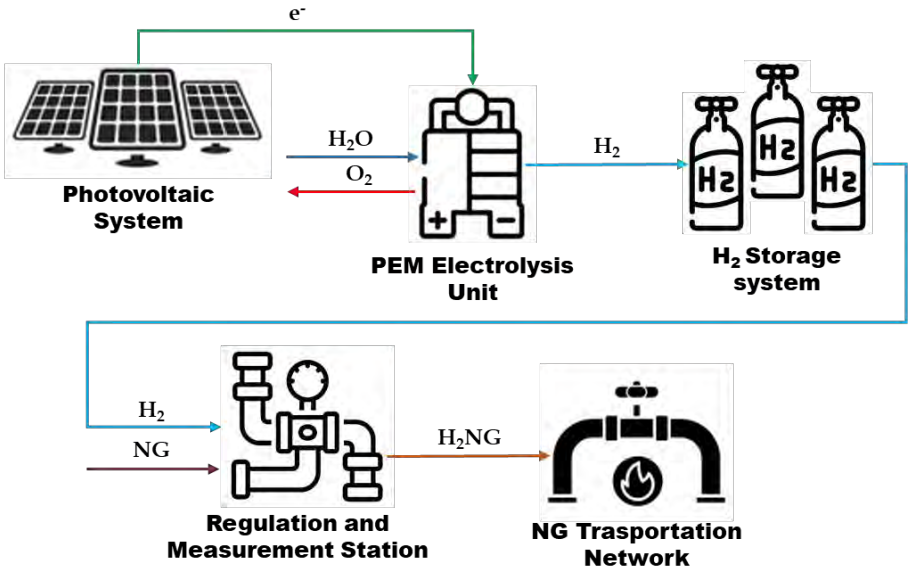


Table 1. Technical specifications of the components of PtH_2 integrated energy system.

PV system	
Model	Trina Solar Vertex Backsheet Module TSM-DE21
Panel type	Monocrystalline
P_{RPV} (W)	670
k (1/°C)	-0.0034
NOCT (°C)	43
f_{PV}	0.9
Single panel footprint (m^2)	3.2
RMS's roof area (m^2)	300
Number of panels	93
Nominal capacity (kW)	62.31
System footprint (m^2)	297.6
PEM Electrolysis Unit	
Nominal capacity of single power module (kW)	2
Efficiency (%)	84.5
Minimum load (%)	5
Single power module footprint (m^2/kW)	1
Number of power modules	23
Nominal capacity (kW)	46.0
Footprint (m^2)	46.0
H_2 Storage Unit	
$SOC_{HST,min}$	0
$SOC_{HST,max}$	0.9
Footprint per unit of H_2 stored volume (m_2/m^3_{H2})	0.5
Nominal capacity (m^3)	3
Footprint (m^2)	1.5

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

NG Transportation Network	
Operating pressure (bar)	24
NG Temperature (°C)	12
δMAX (%)	10

3. PtH_2 integrated energy system model

The developed mathematical model is based on the following assumptions: i) the efficiency of subsystems that made up the PtH_2 integrated energy system is constant; ii) the start-up, shutdown and operating times in off-design conditions are not considered; iii) breakdowns, and therefore, replacements of the equipment are not expected during the useful life of the system.

3.1. Photovoltaic system

The hourly electricity generation from the PV system has been modelled as a function of the actual solar radiation per unit surface G (W/m2), using the following relation (1) [5,6]:

$$P_{PV}(t) = n_{PV} \cdot P_{RPV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{G}{G_{STC}}\right) \cdot [1 + k(T - T_{STC})] \quad (1)$$

where:

- $P_{PV}(t)$ is the power generated by the PV system at time t, (W);
- n_{PV} is the number of PV panels in the PV array;
- P_{RPV} is the power generated by the single PV panel at standard test conditions (STC), (W);
- f_{PV} is the attenuation coefficient;
- G_{STC} is the solar radiation per unit surface at standard test conditions, (W/m^2);
- k is the power temperature coefficient, (1/°C);
- T_{STC} is the PV panel temperature at standard test conditions, (°C);
- T is the actual temperature of the PV panel at time t, (°C), calculated as a function of the ambient temperature T_a (°C) and the actual solar radiation G as follows [7–10]:

$$T = T_a + \frac{NOCT - T_{a,NOCT}}{G_{NOCT}} \cdot G \quad (2)$$

where:

- NOCT is the cell temperature at nominal operating conditions, (°C);
- $T_{a,NOCT}$ is the ambient temperature at nominal operating conditions, (°C);
- G_{NOCT} is the solar radiation at nominal operating conditions, (W/m^2).

The hourly data of the actual solar radiation G and the ambient temperature T_a have been obtained from the Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) database, freely accessible online [11]. PVGIS provides information about solar radiation and PV system performance for any location in Europe and Africa, as well as a large part of Asia and America, allowing to estimate the power produced by PV systems optimizing its parameters, including orientation (azimuth angle) and tilt angle of the solar panels, on the basis of the specific characteristics of the installation site. The tool's reliability has

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

been demonstrated in a considerable number of scientific papers [12–21], to which the interested reader is kindly referred for more information on the functionality of the tool and on the mathematical model that underlies it.

3.2. Electrolysis unit

As regards the electrolysis unit, the mass of hydrogen generated in the electrolysis process during a certain time interval, $m_{H_2,EL}$ (kg), has been calculated by the following formula:

$$m_{H_2,EL} = \frac{P_{PV} \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\tau \cdot \tau}{\alpha_{EL}} \quad (3)$$

where:

- $\Delta\tau$ is the temporal resolution, (h);
- τ is the efficiency of electrolyser;
- α_{EL} is the Higher Heating Value (HHV) of hydrogen, (kWh/kg).

The volume of hydrogen produced by the electrolyser, $V_{H_2,EL}$, has been evaluated as the ratio of the mass of product hydrogen to the density of hydrogen, as shown below:

$$V_{H_2,EL} = \frac{m_{H_2,EL}}{\rho} \quad (4)$$

where:

- ρ is the density of hydrogen, calculated through the following formula, (kg/m^3):

$$\rho = \frac{M_{mol,H_2} \cdot p}{Z \cdot R \cdot T} \quad (5)$$

where:

- M_{mol,H_2} is the molar mass of hydrogen, (kg/mol);
- p is the hydrogen supply pressure, (Pa);
- Z is the compressibility factor of hydrogen, evaluated at the operating conditions in accordance with UNI EN ISO 12213-2:2010 [22];
- R is the universal gas constant, (J·mol^{-1}·K^{-1});
- T is the hydrogen supply temperature, (°C).

3.3. Storage unit

The stored volume of hydrogen at time t, $V_{H2,st}(t)$, has been calculated as follows:

$$V_{H_2,st}(t) = V_{H_2,st}(t-1) + \left[V_{H_2,EL}(t) - V_{H_2,imm}(t)\right] \quad (6)$$

where:

- $V_{H_2,st}(t-1)$ is hydrogen volume stored at time $(t-1)$, (m^3);
- $V_{H_2,EL}(t)$ is the volume of hydrogen produced by the electrolyser at time t, (m^3);
- $V_{H_2,imm}(t)$ is the volume of hydrogen injected into the NG network at the instant of time t, (m^3), evaluated in accordance with the following formula:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

$$V_{H_2,imm}(t) = \delta \cdot V_{NG}(t) \quad (7)$$

where:

- δ is the hydrogen fraction injected into the NG network;
- $V_{NG}(t)$ is the NG volume circulating in the NG network at the instant of time t, depending on the end-users consumptions, (m^3).

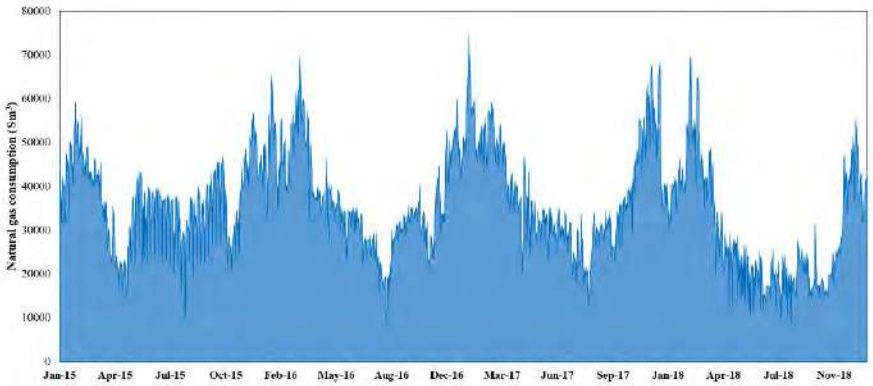
Finally, following Zhou et al. [5], a State of Charge for the hydrogen storage tank (SOC_{HST}) has been defined as the ratio of the hydrogen volume present in the tank at the instant of time t to the nominal storage capacity $V_{H_2,st}(t)$ (m^3):

$$SOC_{HST}(t) = \frac{V_{H_2,st}(t)}{V_{H_2,rated}} \quad (8)$$

3.4. Natural gas network consumptions

As mentioned above, the volume of hydrogen injected into the NG network relies on the consumptions of the NG grid. In this case, the data relating to the daily NG consumptions of a RMS located in central-south of Italy has been employed. In particular, the data has been made available by the Transportation System Operator of the specific section of network supplied by the RMS for the time period 2015 to 2018 (see Figure 2).

Figure 2. Daily NG consumption of a specific section of the transportation network located in central-south Italy.



4. Case study

The PtH_2 integrated energy system here proposed is applied to an RMS located in central-southern Italy (depicted in Figure 3), with a downstream natural gas pressure of 24 bar. Figure 4 shows the layout of the CMS under study: PV panels can be installed on the cabin roof (highlighted in orange color), with an available surface area of 300 m^2, while other equipment (i.e., electrolysers and hydrogen storage tanks) can be positioned within the enclosure surrounding the station (borders highlighted in yellow). According to the available area and the area and spacing of each component (Table 1), the number constraints of PV panel is 93.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Overview of the RMS.



Figure 4. Layout of the RMS, with the surface area available for PV panels installation highlighted in orange colour.



The first step of the analysis was the sizing of the energy system, with the optimal selection of installed capacity for each equipment. System was sized with reference to summer operating conditions, studying the hourly hydrogen production and storage in the day with minimum natural gas consumption from the available dataset (years 2015-2018, section 3.4): this condition occurred on August 15th, 2018 (hereinafter referred to as "Day 1"), and it represents the most critical condition due to the lowest natural gas demand and the high hydrogen production (because of the high solar irradiance). After sizing the system, in order to have a more comprehensive view of its operating conditions, the analysis was extended to the days corresponding to the median (October 6th, 2017) and to the maximum (January 10th, 2017) NG consumption, hereinafter referred to as "Day 2" and "Day 3", respectively. As last step, a scenario of increased photovoltaic production was also evaluated, by increasing the surface area available for PV panels installation from 300 m^2 to 600 m^2 and 900 m^2: for such purpose, being the Control and Measuring Station located in the countryside, one possibility could be to use the space outside the enclosure (in yellow colour in Figure 4).

5. Results and discussion

The optimal configuration for the integrated energy system, determined by reference to Day 1, consists of 42 kW electrolysers and 3 m^3 storage tank. The hourly hydrogen production is shown in Figure 5 together with the natural gas demand (box in the upper right corner). The matching between hydrogen production and natural gas consumption allows a continuous injection in the NG network with a H_2 fraction in the blend of 0.8%; Figure 6 shows the hourly trend for the hydrogen buffer: after an initial filling of the tank, the level in the storage drops in the second part of the day due to the decrease in the production without a corresponding reduction of natural gas demand.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Hourly hydrogen production (blue line) and natural gas demand (orange line), for Day 1.

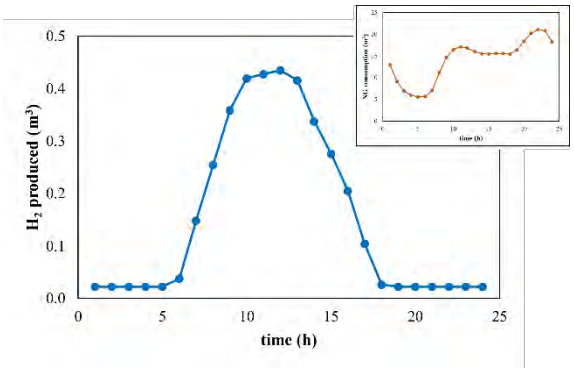
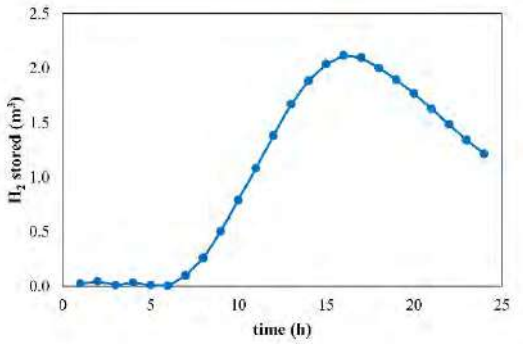
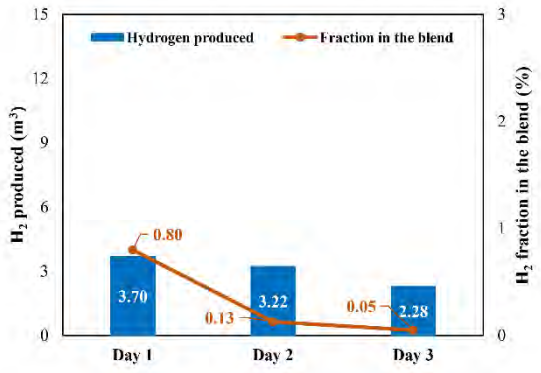


Figure 6. Hourly hydrogen storage for Day 1.



By extending the analysis to Days 2 and 3, the trends shown in Figure 7 are obtained: higher hydrogen production and fraction values can be achieved during summer operations (Day 1), when the lowest natural gas consumption and the highest solar production occur; however, the hydrogen fraction is well below the upper limit of 10%, with a negligible concentration in winter operations (Day 3).

Figure 7. Total hydrogen produced, with its fraction in the blend, for the three days under investigation.



By doubling and tripling the space intended for PV panels installation (Figure 8 and Figure 9, respectively), more relevant hydrogen fractions can be achieved in the supplied gas, always complying with the gas quality supply standards (upper limit of 10% of hydrogen in the blend) and never falling below the 0.1%.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 8. Total hydrogen produced and fraction in the blend, in case of an available surface area for PV installation of 600 m^2.

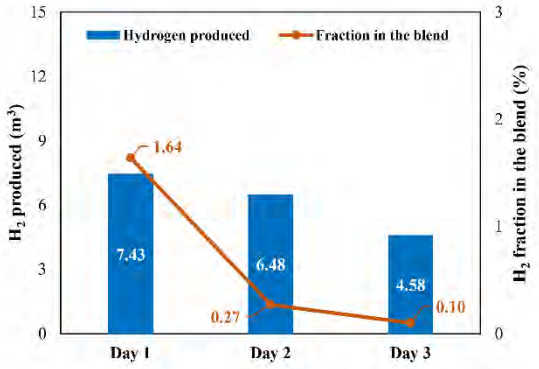
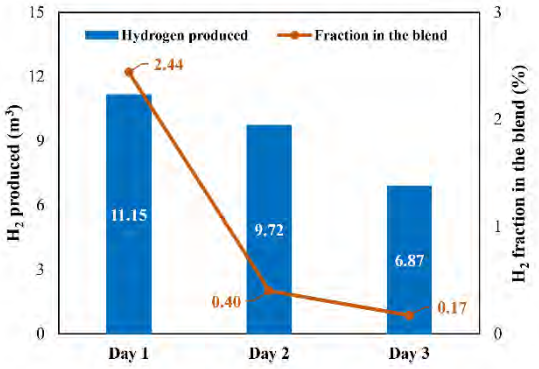


Figure 9. Total hydrogen produced and fraction in the blend, in case of an available surface area for PV installation of 900 m^2.



In Table 2 below, a summary of installed capacity is provided for the investigated scenarios together with a first estimate of the associated costs.

Table 2. Installed capacity and total costs for the scenarios under investigation.

	Surface area available (m^2)		
Results	300	600	900
n_{PV}	93	187	281
EL installed power (kW)	42	84	124
HST capacity (m^3)	3	5	8
Total costs (million EUR)	0.460	0.910	1.359

6. Conclusions

In the present study, a mathematical model has been developed to analyze the hourly operation of an integrated multi-gas system for green hydrogen production via photovoltaic-powered electrolysers and its coupling with natural gas network for line-pack storage. The PtH_2 integrated energy system was applied to an RMS located in central-southern Italy.

Results show that higher fractions of hydrogen in the blend can be achieved during summer operations when the lowest natural gas consumption and the highest solar production occur, while always complying with the gas quality supply standards (upper limit of 10% of hydrogen in the blend). Hydrogen levels are very low in winter operations, being around 0.1% even when increasing PV production.

The analyses carried out in this study are the starting point for a broader research activity currently ongoing aimed at assessing the feasibility of hydrogen production systems distributed next to the RMS scattered on the national network and proposing such a strategy as a possible step towards the natural gas system decarbonization.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

References

1. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. *Hydrogen Roadmap Europe: A Sustainable Pathway for the European Energy Transition.*; Publications Office: LU, 2016;
2. IRENA *Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making*; International Renewable Energy Agency, 2022;
3. IRENA *Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making*; International Renewable Energy Agency, 2021;
4. IRENA *Green Hydrogen: A Guide to Policy Making*; International Renewable Energy Agency, 2020;
5. Zhou, J.; Wu, Y.; Zhong, Z.; Xu, C.; Ke, Y.; Gao, J. Modeling and Configuration Optimization of the Natural Gas-Wind-Photovoltaic-Hydrogen Integrated Energy System: A Novel Deviation Satisfaction Strategy. *Energy Convers. Manag.* **2021**, *243*, 114340, doi:10.1016/j.enconman.2021.114340.
6. Liu, Z.; Chen, Y.; Zhuo, R.; Jia, H. Energy Storage Capacity Optimization for Autonomy Microgrid Considering CHP and EV Scheduling. *Appl. Energy* **2018**, *210*, 1113–1125, doi:10.1016/j.apenergy.2017.07.002.
7. Diaf, S.; Notton, G.; Belhamel, M.; Haddadi, M.; Louche, A. Design and Techno-Economical Optimization for Hybrid PV/Wind System under Various Meteorological Conditions. *Appl. Energy* **2008**, *85*, 968–987, doi:10.1016/j.apenergy.2008.02.012.
8. Kaabeche, A.; Belhamel, M.; Ibtiouen, R. Sizing Optimization of Grid-Independent Hybrid Photovoltaic/Wind Power Generation System. *Energy* **2011**, *36*, 1214–1222, doi:10.1016/j.energy.2010.11.024.
9. Belmili, H.; Haddadi, M.; Bacha, S.; Almi, M.F.; Bendib, B. Sizing Stand-Alone Photovoltaic–Wind Hybrid System: Techno-Economic Analysis and Optimization. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *30*, 821–832, doi:10.1016/j.rser.2013.11.011.
10. Smaoui, M.; Abdelkafi, A.; Krichen, L. Optimal Sizing of Stand-Alone Photovoltaic/Wind/Hydrogen Hybrid System Supplying a Desalination Unit. *Sol. Energy* **2015**, *120*, 263–276, doi:10.1016/j.solener.2015.07.032.
11. Available online at: *https://Ec.Europa.Eu/Jrc/En/PVGIS/Tools/Hourly-Radiation*;
12. González-Peña, D.; García-Ruiz, I.; Díez-Mediavilla, M.; Dieste-Velasco, M.I.; Alonso-Tristán, C. Photovoltaic Prediction Software: Evaluation with Real Data from Northern Spain. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 5025, doi:10.3390/app11115025.
13. Šúri, M.; Huld, T.A.; Dunlop, E.D. PV-GIS: A Web-Based Solar Radiation Database for the Calculation of PV Potential in Europe. *Int. J. Sustain. Energy* **2005**, *24*, 55–67, doi:10.1080/14786450512331329556.
14. Šúri, M.; Huld, T.A.; Dunlop, E.D.; Ossenbrink, H.A. Potential of Solar Electricity Generation in the European Union Member States and Candidate Countries. *Sol. Energy* **2007**, *81*, 1295–1305, doi:10.1016/j.solener.2006.12.007.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

15. Suri, M.; Huld, T.; Cebecauer, T.; Dunlop, E.D. Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS Website. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2008**, *1*, 34–41, doi:10.1109/JSTARS.2008.2001431.
16. Huld, T.; Šúri, M.; Dunlop, E.D. Geographical Variation of the Conversion Efficiency of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules in Europe. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* **2008**, *16*, 595–607, doi:10.1002/pip.846.
17. Huld, T.; Müller, R.; Gambardella, A. A New Solar Radiation Database for Estimating PV Performance in Europe and Africa. *Sol. Energy* **2012**, *86*, 1803–1815, doi:10.1016/j.solener.2012.03.006.
18. Djurdjevic, D.Z. Perspectives and Assessments of Solar PV Power Engineering in the Republic of Serbia. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 2431–2446, doi:10.1016/j.rser.2011.02.025.
19. Hofierka, J.; Kaňuk, J. Assessment of Photovoltaic Potential in Urban Areas Using Open-Source Solar Radiation Tools. *Renew. Energy* **2009**, *34*, 2206–2214, doi:10.1016/j.renene.2009.02.021.
20. Conceição, R.; Silva, H.G.; Fialho, L.; Lopes, F.M.; Collares-Pereira, M. PV System Design with the Effect of Soiling on the Optimum Tilt Angle. *Renew. Energy* **2019**, *133*, 787–796, doi:10.1016/j.renene.2018.10.080.
21. Ozdemir, S.; Sahin, G. Multi-Criteria Decision-Making in the Location Selection for a Solar PV Power Plant Using AHP. *Measurement* **2018**, *129*, 218–226, doi:10.1016/j.measurement.2018.07.020.
22. *UNI EN ISO 12213-2:2010 Natural Gas - Calculation of Compression Factor - Calculation Using Molar-Composition Analysis*;

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Insights into the effect of light pollution on mental health

Federica Cirimbilli [1,*], Giulia Menculini [1], Anastasia Grazia Chieppa [1], Pierfrancesco Maria Balducci [1,2], Luigi Attademo [3,4], Francesco Bernardini [5,4], Tiziana Sciarma [1], Patrizia Moretti [1] and Alfonso Tortorella [1]

[1] Department of Psychiatry, University of Perugia, Piazzale Lucio Severi 1, 06132, Perugia, Italy
[2] CSM Terni, Department of Mental Health, 05100 Terni, Italy
[3] SPDC Potenza, Department of Mental Health, ASP Basilicata, Italian National Health Service, 85100 Potenza, Italy
[4] Planetary Health Lab, Old Medical School, University of Edinburgh, Edinburgh EH8 9AG, UK
[5] SPDC Pordenone, Department of Mental Health, AsFO Friuli Occidentale, Italian National Health Service 33170 Pordenone, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: federica.cirimbilli@unipg.it

Abstract: The daily rhythms of plants, animals and humans have always been regulated by the light-dark cycle. Discovery and development of artificial light sources inevitably interfered with this physiological clock. Indeed, the presence of artificial light at night (ALAN) became an anthropogenic stressor, which is configured as a type of pollution called "light pollution". Light pollution has revealed its negative effects on humans, animals, and supporting ecosystems. A deeper understanding on how different sources of light pollution affects circadian physiology represents a major challenge in the field of environmental health. Indeed, ALAN modifies biological rhythms and may thus shift the onset of activities that are normally carried out during the daytime, such as food intake or social activities, also affecting the sleep-wake cycle. Furthermore, light pollution may have serious consequences on metabolic pathways, possibly disrupting pineal melatonin production with multiple adverse health effects. The suppression of melatonin at night is associated with the development of physical diseases, but can also impact human mental health, contributing to the development or exacerbation of psychiatric disorders in vulnerable individuals. After the literature search process was completed, 11 papers were included in the present review, critically summarize the effects of light pollution on human mental health and analyze possible pathophysiological pathway through which it could act.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_021_pp_208

Keywords: light pollution; urban environment; artificial light at night; mental health; melatonin; biological rhythms; circadian rhythms; psychiatric symptoms; psychopathology

1. Background

Today, most of the world population lives in cities (more than 50%) and it is expected that by 2050 this will rise further (up to about 70%), with cities reaching 500,000 inhabitants or more [1]. These data are relevant for human health, since living in the urban environment significantly increases the exposure to risk factors, e.g., pollution (e.g. air, noise, light pollution) for the development of medical illnesses [2]. Moreover, different sources of pollution contribute to the development of psychological distress, thus causing negative outcomes for mental health. In particular, mood and anxiety disorders are more common in urban centers and their incidence is increasing: for anxiety disorders, an increase of 21% has been recorded, while for mood disorders it has reached more than 39% [3-4]. Studies with different experimental designs have also confirmed a higher risk of schizophrenia for urban inhabitants [5-6-7].

There are epidemiological data showing a clear link between urban life and the risk of psychiatric disorders that mainly focus on risk factors and the demonstration of associations. The physiological mechanisms behind these observations have also been explored, in the attempt to identify putative biological links between the urban environment and mental health [8]. To this purpose, some researches documented the role of changes in immune and brain function and epigenetic changes. Indeed, advances in neuroimaging studies, functional magnetic resonance imaging techniques (fMRI), demonstrated how stressors in the urban environment can affect specific brain mechanisms [8]. In particular, urban life and social stress appeared to be associated with increased activation of the amygdala and the anterior perigenual cingulate cortex (pAcc), a brain region that may be involved in the development of schizophrenia [9]. Research is moving towards epigenetic regulation too, by comparing healthy control populations with people suffering from specific mental illness [10-11-12]. Moreover, animal models showed that epigenetic modifications are implicated in behavioral phenotypes related to mental diseases. It is easy to imagine the health effects of environmental pollution. This review aims to identify possible effects of light pollution on mental health, as well as current citizens' risk perception about light pollution. Indeed, the effects of light pollution on human health have been less documented than those caused by other pollutants. Our hypothesis is that artificial light can affect mental health by causing in human biorhythm alterations and metabolic changes.

1.1 The definition of light Pollution and its effects on human health

The term "light pollution" was first used in the 19th century, but one of the first attempts to describe and analyze this phenomenon was the association between stopping bird migration and artificial light

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

activity at night [13]. The focus so far has been on direct measurement and modelling of light pollution. Thanks to these acquisitions, the awareness of the problem of light pollution among scientists has increased considerably and as a result the number of available satellite images has increased and the New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness was born [14]. About 83% of the world's population lives in areas polluted by artificial light [15]. The highest intensity of the phenomenon occurs in urban centers, especially those with high population density. Artificial light at night (ALAN) is suspected to have negative effects on humans, animals, plants and the ecosystem balance. ALAN affects the health and well-being of urban residents, as demonstrated by the increasing number of studies on the effects of light pollution on human health [14].

The secretion of melatonin, a hormone associated with the control of the circadian rhythm, is regulated by the conditions of external illumination [16]. Indeed, the production of this hormone by the pineal gland (or epiphysis) is regulated by informations stimultating retinal photoreceptors that are sensitive to different wavelengths [17]. There is evidence of significant suppression of melatonin secretion after 2 hours of exposure to monochromatic light at 460 nm late in the evening [17-18]. Under the same conditions, with a wavelength of 550 nm, such effects were not observed. A strong inhibitory effect applies to short wavelengths and color temperature of about 6500 K; indeed, the use of light below 3000 K and reduction of blue spectral color is recommended [17]. Also improper spectral characteristics worsen skyglow. Particularly, 4000 K white LED is 2.5 times more polluting than low temperature lighting, assuming equal photopic flow and upward emission function [15-19].

Light pollution is a new topic, and in some countries there is still a lack of legislation regulating emissions. This can be shifted into wrong choices of infrastructures and lighting fixtures that are harmful to the environment and towards human health. Exposure to ALAN has been estimated to increase annually by 3–6% in past decades and continues to extend further in space, time, and intensity with more than 2% annual growth in radiance and extent [17]. A higher awareness of the risks that light pollution can determine in terms of psychophysical health would help implementing appropriate preventive behaviors.

Exposure to ALAN can have direct or indirect physiological effects on human health. Direct physiological effects involve the disruption of circadian rhythms, and in particular the release of the hormone melatonin, which regulates changes in physiological processes as a function of day length, including body mass, metabolic rate, hormone synthesis, and immunity [20]. ALAN may contribute to the development or worsening of obesity and metabolic disruptions. Obesity can result from changes in caloric intake and energy expenditure, but the time of feeding can also play a significant role [20]. Moreover, epidemiological data showed that ALAN correlates with a higher risk for developing breast cancer in women, prostate cancer in men, and pancreatic cancer in both sexes [21-22-23-24-25-26-27]. Although the mechanisms are still unclear, melatonin suppression is likely involved [19]. ALAN can also have indirect effects on other physiological processes. For this purpose, components of the immune system have circadian clocks and are thus probably vulnerable to the effects of ALAN. Depression of the immune system induced by external light pollution makes the human body more vulnerable to virus infections. Moreover, data from italian regions particularly exposed to external light pollution per

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

inhabitant set by studies on levels and light flux for light pollution [28], are linked to a higher number of COVID-19 cases [29]. Other indirect circadian effects of ALAN are associated with sleep deprivation, such as cardiovascular disease and endocrine disruption [20].

2. Methods

A systematically literature search in online databases (PubMed, Scopus) up to 15 March 2022, using different search terms linked to “mental health”, “human health” and “light pollution” was carried out. We included original research evaluating the relationship between light pollution and human mental health. As for outcomes, we focused on the effects of light pollution on mental health and psychiatric related disorders in different age groups. Studies assessing the effects of light pollution on the development of psychiatric symptoms/psychiatric disorders as secondary outcomes were considered as well. In addition, to assess the level of awareness of citizens about the perception of the risk of exposure to light pollution, studies with the measure of perception of the risk of light pollution on human health were included. Studies focused on animal samples were excluded, as well as those considering animal, plants, or other organisms.

3. Results

3.1 Literature search results and study description

After duplicates removal, literature screening and hand screening of relevant references, 11 papers were included in the present narrative review. The selected studies investigate the role of indoor and outdoor light at night. Data were mainly collected from countries with higher level of environmental pollution. Studies have been selected on three main topics that emerged from the literature research: sleep (5 studies), mood disorders and related behaviors (4 studies), public risk perception regarding light pollution (2 studies). The latter has been considered since we believe that a survey on the citizens’ attitudes of concerning about issue is fundamental for the development of adequate prevention strategies in the field of environmental health. For summary of the included results, see Table 1.

3.2 Light Pollution, sleep and circadian disruption

Sleep quality is an important determinant of wellbeing, linked to individual factors but also to the environment where the subject lives. For this reason, it is important to identify the light pollution as a possible moderator of the effects of urbanization on sleep disturbances. There are currently few studies about quantification of the effect of light pollution on overall sleep quality. Studies conducted outdoor, which were included in this narrative review, tried to measure the effect of light on sleep quality mainly by comparing subjects living in rural areas with those living in urban areas or exposed to different concentrations ALAN. The possible association between light and poorer quality of sleep was confirmed by three studies, while one study found small effects and thus suggested that effects on population are negligible, and the effect of night time light pollution is more idiosyncratic [30].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Moreover, one study investigated the effects of indoor night light on sleep. To measure the quality of sleep, most studies that were included in this review used the Pittsburg Sleep Quality Index (PSQI) test. A comparative cross-sectional study [31] of adults (18–60 years) living in rural and urban areas, where night time radiance measurement was considered as a measure of light pollution, found that the effect of the same category of exposure in bringing about a poorer sleep quality was higher among the urban population as compared to rural participants. The higher values of PSQI global scores in high exposure categories indicated a higher degree of sleep disturbance. Comparing the effect sizes, the effects of different levels of exposure to light pollution was found to be the major determinant for poorer self-reported sleep quality. This study identified the effect of this exposure to be independently hazardous in terms of sleep quality [31]. In elderly subjects (age ≥ 60), increasing exposure to ALAN (light data based on satellite mapping of artificial light) seems to be associated with increased prescription of hypnotic drugs and daily dose intake (zolpidem and triazolam) in South Korean population [32]. Area-level outdoor ALAN, as derived from satellite imagery data, was associated with less favorable sleep patterns, mood and anxiety disorder in adolescents, as found in a cross-sectional study of US adolescents [33]. In this study, area-level outdoor ALAN was associated also with mood disorders for both bipolar disorder and major depressive disorder/dysthymia, while associations with anxiety disorders were driven by specific phobias. These results are consistent with the biological role of light as a driver of circadian rhythms, demonstrating the effects of ALAN on sleep patterns [34-35]. Artificial lighting is also common in indoor conditions, like bedrooms. Indeed, individuals often deliberately or unintentionally fall asleep with lights on, or with the television light on, and children who are afraid of the dark may ask their parents to keep their lights on during sleep, but light exposure may affect sleep quality. Moreover, the last of the included studies on the topic, investigates the effect of light on sleep quality and brain activity by performing two whole-night polysomnography (PSG) sessions, one with lights off and one with lights on [36]. Lights-on sleep was associated with increased stage 1 sleep, decreased slow-wave sleep, and increased arousal index. Spectral analysis revealed that theta power during REM sleep and slow oscillation, delta, and spindle power during NREM sleep were decreased in lights-on sleep conditions. This means that light seems to have an effect on the quality of deep sleep, which is closely linked to cognitive functions, e.g., memory. ALAN differs from natural light in the time and duration of exposure, intensity, and spectral distribution or range of wavelengths of emitted light.

3.3 Light Pollution and mood disorders: depressive, hypomanic/manic symptoms, and suicidal behaviors

Individuals who experience seasonal changes in the length of the day, suffer from jet lag, or work regularly at night are more likely to develop depressive symptoms and mood changes, but it is not known whether outdoor ALAN affects the incidence of depression or suicide in the general population [36]. Research included in this review advocates that external ALAN is associated with increased prevalence of depressive symptoms and suicidal behaviors. In two studies, depressive symptoms were measured using self-administered scales whose items defined depressive symptoms, e.g., the Center for Epidemiologic Studies Depression Scale (CES-D) [37] or Patient Health Questionnaire – 9 items (PHQ–9) [38], and suicidal behaviors were defined as the experience of suicidal ideation or attempt

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[39]. ALAN exposure assessments were based on earth-observing satellites. Using a large and representative sample, outdoor ALAN was found to be significantly associated with depressive symptoms and suicidal behaviors in South Korean adults [39]. Compared with adults living in areas exposed to lowest outdoor ALAN levels, those living in areas exposed to higher levels showed increased odds of depressive symptoms and suicidal behaviors. Confirmation of this association is essential, as current data suggest that outdoor ALAN may be a risk factor for depressive symptoms or suicide [39]. In Netherlands [40], a statistically significant increase in depressive symptoms with growing levels of outdoor ALAN in the immediate residential environment in unadjusted models was observed. The association remained significant after adjusting for person-level and environmental correlates. To explain neurobiological mechanisms through which ALAN may contribute to mood disorders, the disruption of circadian rhythmicity was demonstrated to be crucial for mood disorders including depression, since also blue wavelengths at night can suppress melatonin levels and their production [41]. Sleep-wake cycle disruptions and artificial light pollution could also be a trigger for affective episodes in Bipolar Disorders (BD). First, the role of sleep deprivation in inducing mania is well-known. Moreover, is has been hypothesized that the blockade of nocturnal production of melatonin by light pollution plays a role in the genesis of BD as a consequence of the effect that melatonin exerts balancing steroid hormones [42]. There are two studies about indoors ALAN exposure in subjects suffering from BD [43-44], which found out a worsening of manic symptoms and manic/hypomanic episodes relapses.

3.4 Risk perception of the effects of light pollution on citizens' health

According to the analyzed literature, citizen science approaches demonstrated their usefulness in gathering data on public perceptions of light pollution and its impacts. In one study conducted among Irish citizens, this perception was strongly influenced by the position, highlighting the importance of evaluating experiences and attitudes in a number of geographical contexts [45]. This study, conducted through a survey administered to Irish citizens showed that regarding the perceived impacts of ALAN, respondents endorse that light entering the bedroom impacts on sleep (findings mostly reported in rural dwellers), and suggests that in Ireland light pollution may be an important environmental factor to consider for sleep health [45]. The second study conducted in Korea, used questionnaire survey [46]. Citizens were asked to assess risk perception level of selected light pollution type (e.g. light trespass, over-illumination, glare, and light clutter) and other environmental and health risk factors. The aim of this research was also to study the process of social amplification: for this psychometric paradigm, factors that were selected as the indices that affect risk perception were: personal knowledge, degree to which risk is known, controllability, effect of risk on future generation, familiarity of risk, fatal consequences of risk, responsibility attribution and trust in the government,; while the explanatory variables chosen were: level showing the acquisition of information from the media and recollection level of media criticism. [46]. The risk of perception levels of each light pollution type and other environmental and health risk factors were compared. In addition, analysis to test which variables affect the group with high-risk perception of each light pollution type was performed. Among the 11

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

environmental and health risk factors, glare was ranked 5th, and over-illumination, light trespass, and light clutter were ranked 9th, 10th, and 11th, respectively, which were far away than other environmental and health risk factors. The results showing that the acquisition of information from the media and the recollection level of media criticism on each light pollution type had a statistically significant increase [46].

Reference	Country (Study)	Design	Sample	Mental Health Outcome (Assessment Measure)	Light exposure (Measure Unit)
Patel [30]	USA	Population-based study	282403 individual self-reports from the 2014 and 2016 MMSA BRFSS and during 2014 in 2823 US counties from the County Health Rankings. (≥18)	LOWER OR INSUFFICENT SLEEP (individual-level repeated cross-sectional survey)	OUTDOOR ALAN nanowatts per centimeter squared per steradian ($nW/[cm^2\ sr]$)
Lahiri et al. [31]	India	Comparative cross-sectional study	263 participants from urban and 249 participants from rural areas (18–60 years)	SLEEP QUALITY compared in people residing in selected rural and urban area (PSQI; 10-item PSS)	OUTDOOR ALAN nighttime radiance (1 radiance unit = 10^{-9} $W/cm^2/sr$)
Min & Min [32]	South Korea	Population-based cohort study	52,027 adults (≥ 60 years)	INSOMNIA prescriptions for hypnotic drugs (data of two hypnotic drugs, zolpidem and triazolam extracted from the NHIS-NSC records)	OUTDOOR ALAN satellite mapping of artificial light Light pollution levels ($nanowatts/cm^2/sr$)
Paksarian et al. [33]	USA	Population-based, cross-sectional study	10 123 adolescents (4953 boys [51.3%]; mean [SE] age, 15.2 [0.06] years [weighted]; 6483 for behavior disorder outcomes) (13-18 years)	SLEEP PATTERNS AND PAST-YEAR MENTAL DISORDER (Modified version of the World Health Organization Composite International Diagnostic Interview version 3.0 according to *DSM-IV* criteria. - Self-reported habitual sleep patterns - Parent-reported information was included in behavior disorder diagnoses.)	OUTDOOR ALAN, transformed into units of radiance ($nanowatts/cm^2/sr$)

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cho et al. [36]	Korea	whole-night polysomnography sessions	10 young (21–34 years; mean age, 27 years)	WHOLE—NIGHT BEDSIDE LIGHT EFFECT ON SLEEP QUALITY AND BRAIN ACTIVITY (PSQI FOR sleep–wake habits; PSG)	INDOOR LAN fluorescent lamp (40 lux, 30-cm long), located approximately 1 m away from the participants' eyes kept on during the entire session
Min & Min [39]	Korea	Population-based study	113,119 participants for the assessment of depressive symptoms and 152,159 participants for the assessment of suicidal behavior, data from KCHS.(age ≥ 20 years)	DEPRESSIVE SYMPTOMS AND SUICIDAL BEHAVIOR (CES-D; question about attempted suicide or contemplated dying over the preceding 12 months ("yes" or "no")	OUTDOOR ALAN satellite data from the National Centers for Environmental Information (from 0 to 63 nano watts/cm^2 / sr. Spatial resolution: 50–100 m and the detection limit 10^{-9} W/cm^2 /sr)
Helbich [40]	The Netherlands	Cross-sectional survey	10,482 people(18–65 years)	DEPRESSIVE SYMPTOMS (PHQ–9)	OUTDOOR ALAN satellite-based measures of radiances for exposure assessments (nW/cm^2 /s)
Esaki [43]	Japan	Cross-sectional analysis	184 subjects (18-75 years)	MANIC SYMPTOMS IN BD PATIENTS (YMRS)	INDOOR ALAN Bedroom light exposure (from bedtime to rising time assessed for 7 consecutive days using a portable photometer)
Esaki [44]	Japan	Longitudinal analysis	184 subjects (18-75 years)	MOOD EPISODE RELAPSES IN BD PATIENTS (manic or hypomanic episodes (with or without mixed features) or depressive episodes according to the DSM-5 criteria)	INDOOR ALAN Bedroom light exposure (from bedtime to rising time assessed for 7 consecutive days using a portable photometer)

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Coogan [45]	Irleand	Cross-sectional survey	462 respondents (age≥ 18)	CITIZEN'S PERCEPTIONS OF LIGHT POLLUTION AND ITS IMPACT (12 item questionnaire on light pollution)	OUTDOOR ALAN perceptions of recent increase in light at night, the impact of light at night on sleep, changes in the timing of bird song, changes in the night time behaviour of animals and changes in the number of bats see
Kim [46]	Korea	Cross-sectional survey	1096 research subjects (40s: 27.7 %, 304 persons; 30s: 26.4 %, 289 persons; 50s: 23.8%, 261 persons; 20s: 22.1 %, 242 persons)	CITIZEN'S PERCEPTIONS OF LIGHT POLLUTION AND ITS IMPACT AND SOCIAL AMPLIFICATION OF RISK (Survey environmental and health risk factors for the comparison of risk perception levels for light pollution)	OUTDOOR ALAN (light trespass, over-illumination, glare, and light clutter)

Table 1. Summary of the included results. MMSA = metropolitan and micropolitan statistical area; BRFSS = Behavioral Risk Factor Surveillance System; PSQI = Pittsburg Sleep Quality Index; PSS = Perceived Stress Scale; NHIS = The National Health Insurance Service; NHIS-NSC = NHIS-National Sample Cohort; PSG = polysomnography; CES-D = Center for Epidemiologic Studies Depression Scale; KTCS = Korean Community Health Survey; PHQ–9 = Patient Health Questionnaire; BD = Bipolar Disorder; YMRS = Young Mania Rating Scale;

4. Conclusions

The results of this review indicate that there is an association between light pollution and mental health. In particular, increased exposure to light pollution (both indoor and outdoor) appears to have a negative effect on the quality of sleep in populations of different ages (adults, adolescents, and elderly). Increased exposure to indoor and outdoor artificial light at night also appears to be associated with the emergence of mood symptoms in adults and adolescents. In this latter group possible associations with other disorders such as anxiety and specific phobias were also found. Mediators of the effects of light pollution on mental health seem to be represented by melatonin suppression and circadian rhythm disturbances. The difficulty in isolating the variable of light pollution from other pollutants in the urban environment remains the greatest challenge and the greatest criticism of studies conducted to date. The strength of the studies here included, especially those about mood disorders, is the representative number of participants enriched with person-level register and environmental data, but analyses were based on self-reported depressive symptoms, which may have biased regression estimates. Future studies on the topic of light pollution are expected to better clarify its relationship with the mental health of citizens. To this purpose, it is crucial to perform studies with more robust designs such as longitudinal studies during natural experiments and cohorts with follow-

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

up data collection. In particular, studies with longitudinal design would be important for people who do not present risk factors for psychiatric disorders to measure the effective influence of light pollution on the general population. As for vulnerable population, there is the need for understanding what preventive strategies can be put in place to avoid the onset of clear-cut psychopathology. When ALAN exposures are inappropriate or constant, biological rhythms can be desynchronized and mood disorders may be exacerbated. In order to ensure environmentally sustainable cities, we can conclude from this research that identifying social variables and attitudes that affect the risk perception of any type of pollution represents a priority for the implementation of adequate prevention strategies. A low-risk perception of light pollution could be due to insufficient interest in social determinants of health, and also to the fact that light pollution represents a risk with which the public is not familiar. Since it was foreseen that light pollution could be a serious potential risk in the future [47], the necessity of establishing a strategy for communicating the risks of light pollution to the public. Citizens' risk perception could affect public health behavior regarding light exposure and if the risk perception of light pollution is low, precautionary behaviors for reducing exposure to light pollution could be weakened [48]. The results reported in this review suggested that understanding citizens' thoughts and feelings about light pollution is the first step in increasing the understanding of light pollution and the political effectiveness of regulatory authorities. For this purpose, an effective communication strategy should be implemented to reduce light pollution, e.g., enhancing thematic diffusion through internet and social media. The building of more livable cities, which protect public health in a naturalistic perspective, should be promoted according to the principles of sustainability and liveability, including the broadening of green space, eco-friendly lighting**,** and citizens aware of risk factors and harmful habits.

References

1. United Nations Department of Economic and Social Affairs. The World's Cities in 2016, Statistical papers - *United Nations (Ser. A), population and vital statistics report, United Nations, New York.*
2. Sarkar, C.; Webster, C. Urban environments and human health: current trends and future directions. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, **2017**, *25*, 33-44.
3. Gruebner, O.; Rapp, M.A.; Adli, M.; Kluge, U.; Galea, S.; Heinz, A. Cities and mental health. *Deutsches Arzteblatt international* **2017,** *114*, 121–127.
4. Peen, J.; Schoevers, R.A.; Beekman, A.T.; Dekker, J. The current status of urban-rural differences in psychiatric disorders. *Acta psychiatrica Scandinavica* **2010,** *121*, 84–93.
5. Pedersen, C.B.; Mortensen, P.B. Evidence of a dose-response relationship between urbanicity during upbringing and schizophrenia risk. *Archives of general psychiatry* **2001,** *58,* 1039–1046.
6. van Os, J.; Kenis, G.; Rutten B.P. The environment and schizophrenia. *Nature* **2010,** *468,* 203–212.
7. Vassos, E.; Pedersen, C.B.; Murray, R.M.; Collier, D.A.; Lewis, C.M. Meta-analysis of the association of urbanicity with schizophrenia. *Schizophrenia bulletin* **2012**, *38*, 1118–1123.
8. Costa E Silva, J. A.; Steffen, R. E. Urban environment and psychiatric disorders: a review of the neuroscience and biology. *Metabolism: clinical and experimental* **2019,** *100S*, 153940.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

9. Lederbogen, F.; Kirsch, P.; Haddad, L.; Streit, F.; Tost, H.; Schuch, P. et al. City living and urban upbringing affect neural social stress processing in humans. *Nature* **2011,** *474,* 498–501.
10. Tsankova, N.; Renthal, W.; Kumar, A.; Nestler, E.J. Epigenetic regulation in psychiatric disorders. *Nature reviews. Neuroscience* **2007,** *8,* 355–367.
11. Philibert, R.A.; Sandhu, H.; Hollenbeck, N.; Gunter, T.; Adams, W.; Madan, A. The relationship of 5HTT (SLC6A4) methylation and genotype on mRNA expression and liability to major depression and alcohol dependence in subjects from the Iowa adoption studies. *American journal of medical genetics. Part B, Neuropsychiatric genetics : the official publication of the International Society of Psychiatric Genetics,* **2008,** *147B,* 543–549.
12. Labonte, B.; Suderman, M.; Maussion, G.; Lopez, J.P.; Navarro-Sanchez, L.; Yerko, V. et al. Genome-wide methylation changes in the brains of suicide completers. *The American journal of psychiatry* **2013**, *170,* 511–520.
13. Squires, W.A.; Hanson, H.E. The destruction of birds at the lighthouses on the coast of California. *Condor* **1918**, *20*, 6–10.
14. Czarnecka, K.; Błażejczyk, K. & Morita, T. Characteristics of light pollution - A case study of Warsaw (Poland) and Fukuoka (Japan). *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, **2021,** *291*, 118113.
15. Falchi, F.; Cinzano, P.; Duriscoe, D.; Kyba, C.C.M.; Elvidge, C.D.; Baugh, K.; Boris, P.A.; Rybnikova, N.A.; Furgoni, R.; The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science advances 2,* **2016a**, 1600377.
16. Karasek, M. Pineal Gland and Melatonin (Szyszynka I Melatonina). *Polish Scientific Publishers PWN*, Warsaw, **1997**.
17. Tähkämö, L.; Partonen, T.; & Pesonen, A. K. Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm. *Chronobiology international*, **2019,** *36*, 151–170.
18. Cajochen C.; Jud C.; Münch M.; Kobialka S.; Wirz-Justice A.; Albrecht U. Evening exposure to blue light stimulates the expression of the clock gene PER2 in humans. *The European journal of neuroscience*. **2006,** *23,* 1082–1086.
19. Falchi, F.; Cinzano, P.; Duriscoe, D.; Kyba, C.C.M.; Elvidge, C.D.; Baugh, K.; Portnov, B.; Rybnikova, N.A.; Furgoni, R. Supplement to: the New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness. In: Stare, J. (Ed.). **2016** GFZ Data Services.
20. Dominoni, D. M.; Borniger, J. C.; & Nelson, R. J. Light at night, clocks and health: from humans to wild organisms. *Biology letters*, **2016**, *12,* 20160015.
21. Lamphar, H.; Kocifaj, M.; Limón-Romero, J.; Paredes-Tavares, J.; Chakameh, S. D.; Mego, M.; Prado, N. J.; Baez-López, Y. A.; & Diez, E. R. Light pollution as a factor in breast and prostate cancer. *The Science of the total environment*, **2022,** *806*, 150918.
22. Xiao Q.; Jones R.R.; James P.; Stolzenberg-Solomon, R.Z. Light at Night and Risk of Pancreatic Cancer in the NIH-AARP Diet and Health Study. *Cancer research,* **2021,** *81*, 1616-1622.
23. Lai K.Y.; Sarkar C.; Ni M.Y.; Cheung L.W.T.; Gallacher J.; Webster C. Exposure to light at night (LAN) and risk of breast cancer: A systematic review and meta-analysis. *The Science of the total environment,* **2021,** *762*.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

24. Zubidat, A. E.; & Haim, A. Artificial light-at-night - a novel lifestyle risk factor for metabolic disorder and cancer morbidity. *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*, **2017**, *28*, 295–313.
25. Kim Y.J.; Lee E.; Lee H.S.; Kim M.; Park M.S. High prevalence of breast cancer in light polluted areas in urban and rural regions of South Korea: An ecologic study on the treatment prevalence of female cancers based on National Health Insurance data. *Chronobiology international*, **2015,** *32,* 657-667.
26. Xiao Q.; Gierach G.L.; Bauer C.; Blot W.J.; James P.; Jones R.R. The Association between Outdoor Artificial Light at Night and Breast Cancer Risk in Black and White Women in the Southern Community Cohort Study. *Environmental health perspectives,* **2021,** *129*.
27. Kim, K. Y.; Lee, E.; Kim, Y. J.; & Kim, J. The association between artificial light at night and prostate cancer in Gwangju City and South Jeolla Province of South Korea. *Chronobiology international*, **2017**, *34*, 203–211.
28. Falchi, F.; Furgoni, R.; Gallaway, T. A.; Rybnikova, N. A.; Portnov, B. A.; Baugh, K.; Cinzano, P.; & Elvidge, C. D. Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of environmental management*, **2019,** *248*, 109227.
29. Argentiero, A.; Cerqueti, R.; Maggi, M. Outdoor light pollution and COVID-19: The Italian case. *Environmental impact assessment review,* **2021,** *90*, 106602.
30. Patel, P.C. Light pollution and insufficient sleep: Evidence from the United States. *American Journal of Human Biology,* **2019,** *31*.
31. Lahiri, A., Chakraborty, A., Roy, A.K.S., Dasgupta, U., Bhattacharyya, K. Effect of light pollution on self-reported sleep quality and its components: Comparative assessment among healthy adult populations in a rural and an Urban area of West Bengal, India. *Indian Journal of Public Health,* **2020,** *64*.
32. Min, J.Y., Min, K.B. Outdoor Artificial Nighttime Light and Use of Hypnotic Medications in Older Adults: A Population-Based Cohort Study. *Journal of Clinical Sleep Medicine,* **2018,** *14*.
33. Paksarian, D., Rudolph, K.E., Stapp, E.K., Dunster, G.P., He, J., Mennitt, D., Hattar, S., Casey, J.A., James, P., Merikangas, K.R. Association of Outdoor Artificial Light at Night With Mental Disorders and Sleep Patterns Among US Adolescents. *JAMA Psychiatry,* **2020,** *77*.
34. Roenneberg, T., Merrow, M. The circadian clock and human health. *Current Biology,* **2016,** *26*.
35. Stevens RG, Zhu Y. Electric light, particularly at night, disrupts human circadian rhythmicity: is that a problem? *Philosophical Transansactions of Royal Society London B Biological Sciences,* **2015,** *370*.
36. Cho, J.R., Joo, E.Y., Koo, D.L., Hong, S.B. Let there be no light: the effect of bedside light on sleep quality and background electroencephalographic rhythms. *Sleep Medicine,* **2013,** *14,* 1422-1425.
37. Radloff, L.S. The CES-D scale: a self report depression scale for research in the general population. *Applied Psychological Measurement,* **1977,** *1*, 385–401.
38. Kroenke, K., Spitzer, R.L. The PHQ-9: a new depression diagnostic and severity measure. *Psychiatric Annals,* **2002,** *32*, 509–515.
39. Min, J.Y., Min, K.B. Outdoor light at night and the prevalence of depressive symptoms and suicidal

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

behaviors: A cross-sectional study in a nationally representative sample of Korean adults. *Journal of Affective Disorders,* **2018,** *227*, 199-205.

40. Helbich, M., Browning, M.H.E.M., Huss, A. Outdoor light at night, air pollution and depressive symptoms: A cross-sectional study in the Netherlands. *Science of the Total Environment,* **2020,** *744,* 140914.
41. Haim A., Zubidat, A.E. Artificial light at night: melatonin as a mediator between the environment and epigenome. *Philosophical Transansactions of Royal Society London B Biological Sciences,* **2015,** *370*, 20140121.
42. Carta, M.G., Preti, A., Akiskal H.S. Coping with the New Era: Noise and Light Pollution, Hperactivity and Steroid Hormones. Towards an Evolutionary View of Bipolar Disorders. *Clinical Practice and Epidemiology in Mental Health,* **2018,** *14,* 33-36.
43. Esaki, Y., Obayashi, K., Saeki, K., Fujita, K., Iwata, N., Kitajima, T., Association between light exposure at night and manic symptoms in bipolar disorder: cross-sectional analysis of the APPLE cohort. *Chronobiology International,* **2020,** *37,* 887–896.
44. Esaki, Y., Obayashi, K., Saeki, K., Fujita, K., Iwata, N., Kitajima, T. Effect of nighttime bedroom light exposure on mood episode relapses in bipolar disorder. *Acta Psychiatrica Scandinavica,* **2022**.
45. Coogan, A.N., Cleary-Gaffney, M., Finnegan, M., McMillan, G., González, A., Espey, B. Perceptions of Light Pollution and its Impacts: Results of an Irish Citizen Science Survey. International Journal of Environmental Research and Public Health, **2020,** *17,* 5628.
46. Kim, K.H., Choi, J.W., Lee, E., Cho, Y.M., Ahn, H.R. A study on the risk perception of light pollution and the process of social amplification of risk in Korea. Environmental Science and Pollution Research International, **2015,** *22,* 7612-7621.
47. Munn, T., Timmerman, P., Whyte, A., Emerging environmental issues: a global perspective of SCOPE. *Ambio A Journal of Environment and Society,* **1999,** *28,* 464–471.
48. Kim, K.H., Kim, H.J., Song, D.J., Cho, Y.M., Choi, J.W. Risk perception and public concerns of electromagnetic waves from cellular phones in Korea. *Bioelectromagnetics,* **2014,** *35,* 235–244.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Integrated and innovative approach for the recovery of by-products of the brewing industry

Ilary Belardi [1,2]*, Ombretta Marconi [1,2], Assunta Marrocchi [3] and Marco Paolantoni [3]

[1] Department of Agricultural, Food and Environmental Science, University of Perugia, Via San Costanzo, Perugia, 06126, Italy

[2] Italian Brewing Research Centre CERB, University of Perugia, Via S. Costanzo, n.c.n, Perugia, 06126, Italy

[3] Department of Chemistry, Biology and Biotechnology, University of Perugia, Via Elce di Sotto 8, Perugia, 06123, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: ilaryb91@hotmail.it

Abstract: Beer is one of the most consumed alcoholic beverages in the world. The brewing industry, as well as the whole agri-food chain, is responsible for the production of a high number of several by-products (spent grain, spent hop, and spent yeast). Brewer's spent grain is the main by-product of brewing industry accounting for about 85% of the total. At the end of the mashing process, through the lautering stage of the wort, brewer's spent grain is obtained. This by-product represents a lignocellulosic biomass characterized mainly by proteins, fiber and a high moisture content and, in smaller quantities, by minerals, vitamins, phenolic compounds and other extractive substances. In a broad context, our study aims to implement sustainability, resilience, and circularity strategies within the brewing chain, through biorefining and valorization of the brewery by-products. Here, there will be presented the results relative to the realization of a fractionation process for the integral recover of the main components of the brewer's spent grain, which enable the by-product valorization through its reuse in other processes (e.g., bioplastic production, food applications) and, ultimately, the re-introduction in a productive cycle. Furthermore, a preliminary evaluation of the efficiency of the fractionation technique was carried out. In particular, attenuated total reflection-Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy was employed both to characterized the isolated components and to check the reproducibility of the integral fractionation process of brewer's spent grain.

Keywords: brewer's spent grain; agro-industrial by-products; arabinoxylan; biomass; valorization; ATR-FTIR spectroscopy.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

In 2014, the Food and Agricultural Organization (FAO) defined “food loss” as the decrease in quantity or quality of food, caused mainly by food production and supply system functioning or its institutional and legal framework. “Waste” is defined as “any substance or object, which the holder discards or intends or is required to discard” according to the EU Commission Council Directive 2008/98/EC. On the other hand, food waste is defined as an unintentional loss or intentional disposal of edible food mass at any stage of the supply chain. In any case, within the sustainability and bioeconomy aspect, all the food-related substrates that are included in “food loss” term (lost within the food supply chain), should be considered as by-products of potential reuse or valorization [1, 2].

The amount of food waste is ever increasing, causing serious environmental issues and costs for its disposal. Food waste represents a source of valuable compounds such as polysaccharides, being a mixture of starch and lignocellulose, proteins, fats, and bioactive compounds, which can be converted by biorefineries into value-added products [3].

The food and beverage industry are a major source of waste streams e.g., bagasse and molasses from the sugar industry, by-products of vegetable canned foods and cereal-based foods, spent grains and filter cakes from breweries, and waste from wine grape processing. Herein, this work addresses the valorization of brewers’ spent grain (BSG), a by-product obtained during the production of beer, relying on the recovery of valuable biopolymers from it.

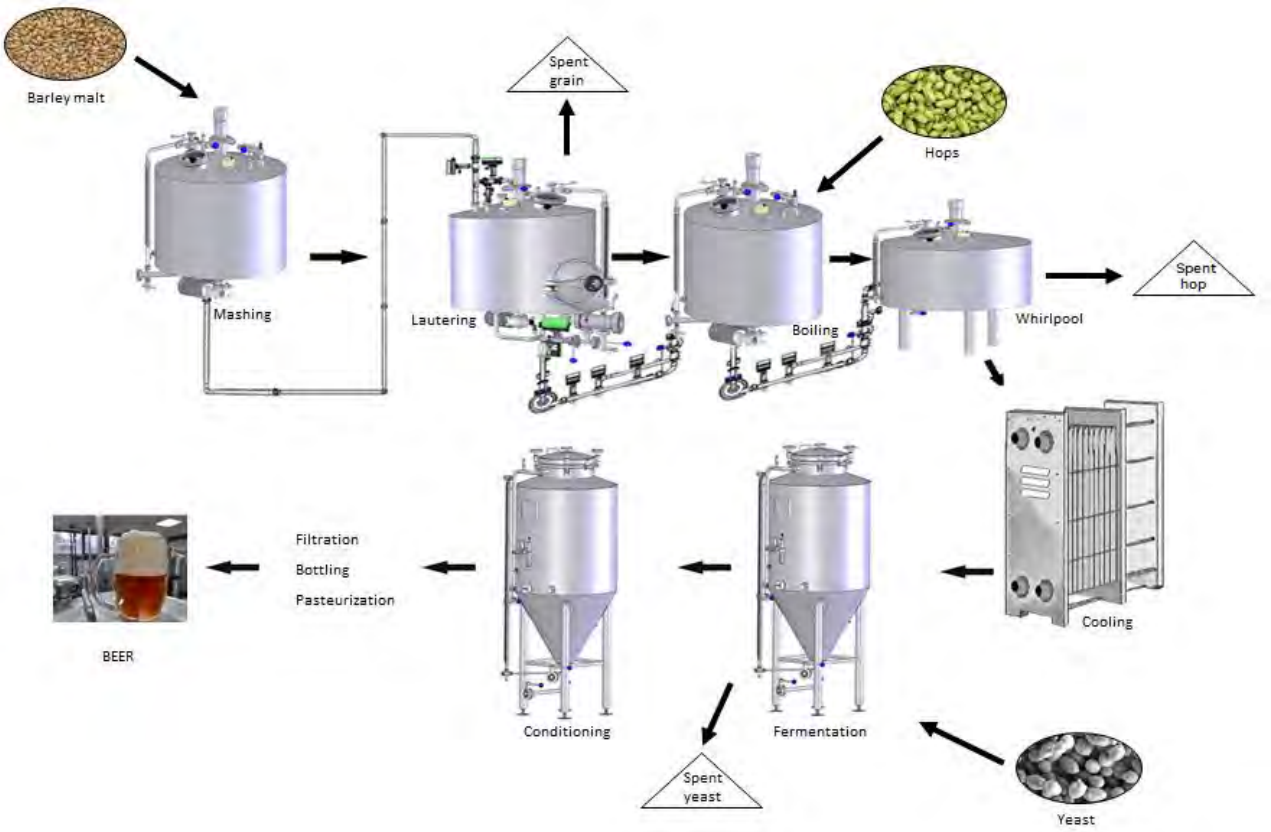
Beer is one of the most common alcoholic beverages in the world. Beer production worldwide amounted to about 1.82 billion hL in 2020 [4]. In the same year, the European production was ~341 million hL [5], 15 million hL of which were produced in Italy [6].

The brewing process involves several stages (Figure 1). After milling barley malt (and other malted and/or unmalted grains), the first step of the brewing process is called mashing. In this step barley malt and hot water is mixed to allow the solubilization of sugars and proteins through enzymatic activity. At the end of the mashing process, the mash is subjected to lautering, and the wort and the first by-product (brewer’s spent grain (BSG)) are obtained. Afterward, during the boiling step the hop (the type varying according to the style of beer produced) is added to the wort. At the end of this stage, the second by-product (spent hops) is obtained after separation from wort in the whirlpool. Then the wort is treated in a cooling stage in order to reach the fermentation temperature. During the fermentation stage is added the yeast S. cerevisiae or S. pastorianus (yeast varies according to the style of beer produced). At the end of fermentation, green beer and the third by-product (spent yeast) are obtained. The green beer then is subjected to maturation, filtration, bottling, and pasteurization to obtain the final product [7, 8].

Given the large global annual production of beer, it is also important to consider that the brewing industry presents excess by-products (i.e., spent grain, spent hop, and spent yeast, see below) that will not be reused by the brewing industry and, depending on the disposal options, it can have a significant environmental impact. The high volume of by-products from breweries represents a feedstock for the production of valuable product streams in the perspective of a circular economy [9].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1. Scheme of the brewing process, highlighting where the main by-products are generated.



Brewer's spent grain (BSG), represents the main by-product of the brewing industry, accounting for about 85% of the total by-products. For each 100 L of brewed beer produced, almost 20 kg of wet BSG is generated as a by-product. The annual global production of BSG is therefore massive, that is ~39 million tons. In the European Union, the production is ~3,4 million tons, ~219 thousand tons of which are produced in Italy [6, 10, 11].

Brewer's spent grain is characterized by the insoluble components, seed coat–pericarp–husk layers of barley grain. It is heterogeneous biomass that varies depending on the type of barley grains, harvesting time, location, malting and mashing conditions, quality, and type of adjuncts used during the brewing process [12].

Currently, BSG is mainly sold to farmers (~30% in EU) as animal feed, with a low market value of ~35 Euro/tonne or landfilled. Finding alternatives, higher-value uses for BSG is therefore particularly attractive from the point of view of brewery economics [13].

BSG is composed from fibers (30–50%, w/w), proteins (19–30%, w/w), lipids (10%, w/w) and ash (2-5%, w/w). In particular, the fiber is divided in cellulose (12-25%, w/w), hemicellulose (20-25%, w/w) and lignin (12-28%, w/w) [14]. It is noteworthy to point out that BSG is available in large quantities throughout the year [10].

Beyond its usefulness as an animal food by-product, some of BSG components are also considered as precursors for fine chemicals or as energy sources in microbial fermentations. The use of BSG has also been explored for removing organics from effluents and the immobilization of various substances and to produce bioethanol [9-11, 15].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The major challenges associated with using BSG as a feedstock include the high moisture content, ~70-80%, which makes it susceptible to microbial growth and spoilage within a short period (7-10 days), owing to its nitrogen content, as well as the complex outer layer, which make it difficult to separate into components and convert. To extend its shelf-life, BSG is typically subjected to pre-treatments such as drying, which are costly from both energetical and economical points of view, reaching a water content not exceeding 10% [10, 11, 16].

There are several techniques that have been developed for BSG valorization through deconstructing, separation and isolation of its valuable components; however, most of them only focuses on the extraction of protein from BSG, with little attention to the recovery of either fiber, which is a more abundant component, or fiber structural constituents (i.e., lignin, cellulose, hemicellulose) [17, 18].

This work focuses on the development of a fractionation process of BSG targeting the integral recovery of its main components (cellulose, hemicelluloses, lignin, and proteins), which enable the by-product valorization through its reuse in other processes and the consequent re-introduction in a productive cycle.

Note that the developed process uses wet BSG, without the need of costly drying pre-treatments. In addition, the process includes a step which enables the simultaneous extraction and functionalization of the hemicellulose, thereby increasing its value for the biorefineries [18]. Furthermore, the preliminary results relative to the evaluation of the effectiveness of the attenuated total reflection-Fourier transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy in controlling the reproducibility of the fractionation technique will be discussed.

2. Materials and Methods

2.1. Materials

BSG were collected from the pilot plant located at the Italian Brewing Research Centre (CERB) of the University of Perugia and were stored frozen in the dark until use.

All chemicals were purchased from Merck KGaA, Darmstadt, Germany, and used without further purification, unless otherwise noted.

Wheat Arabinoxylan M.V. (~22 cSt.; M.W. 323,000 Da) standard was purchased from Megazyme.

2.2. Analytical methods

BSG were analyzed for the following parameter: moisture, total nitrogen and proteins, β-glucans, and arabinoxylan. All the analyses were performed according to Analytica EBC Methods [20]. The moisture and protein content were determined according to the EBC Analytical Method A-EBC 4.2 and A-EBC 4.3.1, respectively.

β-Glucans content was determined employing the β-Glucan Assay Kit purchased from Megazyme. This analysis consists of a spectrophotometric method with a measure of absorbance at 510 nm.

Arabinoxylan content was determined by an internal method based on enzymatic purification, colorimetric reaction and spectrophotometric determination at 552 and 510 nm wavelengths.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.3. ATR-FTIR spectroscopic technique

Fourier transform infrared (FTIR) spectra in attenuated total reflection (ATR) configuration were obtained by using an Alpha spectrometer (Bruker Optics) and a Platinum ATR module equipped with a single reflection diamond crystal (Bruker Optics). The OPUS 7.5 Bruker Optics software was employed for acquisition and analysis of the IR spectra. These were recorded in the 400-5000 cm^{-1} range by averaging 30 scans, with a resolution of 2 cm^{-1}. A standard baseline correction was applied.

The employing of ATR-FTIR spectroscopy provided spectra with good quality and reproducibility, minimizing the sample treatment.

In this work, ATR-FTIR spectroscopy was employed to check the effectiveness of the brewer's spent grain fractionation process and to evaluate the degree substitution (DS) of functionalized arabinoxylans. Sample analyses were performed in duplicate.

3. Results and Discussion

3.1. Composition of brewer's spent grain

The chemical composition of BSG depend on the beer recipe and the evaluation of the moisture content is very important in connection with its shelf-life and the risk of microbic contamination. In our case a value of 78% is determined in line with other studies [10], the moisture content decreases below 10% after drying at 60 °C for 24 hours.

The total amount of nitrogen of BSG was determined to be 3,8%. By using the appropriate conversion factor of barley (6.25), a proteins content of 23,8% was estimated, in agreement to the literature [10, 16, 19].

The amount of β-glucan and arabinoxylan was 0,96% and 17%, respectively, according to the literature [10]. The chemical composition of BSG resulting from our analysis is listed in Table 1.

Table 1. Composition of brewer's spent grain.

Components	Concentration (%)[a]
Moisture	78 ± 7
Total nitrogen	3,8 ± 2,5
β-glucan	0,96 ± 0,02
Arabinoxylan	17 ± 0,2
[a]Values are means ± standard deviation. % (w/w) on dry basis, except for moisture	

3.2. Fractionation of brewer's spent grain

In this section, the results relative to the fractionation process of a pre-determined amount of BSG

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

are reported. The BSG integral fractionation technique is currently patent pending in Italy (O. Marconi, A. Marrocchi, Patent application N. 102021000021299, 2021) and avoids drying steps.

The process was performed using water as the extraction solvent, under controlled alkaline conditions, in duplicate. The temperature range was 20°-90°C.

However, the integral fractionation was carried out on the wet BSG (moisture of about 78%). For starters, the protein-rich fraction was extracted, separated by conventional methods, and collected. The protein content was determined on both the protein- and fibrous-rich fractions. The protein content in the former was 64 ± 1% (w/w, dry basis), based on the method reported in "Materials and Methods" section. On the other hand, the fibrous-rich fraction was found to contain 36 ± 1% of protein residue (w/w, dry basis).

Next, the fibrous fraction was further fractionated into an insoluble residue (i.e., cellulose), and a liquid fraction. Cellulose residue was recovered by centrifugation, whereas the liquid fraction was added with a pre-determined reagent, which enabled selectively the functionalization and subsequent precipitation of hemicelluloses (mainly arabinoxylans). The yield of functionalization was 77 $\pm$ 10%, as revealed by the arabinoxylan content left in the residual liquid fraction (23 $\pm$ 14%).

Finally, the recovery of lignin was performed by acidic precipitation (pH∼2) from the residual liquid fraction [21-23]. The recovered compounds are shown in Figure 2.

Figure 2. BSG as it is (a), protein fraction (b), fibrous fraction (c), cellulose (d), lignin (e) and functionalized arabinoxylan (f).



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.3. ATR-FTIR spectroscopic study

The ATR-FTIR spectra were recorded for the pre-dried BSG samples. The main spectral signals, assigned on the basis of literature data, are listed in Table 6.

The broad band in the 3300-3200 cm^{-1} spectral region is due to the stretching vibrations of hydroxyl groups (-OH) of polysaccharides such as cellulose, hemicellulose and lignin [24-26].

The peaks around 3200-3000 cm^{-1} are related to stretching modes of aromatic C-H bonds [26, 27].

The signals in the 3000-2800 cm^{-1} region are attributed to the stretching vibrations of aliphatic C-H bonds of polysaccharides such as cellulose, hemicellulose and lignin [24-26].

The peaks within the 1800-1700 cm^{-1} spectral region are related to the stretching vibrations of C=O groups, typical of hemicellulose and lignin [27, 28].

The signals in the 1700-1600 cm^{-1} region can be related to vibrations of ferulic acid and proteins. In particular, this range encompasses the so-called Amide I signal, mainly ascribed to the C=O stretching vibration of amide protein groups. This band is sensitive to the conformation of the protein and might be employed to evaluate the amount of its secondary structure (α-elix, β-sheet, β-turn and random coil) [28-30].

The Amide II signal, mainly due to the C-N stretching and N-H bending of amide protein groups, can be found in the 1600-1500 cm^{-1} region. Here the bands due to the stretching vibrations of the aromatic ring (C=C-C) and conjugated carbonyl bonds (C=O), typical of the lignin, can be also found [30-32].

The peaks in the 1500-1300 cm^{-1} spectral region are related to the symmetrical and/or asymmetrical bending vibrations of aliphatic hydrocarbons (C-H bonds). In particular, the bands around 1400 cm^{-1} are typical to the aliphatic chains of cellulose, hemicellulose and lignin [26, 27, 30, 31].

The bands in the 1300-1000 cm^{-1} spectral region are due to the stretching vibrations of C-O, C-C and C-OH bonds of cellulose, hemicelluloses and lignin. In particular, in this spectral region we can find the symmetric stretching vibrations of carbonyl bonds (C=O) and guaiacyl ring of lignin. Signals due to ring vibrations involving the glycosidic bond (C–O–C) and stretching vibrations of the C–OH or C–O–R groups of alcohols or esters are also expected in this region [27, 28, 32, 33].

The peaks at 1000-900 cm^{-1} can be related to the out-of-plane deformation of C-H bonds of the aromatic ring, typical of lignin. Moreover, this region also accounts for the signals related to β-glycosidic bonds of the arabinoxylans backbone [27, 30].

The bands within the 900-500 cm^{-1} spectral region are ascribed to β-glycosidic and α-glycosidic bonds typical of cellulose and hemicellulose. In this region there are also the signals due to C-H deformation and ring vibrations of aromatic groups, typical of lignin [24, 27, 28, 34].

Table 6. The spectral regions of brewer's spent grain.

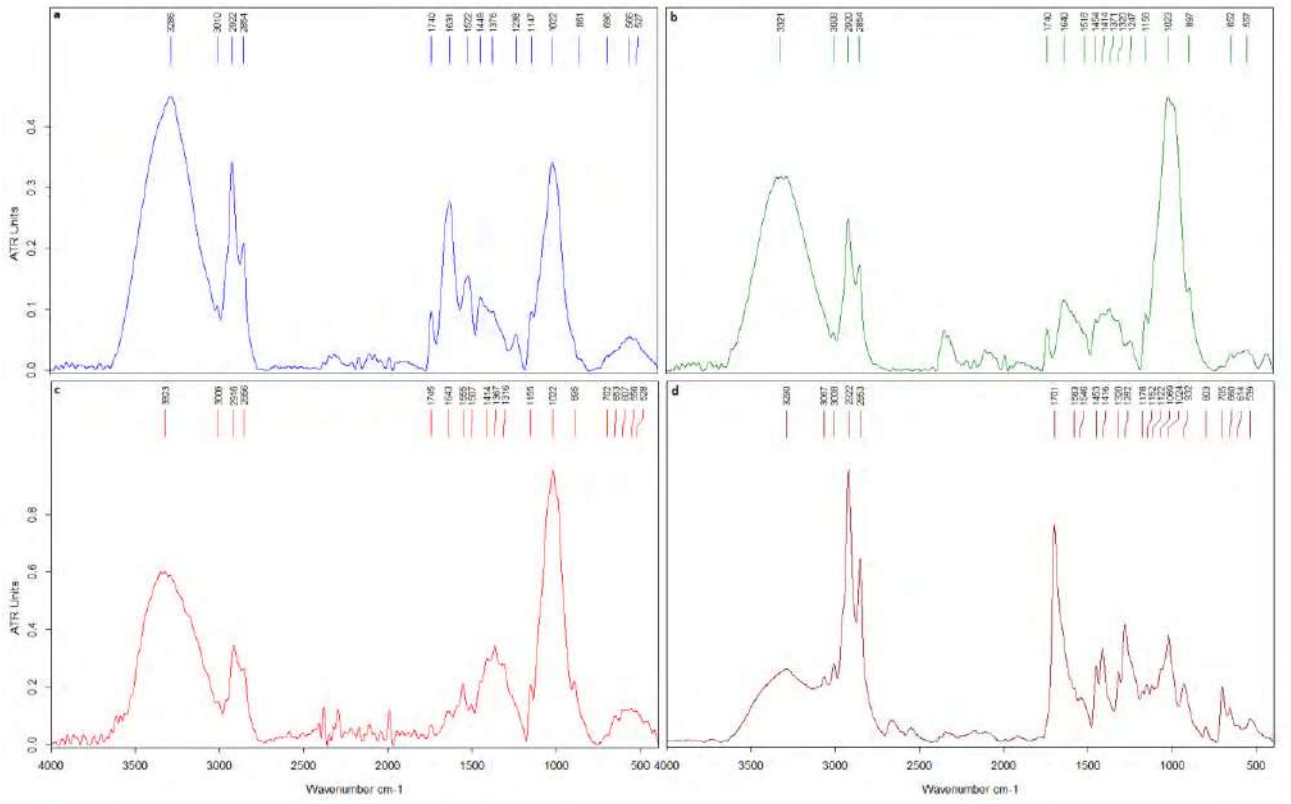
Band region (cm^{-1})	Functional groups	BSG components
3600-3200	Stretching vibrations of hydroxyl groups (–OH)	Cellulose; hemicellulose; lignin
3200-3000	Stretching vibrations of aromatic C-H bonds	Lignin (aromatic compounds)

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3000-2800	Stretching vibrations of aliphatic hydrocarbons (C-H)	Cellulose; hemicellulose; lignin
1800-1700	Stretching vibrations of the carbonyl bond (C=O)	Lignin; hemicellulose (ester groups)
1700-1600	Stretching vibrations: Amide I (N-H), aromatic hydrocarbons (C=C)	Proteins; lignin (aromatic compounds)
1600-1500	Stretching vibrations: Amide II, aromatic ring (C=C-C)	Proteins; lignin (aromatic compounds)
1500-1300	Symmetrical/asymmetrical bending vibrations of aliphatic hydrocarbons (C-H)	Cellulose
1300-1000	Acetyl groups, aliphatic esters and acid functional groups.	Cellulose; hemicellulose; lignin
1000-900	Deformation out-of-plane of C-H	Lignin (aromatic compounds)
900-500	β-glycosidic bonds (900-800); α-glycosidic bonds (800-500); bending vibrations and deformation of C-H	Cellulose; hemicellulose; lignin

The ATR-FTIR spectra of BSG, fibrous-rich fraction, cellulose and lignin were depicted in Figure 3. Although the spectra of the different components were found to be similar to the spectrum of the BSG, relevant differences can be observed in specific spectral regions, due to the signals typical of each individual component. For this reason, it can be affirmed that the ATR-FTIR spectroscopy might represent an efficient technique to verify the reproducibility of the BSG fractionation process.

Figure 3. ATR-FTIR spectra: BSG (a); fibrous-rich fraction (b); cellulose (c); lignin (d).

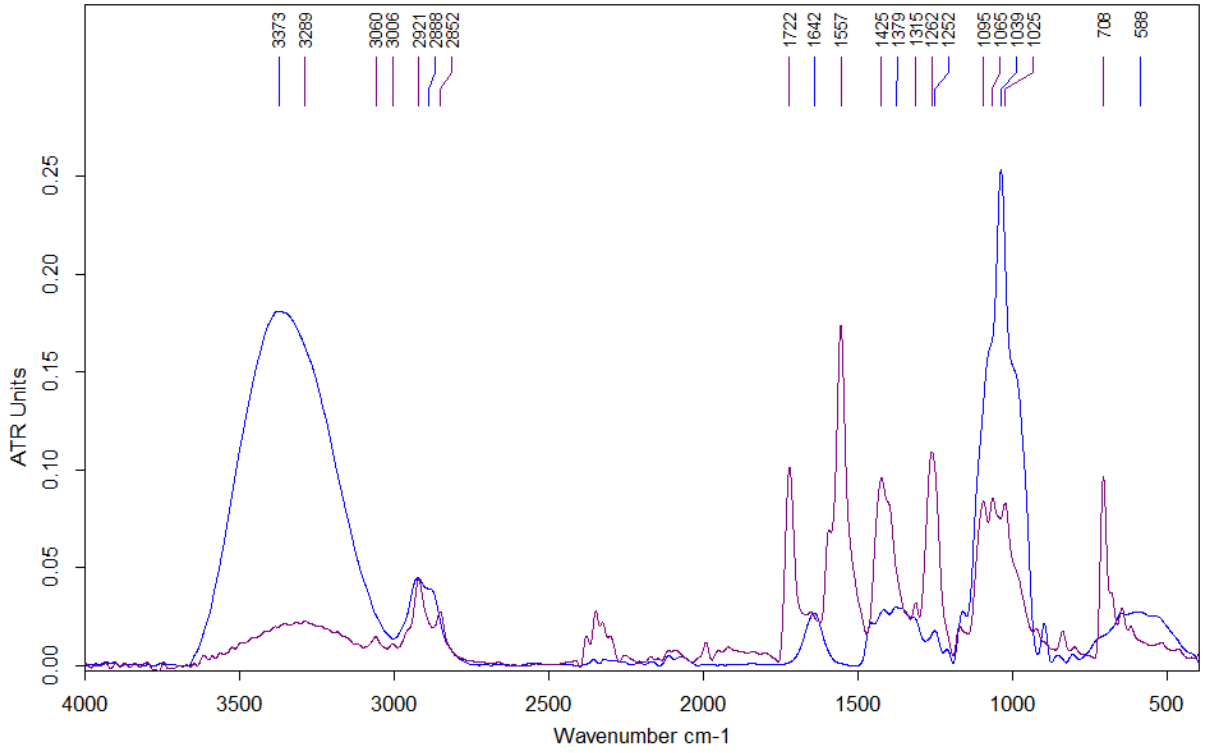


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The comparison between the ATR-FTIR spectrum of standard (STD) and functionalized (AX) arabinoxylan was reported in Figure 4. The functionalization is confirmed by the presence of a number of new intense peaks in the spectrum of the AX sample, when compared to the STD one. This is especially evident in the spectral region between 1800-1000 cm^{-1} in which the observed signals relate to the presence of ester bonds (C-O and C=O bonds). On the other hand, the signals in the 1000-500 cm^{-1} region indicate the presence of α-glycosidic bonds (hemicellulose).

A procedure was also attempted to estimate the degree of substitution based on the ATR-FTIR spectra. In particular, the percentage of substituted OH groups was evaluated considering the relative reduction of the area of the OH stretching band between 3600-3000 cm^{-1} going from the STD to the AX sample. The area of the CH stretching signals between 3000-2800 cm^{-1} was employed for normalization purposes. The analysis has been performed in duplicate. A degree of substitution corresponding to 80 $\pm$ 2% was estimated.

Figure 4. ATR-FTIR spectrum: STD in blue; AX in purple.



Conclusions

This study enabled the development of an innovative fractionation process to recover the main components of the BSG (i.e., protein, cellulose, hemicellulose and lignin). BSG are used wet, with no preliminary drying steps, which have high economic/energetic costs, and hemicellulose can be simultaneously functionalized, which represents an increased value for biorefineries. This process shows great promise for increasing the value of BSG, in the context of a circular economy.

ATR-FTIR spectroscopy appears to be a helpful tool to assess the reproducibility of the BSG fractionation process and to easily estimate the degree of substitution.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Acknowledgements

Ilary Belardi thanks the National Operational Programme (PON) on "Research and Innovation" 2014-2020, with reference to Action IV.5, PhD on green themes, for the financial support.

References

1. Food and Agricultural Organization of the United Nation (FAO). Available online: https://www.fao.org/3/at144e/at144e.pdf (accessed on 5 May 2022).
2. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. Available online: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098 (accessed on 5 May 2022).
3. Belc, N.; Mustatea, G.; Apostol, L.; Iorga, S.; Vlăduţ, V. N.; Mosoiu, C. Cereal supply chain waste in the context of circular economy. *E3S Web of Conferences* **2019**, 112, 03031.
4. Statista. Available online: https://www.statista.com/topics/1654/beer-production-and-distribution/#dossierKeyfigures (accessed on 21 March 2022).
5. The Brewers of Europe. Available online: https://brewersofeurope.org/site/media-centre/index.php?doc_id=1007&class_id=31&detail=true (accessed on 21 March 2022).
6. Assobirra. Available online: https://www.assobirra.it/annual-report-assobirra/ (accessed on 21 March 2022).
7. Cimini, A.; Moresi, M. Circular economy in the brewing chain. *Italian Journal of Food Science* **2021**, 33, 47-69.
8. Aroh, K. Review: Beer Production. *SSRN Electronic Journal* **2019**.
9. Kerby, C.; Vriesekoop, F. An Overview of the Utilisation of Brewery By-Products as Generated by British Craft Breweries. *Beverages* **2017**, 3, 24.
10. Lynch, K. M.; Steffen, E. J.; Arendt, E. K. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing* **2016**, 122, 553-568.
11. Steiner, J.; Procopio, S.; Becker, T. Brewer's spent grain: source of value-added polysaccharides for the food industry in reference to the health claims. *European Food Research and Technology* **2015**, 241, 303-315.
12. Jackowski, M.; Niedźwiecki, Ł.; Jagiełło, K.; Uchańska, O.; Trusek, A. Brewer's spent grains - valuable beer industry by-product. *Biomolecules* **2020**, 10, 1-18.
13. Buffington, J. The Economic Potential of Brewer's Spent Grain (BSG) as a Biomass Feedstock. Advances in Chemical Engineering and Science 2014, 4, 308-318.
14. Bravi, E.; De Francesco, G.; Sileoni, V.; Perretti, G.; Galgano, F.; Marconi, O. Brewing By-Product Upcycling Potential: Nutritionally Valuable Compounds and Antioxidant Activity Evaluation. *Antioxidants* **2021**, 10, 165.
15. Bachmann, S. A. L.; Calvete, T.; Féris, L. A. Potential applications of brewery spent grain: Critical an overview. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2022**, 10, 106951.
16. Karlović, A.; Jurić, A.; Ćorić, N.; Habschied, K.; Krstanović, V.; Mastanjević, K. By-Products in the

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Malting and Brewing Industries - Re-Usage Possibilities. *Fermentation* **2020**, 6, 82.
17. He, Y.; Kuhna, D.; Ogejob, J. A.; O'Keefea, S. F.; Fraguasa, C. F.; Wiersemaa, B. D.; Jina, Q.; Yua, D.; Huanget, H. Wet fractionation process to produce high protein and high fiber products from brewer's spent grain. *Food and Bioproducts Processing* **2019**, 117, 266-274.
18. He, Y.; Kuhn, D. D.; O'Keefe, S. F.; Ogejo, J. A.; Fraguas, C. F.; Wang, H.; Huang, H. Protein production from brewer's spent grain via wet fractionation: process optimization and techno-economic analysis. *Food and Bioproducts Processing* **2021**, 126, 234-244.
19. Chetrariu, A.; Dabija, A. Brewer's Spent Grains: Possibilities of Valorization, a Review. *Applied Sciences* **2020**, 10, 5619.
20. The Analytica EBC. Available online: https://brewup.eu/ebcanalytica.
21. Mussatto, S. I.; Fernandes, M.; Roberto, I. C. Lignin recovery from brewer's spent grain black liquor. *Carbohydrate Polymers* **2007**, 70, 218-223.
22. Ghatak, H. R.; Kundu, P. P.; Kumar, S. Thermochemical comparison of lignin separated by electrolysis and acid precipitation from soda black liquor of agricultural residues. *Thermochimica Acta* **2010**, 502, 85-89.
23. Cao, X.; Shao, L.; Huang, W.; Wang, C.; Mao, J.; Xu, F.; Zhang, X. Thermal degradation of lignins fractionated by gradient acid precipitation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2021**, 157, 105200.
24. Nandiyanto, A. B. D.; Oktiani, R.; Ragadhita, R. How to Read and Interpret FTIR Spectroscope of Organic Material. *Indonesian Journal of Science and Technology* **2019**, 4, 97-118.
25. Liñán-Montes, A.; De La Parra-Arciniega, S. M.; Garza-González, M. T. R.; García-Reyes, B.; Soto-Regalado, E.; Cerino-Córdova, F. J. Characterization and thermal analysis of agave bagasse and malt spent grain. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2014**, 115, 751-758.
26. Samilpa, A. R.; Ferreira, D. P.; Teixeira, M. A.; Fangueiro, R.; Gutiérrez, M. C. Accelerated Aging Effect in Physical and Thermo-mechanical Properties of Maize Starch Biocomposites Reinforced with Agave Salmiana Fibers from Different Leaf Ages. *Fibers and Polymers* **2022**, 23, 807-818.
27. Outeiriño, D.; Costa-Trigo, I.; Paz, A.; Deive, F. J.; Rodríguez, A.; Domínguez, J. M. Biorefining brewery spent grain polysaccharides through biotuning of ionic liquids. *Carbohydrate Polymers* **2019**, 203, 265-274.
28. Naibaho, J.; Butula, N.; Jonuzi, E.; Korzeniowska, M.; Laaksonen, O.; Föste, M.; Kütt, M.-L.; Yang, B. Potential of brewers' spent grain in yogurt fermentation and evaluation of its impact in rheological behaviour, consistency, microstructural properties and acidity profile during the refrigerated storage. *Food Hydrocolloids* **2022**, 125, 107412.
29. Li, Q.; Yang, H.; Coldea, T. E.; Andersen, M. L.; Li, W.; Zhao, H. Enzymolysis kinetics, thermodynamics and structural property of brewer's spent grain protein pretreated with ultrasound. *Food and Bioproducts Processing* **2022**, 132, 130-140.
30. Jaguey-Hernández, Y.; Tapia-Ignacio, C.; Aguilar-Arteaga, K.; González-Olivares, L. G.; Castañeda-Ovando, E. P.; Cruz-Cansino, N.; Ojeda-Ramirez, D.; Castañeda-Ovando, A. Thermoplastic biofilms obtained from an arabinoxylan-rich fraction from brewers' spent grain:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

physicochemical characterization and thermal analysis. *Biomass Conversion & Refinery* **2022**.

31. Netala, V. R.; Kotakadi, V. S.; Nagam, V.; Bobbu, P.; Ghosh, S. B.; Tartte, V. First report of biomimetic synthesis of silver nanoparticles using aqueous callus extract of Centella asiatica and their antimicrobial activity. *Applied Nanoscience* **2015**, 5, 801-807.
32. Sim, S. F.; Mohamed, M.; Lu, N. A. L. M. I.; Sarman, N. S. P.; Samsudin, S. N. S. Computer-assisted analysis of fourier transform infrared (FTIR) spectra for characterization of various treated and untreated agriculture biomass. *BioResources* **2012**, 7, 5367-5380.
33. Hellebois, T.; Gaiani, C.; Planchon, S.; Renaut, J.; Soukoulis, C. Impact of heat treatment on the acid induced gelation of brewers' spent grain protein isolate. *Food Hydrocolloids* **2021**, 113, 106531.
34. Grams, J. Surface analysis of solid products of thermal treatment of lignocellulosic biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* **2022**, 161, 105429.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Impatti di ciclo di vita delle biomasse: un caso studio sulla produzione di cippato forestale

Grazia Barberio [1], Laura Cutaia [1], Caterina Rinaldi [1], Flavio Scrucca [1,*]

[1] Dipartimento di Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali, ENEA – Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, Roma, Italia

* Autore di riferimento. E-Mail: flavio.scrucca@enea.it

Abstract: Lo sfruttamento delle biomasse ad uso energetico, vista l'ampia disponibilità di risorse (residui agricoli e forestali, colture di secondo raccolto e di copertura, …) e la capacità di mitigazione degli effetti del cambiamento climatico associata all'assorbimento della CO_2 garantito dalle filiere produttive, può essere considerato particolarmente rilevante ai fini del raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità a livello globale. Visti inoltre i recenti trend e accadimenti che hanno portato notevole incertezza nell'approvvigionamento e forti incrementi nel prezzo delle fonti energetiche convenzionali, un apprezzabile aumento dell'utilizzo dei biocombustibili nel breve-medio termine è ragionevolmente immaginabile. Il presente lavoro è finalizzato alla valutazione con approccio Life Cycle Assessment (LCA) degli impatti associati alla produzione di cippato forestale, al fine di valutare la sostenibilità di tale fonte energetica in ottica di ciclo di vita. Gli impatti di ciclo di vita in termini di Cambiamenti Climatici del cippato sono stati valutati partendo dal caso studio di una specifica filiera produttiva nazionale (rappresentativa, sia in termini geografici che tecnologici, di una produzione in ambiente montano). Sono dunque stati ipotizzati ed analizzati differenti possibili scenari di produzione, valutando gli effetti in termini di emissioni del ciclo di vita derivanti dalle caratteristiche specifiche di ognuno di essi.

Keywords: LCA; biomasse; fonti rinnovabili, cippato forestale.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduzione

Il settore delle biomasse solide, vista l'ampia disponibilità di risorse (biomasse residuali, agricole e forestali, colture di secondo raccolto e di copertura), l'opportunità di una loro valorizzazione energetica e la capacità di mitigazione degli effetti del cambiamento climatico associata all'assorbimento della CO_2 garantito dalle filiere produttive, può essere considerato uno tra i più rilevanti ai fini della pianificazione energetica per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità a livello globale [1].

Il consumo di energia primaria da biocombustibili solidi nell'UE a 27, nonostante le particolari condizioni generali degli ultimi anni dovute ai nuovi record di temperatura e alla pandemia da COVID-19, ha fatto registrare nel 2020 un leggero incremento (+0,3%) rispetto al 2019, attestandosi a 94,4 Mtep. In tale contesto, l'Italia rappresenta uno dei principali utilizzatori, sia in termini di consumo interno lordo di energia primaria, che di consumo di calore e produzione lorda di energia elettrica [2]. Nel nostro Paese, inoltre, è recente il recepimento della Direttiva europea "Energie Rinnovabili" (nota come RED II) [3] che, conformemente al Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) [4], definisce gli aspetti rilevanti (quadro giuridico di riferimento, strumenti, meccanismi, incentivi, …) ai fini di un ulteriore incremento nella produzione da fonti rinnovabili per il raggiungimento degli obiettivi al 2030, trattando evidentemente anche i temi connessi all'utilizzo dei biocombustibili.

In tale contesto, visti anche i recenti trend e accadimenti che hanno portato a notevoli incrementi del prezzo delle fonti energetiche convenzionali e dell'incertezza di approvvigionamento delle medesime, è ragionevole immaginare un apprezzabile aumento dell'utilizzo dei biocombustibili nel breve-medio termine, in particolare ai fini della produzione di energia termica in impianti di medie-piccole dimensioni distribuiti sul territorio. Tale soluzione, infatti, risulta particolarmente interessante dal punto di vista economico per il consumatore, ma anche particolarmente strategica ai fini dell'implementazione di una strategia di generazione distribuita in prossimità degli utilizzatori, funzionale a svincolare il sistema energetico nazionale da un modello di produzione centralizzato e dipendente dalle fonti convenzionali provenienti dall'estero.

Inoltre, come chiaramente indicato anche all'interno PNIEC [4], ai fini di un corretto sfruttamento dei biocombustibili, risulta strategico promuovere l'uso di impianti efficienti e a ridotte emissioni, nonché favorire la valorizzazione dei residui agricoli in ottica di economia circolare (anche per evitarne la combustione in campo oggi diffusa) e, nel rispetto delle regole europee, promuovere le biomasse locali con una procedura di tracciabilità di filiera corta rispondente a criteri di sostenibilità.

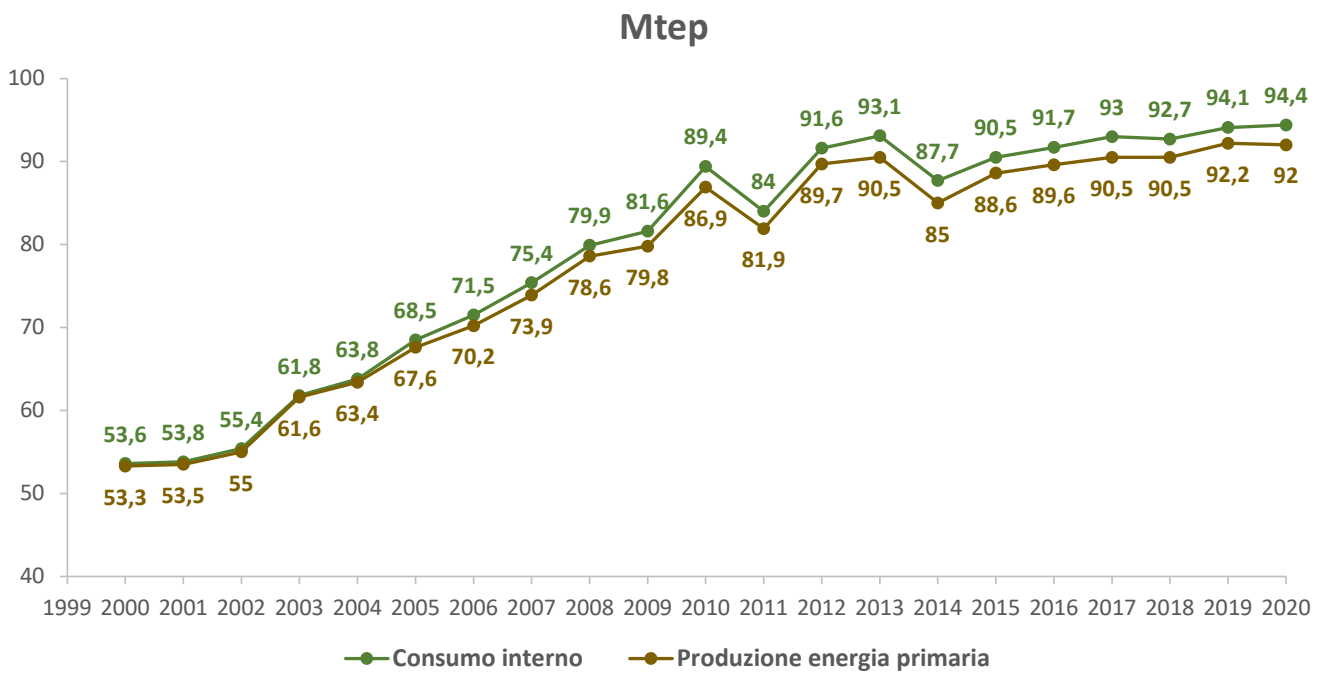
Il presente articolo è finalizzato alla valutazione degli impatti associati alla produzione di cippato forestale con approccio LCA, al fine di valutare la sostenibilità di tale fonte energetica in ottica di ciclo di vita e la sua "competitività" in termini ambientali rispetto ad altre fonti similari. Partendo dal caso studio di una specifica filiera produttiva nazionale (rappresentativa, sia in termini geografici che tecnologici, di una produzione in ambiente montano), sono stati valutati gli impatti di ciclo di vita in termini di Cambiamenti Climatici associati alla produzione di cippato di classe A in uno scenario "di base". Sono dunque stati ipotizzati due possibili scenari di produzione, caratterizzati da differenti condizioni della fase di coltivazione, e sono stati valutati gli effetti in termini di emissioni del ciclo di vita associati ad ognuno di essi.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Il contesto Europeo e Italiano in termini di consumo di biocombustibili solidi

Il consumo di energia primaria da biocombustibili solidi nell'UE a 27, come mostrato in Figura 1, è caratterizzato da un trend crescente a partire dal 2000 e da un leggero aumento anche negli ultimi anni, nonostante le particolari condizioni generali dovute agli incrementi di temperatura e alla pandemia da COVID-19. In particolare, con un valore complessivo pari a 94,4 Mtep, si è osservato nel 2020 un +0,3% rispetto al consumo del 2019. Situazione che può essere attribuita all'aumento del recupero di energia elettrica da biocombustibili solidi, che con un + 2 TWh circa è salito a 82,6 TWh, contrariamente al consumo di calore che è sceso dello 0,8% circa, attestandosi a 76,4 Mtep.

Figura 1. Consumo interno e produzione di energia primaria da biocombustibili solidi UE27 (Mtep) (fonte: [2]).



In tale contesto Europeo, l'Italia rappresenta uno dei principali utilizzatori, posizionandosi per ciascun utilizzo (calore ed energia elettrica) sempre tra i primi 10 consumatori insieme a Germania, Francia, Svezia, Finlandia e Polonia. Nel 2020, in particolare, il consumo interno lordo in termini di energia primaria nl nostro Paese è stato pari a 8.353 Mtep (a fronte di una produzione di 7.124 Mtep), mentre la produzione lorda di energia elettrica è stata pari a 4.470 TWh e il consumo di calore di 6.969 Mtep (Tabella 1) [2]. Inoltre, con 3,4 Mt (0,1% in meno nei 12 mesi fino alla fine del 2020), l'Italia rappresenta attualmente uno dei principali paesi consumatori di pellet di legno a livello UE, insieme a Danimarca (2,9 Mt, -2,9%), Germania (2,3 Mt, +1,3%) e Paesi Bassi (2,2 Mt, + 113,6%).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 1. Dati sull'utilizzo dei biocombustibili solidi nel 2020 (fonte: [2]).

Paese	Anno 2020			
	Produzione di energia primaria (Mtep)	Consumo interno (Mtep)	Produzione lorda di energia elettrica (TWh)	Consumo di calore (Mtep)
Germania	12.778	12.754	11.227	10.021
Francia	9.859	9.914	3.959	8.821
Svezia	9.900	9.886	9.496	8.130
Finlandia	8.327	8.435	10.760	6.841
Italia	7.124	8.353	4.470	6.969
Polonia	6.606	6.972	6.933	5.534
Spagna	5.054	5.054	4.541	3.648
Austria	4.804	4.666	3.634	3.966
Romania	3.401	3.395	0.494	3.432
Repubblica Ceca	3.522	3.367	2.499	2.796

3. Il Progetto ARCADIA

Il Progetto ARCADIA [5] ("Approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse"), coordinato da ENEA e finanziato dall'Agenzia di Coesione Territoriale nell'ambito del PON-Governance e Capacità Istituzionale 2014-2020 [6], ha fra i suoi obiettivi la creazione di una banca dati italiana LCA [7] contenente dataset documentati e con una base di riferimento nazionale.

Le filiere oggetto di studio nell'ambito del progetto sono individuate sulla base di diversi criteri, quali la produttività nazionale e l'impatto ambientale dei settori produttivi, gli ambiti di acquisto di interesse per la Pubblica Amministrazione, le integrazioni con i Criteri Ambientali Minimi (CAM) e lo schema Made Green in Italy. La scelta delle filiere è inoltre stata discussa anche all'interno della "Cabina di Regia" istituita dal progetto Mettiamoci in RIGA coordinato dal Ministero della Transizione Ecologica (MITE), che coinvolge referenti del MITE stesso, del Ministero dello Sviluppo Economico (MISE), delle Regioni italiane, Province autonome, Associazioni (Rete Italiana LCA, ITACA, ecc.), Università, Enti di ricerca e riveste un ruolo di indirizzo e supporto alle attività del progetto ARCADIA.

A seguito del processo appena descritto, sono stati individuati quattro settori prioritari (agroalimentare, edilizia, energia, legno arredo) e oltre 15 filiere per cui è in corso lo sviluppo dei dataset, tra cui è inserita anche la filiera del cippato forestale, il cui gruppo di lavoro è costituito da ENEA, Associazione Italiana Energie Agroforestali (AIEL), professionisti (12-to-Many) e imprese (Cigliani Primo, SaDiLegno) del settore.

Il caso studio della filiera produttiva considerata nell'ambito delle attività del progetto ARCADIA è stato considerato come scenario "di base" per la produzione di cippato di forestale nell'ambito del presente lavoro.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Aspetti metodologici dello studio LCA

4.1. Ambito di applicazione dello studio

Lo scenario "di base" analizzato nell'ambito delle attività del progetto ARCADIA riguarda la filiera del cippato forestale prodotto in Friuli Venezia Giulia ed è pertanto da considerarsi rappresentativo, sia in termini geografici che tecnologici, di una filiera produttiva sviluppata in ambiente montano. Tale situazione può essere ritenuta caratteristica del Nord-Est del nostro Paese, dove si trovano le più importanti fustaie produttive di legname da lavoro (legname da trancia e da sega, per paste e altro legname per uso industriale), ovvero di altre Regioni italiane in cui la produzione di biomassa legnosa avviene prevalentemente in aree montane (o assimilabili).

Il prodotto considerato ai fin del presente lavoro è un cippato forestale di classe A, ovvero prodotto da tronchi o ramaglia priva di foglia e di grossa dimensione (nel caso specifico di legno di abete), ritenuto di buona qualità sulla base della norma UNI ISO 17225-4 e rappresentativo delle classi A1 e A2 da essa individuate, normalmente impiegato in impianti di piccole dimensioni per la produzione di energia termica o a fini cogenerativi.

Lo studio LCA è stato sviluppato in conformità alle norme ISO 14040-14044 [8-9], modellando il ciclo di vita dei prodotti in modo "attribuzionale", ovvero riproducendo la catena di fornitura esistente e utilizzando processi di background rappresentativi del mix di consumo del mercato medio [10].

Per tutti gli dettagli metodologici relativi all'analisi LCA si rimanda allo studio di filiera redatto nell'ambito del progetto ARCADIA, disponibile sul sito di progetto nella sezione relativa al settore legno arredo [11].

4.1.1. Confini del Sistema e unità funzionale

Ai fini del presente lavoro, per lo studio LCA dello scenario "di base" è stato adottato un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i processi fino al "cancello aziendale" e non le successive fasi di uso e fine vita (Figura 2). È esclusa dai confini del sistema la produzione di tutte le attrezzature e i macchinari utilizzati per le diverse attività del cantiere forestale, scelta in linea con alcuni documenti metodologici relativi ai prodotti forestali disponibili in letteratura [12-13] e ritenuta del tutto ragionevole vista la natura di tali oggetti, ovvero il contributo trascurabile in termini di impatto per il singolo cantiere forestale. Inoltre, in accordo con le indicazioni contenute nei documenti metodologici appena citati, sono escluse anche le operazioni "accessorie", quali i viaggi di lavoro e gli spostamenti degli operatori verso il cantiere forestale.

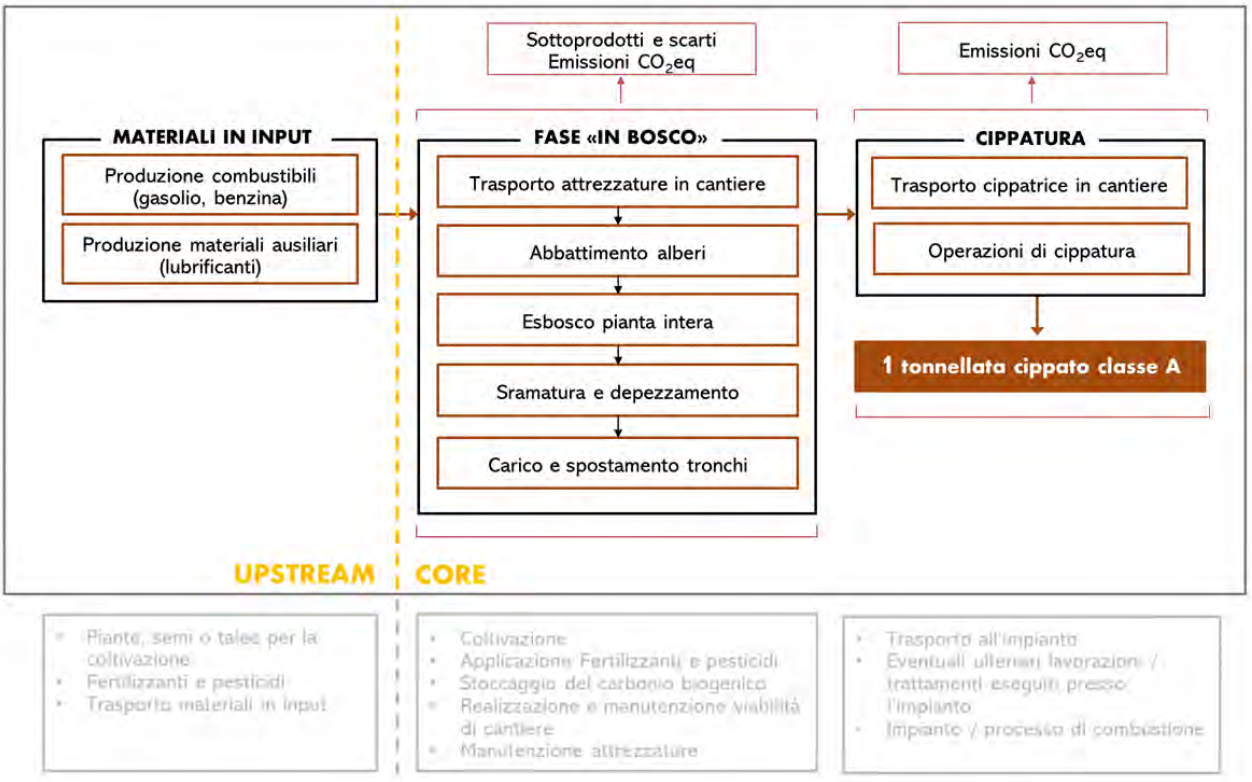
Per quanto riguarda la cosiddetta fase di "upstream", sono stati esclusi l'accrescimento delle piante fino al momento del taglio e la produzione di fertilizzanti e pesticidi, ipotizzando che in presenza di una corretta gestione forestale il bosco si rigeneri naturalmente e che, compatibilmente con tale "rinnovazione naturale", la crescita dello stesso non richieda molte operazioni e un particolare uso di sostanze chimiche. Inoltre, in accordo ai documenti metodologici relativi ai prodotti forestali reperiti [12], gli impatti legati a cambiamenti nell'uso del suolo verificatisi più di 20 anni prima della valutazione non sono da considerare nello studio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Per quanto riguarda invece la fase cosiddetta di "core", compatibilmente con le scelte appena discusse, sono state escluse tutte le lavorazioni connesse alla coltivazione e all'applicazione di fertilizzanti e pesticidi, così come la manutenzione delle attrezzature utilizzate in bosco. Sono state escluse dai confini del sistema anche la realizzazione e la manutenzione della viabilità di cantiere, in quanto non sempre rilevanti, viste le diverse possibili modalità di esbosco e l'assenza di dati sia primari che secondari specifici. Inoltre, sempre considerando una gestione forestale sostenibile, è lecito ipotizzare che lo stock di carbonio forestale associato all'accrescimento delle piante sia in equilibrio con le emissioni derivanti dal cambiamento di uso del suolo, ovvero che le emissioni e le rimozioni di anidride carbonica biogenica da e verso gli stock di carbonio forestale causate dalle attività di gestione forestale abbiano la stessa entità e, quindi, che le emissioni nette di anidride carbonica biogenica siano pari a zero [12].

L'unità funzionale (UF) utilizzata ai fini dello studio è **1 tonnellata di cippato**. La tonnellata è una unità comunemente utilizzata come riferimento nel settore forestale e, in particolare, per i combustibili legnosi. Tale UF, inoltre, è stata utilizzata in vari studi identificati nella letteratura esistente ed è ritenuta più idonea anche dalle aziende e dagli esperti di settore coinvolti nel gruppo di lavoro del progetto ARCADIA per lo studio di filiera. La scelta è inoltre in linea con alcuni documenti metodologici relativi ai prodotti forestali, ovvero con le regole di categoria di prodotto "Basic products from forestry" [12], applicabili ai prodotti e le materie prime ottenute dalle attività forestali come legname, pasta di legno e combustibili legnosi.

Figura 2. Confini del sistema dello scenario "di base".



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4.1.2. Qualità dei dati e analisi di inventario

I dati utilizzati per lo studio sono sia di tipo primario, ovvero disponibili a livello di filiera e raccolti direttamente presso le imprese del gruppo di lavoro (ubicate in Friuli Venezia Giulia), che secondari, ovvero dati di letteratura e/o di settore relativi a filiere di altre Regioni ritenute analoghe a quella considerata per caratteristiche dell'area geografica in cui si sviluppano (ambiente montano e assimilabile) e delle tecnologie in essa impiegate (tipologie di macchinari, attrezzature, ecc.).

Nel complesso, pertanto, in riferimento ai requisiti specificatamente definiti all'interno del progetto ARCADIA, la qualità dei dati utilizzati nello studio è ritenuta buona e, in particolare, si ritiene:

- buona l'affidabilità dei dati (i dati sono in parte calcolati o provenienti da letteratura, ma tutti controllati da esperti);
- accettabile la rappresentatività temporale dei dati (nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 5 anni lo studio di filiera);
- buona la rappresentatività geografica dei dati (i dati riferiti a luoghi diversi da quello indicato nello studio di filiera, su base di giudizio esperto, sono del tutto rappresentativi del luogo geografico);
- molto buona la rappresentatività tecnologica dei dati (i dati descrivono in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato per la filiera di riferimento).

I dati primari, sintetizzati nelle Tabelle 2 e 3, si riferiscono ad un cantiere forestale gestito nell'anno 2021, per un quantitativo totale di legname lavorato pari a 797 tonnellate, flusso di riferimento complessivo per tutte le operazioni del cantiere. Si sottolinea che le emissioni riportate in Tabella 3 possono essere ritenute valori medi rappresentativi delle diverse operazioni, in quanto risultanti da calcoli diretti tramite metodologia IPCC [14] sulla base dei dati primari raccolti sui consumi di combustibili e/o reperiti da studi di letteratura esistenti e/o derivanti da medie di entrambe le tipologie di stima e, comunque, coerenti in termini di tipologia di flusso (CO_2eq).

Tabella 2. Dati di inventario fase UPSTREAM.

Flussi/processi in input/output	Valore	Unità di misura	Tipologia dato
Produzione gasolio utilizzato per: Trasporto mezzi in cantiere	0,023	kg	Primario
Produzione gasolio utilizzato per: Esbosco	1,464	kg	Primario
Produzione gasolio utilizzato per: Carico e spostamento tronchi	1,573	kg	Primario
Produzione gasolio utilizzato per: Cippatura	2,392	kg	Primario
Produzione benzina utilizzata per: Abbattimento alberi	0,310	kg	Primario
Produzione lubrificante utilizzato per: Abbattimento alberi	0,106	kg	Primario
Produzione benzina utilizzata per: Sramatura e depezzamento	0,973	kg	Primario
Produzione lubrificante utilizzato per: Sramatura e depezzamento	0,045	kg	Primario

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 3. Dati di inventario fase CORE.

Flussi/processi in input/output	Valore	Unità di misura	Tipologia dato
Trasporto mezzi in cantiere	0,082	$kgCO_2eq$	Secondario
Abbattimento alberi	0,720	$kgCO_2eq$	Secondario
Esbosco	6,623	$kgCO_2eq$	Secondario
Sramatura e depezzamento	0,224	$kgCO_2eq$	Secondario
Carico e spostamento tronchi	4,481	$kgCO_2eq$	Secondario
Cippatura	3,855	$kgCO_2eq$	Secondario
Trasporto cippatrice in cantiere	2,05	tkm	Secondario

4.1.2. Analisi di sensitività per la fase di produzione

Al fine di valutare l'effetto delle differenti modalità produttive sull'impatto di ciclo di vita complessivo di 1 tonnellata di cippato, è stata inclusa nei confini del sistema la fase di coltivazione, considerando come modalità riproduttiva delle piante la propagazione vegetativa per talea e valutando due differenti scenari, ovvero:

- Scenario 1: coltivazione con fertilizzazione;
- Scenario 2: coltivazione senza fertilizzazione.

Per la definizione dei due scenari produttivi sono state considerate le fasi comuni di: *produzione del materiale di impianto* (ovvero la produzione delle piante pronte per il trapianto a partire dalle talee), di *preparazione del terreno* (ovvero le operazioni preliminari di aratura necessarie a garantire le opportune condizioni di aerazione e di capacità idrica del suolo) e di *cura colturale* (ovvero il controllo delle infestanti attraverso l'applicazione di prodotti di sintesi).

Per lo Scenario 1, è stata poi ipotizzata una *fertilizzazione di tipo organico*, modalità specifica di coltivazione secondo cui nella pratica sono da prevedere la *concimazione all'impianto* (distribuzione di letame maturo da interrare con l'aratura, prima della messa a coltura del terreno) e la *concimazione di copertura* (distribuzione del fertilizzante da eseguire negli anni intermedi di crescita della pianta, seguita da lavorazioni superficiali necessarie a interrare il concime stesso).

In entrambi gli scenari sono state anche considerate le emissioni "in campo", ovvero tutte le emissioni di gas ad effetto serra (tra cui anche le emissioni dirette di N_2O) associate all'applicazione di fertilizzati e pesticidi durante la fase di coltivazione.

I dati utilizzati ai fini della modellazione dei due scenari, stimati sulla base di precedenti studi di letteratura e delle indicazioni fornite da specifici disciplinari di produzione [**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**-18], sono sintetizzati in Tabella 4.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 4. Dati di inventario per la fase di coltivazione.

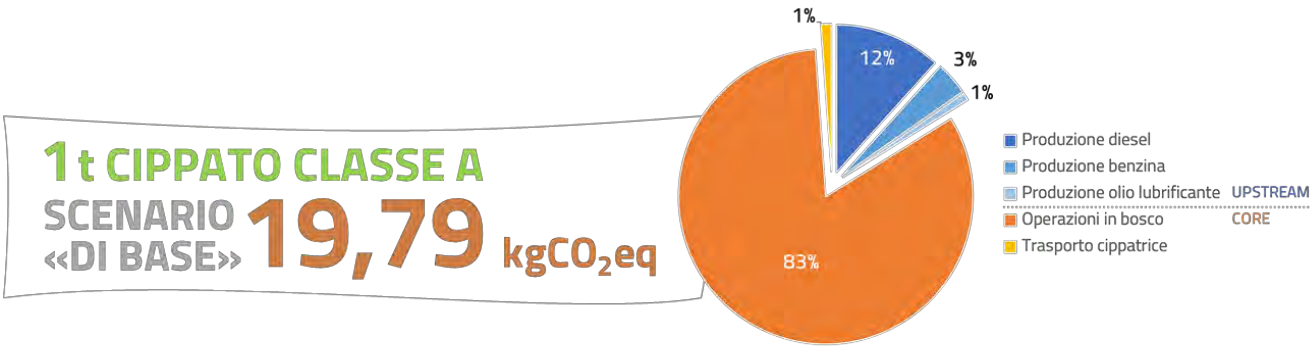
Materiale/flusso	Unità di misura	Scenario 1 (fertilizzazione)	Scenario 2 (no fertilizzazione)
Talee	kg/t	4	5,5
Fertilizzante	kg/t	1.071	-
Gasolio	kg/t	2,9	4,3
Pesticidi	kg/t	0,14	0,29
Emissioni "in campo"	$kgCO_2eq$ /t	21,4	0,28

5. Risultati

I risultati della valutazione di impatto mostrano che la produzione di **1 t di cippato di classe A** è caratterizzata da un valore complessivo di emissioni di ciclo di vita pari a **19,79 $kgCO_2eq$ nello scenario "di base"**.

Analizzando i contributi delle diverse fasi del ciclo di vita è possibile osservare come nello scenario "di base" un 16% circa sia da attribuire alla fase UPSTREAM e l'84% circa alla fase CORE. In termini di processi inclusi nei confini del sistema all'interno delle due fasi, invece, è evidente come il contributo principale sia dovuto alle emissioni dirette associate alle operazioni "in bosco" (83% circa del totale), seguite dalla produzione del diesel che costituisce il combustibile principalmente utilizzato per il loro svolgimento (12% circa del totale). Sono invece di entità minore e tra loro confrontabili (1-3% del totale) le emissioni associate alla produzione degli altri materiali utilizzati per le operazioni "in bosco" (benzina e olio lubrificante) e al trasporto della cippatrice presso il cantiere forestale (Figura 3).

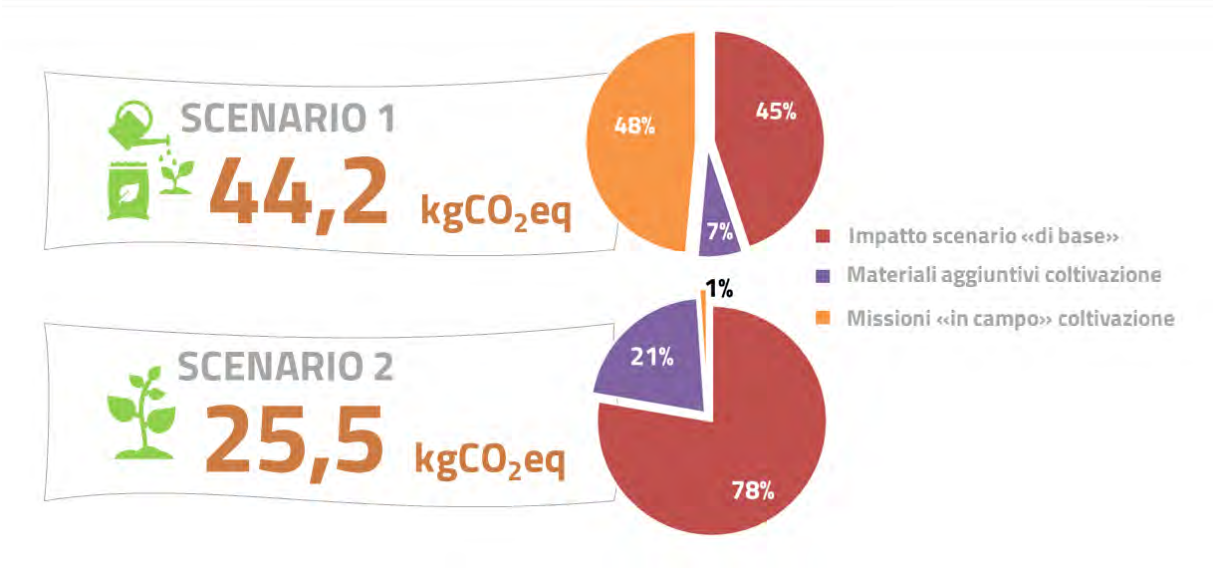
Figura 3. Contributi all'effetto serra ($kgCO_2eq$) dei processi dello scenario "di base".



La valutazione dello **Scenario 1** mostra un impatto complessivo pari a **44,2 $kgCO_2eq$**, indicando chiaramente la fertilizzazione (e, nel dettaglio, le emissioni "in campo" ad essa associate) come principale responsabile dell'incremento delle emissioni, con un contributo minore della produzione dei materiali aggiuntivi necessari per la fase di coltivazione. Lo **Scenario 2** è invece caratterizzato da un valore totale delle emissioni pari a **25,5 $kgCO_2eq$**, a cui contribuiscono in maniera apprezzabile i materiali aggiuntivi impiegati nella fase di coltivazione e in maniera trascurabile le emissioni derivanti dalle operazioni "in campo" (Figura 4).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 4. Risultati per lo Scenario 1 (coltivazione con fertilizzazione) e lo Scenario 2 (coltivazione senza fertilizzazione).



6. Discussione

Nell'ambito del presente studio, per la valutazione dello scenario "di base" sono stati utilizzati dati primari raccolti per una specifica filiera produttiva nazionale (caratteristica di un ambiente montano o similare) e per una determinata specie legnosa (abete), nonché dati di letteratura per quanto riguarda le operazioni "in bosco" derivanti da filiere assimilabili a quella oggetto di studio (per caratteristiche geografiche e tecnologiche).

I due scenari per la coltivazione delle piante definiti ai fini dell'analisi di sensitività per la fase di produzione, invece, sono stati modellati sulla base di dati di letteratura "medi" e non peculiari della filiera indagata (o di filiere assimilabili). Inoltre, tra le differenti possibilità, sono state scelte particolari modalità di coltivazione (propagazione vegetativa per talea) e di fertilizzazione (organica), che presentano caratteristiche specifiche e anche sensibilmente differenti da altre modalità produttive (ad es. produzione a partire da semi e fertilizzazione di sintesi).

I risultati complessivi della valutazione di impatto e, in particolare, le evidenze relative alla variabilità delle emissioni di ciclo di vita nei due diversi scenari ipotizzati per la produzione di 1 t cippato A (coltivazione con e senza fertilizzazione), sono pertanto da considerarsi come ragionevoli approssimazioni di una situazione produttiva reale, potenzialmente soggette ad una sensibile variabilità in funzione delle caratteristiche della filiera produttiva di partenza e del livello di dettaglio caratterizzante la modellazione della fase di coltivazione.

7. Conclusioni

Il settore delle biomasse solide, viste le caratteristiche che lo contraddistinguono, può essere considerato uno tra i più rilevanti ai fini della pianificazione energetica per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità a livello globale.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Nel contesto dell'UE a 27, in cui Il consumo di biocombustibili solidi ha fatto registrare anche nel 2020 un leggero incremento rispetto al 2019 nonostante le particolari condizioni generali degli ultimi anni, l'Italia rappresenta uno dei principali utilizzatori, sia in termini di consumo interno lordo di energia primaria, che di consumo di calore e produzione lorda di energia elettrica. Visti i recenti trend e accadimenti, a cui sono associati notevoli incrementi del prezzo delle fonti energetiche convenzionali e dell'incertezza di approvvigionamento delle medesime, è inoltre ragionevole immaginare un apprezzabile aumento dell'utilizzo dei biocombustibili nel breve-medio termine. La produzione di energia termica tramite tale fonte in impianti di medie-piccole dimensioni distribuiti sul territorio, infatti, risulta particolarmente interessante dal punto di vista economico per il consumatore, ma anche strategica per svincolare il sistema energetico nazionale da un modello di produzione centralizzato e dipendente dalle fonti convenzionali provenienti dall'estero.

Nel presente articolo sono stati valutati gli impatti associati alla produzione di cippato forestale di classe A con approccio LCA, sia in uno scenario "di base" (caso studio di una specifica filiera produttiva nazionale, rappresentativa in termini geografici e tecnologici di una produzione sviluppata in ambiente montano), che in due ulteriori possibili scenari di produzione, caratterizzati da differenti condizioni della fase di coltivazione (con e senza fertilizzazione).

I risultati della valutazione di impatto mostrano che, nello scenario "di base", la produzione di 1 t di cippato di classe A è caratterizzata da un valore complessivo di emissioni di ciclo di vita pari a 19,79 $kgCO_2eq$, con un contributo significativo della fase CORE e, in particolare, delle emissioni dirette associate alle operazioni "in bosco". Nello Scenario 1 (coltivazione con fertilizzazione) l'impatto complessivo è stato stimato in 44,2 $kgCO_2eq$ (2,2 volte circa l'impatto dello senario "di base"), con le emissioni "in campo" associate alla fertilizzazione quale principale causa dell'incremento delle emissioni, mentre nello Scenario 2 (coltivazione senza fertilizzazione) il valore totale delle emissioni è risultato pari a 25,5 $kgCO_2eq$ (1,3 volte circa l'impatto dello senario "di base"), con i materiali aggiuntivi impiegati nella fase di coltivazione come principali responsabili della variazione di impatto.

Nel complesso, nonostante potenzialmente suscettibili di una sensibile variabilità legata alle caratteristiche della filiera produttiva di partenza dello scenario "di base" e del livello di dettaglio adottato per la modellazione della fase di coltivazione, i risultati della valutazione di impatto possono a tutti gli effetti essere considerati ragionevoli approssimazioni di una situazione produttiva reale per il cippato di classe A.

Nonostante il confronto con le evidenze della letteratura esistente sia complicato a causa delle differenze anche sostanziali nelle caratteristiche delle filiere e delle modalità di svolgimento delle operazioni al loro interno, così come nelle specie di legno utilizzato, il cippato forestale di classe A sembra essere una fonte rinnovabile "competitiva" rispetto a fonti similari in ogni diversa modalità produttiva. A fronte dei risultati ottenuti, che riportati all'unità di energia termica utile indicano per la sola fase di produzione un impatto nell'ordine di 1 – 3 gCO_2eq/MJ, infatti, è possibile osservare per fonti analoghe, quali il pellet, un range di variabilità delle emissioni per tale fase ben più ampio e caratterizzato da valori più elevati (6 – 20 gCO_2eq/MJ).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Riferimenti bibliografici

1. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari, Forestali e del Turismo, 2019. Posizione del ministero delle politiche agricole alimentari, forestali e del turismo sul Piano Clima - Energia e sulla RED II. Disponibile online: https://www.politicheagricole.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/14187 (consultato in data 01/03/2022).
2. EUROBSERV'ER, 2021. Solid Biofuels Barometer 2021. Disponibile online: https://www.eurobserv-er.org/solidbiofuels-barometer-2021/ (consultato in data 01/03/2022).
3. D.LGS. 199/2021. Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili. Disponibile online: https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/30/21G00214/sg (consultato in data 01/03/2022).
4. Ministero dello Sviluppo Economico, 2019. Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima. Disponibile online: https://www.mise.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/2040668-pniec2030 (consultato in data 01/03/2022).
5. https://www.arcadia.enea.it/
6. http://www.pongovernance1420.gov.it/it/progetto/arcadia-approccio-ciclo-di-vita-nei-contratti-pubblici-e-banca-dati-italiana-lca-per-luso-efficiente-delle-risorse/
7. https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node/
8. UNI EN ISO 14040:2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
9. UNI EN ISO 14044:2018. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
10. Joint Research Centre, 2010. ILCD Handbook. General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance.
11. https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/legno-arredo.html
12. EPD® System, 2020. Product Category Rules: Basic products from forestry.
13. SCS Global, 2016. Product Category Rule Module for Roundwood.
14. IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 – Energy Disponibile online: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html (consultato in data 01/03/2022).
15. Giuntoli, J.; Agostini, A.; Edwards, R.; Marelli, L. Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions. Calculated according to the methodology set in COM(2016) 767, EUR 27215 EN, 2017, doi:10.2790/27486. Disponibile online: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Solid%20and%20gaseous%20bioenergy%20pathways.pdf (consultato in data 01/03/2022).
16. AA.VV. (2006). Pioppicoltura: produzioni di qualità nel rispetto dell'ambiente, Disponibile online: https://lombardia.confagricoltura.it/file_upload/lombardia/files/libretto_pioppicoltura.pdf (consultato in data 01/03/2022).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

17. https://agricoltura.regione.emilia-romagna.it/produzioni-agroalimentari/temi/bio-agro-climambiente/agricoltura-integrata/disciplinari-produzione-integrata-vegetale/Collezione-dpi/2019/disciplinari-2019
18. Corona, P.; Bergante, S.; Castro, G.; Chiarabaglio, P.M.; Coaloa, D.; Facciotto, G.; Gennaro, M.; Giorcelli, A.; Rosso, L.; Vietto, L.; Nervo, G., 2018. Linee di indirizzo per una pioppicoltura sostenibile. Rete Rurale Nazionale, Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria, Roma, ISBN: 978-88-99595-96-8.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

KID: dalla sostenibilità all'Internet of Bike

Fabio Bianconi [1], Marco Filippucci [1], Filippo Cornacchini [1*], Andrea Parisi [1], Giulia Pelliccia [1] and Marco Seccaroni [1]

[1] Università degli studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, via G. Duranti n°93.

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: filippo.cornacchini@gmail.com

Abstract: Il progetto KID ha come oggetto lo sviluppo di un quadriciclo elettrico a pedalata assistita a due posti posizionati in parallelo, che si inserisce in un contesto di sperimentazioni e progettualità inspirate alla valorizzazione della mobilità lenta e della sostenibilità. Il disegno prende spunto da numerose suggestioni, tra cui le più influenti sono senza dubbio il bambino nel ventre di una madre di Leonardo da Vinci, da cui deriva la forma protettiva a guscio attribuita al prototipo, e il Radiant Child di Keith Haring, immagine ispiratrice delle logiche sensoristiche e comunicative inserite nel quadriciclo. KID, infatti, è in grado sia di ricevere che inviare dati relativi all'ambiente, alle modalità di uso e all'utente stesso, dando vita ad una vera e propria *Smart Grid* in risposta alla sete di informazioni che caratterizza la nostra società. I dati raccolti saranno la base per lo sviluppo di azioni a favore della promozione territoriale locale, della valorizzazione dei beni paesaggistici, della sostenibilità e dell'educazione ad uno stile di vita salutare, concetti cardine della mobilità lenta. L'obiettivo è la promozione dell'accessibilità al territorio senza emissioni, raccogliendo dati, generando e accedendo a informazioni che, con il supporto di tecniche di modellazione e programmazione, si adattino agli interessi specifici dell'utente finale.

Keywords: Mobilità sostenibile, valorizzazione territoriale, monitoraggio ambientale, design

1. Introduzione

Da inizio Novecento e fino agli anni Cinquanta la bicicletta ha rappresentato in gran parte del mondo occidentale il primo e principale mezzo di trasporto individuale. Il rapporto tra modelli di ecosistemi dinamici in co-evoluzione [1] come il sistema bicicletta-società, ha attraversato nel corso della storia

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

un'alternanza di momenti di stabilità e fluttuazioni che ciclicamente ne hanno definito forme e strutture in linea con le necessità e le risorse del contesto nel quale avvengono. Il design e l'utilità delle biciclette sono stati soggetti, quindi, a una serie di trasformazioni non lineari regolate da "criteri di selezione" che hanno delineato una molteplicità di strade per lo sviluppo del design e delle funzionalità del mezzo, rapportate in particolare a periodi storici dove è forte l'esigenza della società di possedere un nuovo metodo di spostamento rapido. Guardando la sua lunga storia, quindi, si può definire il sistema bicicletta come complesso ed è difficile definire chi sia stato il padre di questo mezzo. Il primo veicolo a due ruote sterzante fu la macchina da corsa in legno inventata dal barone Karl von Drais nel 1817 [2]. Un mezzo relativamente comodo e sicuro dove il pilota sedeva in posizione centrale con i piedi che toccavano terra per dare propulsione per lo spostamento, la struttura semplice era composta da due ruote in legno vincolate insieme da cerchiatura di ferro e collegate tramite una dorsale in legno. Denominata poi "Draisine", divenne l'elemento trainante per lo sviluppo di ulteriori modelli tra i quali ricordiamo la bicicletta di Gompertz (1821), di McMillan (1839), di Fisher (1853) [3], modelli che cercavano di piegare la funzionalità del mezzo alle necessita riscontrate nel tempo e di apportare leggere migliorie per quanto riguarda il metodo di propulsione tramite leve: i nuovi sistemi non ebbero il successo sperato per deficit in sicurezza e comodità, ma evidenziarono la necessità di bilanciamento durante la pedalata [4]. Dalle esigenze di innovazione e trasformazione che hanno definito nel corso della storia la morfologia evolutiva della bicicletta fino ai giorni contemporanei è nata l'idea di KID, un progetto di un quadriciclo elettrico a pedalata assistita con le postazioni poste in parallelo. Esso si presenta come un'idea per innovare le bici contemporanee e si inserisce in un contesto di sperimentazioni inspirate alla valorizzazione della mobilità lenta e della sostenibilità e come un'occasione per indagare sul valore della rappresentazione e sulla potenza immaginifica che si condensa nei segni.

2. Concept

Il semplice concetto di accostamento di due biciclette ha come auto ipotesi la necessità di mantenere come fondamento quelle condizioni essenziali all'estetica attuale del mezzo, imponendo leggerezza e dinamicità delle forme e soluzioni ergonomiche di rapporto fra i vari elementi che la compongono. Esso, infatti, è in grado di ricevere e inviare dati relativi all'ambiente, alle modalità d'uso e all'utente stesso, dando vita ad una *Smart Grid* come risposta al bisogno contemporaneo di accumulo di informazioni e digitalizzazione delle stesse. La presente proposta mira quindi a definire anche una rete intelligente per promuovere la modalità dolce come strategia di valorizzazione del territorio e del paesaggio attraverso il KID, creando un'accessibilità e una connettività urbana economica, accessibile e sicura con un impatto ambientale minimo o nullo.

KID si presenta come un "concept design", in cui il disegno dell'idea racchiude i significati simbolici ma anche gli aspetti più tecnici, in una rappresentazione interdisciplinare che coinvolge contemporaneamente il design e la meccanica. Il nome, oltre a prendere spunto e celebrare Karl von Drais e la sua "drasina", richiama anche il brano "New Kid in Town" dell'album Hotel California degli Eagles: la volontà è quella di sviluppare un concept semplice ma chiaro ed evocativo, in cui si trae

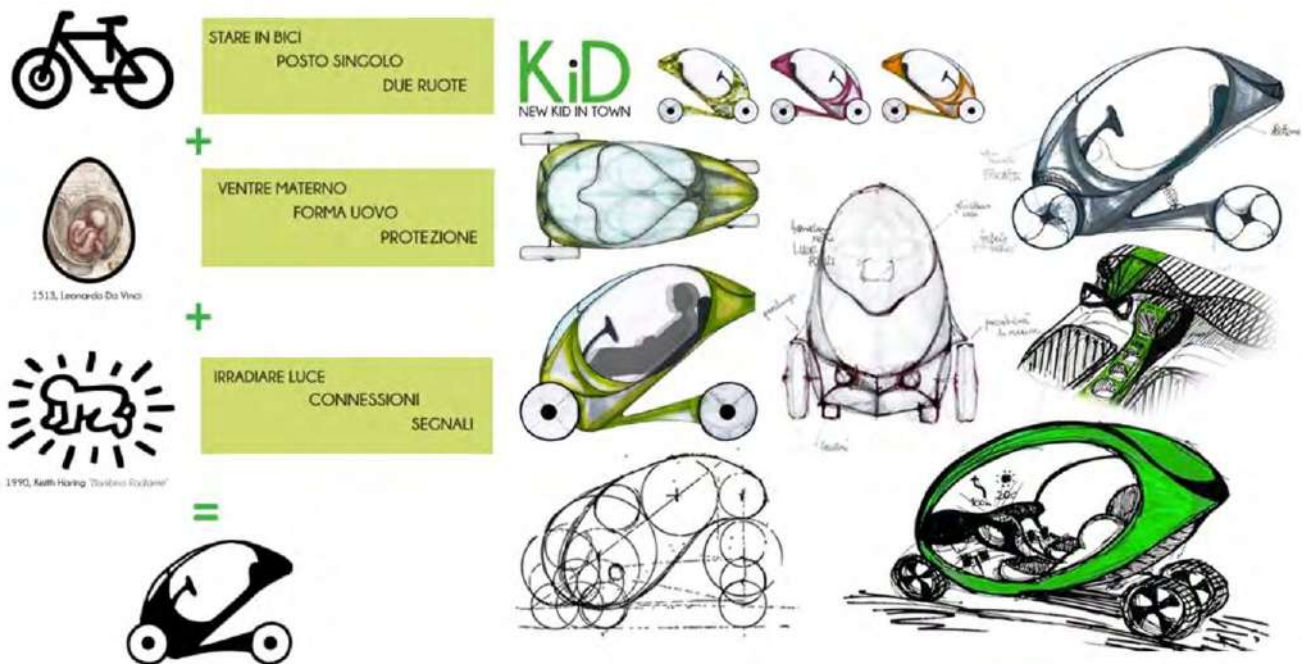
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

ispirazione dalla storia e dalla cultura degli anni Settanta per caratterizzare un mezzo futuristico e all'avanguardia dal punto di vista tecnologico.

La bicicletta evoca spesso nell'immaginario comune l'idea di un mezzo poco sicuro, privo di protezioni dall'ambiente circostante, sia per quanto riguarda le condizioni metereologiche sia per le possibili interazioni con altri mezzi con cui spesso si trova a dover condividere il percorso. Da qui nasce la necessità di caratterizzare il design della nuova bicicletta in modo che comunichi l'idea di protezione, sicurezza e separazione dalla strada. Il bambino nel ventre di una madre di Leonardo (Leonardo da Vinci, Codice Windsor, 1511, Royal Library, n. 12571) racchiude in sé tutti questi concetti: il bambino è protetto geometricamente da un ovolo che infonde contemporaneamente un senso di equilibrio ma anche di dinamicità, trattandosi di una curva policentrica a più raggi. Il mezzo originario, limitato dal punto di vista dell'evoluzione tecnologica, aspira quindi a sfruttare le logiche connettive della contemporaneità [6] che trovano il loro paradigma nel Radiant Child di Keith Haring [7]. KID è quindi la materializzazione simbolica di "un bambino raggiante" [8] che riceve e invia segnali e relazioni, aprendo la strada all'innovazione di un mezzo che poco si è discostato dalle geometrie e dalle funzionalità tradizionali. Il processo progettuale ha preso quindi in esame numerosi scenari, a partire da ampie considerazioni legate agli strumenti digitali [9–13] che sono poi stati impiegati nella modellazione 3D del mezzo.

A 200 anni dall'invenzione della bicicletta moderna, KID si configura quindi come proposta di un mezzo a quattro ruote biposto con seduta affiancata supportato da pedalata assistita. A differenza di altre ricerche contemporanee, molte delle quali diffuse nel continente asiatico [14–16], la pedalata assistita non sfrutta motori a combustione, ma propone soluzioni tecnologiche di tipo meccanico legato alla trazione a pedali e all'ottimizzazione dei pesi e dei fattori aerodinamici, in una sorta di evoluzione del concetto e delle forme del "risciò".

Figura 1. Elaborati per lo sviluppo del concept.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 2. Biciclette scarsamente utilizzate nel comune di Perugia.



3. Progetto

La richiesta progettuale nasce dallo studio sul Comune di Perugia delle motivazioni per cui i mezzi messi a disposizione tramite bike-sharing dall'amministrazione non vengano utilizzate dai cittadini e dai turisti.

Per rispondere al quesito è stato necessario predisporre un questionario che aveva due focus:

- Individuare le criticità delle attuali biciclette comunali;
- Comprendere le caratteristiche necessarie per la bicicletta del futuro.

Dal sondaggio è emerso che la bicicletta attuale ha due tipologie di criticità: la prima è da ricollegare al design, in particolar modo al colore bianco e alla presenza del cestino anteriore che non hanno ricevuto il gradimento atteso. La seconda tipologia è causata dalle rastrelliere, che si prestano molto al vandalismo e quindi sono viste come esempio di degrado urbano, e alla loro distribuzione nel comune, non è ottimale in quanto raramente coerente con i luoghi ricettivi e di interesse.

Secondo gli intervistati, la bicicletta del futuro ha la necessità di condivisione; infatti, la bicicletta è vista come un mezzo da utilizzare insieme e quindi che abbia due posti. È emersa anche l'esigenza di una maggiore protezione durante l'utilizzo e, infine, quella di essere connessi.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Da quest'ultima necessità nasce la suggestione principale del progetto, ovvero non solo rendere connessi i ciclisti, ma anche la stessa bicicletta attraverso l'installazione di sensori ambientali in modo che possa rilevare in tempo reale i parametri ambientali durante gli spostamenti.

Parallelamente è stata richiesta da parte della popolazione un ripensamento del posizionamento dei punti di deposito delle biciclette. Emerge come predominante la necessità di abbinare le rastrelliere a strutture ricettive come bar e ristoranti. Il mezzo e la sua dislocazione nella città rappresentano sia uno strumento di valorizzazione territoriale ma anche di monitoraggio.

Il progetto di ricerca nella prima parte ha come obiettivo la definizione di un nuovo design. La progettazione utilizza un approccio di tipo form-finding, dove le regole geometriche sono vincolate dai limiti della ciclistica e dal raggio di curvatura massimo dei pannelli solari in copertura. L'ottimizzazione mira ad individuare l'insieme di soluzioni migliori per il confort visivo del guidatore. Dal fronte di Pareto è stata individuata la soluzione migliore in correlazione con la superficie minima della struttura.

La soluzione scelta è stata poi ingegnerizzata con l'obiettivo di ricreare una replica in scala 1:20 in modo da essere stampata in 3D. È stata utilizzata una stampa MJF, materiale PA12, in modo da essere testata in galleria del vento per simulare il suo comportamento ad una velocità reale di 40km/h.

Con i risultati ottenuti è stato migliorato il design dal punto di vista aerodinamico andando ad utilizzare una tassellazione di Voronoi.

Figura 3. Alcuni esempi ottenuti attraverso l'approccio generativo.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 4. Modello stampato in 3D testato nella galleria del vento. Modello ottimizzato in funzione dei dati ottenuti in galleria del vento.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Applicazioni future

La realizzazione di KID rappresenta un'occasione imperdibile per allargare gli orizzonti progettuali ad una scala più ampia, in cui la nuova idea di bicicletta diventa perno centrale di connessione e valorizzazione territoriale. Di pari passo all'avanzamento del disegno tecnico del mezzo, infatti, KID è stato contestualizzato in numerose ricerche e iniziative, come ad esempio ricerche di base (FIRB), proposte paesaggistiche (Contratto di Paesaggio del Lago Trasimeno) [17,18], cooperazioni territoriali (Green Community del Chiascio) [19] e per progetti regionali (La via di Francesco) [20].

L'internet of bike [21–23] rappresenta, in primo luogo, una rivisitazione del concetto di mobilità dolce attraverso l'inserimento di un approccio tecnologico a servizio della socialità. Attraverso una sensoristica adeguatamente selezionata, la bici è in grado, infatti, di raccogliere informazioni utili alla collettività e reinterpretarle analiticamente, come ad esempio il monitoraggio ambientale e della salute. La strategia alla base di questo approccio è la promozione di una nuova visione attenta agli aspetti del benessere personale, che sono sempre strettamente collegati al rapporto tra individuo e ambiente e che, quindi, portano verso la scoperta del paesaggio e delle potenzialità attrattive del territorio coinvolto [24]. L'idea progettuale è di mettere a disposizione il nuovo veicolo predisponendo una rete strategica di stazioni studiata per favorire una riorganizzazione dello spazio e del territorio, in modo da promuovere un'accessibilità green ai luoghi e una esperienza personalizzata grazie ai dati raccolti ed elaborati dagli algoritmi di IA.

Il sistema proposto porta anche ad una rivisitazione dell'organizzazione a livello amministrativo. Al centro del progetto va inserita la costruzione di una strategia rivolta agli enti pubblici che controllano il territorio e che hanno la necessità di essere affiancati nelle logiche evolutive rivolte all'ottenimento di importanti obiettivi, come la decarbonizzazione della società e il marketing territoriale. La promozione di nuovi percorsi per conoscere e monitorare il paesaggio, l'ambiente e suoi aspetti positivi deve essere perseguita coinvolgendo l'utenza finale e quindi le comunità. I cittadini condividono necessità, possibilità, servizi, formando così Smart Communities per uno sviluppo dell'innovazione sociale, anche grazie al loro coinvolgimento, entrando così in una logica di Citizen Science tramite la partecipazione nelle attività di raccolta di dati e produzione di informazioni, con l'obiettivo di ampliare la consapevolezza personale, la conoscenza scientifica di ciò che li circonda e quindi migliorare la qualità della vita. Viene quindi a crearsi una *Smart Grid* collegata ad un mezzo di trasporto che promuove i concetti di sostenibilità e benessere e che si inserisce perfettamente nelle dinamiche supportate dal tema delle health cities.

La proposta fin qui descritta risponde in modo ottimale al nuovo approccio rivolto verso lo sviluppo territoriale, in risposta anche all'attuale situazione socioeconomica, che trova fondamento nei sei pilastri indicati dalla comunità europea (transizione verde, trasformazione digitale, crescita intelligente, sostenibile e inclusiva, coesione sociale e territoriale, salute e resilienza economica). Si comprende così l'importanza dei concetti che possono essere collegati al progetto KID e di cui è esso stesso promotore, al fine di attivare un processo di esaltazione delle qualità dello spazio rurale e per riqualificare le strutture ricettive dislocate nel territorio: il coinvolgimento delle attività locali può essere favorito dall'installazione di stazioni di ricarica elettriche, legandosi chiaramente alle energie

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

rinnovabili, oppure tramite la promozione dei prodotti tipici e dei servizi ricreativi che le aziende possono offrire e che KID, tramite l'elaborazione dei dati raccolti, può individuare per lo specifico utente.

5. Conclusioni

Il progetto di ricerca qui presentato dimostra come il "design thinking" collaborativo e gli scenari urbani possono diventale una forma di "tecnologia sociale" avente la capacità di contrapporsi alle resistenze locali e cambiare il modo in cui la comunità viene coinvolta nei processi di innovazione. La rivisitazione in chiave tecnologica e digitalizzata della bicicletta diviene, quindi, uno strumento che mette in comunicazione due mondi antipodali, fisico e virtuale, creando flussi biunivoci di informazioni e di valori, unendo persone e luoghi. KID nasce non come un progetto chiuso nella propria bolla, viene sviluppato per mettere in relazione una molteplicità di orizzonti, un progetto multidisciplinare che tocca vari ambiti della progettazione, della meccanica, di design, di rappresentazione, di sostenibilità ambientale, che hanno alimentato proposte di ricerca per ambiti paesaggistici di vario genere. Oggi, infatti, i metodi di pianificazione territoriale sono sempre più volti verso una progettazione integrata tra infrastrutture e paesaggio, espressione di un'ottica unitaria, di un approccio multidisciplinare che derivano da una rinnovata consapevolezza delle reciproche interazioni e dell'influenza che hanno le une sulle altre.

Soltanto quando architettura, mobilità e paesaggio vengono sinergicamente guidati nella stessa direzione, allora le infrastrutture assumono ulteriore importanza, divenendo lo strumento tramite il quale ridurre la marginalizzazione a favore dell'inclusione e dell'interazione. L'innovazione tecnologica non è però solo meccanica, ma è una proposta culturale di come vivere i cammini, ponendo al centro il paesaggio e l'uomo, enfatizzando il valore della relazione nel mettersi l'uno accanto all'altro, lo stare vicini, in simbiosi. La strategia del progetto è fondata su obiettivi volti al miglioramento della salute e dello stile di vita, elementi che comporteranno cambiamenti comportamentali nella vita quotidiana, necessari per lanciare una transizione radicale verso una mobilità sostenibile e accessibile. KID si propone quindi come un nodo chiave dall'approccio congiunto fra mobilità fisica e trasporti urbani sostenibili, uso del territorio e connettività digitale. Uno degli obiettivi è quindi promuovere la mobilità territoriale senza generare inquinamento e scarti dannosi, raccogliendo contemporaneamente dati e generandone di nuovi. Quest'ultimi, tramite il supporto di tecniche di modellazione e algoritmi di IA, concorrono poi a guidare l'utente secondo i suoi interessi. Il sistema proposto offre inoltre un valido supporto per le pubbliche amministrazioni nella costruzione di una strategia per migliorare il processo di decarbonizzazione della società, con la promozione di stili di vita salutari e sostenibili, proponendo percorsi per conoscere e monitorare il territorio, l'ambiente e le sue qualità. Questa proposta segue, quindi, il cammino della società contemporanea, mutando il proprio corpo a favore di una digitalizzazione dalla quale è possibile reperire molteplici dati, che possono essere considerati come elementi portanti per lo sviluppo del futuro e per trovare strategie per il loro utilizzo da parte degli utenti finali.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

References

[1] Van Nierop, O. A., A. C.M. Blankendaal, & C. J. Overbeeke, "*The Evolution of the Bicycle: A Dynamic Systems Approach,*" J. Des. Hist., 10(3), 1997, pp. 253–267.

[2] Ebelin, H., *Der Freiherr von Drais: Das Tragische Leben Des "Verriickten Barons,"* Karlsruhe, 1985.

[3] McGurn, J., *On Your Bicycle: An Illustrated History of Cycling*, London, 1987.

[4] Malizia, Fabio, & Bert Blocken, "*Bicycle Aerodynamics: History, State-of-the-Art and Future Perspectives,*" J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 200, 2020, p. 104134.

[5] Kobayashi, Keizo, *Histoire Du Vélocipède de Drais À Michaux, 1817-1870 : Mythes et Realites*, Bicycle Culture Center, Tokyo, 1993.

[6] van Dijck, José, *The Culture of Connectivity: A Critical History of Social Media*, Oxford University Press, Oxford, 2013.

[7] Haring, K, & RC Roth, *Keith Haring: Journey of the Radiant Baby*, Bunker Hill Publishing Inc, 2006.

[8] Buchhart, D, R Montez, R Ricard, L Yablonksy, & L Warsh, *Keith Haring| Jean-Michel Basquiat: Crossing Lines*, Princeton Univ Pr, 2022.

[9] Bianconi, F, & M Filippucci, *WOOD, CAD AND AI: Digital Modelling as Place of Convergence of Natural and Artificial Intelligent to Design Timber Architecture*, 2019.

[10] Bianconi, F., M. Filippucci, & A. Buffi, "*Automated Design and Modeling for Mass-Customized Housing. A Web-Based Design Space Catalog for Timber Structures,*" Autom. Constr., 103, 2019, p. .

[11] Filippucci, Marco, *Rappresentazione Al Quadrato. Il Disegno Generativo per Il Rinnovamento Della Geometria Descrittiva*, Gangemi, Rome, 2012.

[12] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, "*Generative Education: Thinking by Modeling/Modeling by Thinking,*" *Architectural Draughtsmanship*, Springer, Cham, 2017, 2017, pp. 1009–1020.

[13] Bianconi, F., M. Filippucci, & S. Catalucci, "*LINE AND POINTS. Critical Analysis of Evolution of Archaeological Survey in Forty Years of Experiences in Umbria,*" DISEGNARECON, 10(19), 2017, pp. E4–1–E4.20.

[14] Mazumder, M., & M. Roy, "*Role of Battery-Operated Rickshaw in Income and Employment Generation of Urban Bangladesh: A Study of Chittagong City.,*" Glob. J. Menag. Bus. Res., 2018, p. .

[15] Salmeron-Manzano, E., & F. Manzano-Agugliaro, "*The Electric Bicycle: Worldwide Research Trends.,*" Energies, 11 (7), 2018, p. .

[16] Jain, N., & S. Gupta, "*Estimating Drive Cycle for E-Rickshaws Using Real World Operating Scenarios for Overall Powertrain Improvements,*" SAE Tech. Pap., 2019, p. .

[17] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Stefano Andreani, "*La Partecipazione per La Riconnessione Fra Campagna e Città. Il Ridisegno Delle Relazioni Attraverso Il Contratto Di Paesaggio e La Strategia Territoriale Del Cibo,*" *La Prossima Città*, G.F. Ferrari, ed., Mimesis, Milano, 2017, 2017, pp. 651–670.

[18] Bianconi, Fabio, Ambra Ciarapica, & Marco Filippucci, "*Strategie per Un Governo Partecipato Del Territorio. Progetti Integrati d'area, Atlante Degli Obiettivi e Contratti Di Paesaggio Della*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Regione Umbria," *Atti Del XIX Conferenza Nazionale SIU. Cambiamenti. Responsabilità e Strumenti per l'urbanistica Al Servizio Del Paese*, Plenum Publisher, 2016, 2016, pp. 1567–1575.

[19] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Andrea Fancelli, "*Regenerating Chiascio: The First Green Community in Umbria,*" *De- Sign Environment Landscape City*, Genova University Press, 2020, 2020, pp. 75–88.

[20] Bianconi, Fabio., "*Connections: Digital Revolution in the Post-Truth Landscape,*" *Digital Draw Connections. Representing Complexity and Contradiction in Landscape*, Springer, ed., 2021, 2021, pp. 3–55.

[21] Karanikola, Paraskevi, Thomas Panagopoulos, Stilianos Tampakis, & Georgios Tsantopoulos, "*Cycling as a Smart and Green Mode of Transport in Small Touristic Cities,*" Sustain., 10(1), 2018, pp. 1–18.

[22] Southworth, Michael, "*Designing the Walkable City,*" ascelibrary.org.

[23] Moudon, Anne Vernez, & Chanam Lee, "*Walking and Bicycling: An Evaluation of Environmental Audit Instruments,*" Am. J. Heal. Promot., 18(1), 2003, pp. 21–37.

[24] Bianconi, Fabio., & Marco. Filippucci, *Landscape Lab. Drawing, Perception and Design for the Next Landscape Models*, Springer Nature, Basingstoke, 2019.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Use of biomass ashes for the treatment of expansive clayey soils.

Paola Comodi [1,*], Costanza Cambi [1], Maximiliano Fastelli [1], Elia Pandolfi Balbi [1], Paola Sassi [2], Leonardi Pioppi [2], Azzurra Zucchini [1], Gianluca Cavalaglio [3] and Franco Cotana [4]

[1] Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia, 06121 Perugia, Italy.
[2] Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie, Università di Perugia, I-06123 Perugia, Italy.
[3] Dipartimento di Giurisprudenza, Università Telematica Pegaso, 80132 Napoli, Italy.
[4] Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, 06121 Perugia, Italy.

* E-Mail: paola.comodi@unipg.it

Abstract Clayey soils typically have the requirement to demonstrating undesirable engineering behavior due to their poor physical/mechanical characteristic. Clay soils are often treated by adding chemical agents able to improve their physical and mechanical characteristics. Lime/cement binders provide excellent results, but their production emits significant amounts of greenhouse gases. In this work, intending to create naturally activated soils and repurpose waste we used three different kind of biomass ash generated by pellet, olive and grapevine combustion as stabilizing agents for clayey soil. The mechanical effects of the treatment were evaluated using confined compressive tests at different curing times. When necessary, the ashes were activated by a sodium-based alkaline solution. The evolution of the clay ashes was evaluated through X-ray powder diffraction (XRPD), infrared spectroscopy (FT-IR) and scanning electron microscopy (Fe-SEM). The compressibility was determined utilizing edometric tests on raw and treated samples. Rietveld analysis of the XRPD results allowed a quantitative assessment of the amorphous phase. The XRPD results did not show relevant changes both in the mineralogical phases and amorphous content along curing time, with exception on the illite amount. The FT-IR spectroscopy shows an evolution of the Si-O vibrational mode positions and of their shapes. The EDS-SEM analysis shows an evolution of the Ca/Si distribution and grow of amorphous gels/nanocrystals of C-S-H. This evidence confirmed that the pozzolanic reaction occurs from the dissolution of the clay minerals with the growth of cement phases. These preliminary results indicate that selected biomass ashes could be implemented as an environmentally sustainable binder.

Keywords: Biomass fly ash, chemo-mineralogical evolution, clayey soil, mechanical behavior

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

It is well known that the scarce physical and mechanical properties of clay soils are a major problem in geotechnical engineering. In addition, quarry materials are becoming scarce, and are not considered to be products with a good environmental impact in relation to the expansion of quarries and the remoteness of these places from construction sites, which increases their transport costs and related greenhouse gas emissions [1]. Clay soils are therefore often treated with chemical agents such as lime and/or cement which act as binders and drastically improve their geotechnical behavior [2–6]. On the other hand, the production of these binders generates a high number of greenhouse gas emissions into the environment [1,7], hence the search for more environmentally sustainable materials that can fall within a circular economy to reduce their impact. Biomass ash is the residue from the combustion of plant material and is characterized by great variability in chemical composition. In the coming years there will be an increase in the use of biomass to reduce dependence on traditional fuels, with the consequent growth of new waste, biomass fly ash [8]. However, this type of material has been used with excellent results in agriculture and concrete manufacturing [9,10]. Recently, different kind of biomass ashes have been also investigated, with different results, as possible soil binders. Some experiments have recently been carried out to improve the technical properties of clay soils by using fly ash in a highly alkaline environment, where the dissolution of the aluminosilicate source from clay soils could lead to the formation of calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminum silicate hydrate (C-A-S-H) compounds [11,12]. How this mechanism occur is not well understand and this works is focused into the investigation of the solid-state reaction occurring in a plastic clayey soil when different kind of biomass ashes are adding. Among the different analyzed ashes previous characterized by Comodi et al. [13], were selected as possible binders those that, based on their chemo-mineralogical composition, which make more suitable calcium, silica, and alumina sources. The ashes were activated by a sodium-based alkaline solution. The mechanical effects of the treatment were evaluated by means of confined compressive tests at different curing times, up to 28 days. The evolution of the clay ashes mixtures on the chemo-mineralogical point of view was evaluated by means of X-ray diffraction powder diffraction (XRPD) data, and Rietveld spectra analysis to determine the mineralogical quantitative composition as well the amorphous content, Fourier-transform infrared spectroscopy (FT-IR) to collect high-resolution spectral data over a wide spectral range (from 300 to 4000 cm^{-1}), and to follow the evolution of the structural and/or chemical changes of functional groups, namely to identify structural or chemical changes of the molecule during curing time. In addition, Field Emission Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersion Scanning system (FE-SEM-EDS) allowed to observe the micro-nano textural characteristics of the mixtures and their chemical composition evolution at different time.

2. Materials

The clay used in this work, hereafter called **PR** soil, comes from a quarry sited in the Parma province (Italy). Results of XRPD analyses shows that the main minerals are quartz (14.51 wt %), calcite (16.6 Wt %) and illite (25.85 Wt%) with an amorphous content of 37.8%. Three types of biomass ashes, derived from the combustion of Grapevine (**GrA**), Pellet (**PeA**) and Olive tree pruning (**OlA**) were characterized in a previously study where accurate chemo-mineralogical analyses of these samples were carried out [13]. The chemistry of the studied fly ashes indicates that the main component for all of them is CaO,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

followed by SiO_2 and then by Al_2O_3 or, in one case, by MgO. The abundance of SiO_2, Al_2O_3 and CaO, suggest that these ashes can be considered as potential aluminosilicate source and can be suitable as stabilizing agents for clayey soils. A summary of the chemical properties of fly ash used is reported in Table 1 with the sample codes used in this paper. By adding the 3 selected biomasses in 20 wt% to the clay soil discussed above we created 3 ash-clay mixtures, studied in this work. In addition, an NaOH activator indicate with code **GEOS** was added to create and alkaline environment, essential to bring into solution silica and alumina component.

Table 1. Summary of chemical composition and origin of selected biomass ash used in this work. Data information were taken from Comodi et al., [13].

Code	Type	Origin	Major elements (in oxide wt%)												
GrA	Biomass ashes	Grapevine prunings, Torgiano (PG) Italy	**NaO**	**Cl**	**Mn**	**K_2O**	**MgO**	**SiO_2**	**Cr_2O_3**	**FeO**	**CaO**	**Al_2O_3**	**P_2O_5**	**TiO_2**	**Total**
			0.94	0.0	0.13	1.78	9.14	26.19	0.0	2.34	44.26	5.52	8.86	0.32	99.5
PeA	Biomass ashes	Wood pellet	0.11	0.0	1.11	0.0	32.4	16.51	0.0	2.76	37.21	5.54	3.50	0.2	99.4
OlA	Biomass ashes	Olive tree prunings	0.58	0.0	0.12	4.94	3.85	27.95	0.0	2.89	43.31	7.90	7.83	0.35	99.8

3. Methods

3.1 Geotechnical analyses

The Eades and Grim test was performed on PR soil to assess the quantity of lime necessary to reach the stabilization field. The test was performed according to the ASTM D6276 Standard. Proctor like compaction tests were performed on both raw PR soil and on PR/ashes mixtures with the final goal to build compaction curves of raw and treated soils crossing with each, so to define at what water content it is possible to prepare samples of raw soil and PR/ashes mixtures with the same compaction degree (ρ_d) and void ratio (e). Compressibility properties of both raw PR soil and PR/ashes were measured by means of oedometer tests performed on the samples selected based on the compaction test results. All tested samples had the same water content and void ratio. Tests were performed in unsaturated conditions; however, no suction measurements were performed before and during the tests. Compression tests were performed on treated materials at different curing times, namely 1, 7, 14 and 28 days. Compressibility properties of both raw PR soil and PR/ashes mixtures were measured by means of oedometer tests performed on the previously compacted samples, selected on the basis of compaction test results. Tests were run in unsaturated conditions; however, no suction measurements were performed before and during the tests.

3.2 Chemo-mineralogical analyses

The quantitative mineralogical compositions of the mixtures, as well the amorphous content, were obtained with XRPD, collected using a Bragg-Brentano θ- 2θ diffractometer (Philips PW 1830, radiation

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

$\lambda_{CuK\alpha}$ = 1.54184 Å, 40 KV and 30 mA) in the 3°-80° [2θ] range with an angle step scan of 0.02° and a step time of 20 s. Quantitative Phase Analyses (QPA) were performed using Rietveld method [14] and Quanto software [15]. The amorphous content was calculated adding to the samples 10 wt% of crystalline silicon as external standard. The quantification of the amorphous content was performed following the strategy described in Balic-Zunic et al. [16] The starting atomic co-ordinates and cell parameters were taken from the American Mineralogist Crystal Structure Database (AMCSD) [17]. Micro-nano-textural evolution of the samples at different curing time were observed by using a Fe-SEM-EDS analyses to measure the semi-quantitative chemical composition of the samples. A FE-SEM LEO 1525 with ZEISS angle-selective backscatter detector was used for imaging materials at different scale, from granular to sub-granular to nanoscale, and GEMINI column for chemical analysis. FT-IR spectra in an Attenuated Total Reflectance (ATR) configuration were made using an Alpha (Bruker Optics) spectrometer equipped with a GLOBAR source, a ROCKSOLIDTM, a KBr beam-splitter, an RT-DLATGS detector and a diamond crystal. The Opus 7.5 Bruker Optics software was used for spectral measurements and analysis. Data were recorded in the spectral range from 300 to 4000 cm^{-1} with a spectra resolution of 2 cm^{-1} and averaging 64 scans acquisition. Collected spectra were corrected using the Opus 7.5 routine for water vapor.

4. Results

4.1 Geotechnical analyses

Results of Eades Grim test performed on mixture of PR/lime (used as a reference) and PR/ashes are shown in table 2.

Table 2. Results of Eades and Grim tests performed on Measured pH adding lime and *GRA*, *PeA*, *OlA* ashes in different percentage (in wt%) to PR clay.

Lime	pH	GrA	pH	PeA	pH	OlA	pH
2%	12.10	2%	8.97	2%	9.96	2%	8.98
3%	12.26	3%	9.25	3%	10.59	3%	8.97
4%	12.36	4%	9.39	4%	11.04	4%	9.19
5%	12.39	5%	9.57	5%	11.31	5%	9.34
6%	12.40	6%	9.70	6%	11.59	6%	8.57
--	--	10%	9.44	10%	12.05	10%	9.7
--	--	20%	---	20%	12.5	20%	9.39

The conventional interpretation of this test for the PR/lime mixture indicates that, for PR soil, the minimum amount of lime required to enter the stabilization field is 6%, as this lime percentage leads the pH up to 12.4. We applied the same concept to the PR/ashes mixtures, preparing them with ashes amounts up to 20% of the dry weight of soil. It was found out that, although all mixtures generate an alkaline environment, the only one in which pH exceeds the minimum value required to enter the stabilization field (12.4), is the PR/PeA mixture. Based on the Eades and Grim results four ash-clay mixtures were created. Each ash was added to PR soil in amount equal to 20 wt% of soil. Following

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

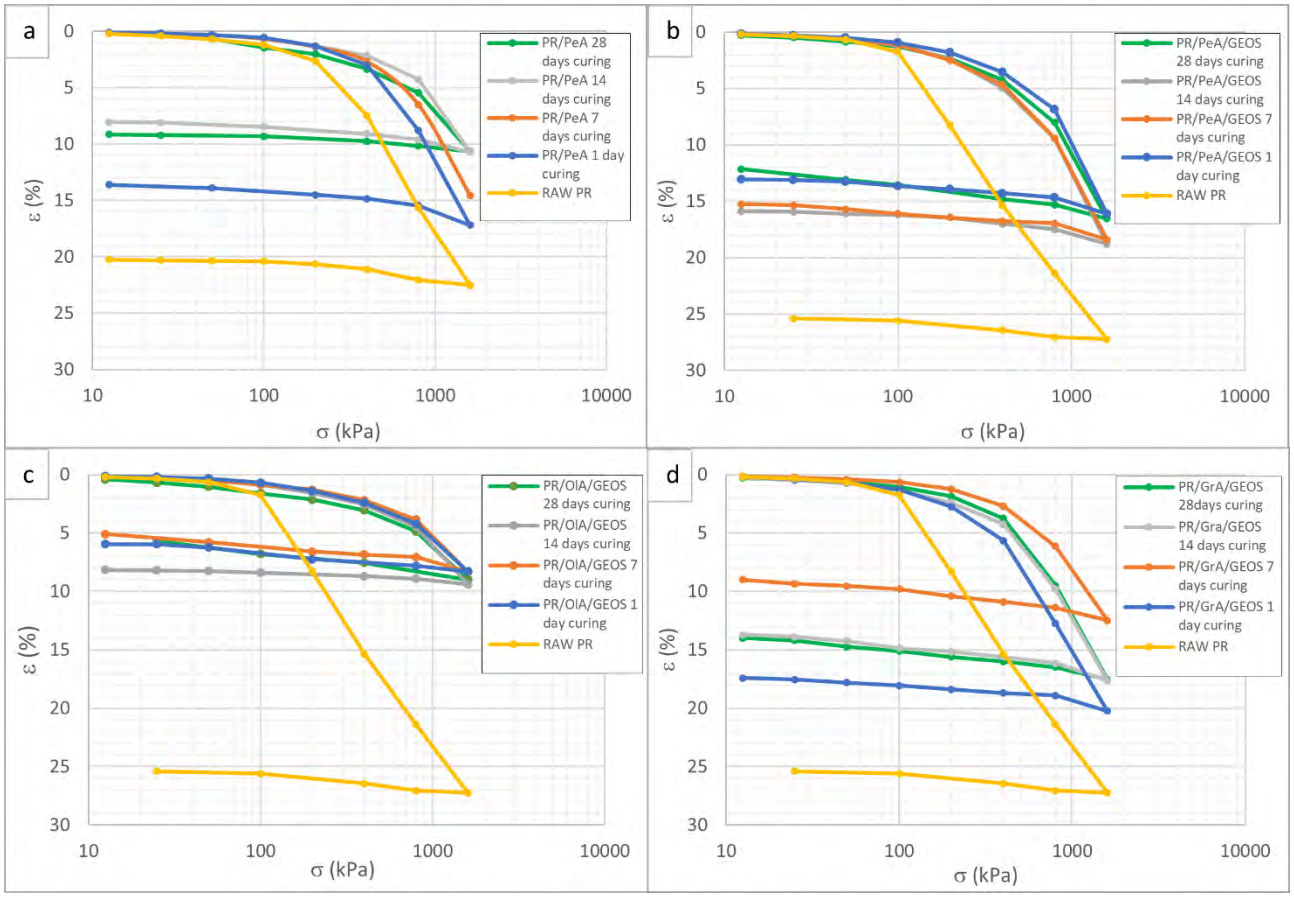
Vitale et al. (2017) **GEOS** activator was added to PR/GrA, PR/PeA and Pr/OlA in amount equal to 50 wt% of ash, to increase the alkalinity.

So, the samples names are: (1) **PR/GrA/GEOS** abbreviation indicating clay soil with added grapevine pruning ash and activator; (2) **PR/OlA/GEOS** abbreviation indicating PR clay soil with added olive pruning ash and activator and (3) **PR/PeA/GEOS** abbreviation indicating PR clay soil with added wood pellet ash and activator.

4.2 Compression tests

The compression curves of raw PR, **PR/PeA/GEOS, PR/OlA/GEOS** and **PR/GrA/GEOS** mixtures determined on samples with a water content of 27% and a void ratio of 1.1 are reported in figure 1.

Figure 1. Compression curves of raw PR and PR/OlA/GEOS (a); raw PR and PR/PeA/GEOS (b): raw pr



and PR/GrA/GEOS (c) mixtures at different curing times.

For the sample treated with PeA only (fig. 1.a) an improvement in terms of one-dimensional stiffness can be observed in the entire stress range soon after one day of curing, and a progressive increase in stiffness and decrease in compressibility occur while curing time increases, up to 14 days. No further improvements are observed for longer curing times (28 days). An increase in one dimensional stiffness and a decrease in axial deformation can also be observed for all **PR/PeA/GEOS** samples (fig. 1.b) for load values equal or higher than the yield stress (100kPa). Nonetheless a trend related to the curing

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

time cannot be detected as the mechanical behaviour of samples cured 7 and 14 days is virtually the same while the samples cured 1 and 28 days behave similarly to each other and are characterized by a smaller deformation with respect to samples cured 7 and 14 days

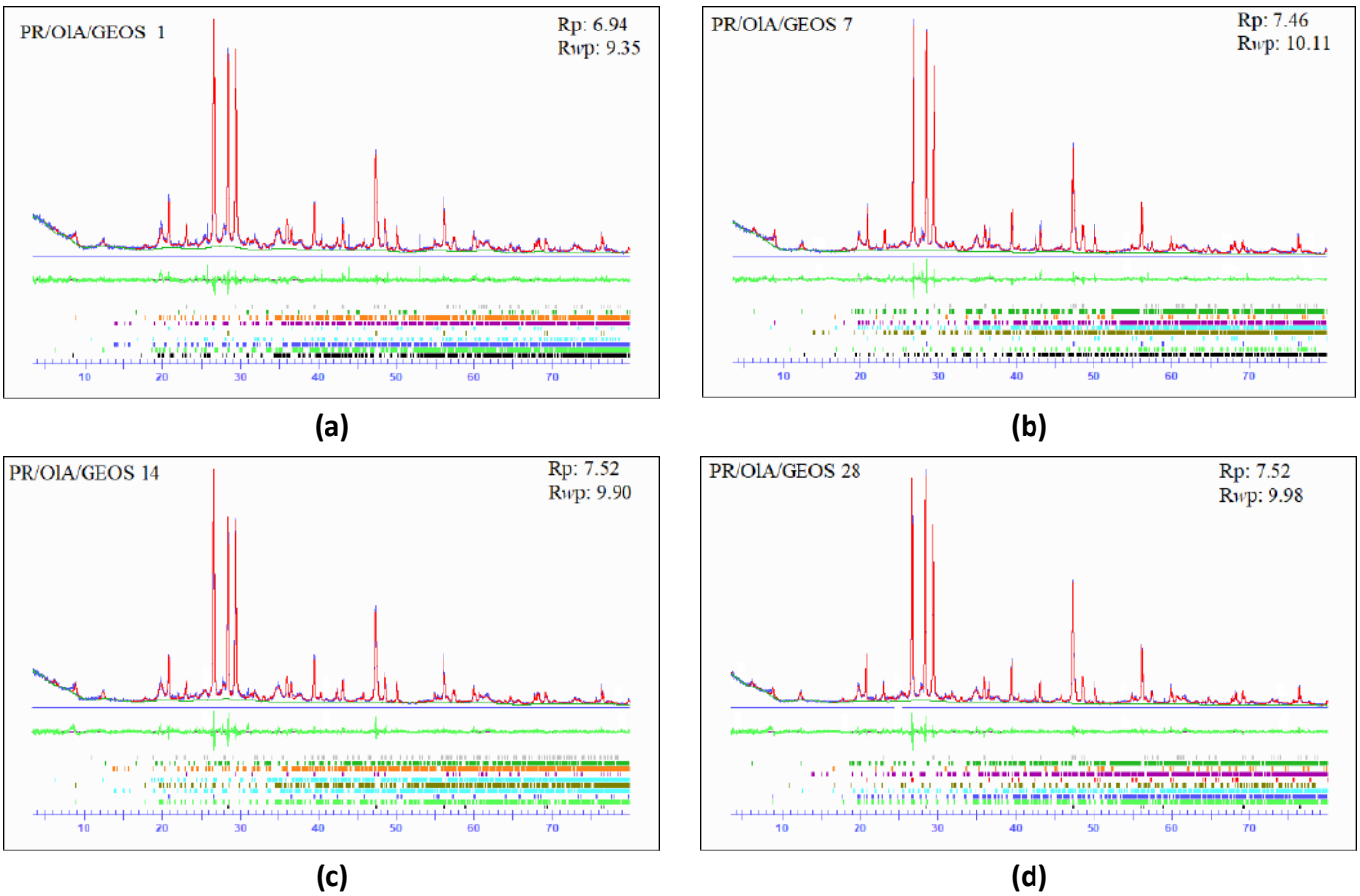
The **PR/OIA/GEOS** mixture showed the better response to treatment (figure 1.c), with an overall reduction in axial yield largely higher that 15% at the highest load (1600 kPa).

Finally, a decrease in compressibility is also observed on the **PR/GrA/GEOS** mixture (fig. 1d), for which the highest reduction in axial deformation, of about 15%, is recorded after 7 days of curing. It is worth noticing that this is the only mixture for which the axial deformation is higher at the longest curing time (28 days) that it was before

4.3 XRPD and electron microscopy analyses on PR/ashes mixtures

Figures 2 shows an example of Rietveld refinement of XRPD spectra of **PR/OIA/GEOS** sample with the addition of the external standard (crystalline silicon) collected at different curing times. In each graph, the blue patterns represent the collected data, and the red lines represent the calculated profile. Furthermore, accuracy parameters such as R*w*p and Rp were reported for each pattern.

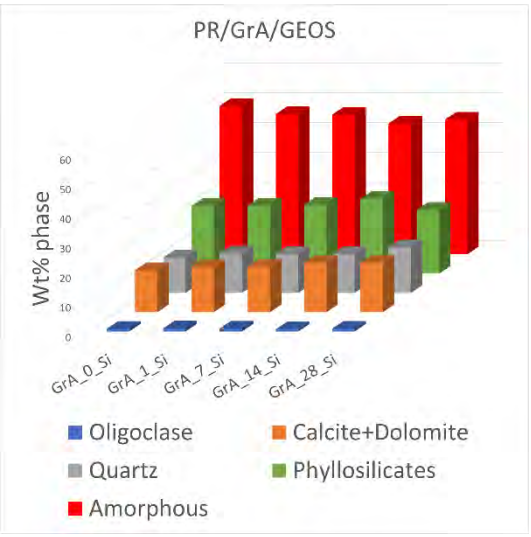
Figure 2. XRPD patterns refined by means of the Rietveld method for PR/OIA/GEOS samples after 1 (a). 7 (b), 14 (c) and 28 (d) curing days with the addition of the external standard (crystalline silicon Si). Observed and calculated profiles are given in blue and red, respectively. The differences between the observed and calculated powder diffraction profiles are in green.



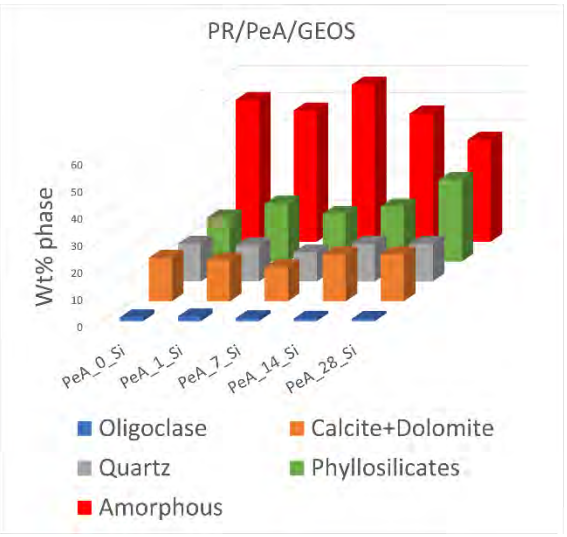
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The results of QPA were reported in figure 3, the abundance of crystalline and amorphous phases (wt%), using Rietveld method of **PR/OlA/GEOS**, **PR/PeA/GEOS** and **PR/GrA/GEOS** sam-ples, cured from 0 to 28 days. The phases detected in all samples are calcite, dolomite, quartz, phyllosilicates (illite, muscovite and chamosite), oligoclase and minor phases (albite, reichenbachite, hydrossilapatite and phosphoferrite).

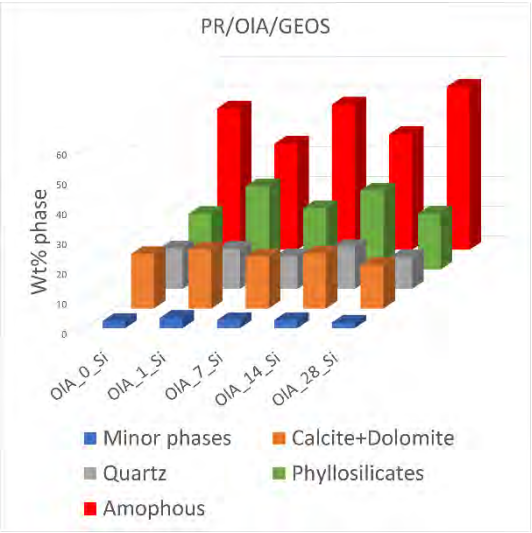
Figure 3. Histograms report quantitative analyses by Rietveld refinement of XRPD for PR/GrA/GEOS (a), PR/PeA/GEOS (b) and PR/OlA/GEOS (c) samples. Quantitative results are given in wt (%). Amorphous content was recalculated based on Si as an external standard.



(a)



(b)



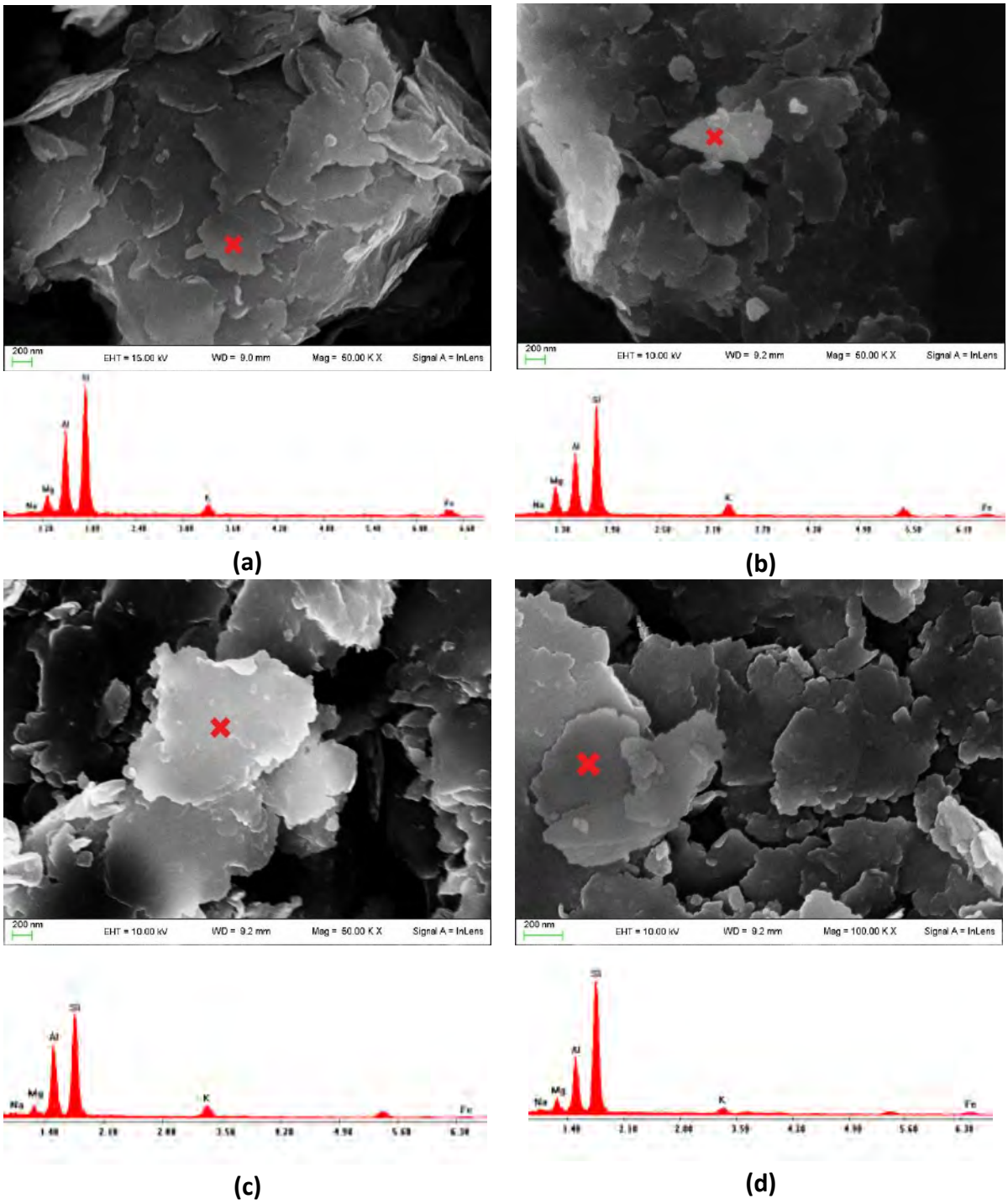
(c)

Fe-SEM of raw soil samples at different magnification are reported in figures 4. Images of raw soil show clay minerals with typical lamellar structures stacked on top of each other and semi-spherical agglomerates of added biomass fly ashes. Figure 5 shows the soil after 28 days of treatment. The

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

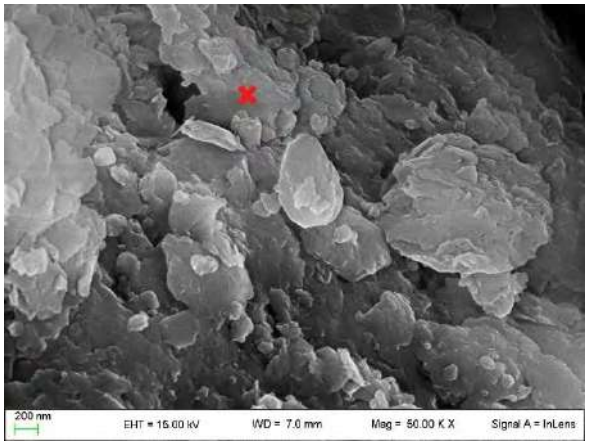
surfaces of all samples are clearly modified, during curing time, with a sort of gel that cover the lamellar morphology of pris-tine clay. The EDS semi-quantitative analyses show that the amorphous cementitious gels formed has a CaO content around 15%, increasing curing days, definitively higher with respect the primitive CaO content in clay, which was around 7 wt%.

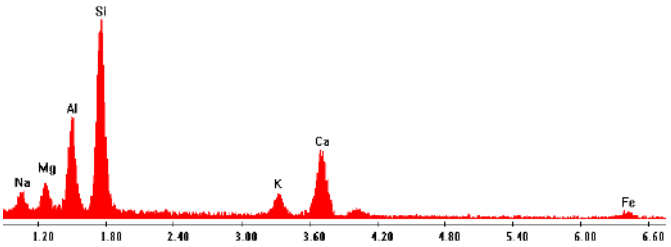
Figure 4. Fe-SEM photos of raw soils, PR/GRA (a), PR/Ol (b), PR/PeA (c) and PR (d). For each photos the chemical analysis (EDS) was reported below, and the red cross indicates the point where analysis was carried out. The images show the typical lamellar structures of clay minerals.



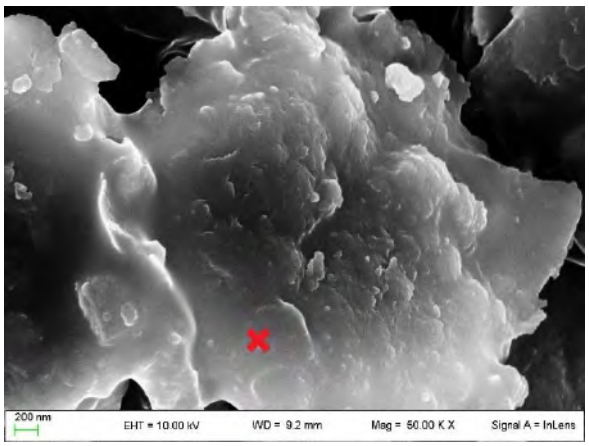
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

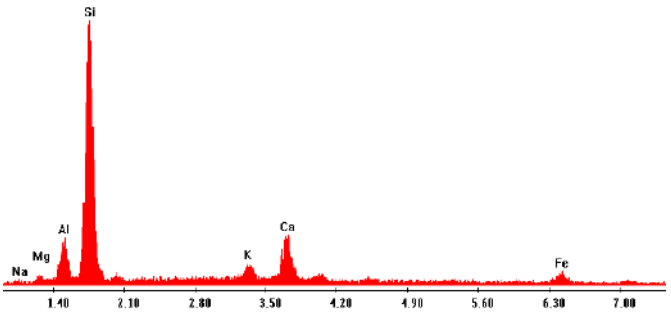
Figure 5. Fe-SEM photos of treated soil PR/GRA/GEOS (a), PR/OI/GEOS(b) and PR/PeA/GEOS(c) after 28 curing days. For each sample on the right the chemical analyses (EDS) were reported, and red crosses indicates the point where the analysis was carried out. The images show the lamellar structures covered by amorphous gels.



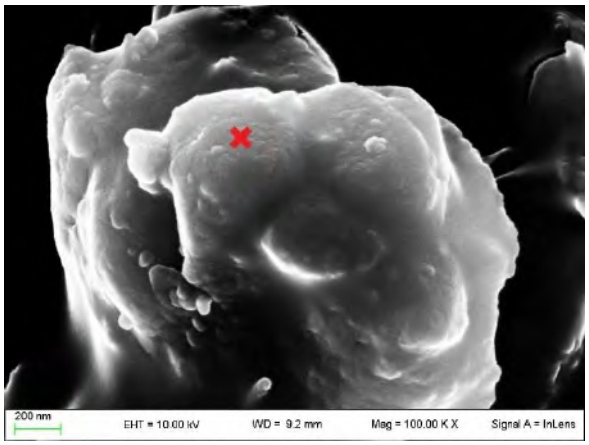


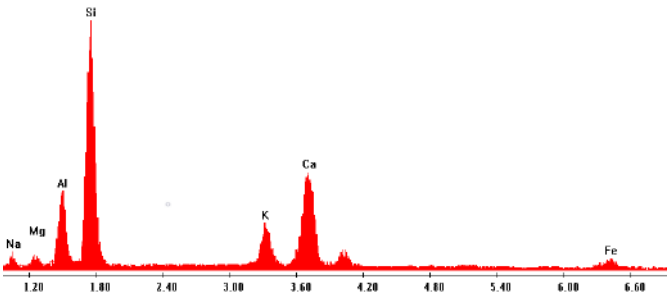
(a)





(b)





(c)

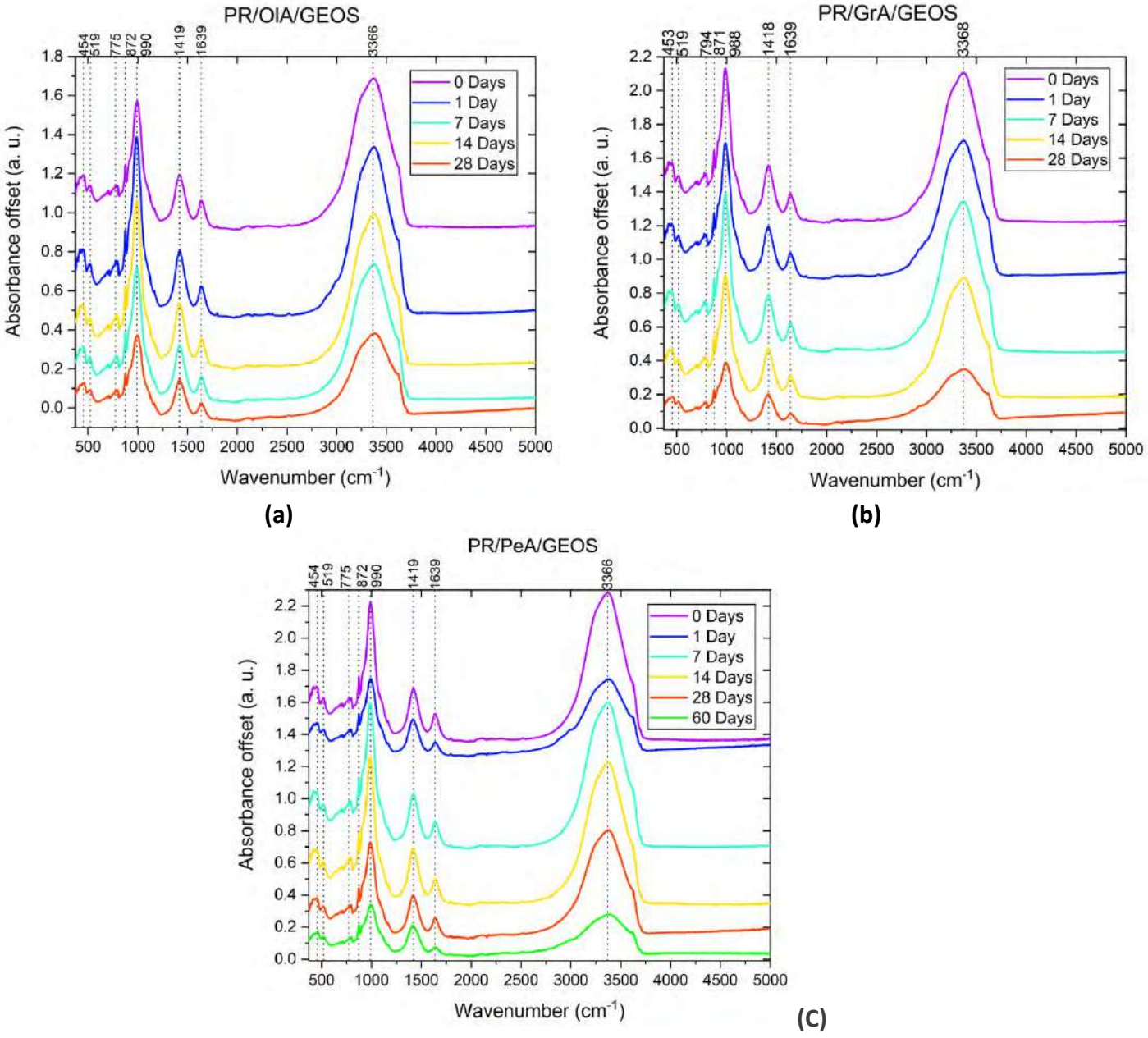
4.3 FT-IR spectroscopy

FT-IR spectroscopy was used to better characterize hydration products of pozzolanic reactions. The spectra after 28 days of curing period for **PR/OIA/GEOS** and **PR/GrA/GEOS** samples and after 60 days

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

of curing period for **PR/PeA/GEOS** sample were reported in figure 6. The absorption bands located at 3000-3750 cm-1 and 1570-1700 cm^{-1} are due to the O-H stretching (v_3) and O-H bending of H_2O (v_4), respectively [18]. In addition, the band at ~ 3600 cm^{-1} is due to OH stretching from clay minerals [19,20]. The $v_3CO_3^{-2}$ stretching are observed at ~ 1400 cm^{-1} and at ~710 and at ~850 cm^{-1} there are v_2 CO_3^{-2} bending, associated to the presence of calcite mineral in raw biomass ash and clayey soil [21]. The absorbance bands in the 1100 – 900 cm^{-1} range are ascribed to the asymmetric stretching vibration of Si-O-T and those between 420 to 620 cm^{-1} are attributed to the bending vibration of Si–O–Si or Si–O–Al atoms, related to the presence of clay minerals [20].

Figure 6. FTIR spectra of PR/OlA/GEOS (a), PR/GrA/GEOS (b) and PR/PeA/GEOS (c) soil at different curing time. The positions of the bands shown in the figures and marked with a dotted line refer to curing time 0 days.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5 Discussions and conclusions

A comparison of the results of the different techniques applied allows the following considerations to be made:

- No C-S-H or/and C-A-S-H peaks were observed in any of the XRPD spectra because nanocrystalline phases that are difficult to identify generally develop at room temperature [6,22]. In addition, the illite content decreases as the amorphous content increases as reported by Chrysochoou et al., [23] as a consequence of the impact of the pozzolanic reaction. The quantity of clay appears to decrease abruptly in the **PR/OlA/GEOS** and **PR/PeA/GEOS** samples after short settling times (Fig. 3 b-c).
- Evidence of growth of gel amorphous product is provided by Fe-SEM images where the serrated edges of clay lamellae appear rounded, and EDS semi-quantitative analyses show a drastically increase of Ca content, on the surface of clay grains after 28 curing days (Fig. 5).
- Change in the bands position of diagnostic FT-IR peaks is indicative of development of pozzolanic reactions products [24,25]. The bands located at 900-1100 cm^{-1} (Si-O-T stretching modes) and 420 – 620 cm^{-1} (Si-O-T bending modes) are sensitive to the chemical reaction resulting in a shifting of the positions indicative of the formation of C-S-H and/or C-A-S-H gels [26]. The shift in the position of the Si-O-T bands is due to an increase in the degree of polymerization of the silicon tetrahedra (SiO_4).
- The development of C-S-H /C-A-S-H increases in a non-linear manner with increasing curing days, which is mainly attributed to the different rate of pozzolanic reaction.

The preliminary results reported in this work show that the clay-ash mixes tested are subject to pozzolanic reactions which, as the curing time varies, give better geotechnical properties in terms of hardness and compressibility. These improvements are justified by the evidence of the chemical-mineralogical analyses showing an increase in the amorphous component, gels that cover clay grains, typical of the newly formed cementitious phases (C-S-H). Future studies will be needed to reduce and control more the parameters influencing these reactions, such as temperature, pH, water content, to create a consolidated process for their application in industrial paving applications.

References

1. Phummiphan, I.; Horpibulsuk, S.; Phoo-ngernkham, T.; Arulrajah, A.; Shen, S.-L. Marginal Lateritic Soil Stabilized with Calcium Carbide Residue and Fly Ash Geopolymers as a Sustainable Pavement Base Material. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2017**, *29*, 04016195, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001708.
2. Uddin, K.; Balasubramaniam, A.S.; Bergado, D.T. Engineering Behavior of Cement-Treated Bangkok Soft Clay. *Geotechnical Engineering* **1997**, *28*, 89–119.
3. Boardman, D.I.; Glendinning, S.; Rogers, C.D.F. Development of Stabilisation and Solidification in Lime–Clay Mixes. *Géotechnique* **2001**, *51*, 533–543, doi:10.1680/geot.2001.51.6.533.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Vitale, E.; Deneele, D.; Russo, G.; Ouvrard, G. Short-Term Effects on Physical Properties of Lime Treated Kaolin. *Applied Clay Science* **2016**, *132*, 223–231.
5. Vitale, E.; Deneele, D.; Russo, G. Multiscale Analysis on the Behaviour of a Lime Treated Bentonite. *Procedia Engineering* **2016**, *158*, 87–91.
6. Guidobaldi, G.; Cambi, C.; Cecconi, M.; Comodi, P.; Deneele, D.; Paris, M.; Russo, G.; Vitale, E.; Zucchini, A. Chemo-Mineralogical Evolution and Microstructural Modifications of a Lime Treated Pyroclastic Soil. *Engineering Geology* **2018**, *245*, 333–343, doi:10.1016/j.enggeo.2018.09.012.
7. Coudert, E.; Paris, M.; Deneele, D.; Russo, G.; Tarantino, A. Use of Alkali Activated High-Calcium Fly Ash Binder for Kaolin Clay Soil Stabilisation: Physicochemical Evolution. *Construction and Building Materials* **2019**, *201*, 539–552.
8. Agrela, F.; Cabrera, M.; Morales, M.M.; Zamorano, M.; Alshaaer, M. Biomass Fly Ash and Biomass Bottom Ash. In *New trends in eco-efficient and recycled concrete*; Elsevier, 2019; pp. 23–58.
9. Obernberger, I.; Supancic, K. Possibilities of Ash Utilisation from Biomass Combustion Plants. In Proceedings of the Proceedings of the 17th European biomass conference & exhibition; Hamburg Germany, 2009; Vol. 29.
10. Thomas, M.D.A. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*; Portland Cement Association Skokie, IL, USA, 2007; Vol. 5420;.
11. Cherian, C.; Siddiqua, S. Engineering and Environmental Evaluation for Utilization of Recycled Pulp Mill Fly Ash as Binder in Sustainable Road Construction. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *298*, 126758.
12. Cabrera, M.; Rosales, J.; Ayuso, J.; Estaire, J.; Agrela, F. Feasibility of Using Olive Biomass Bottom Ash in the Sub-Bases of Roads and Rural Paths. *Construction and Building Materials* **2018**, *181*, 266–275.
13. Comodi, P.; Zucchini, A.; Susta, U.; Cambi, C.; Vivani, R.; Cavalaglio, G.; Cotana, F. *Multi-Scale Minero-Chemical Analysis of Biomass Ashes: A Key to Evaluating Their Dangers vs. Benefits. Sustainability 2021, 13, 6052*; s Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published …, 2021;
14. Rietveld, H.M. A Profile Refinement Method for Nuclear and Magnetic Structures. *Journal of applied Crystallography* **1969**, *2*, 65–71.
15. Altomare, A.; Burla, M.C.; Giacovazzo, C.; Guagliardi, A.; Moliterni, A.G.; Polidori, G.; Rizzi, R. Quanto: A Rietveld Program for Quantitative Phase Analysis of Polycrystalline Mixtures. *Journal of Applied Crystallography* **2001**, *34*, 392–397.
16. Balić-Žunić, T. Quantitative Powder Diffraction Phase Analysis with a Combination of the Rietveld Method and the Addition Method. *Powder Diffraction* **2002**, *17*, 287–289.
17. Downs, R.T.; Hall-Wallace, M. The American Mineralogist Crystal Structure Database. *American Mineralogist* **2003**, *88*, 247–250.
18. Zhu, W.; Chen, X.; Struble, L.J.; Yang, E.-H. Characterization of Calcium-Containing Phases in Alkali-Activated Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Binder through Chemical Extraction and

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Deconvoluted Fourier Transform Infrared Spectra. *Journal of Cleaner Production* **2018**, *192*, 782–789.

19. Madejová, J. FTIR Techniques in Clay Mineral Studies. *Vibrational spectroscopy* **2003**, *31*, 1–10.
20. Madejová, J.; Gates, W.P.; Petit, S. IR Spectra of Clay Minerals. In *Developments in clay science*; Elsevier, 2017; Vol. 8, pp. 107–149 ISBN 1572-4352.
21. Kalembkiewicz, J.; Galas, D.; Sitarz-Palczak, E. The Physicochemical Properties and Composition of Biomass Ash and Evaluating Directions of Its Applications. *Polish Journal of Environmental Studies* **2018**, *27*.
22. Tabet, W.E.; Cerato, A.B.; Elwood Madden, A.S.; Jentoft, R.E. Characterization of Hydration Products' Formation and Strength Development in Cement-Stabilized Kaolinite Using TG and XRD. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2018**, *30*, 04018261.
23. Chrysochoou, M. Investigation of the Mineral Dissolution Rate and Strength Development in Stabilized Soils Using Quantitative X-Ray Diffraction. *Journal of materials in civil engineering* **2014**, *26*, 288–295.
24. Geng, G.; Myers, R.J.; Li, J.; Maboudian, R.; Carraro, C.; Shapiro, D.A.; Monteiro, P.J. Aluminum-Induced Dreierketten Chain Cross-Links Increase the Mechanical Properties of Nanocrystalline Calcium Aluminosilicate Hydrate. *Scientific reports* **2017**, *7*, 1–10.
25. Gupt, C.B.; Bordoloi, S.; Sahoo, R.K.; Sekharan, S. Mechanical Performance and Micro-Structure of Bentonite-Fly Ash and Bentonite-Sand Mixes for Landfill Liner Application. *Journal of Cleaner Production* **2021**, *292*, 126033, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126033.
26. Jose, A.; Nivitha, M.R.; Krishnan, J.M.; Robinson, R.G. Characterization of Cement Stabilized Pond Ash Using FTIR Spectroscopy. *Construction and Building Materials* **2020**, *263*, 120136.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Energy Transition: Solar and Wind Energy based Combined Heat and Power system Model for small communities

Eid Gul[1,*], Giorgio Baldinelli [2]

[1] Biomass Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti n.67, 06125 Perugia Italy

[2] Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti n.67, 06125 Perugia Italy

***** E-Mail: eid.gul@crbnet.it

Abstract: Renewable energy sources can play a key role in mitigating the climate change problems and reducing the dependence on fossil fuels. The objective of this work is to design a combined heat and power system to supply electricity and heat to distributed communities by harnessing energy from renewable energy sources, especially wind and solar energy. To accomplish set objectives, an optimization model is developed which firstly maximizes the power production from wind and solar PV system and secondly meets the energy demand. The curtailed energy of solar and wind is used to produce heat and electricity to the selected communities by using a thermal load controller. The presented system is also interlocked with the grid station for the energy exchange. One of the core objectives is to evaluate the system economic and environmental feasibility and determine the best optimal operational strategies to maximize renewable energy utilization and minimize energy costs. An economic and environmental analysis is performed to determine the cost of energy and reduction in CO_2 emissions. The obtained results show that a significant amount of clean energy has been produced and the developed system meets the 79% of energy demand produced by renewable energies at the lowest Levelized Cost Of Energy of 0.013 €/kWh.

Keywords: Renewable energy sources; Combined heat and power system; economic and environmental analysis.

1. Introduction

New energy technologies are playing an essential part to mitigate environmental problems, limiting greenhouse gases emissions (GHG), and increasing energy production from renewable energies [1-2]. However, due to the uncertain and variable nature of renewable energy sources (RES), it is highly

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

challenging to maximize the utilization of RES, especially solar and wind energy [3]. Additionally, the inconsistency and uncertainty in energy production from RES also pose technical challenges for grid stations to manage available energy effectively and efficiently [4]. Combined heat and power (CHP) technologies produce electricity and convert waste energy into thermal energy; this conversion process increases the systems energy utilization and efficiency [5].

Numerous research studies [6-7] present technical and economic analyses of small-scale CHP systems to produce electricity and heat at an industrial scale, by capturing the waste/exhaust heat of thermal power plants and producing heat while this process increases the energy efficiency and reduces the cost of energy. Moreover, the curtailed or surplus energy of renewable energy sources especially wind and solar energy are also being used for producing heat and electricity [8]. Variable renewable energy sources such as solar and wind energy rated output power is not constant and due to this variation a significant amount of energy got wasted, however by using this curtailed/surplus energy heat can be produced which could be supply to the small communities and selected building [9-10]. This research work presents the advanced combined heat and power energy system model, which meets the energy demand of small communities.

2. Methodology

To achieve the set objectives of this research an optimization model is developed; it integrates solar PV and wind energy system and optimizes the power produced by these sources and supplied to the load centers. At the aim of testing and validating the performance of the system, a simulation and optimization software Homer Pro developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL) [11] is used.

2.1 Model formulation

The presented energy system model is designed to reach three objectives, A) maximize the power generation from solar and wind power system presented in eq. (1); B) balance the electricity load demand while mixing the renewable power with energy purchased from the grid and meet the instantaneous load demand; C) supply the heat produced by the thermal load controller and boiler to balance the heat demand at each time interval over the scheduling horizon. Eq. (1) represents the sum of the output power of solar and wind energy during operational periods in MWh, where $P^t_{\max}$ is the maximum power, P^W_m and P^S_m are the power produced by the wind turbines and solar PV system. P^t_d is the electricity demand, P^t_R is the Homer microgrid power and P^t_{grid} is the energy imported from the local grid station. In Eq. (3), Q^t_d is the thermal energy/heat demand of the community, while Q^t_{TLC} and Q^t_{boiler} is the heat produced by thermal controllers and the boiler.

Objective A. Maximize the renewable power generation:

$$P^t_{\max} = \sum_{m=1}^{M} P^W_m + P^S_m \quad (1)$$

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Objective B. Balance load demand:

$$P_d^t = \sum_{m=1}^{M} P_R^t + P_{grid}^t \quad (2)$$

Objective C. Thermal energy:

$$Q_d^t = Q_{TLC}^t + Q_{boiler}^t \quad (3)$$

2.2. Constraints

The energy produced by the solar and wind system is supplied to Homer Microgrid and supplied to the connected load centers, while the surplus power is transferred to the connected grid station. Moreover, the curtailed energy of solar and wind systems is shifted to the thermal load controller for heat production, which is supplied to the selected buildings for the heating purpose presented in eq (4). $P_{Microgrid}^t$ is the power supplied from Homer microgrid, P_{Load}^t is the total load demand, P_{grid}^t is the power export to the local grid station and P_{TLC}^t is the power supplied to the thermal load controller. During the high load demand, the power purchased from local grid station is mixed with renewable energy and supplied to the load centers, as expressed in eq (5).

$$P_{Microgrid}^t \xrightarrow{\text{sup}} \begin{cases} P_{Load}^t \\ P_{grid}^t \\ P_{TLC}^t \end{cases} \quad (4)$$

$$P_{Microgrid}^t \xleftarrow{deficit} P_{grid}^t \quad (5)$$

The annual capacity shorted and minimum renewable fraction of the developed system is expressed in Equations (6) and (7). $CP_{shortage}$ is the annual capacity shortage, while $RE_{fraction}$ is the minimum renewable energy fraction.

$$CP_{shortage} \leq 2\% \quad (6)$$

$$RE_{fraction} \geq 30\% \quad (7)$$

3. System architecture

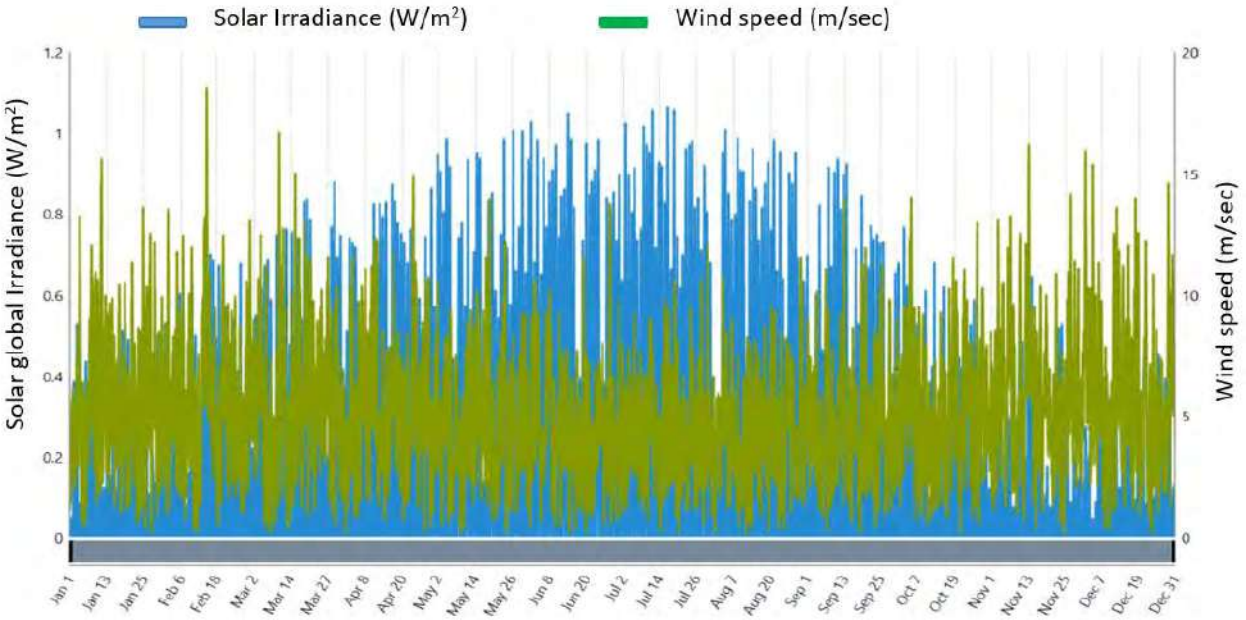
This section presents the system architecture and the connected components. Homer is a powerful modeling and optimization software used to develop and estimate the performance of the energy system.

To optimally combine all the integrated sources and components dispatch strategies, load following and cycle charging techniques were used. The maximum installed capacity of solar PV system is 2500 kW, while the wind system installed capacity is 2640 kW. Figure 1 presents the daily average and peak electric and thermal load demand of the communities.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1 shows the annual solar and wind resources at the selected location, through the solar global irradiance (W/m^2) and the wind speed (m/sec).

Figure 1. Solar and Wind resources at the selected location.



3.2 Wind Model

Integration of wind power is a key part of this work; in the proposed optimized model, 8 small commercial wind turbines are installed, while the hub height is 50 meters, and the installed capacity is 2640 kW. The power produced from wind turbines is expressed in equation (8) [12]:

$$P = \frac{1}{2}\sigma A V^3 C_p(\lambda;\theta) \tag{8}$$

where P is the Aerodynamic power directly proportional to the air density σ , speed of wind V^3 , area A of rotor and aerodynamic efficiency C_p. The aerodynamic efficiency $C_p(\lambda;\theta)$ depends upon the pitch blade angle θ, and the tip speed ratio λ .

3.3 Solar Model

In the analysed system, the solar power is estimated by using a solar PV model developed by National Renewable Energy laboratory [29-30] and expressed in eq (9):

$$P_m^{PV} = x(\frac{R_m}{R_{stc}})[1+\alpha_p(T_m - T_{stc}) \tag{9}$$

R_m is the actual solar radiation intensity (W/m^2); *Rstc* is solar radiation intensity under standard Test conditions (1000 W/m^2). T_{stc} is the temperature of the standard test conditions (25°C), while T_m is the real temperature of the solar cell while; α_p is the temperature power coefficient for the solar cell module (-0.35 %/°C).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Results

This section presents the obtained results of the proposed system. Table 1 and Table 2 show the energetic scenarios of the system. Table 1 shows that a significant amount of clean energy estimated at 10 GWh has been produced by the developed model during the first year of operation, meeting about 79% of the energy demand of the distributed communities. Table 2 shows the total electricity load demand and the energy export to the grid station.

Table 1. Energy production from renewables and grid import.

System	Energy production kWh/year	%
Solar PV system	3,714,797	29.0
Wind Energy	6,483,132	50.7
Grid Purchases	2,600,943	20.3
Total	12,798,873	100.0

Table 2. Energy demand and grid export

Consumptions	kWh/year	%
AC Primary Load	8,446,003	67.0
DC Primary Load	0	0.0
Grid Sales	4,165,510	33.0
Total	12,611,513	100.0

Data presented in Table 3 illustrates the energetic scenarios of the solar PV system, which shows the significant amount of energy produced by the system at the lowest Levelized Cost Of Energy.

Table 3. Description of solar PV system model

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	2,500	kW
Mean Output	424	kW
Mean Output	10,178	kWh/d
Capacity Factor	17.0	%
Total Production	3,714,797	kWh/year
PV Penetration	44.0	%
Hours of Operation	4,374	hours/year
Levelized Cost	0.00128	€/kWh

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

One of the core objectives of this research is to supply thermal energy to the selected communities using also the curtailed energy of renewable sources. Naturally, to meet the large heat energy demand, a liquid gas propane-based boiler is integrated with the system. Data in Table 4 show that the boiler and the thermal load controller meet the total demand.

Table 4. Thermal energy demand and production

Production	kWh/year	%
Boiler	1,288,115	99.9
Thermal Load Controller	1,705	0.132
Total	1,289,819	100
Excess thermal	225	0.0174

The integration of the developed system with the local grid station increases the system reliability and flexibility. Data in table 5 show that during the period of high energy production by the system, the surplus energy is transferred to the grid station at the flat-rate tariff, while during the energy deficit period, energy is imported from the local grid station to meet the load demand.

Table 5. Energy import and export

Quantity	Energy import (kWh)	Energy export (kWh)	Peak load (kW)
January	171,199	455,752	1,330
February	144,537	436,012	1,370
March	161,248	506,721	1,352
April	187,251	376,420	1,281
May	206,644	300,447	1,599
June	305,434	186,604	2,054
July	315,915	189,620	2,127
August	359,084	187,552	1,898
September	249,184	266,851	1,698
October	198,900	344,611	1,532
November	168,773	451,427	1,392
December	132,775	463,493	1,183

As far as the economic analysis, table 6 shows the economic analysis of the developed system, showing that the Levelized Cost Of Energy is significantly low, as well as the net present value of the system; the lifetime is fixed to 25 years.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Table 6. Economic values of proposed system

Quantity	Value
Net present value	€ 1,168,842
LCOE	€ 0.013/kWh
Operating cost	€ 115,364
Discount rate	8.0%
Annual capacity shortage	2.0%
Project lifetime	25 years

Conclusion

This research work presents a combined heat and power system model and proposes a layout for a sustainable, socio-economic, and environmentally feasible solution that would not only speeds up the energy transition process, but also supports the reduction of greenhouse gases emissions. The design system integrates and optimizes the power produced by the solar PV and wind system and maximizes the total power generation, to meet the electric and thermal load demands of small communities. The achieved results show that the system produces a large amount of clean electricity: 10 GWh annually at 0.013 €/kWh cost of energy. The optimal combined dispatch strategies and efficient resources management mutually contribute and increase the penetration of renewable energy, with a fraction of 79.2 %; the capacity factor of the PV system is 17 %, and 28 % for the wind system. At the aim of improving the system flexibility and reliability, the system is integrated with the local grid station for energy trading, and the results highlight the significant amount of energy exchanged between the system and the grid station. The environmental analysis estimates that a large amount of greenhouse gases emissions is reduced: 4,129 tons of CO_2 each year. Moreover, the economic assessment of the proposed system indicates its economic feasibility, as it decreases the cost of energy.

For future work, the developed model will be used for the development of a large-scale energy system model, integrating further renewable energy sources, and considering also other load sectors such as industrial, agricultural, and electric vehicle load centers; additionally, new energy storage technologies will be integrated.

References

1. P. A. Østergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, H. Mikulcic, S. Kalogirou, Sustainable development using renewable energy technology, Renewable Energy, Volume 146, 2020, Pages 2430-2437.
2. Boudet, H.S. Public perceptions of and responses to new energy technologies. Nat Energy 4, 446–455 (2019).
3. Kaushik, E.; Prakash, V.; Mahela, O.P.; Khan, B.; El-Shahat, A.; Abdelaziz, A.Y. Comprehensive

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Overview of Power System Flexibility during the Scenario of High Penetration of Renewable Energy in Utility Grid. Energies 2022, 15, 516.

4. Badanjak, D.; Pandžić, H. Distribution-Level Flexibility Markets—A Review of Trends, Research Projects, Key Stakeholders and Open Questions. Energies 2021, 14, 6622.
5. Behabtu, H.A.; Messagie, M.; Coosemans, T.; Berecibar, M.; Anlay Fante, K.; Kebede, A.A.; Mierlo, J.V. A Review of Energy Storage Technologies' Application Potentials in Renewable Energy Sources Grid Integration. Sustainability 2020, 12, 10511.
6. Göransson, L.; Lehtveer, M.; Nyholm, E.; Taljegard, M.; Walter, V. The Benefit of Collaboration in the North European Electricity System Transition—System and Sector Perspectives. Energies 2019, 12, 4648.
7. A. Boldrini, J.P. Jiménez Navarro, W.H.J. Crijns-Graus, M.A. van den Broek, The role of district heating systems to provide balancing services in the European Union, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 154, 2022, 111853.
8. De Souza, R.; Casisi, M.; Micheli, D.; Reini, M. A Review of Small–Medium Combined Heat and Power (CHP) Technologies and Their Role within the 100% Renewable Energy Systems Scenario. Energies 2021, 14, 5338.
9. Mohammad Ali Bagherian, Kamyar Mehranzamir, A comprehensive review on renewable energy integration for combined heat and power production, Energy Conversion and Management, Volume 224, 2020,
10 Oon Erixno, Nasrudin Abd Rahim, Farah Ramadhani, Noriah Nor Adzman, Energy management of renewable energy-based combined heat and power systems: A review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 51, 2022, 101944,
11. Homer Pro Software. https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html
12. Chi-Jeng Bai, Wei-Cheng Wang, Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs), Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 63, 2016, Pages 506-519.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Cooling effects in a coastal city in Italy

Roberta Jacoby Cureau [1], Ilaria Pigliautile [1,2] and Anna Laura Pisello [1,2,*]

[1] CIRIAF, Interuniversity Research Center on Pollution and Environment Mauro Felli, University of Perugia, Via G. Duranti, 67, 06125 Perugia, Italy

[2] Department of Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti, 93, 06125 Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: anna.pisello@unipg.it

Abstract: One of the consequences of the rapid urbanisation process is the raise in air and surface temperatures that cities experience in comparison to their surroundings, a phenomenon that is called Urban Heat Island (UHI). Water bodies are an effective strategy for mitigating urban overheating during daytime due to their larger specific heat capacity than other surface materials, and, therefore, there is a huge interest in studying water bodies' cooling effects in the urban context. This study aimed to assess the cooling effect of the sea, using for the first time a wearable system to monitor environmental parameters in a coastal city. A walking path was repeated three times on a winter day (at 8 am, midday, and 4 pm). Besides the boardwalk along the seafront, the path also encompassed other five streets, perpendicular to the sea, with different morphological characteristics, which were assessed through the sky view factor (SVF). The cooling effect of the sea was not identified in all streets, but the correlation between the distance from the seafront and the air temperature was statistically significant in most streets. No correlation between the SVF and air temperature was verified, but there is strong evidence that the distinct characteristics of each urban canyon influenced the temperature. Therefore, the temperature pattern of each street may be a result of the combination of their traits. Mobile monitoring showed to be useful for this analysis since it allowed precisely describing the monitored area, which could not be done with other monitoring techniques.

Keywords: Urban heat island; water body; cooling effect; wearable monitoring system; sky view factor.

1. Introduction

The percentage of the world's population that lives in cities has been rapidly increasing in the recent years. According to United Nations [1], this fraction represents about 55% nowadays, and it is expected

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

to reach up to 68% by 2050. An effect of the urbanization process is the growth of population and building densities, which changes land surfaces and uses. This alteration from the natural to the urban landscape alters cities' energy balance, and as a consequence, urban environments usually experience higher air and surface temperatures than the surrounding areas, a phenomenon that is called the Urban Heat Island (UHI) [2].

It has been extensively reported that the UHI has several negative impacts on human life since it was already associated with growth in heat-related mortality and morbidity rates, thermal discomfort, and raised building energy consumption for cooling and electricity demand peak [3–6]. Due to these consequences, there is an increasing interest on studying urban microclimates, with a special focus on investigating alternatives capable to enhance the environmental quality in these areas. On the city scale, some mitigation strategies that are already consolidated include green infrastructures (e.g., urban parks and street trees) [7,8], water bodies (e.g., rivers, artificial or natural lakes, and ponds) [9,10], and cool materials [11,12].

It has been already demonstrated that water bodies provide significant temperature reductions within urban areas [13–17]. The cooling effect caused by a water body is due to its larger specific heat capacity when compared to other land surface materials. Therefore, the warming-up velocity of a water body is slower than the surrounding, which causes its cooling effect during the daytime [18]. Peng et al. [15] found a significant cooling effect during summer daytime caused by the sea in a city in Japan, capable to mitigate the land surface temperature (LST) at 2.79 K on average at about 1 km from the water body. Wu e Zhang [16] concluded that Suzhou Bay, in China, has a maximum cooling effect of 3.02 °C that can reach 800 m of distance from the bay. Cai et al. [18] found a maximum cooling effect of 4.75 °C and a maximum cooling distance of 945 m during daytime when analysing an area delimited by two rivers in China. Hathway and Sharples [17] evaluated the cooling effect of a small urban river in the United Kingdom and observed an average reduction in air temperature of nearly 1 °C when ambient conditions are higher than 20 °C. Other studies noticed that the cooling intensity (reduction in the temperature per unit of distance) depends on the water body area and its geometry [9,19]. Moreover, it has been already concluded that the urban morphology (e.g., landscape configuration, land cover, building density and geometry, sky view factor (SVF)) of the water bodies surrounding areas also affects their cooling intensity [17,18,20]. In fact, the urban morphology influences microclimate [21,22], and for this reason it is expected that it has an effect on the intensity and efficiency of the mitigation strategies as well.

The most common method used to analyse the cooling extent and intensity of water bodies is through the LST retrieved from remote sensing images. This technique is very important for these studies because it allows the evaluation of a large spatial area, which eases the identification of spatial patterns [16]. However, urban landscapes are complex and heterogeneous, and this leads to great variabilities in environmental parameters within the same urban space [23]. Identifying hyperlocal differences requires high spatial and temporal data resolution, which cannot be obtained through remote sensing [24].

A suitable solution to get the required data granularity is to use mobile transects equipped with monitoring systems, like vehicles and wearable devices [25]. The use of wearable devices to monitor

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

outdoor environments have been recently proposed, and besides their advantage of outlining spatial and temporal variations of the parameters, they also allow catching the user's real exposures [26]. Furthermore, they overcome the intrinsic constraint of vehicle-based monitoring systems of being limited to roads and parking areas [24].

In this context, the aim of this study was to evaluate the cooling effects of a water body in a coastal city in Italy, considering the distance from the sea and different urban morphologies. For the first time, a wearable device was used for environmental monitoring in a coastal city to investigate the mitigation potential of the sea. The urban morphology was included in the analysis through the SVF, and besides investigating different urban features, areas with diverse anthropogenic activities were monitored.

2. Materials and methods

The experiment consisted in walking through a predefined path, repeating the same path 3 times per day: at 8 am, midday, and 4 pm. These periods were selected to be symmetric to the peak of solar radiation at midday. The walks were completed in a winter day, in February 2022.

During the walks, a wearable device was used to monitor the environmental parameters [25]. This equipment was specifically designed and calibrated for measuring environmental data outdoors on a hyperlocal scale from a pedestrian perspective. The system counts with a GPS to associate a precise geographic position to each measurement, and several sensors that monitors key multi-domain environmental parameters, such as air temperature, relative humidity, wind speed and direction, solar radiation, illuminance, CO_2 concentration, and particulate matter concentration ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, and PM_{10}). Figure 1 presents the wearable equipment used in the experiment.

Figure 1. Wearable system used for monitoring the environments: front view (a), and system in use (b).



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

With the measured parameters, the apparent temperature was computed to evaluate the cooling effect of the water body. Apparent temperature is the equivalent temperature perceived by humans, calculated as a function of air temperature, humidity, and wind speed, determined according to the Equation 1 [27]:

$$AT = -2.7 + 1.04T_a + 2e - 0.65ws \quad (1)$$

where *AT* is the apparent temperature (°C); T_a is the air temperature (°C); *ws* is the wind speed (m/s); and *e* is the humidity in terms of vapour pressure (kPa), which is calculated according to the Equation 2:

$$e = \left({}^{RH}/_{100}\right) * 6.105exp\left({}^{17.27T_a}/_{273.7 + T_a}\right) \quad (2)$$

where *e* is the vapour pressure (kPa); *RH* is the relative humidity (%); and T_a is the air temperature (°C).

Besides the environmental parameters, this study also considered different urban morphologies. These differences were assessed through the SVF, a metric that involves several landscape characteristics, like building plane form, building height, and building density [28]. The SVF represents the percentage of the visible sky area from a specific position on the ground, and it ranges from 0 to 1, where 0 represents a completely blocked sky, and 1 a sky with no obstructions [21]. To determine the SVF, a 360° camera was used to take cylindrical projection pictures in each street of the predefined path. These pictures were transformed into fisheye images, which were processed to become binarized images. This process is made to separate the sky area (white pixels) and the blocking elements, like buildings and trees (black pixels). With the binarized images, the SVF was calculated. All this process from the cylindrical projection pictures until the SVF calculation was executed in the R program [29].

3. Case study

The study was conducted in Riccione (Cfa climate according to the Köppen-Geiger classification [30]), a city located on the North-West Adriatic Sea, in Italy. The path defined to be completed with the wearable monitoring system was selected in a way to cross urban canyons with different morphological characteristics and varied anthropological activities. In detail, six canyons were investigated. The first one (canyon 0) is the boardwalk along the seafront. The other five are perpendicular to this boardwalk, being: (I) a wide one-way street following a canal; (II) a wide pedestrian sidewalk covered by trees; (III) a two-way street with parking spaces and sidewalks on both sides, also covered by trees; (IV) a one-way street with parking spaces and without sidewalks; and (V) a one-way narrow street without parking spaces and sidewalks. Figure 2 presents a map with the final path. Each colour on the map is associated with one canyon, and the arrows indicate the direction the path was crossed. The total length of the path is around 3.4 km, and it was taken 45 min to complete the walk.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 2. Path completed with the wearable monitoring system, distinguishing the six analysed canyons.



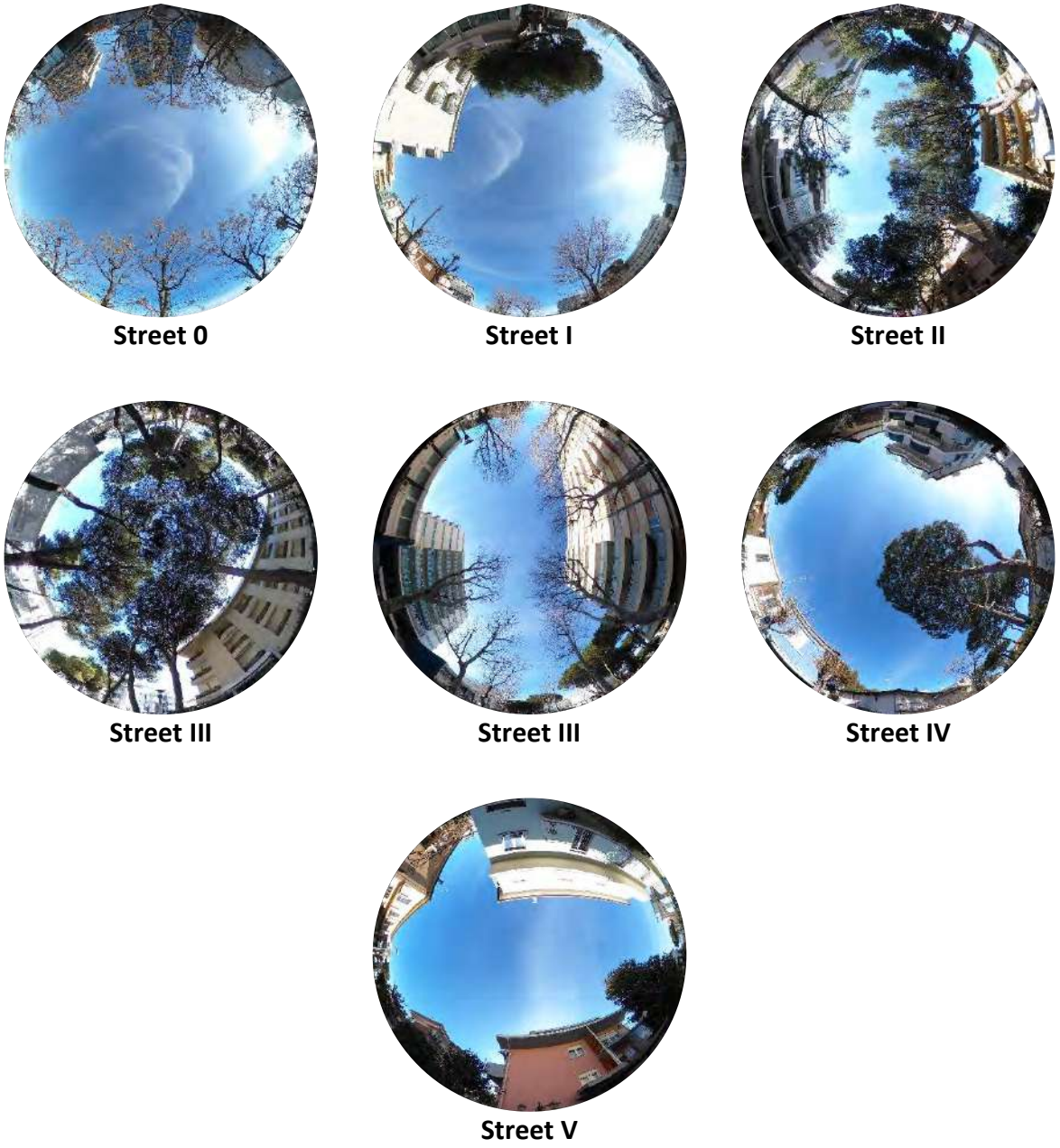
These six canyons were characterized in terms of their main activity (commercial, residential, walking), whether they allow car passage or are just for pedestrians, whether there are trees covering the street in its whole extension, their length, orientation, and SVF. Table 1 summarises these characteristics, and Figure 3 presents fisheye pictures taken in each street. Streets 0 and I have the highest SVFs, while II and III have the lowest due to tree cover. Streets 0 and II are the only ones that do not allow car passage.

Table 1. Characteristics of each street.

Street	Main activity	Cars	Trees	Length (m)	Orientation	SVF
0	Walking	No	Yes	-	NW-SE	0.679
I	Commercial	Yes	No	283	NE-SW	0.618
II	Commercial	No	Yes	440	NE-SW	0.271
III	Residential	Yes	Yes	479	NE-SW	0.171 - 0.369
IV	Residential	Yes	No	349	NE-SW	0.483
V	Residential	Yes	No	337	NE-SW	0.506

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Fisheye pictures of each street.

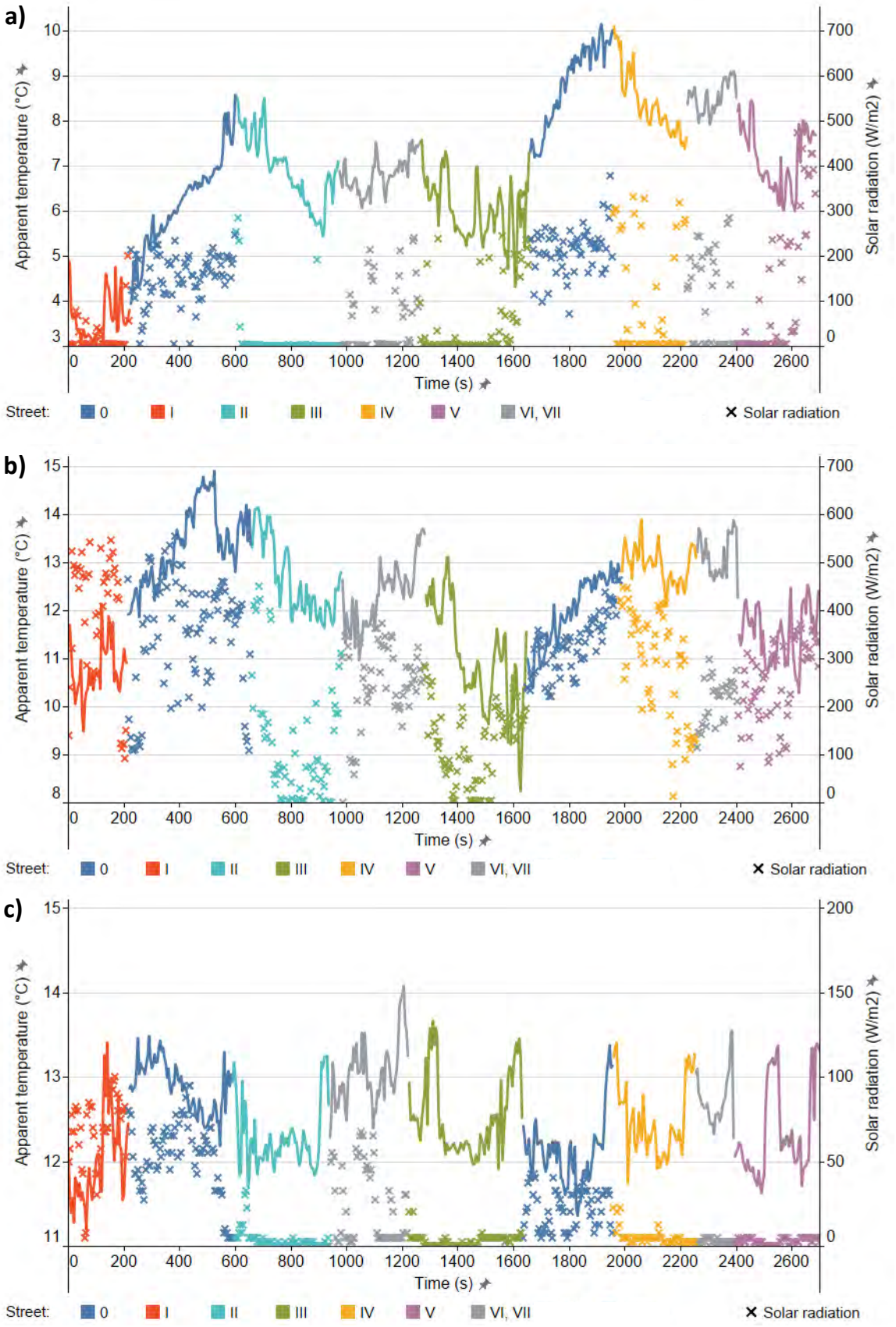


4. Results and discussions

The cooling effect of the sea was analysed through the comparison of the air temperature and apparent temperature among the streets. Figure 4 shows the variation on the apparent temperature (line) along the duration for each walk. A limitation of apparent temperature is that this metric does not include solar radiation, then solar radiation was also plotted in these graphs (crosses).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 4. Apparent temperature and solar radiation variation along the walk at 8 am (a), midday (b), and 4 pm (c).



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

At 8 am, it was observed that the increase in apparent temperature is related to higher solar radiation, which was noticed on the boardwalk along the seafront (street 0). The other streets, which are in a perpendicular direction in relation to the boardwalk, have a very low solar radiation due to the sun position at this time of day making streets in their orientation to be almost completely shaded by buildings. Then, in streets I to V, the apparent temperature was constant or decreasing.

At midday, solar radiation was higher in the streets, but the peak of apparent temperature was again registered on the boardwalk. During this walk, it was detected a temperature decrease in streets II and III, but in opposite directions: in street II, the temperature was decreasing in the inland direction, while in street III, it was decreasing towards the sea. Both have similar morphological characteristics (shaded by trees and low SVF). The main difference among them that could justify this inconsistency is related to the anthropogenic activity that characterises each street since II is mainly commercial and does not allow car passage, while III is more residential and permits car passage.

During the 4 pm walk, the apparent temperature was more constant along the path despite the morphological and activity differences among the streets.

Figure 5 shows the air temperature along each street, considering the distance from the seafront, for the three walks. For each street, the corresponding linear model is also presented. These models were built to verify whether the distance from the seafront is statistically significant to determine the air temperature. This model was chosen because the observed data fitted well the linear model (R^2 = 0.984 at 8 am, R^2 = 0.939 at midday, and R^2 = 0.715 at 4 pm). Table 2 presents the *p* value for the variable “distance from the seafront” in each model. The *p* value tests the null hypothesis that the coefficient of the variable is equal to zero, i.e., there is no correlation between the predictor (distance from the seafront) and the outcome (air temperature) variables. A significance level of 95% was adopted in this study. Therefore, a *p* value lower than .05 indicates that there is enough evidence to reject the null hypothesis and the variable "distance from the seafront” can be considered statistically significant to the model.

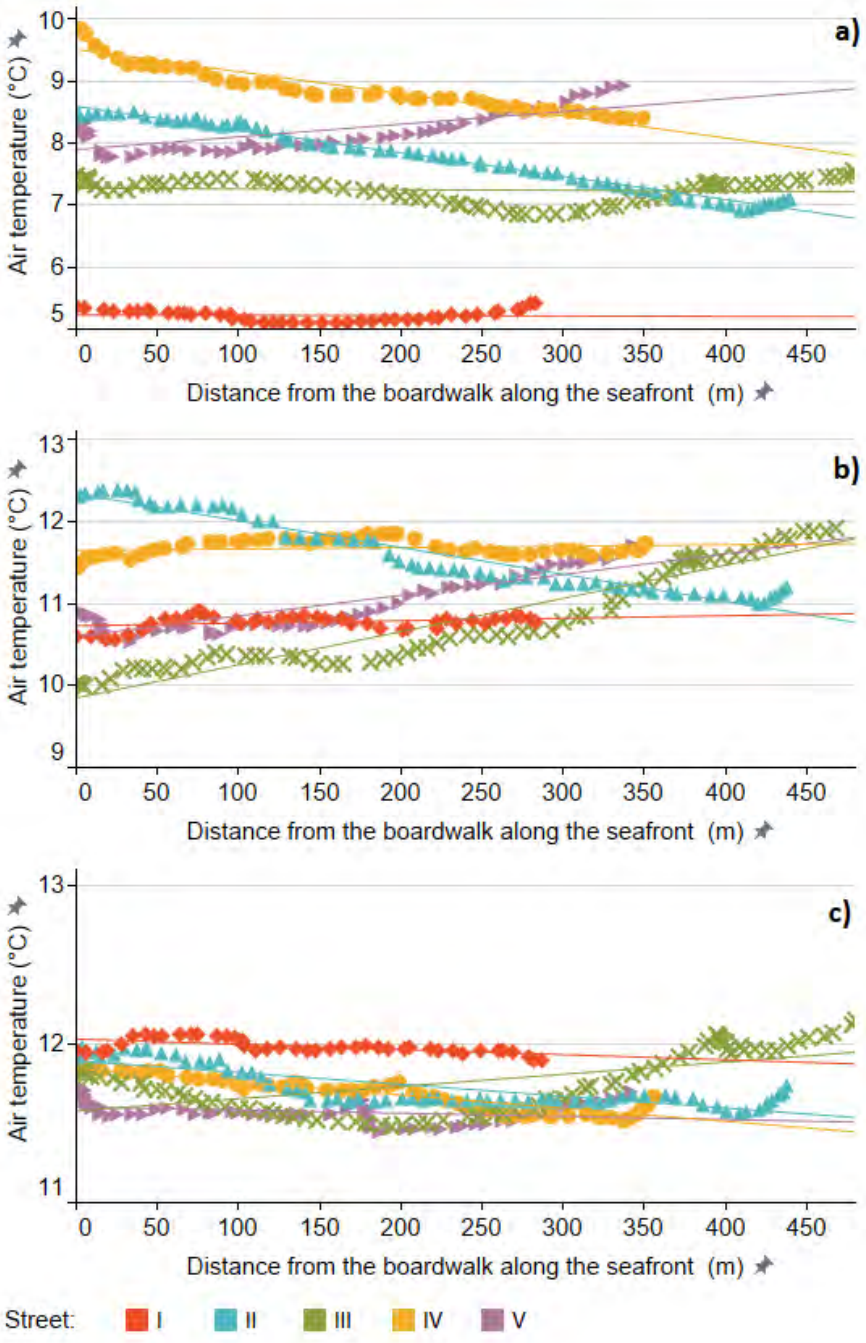
A cooling effect from the sea to the inland direction was expected, which means that the temperature should increase as the distance from the seafront increases. At the 8 am walk, the distance was statistically significant in the models for streets II, IV, and V, but the cooling effect was just observed in the V. At midday, the distance was not statistically significant in street IV, but a cooling effect was registered only in streets III and V. At 4 pm, the distance was significant in all models, but at this period, the air temperature was more constant along the length of the streets, with a clear cooling effect only in street III.

Table 2. p value for each linear model.

Street	p-values		
	8 am	Midday	4 pm
I	.717	.047	< .001
II	< .001	< .001	< .001
III	.411	< .001	< .001
IV	< .001	.130	< .001
V	< .001	< .001	.012

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Air temperature along each street at: (a) 8 am; (b) midday; (c) 4 pm.



In summary, the cooling effect was observed just in streets III and V, with different intensities according to the period of the day. The common characteristics between these two streets are the main activity (residential) and the permission for car passage. They differ in terms of SVF and trees coverage. In fact, no relation between air temperature and SVF was found in this study. However, it is important to highlight that the distinct characteristics of each canyon have influenced the air temperature since the temperature pattern is completely different from one street to another. Streets II and III, for example, have similar SVFs, both are covered by trees, but presented opposite air

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

temperature patterns. The main difference among them is in the anthropogenic activities and the presence or absence of cars.

5. Conclusions

This paper aimed to evaluate the cooling effect of the sea in Riccione, a coastal city in Italy, considering different urban morphologies and anthropogenic activities, and using for the first time a wearable device to monitor this effect. This assessment was based on the analysis of the variation of air temperature and apparent temperature in five streets perpendicular to the sea with different characteristics, such as SVF, main activity, presence or absence of trees, and permission or not for car passage.

No relation between air temperature and SVF was found. There was a statistically significant correlation between air temperature and distance from the sea in most streets, but the cooling effect of the sea was observed in only two of them, with differences according to the period of the day. The fact that it was observed in some streets and not in others can indicate that the architectural layout of this city could somehow block the mitigation potential of the sea, which could be avoided with better descriptions of the urban environments that could support urban planners' decisions.

The urban microclimate is influenced by several complex factors, like the geometry, building materials properties, and the intensity of anthropogenic activities. Therefore, the cooling or heating patterns observed in this study probably are a result of the complexity of each urban canyon that was analysed. This aspect highlights the importance of carrying out environmental monitoring with high spatial and temporal granularities in these environments. In this way, it is possible to describe in detail the thermal environment in these places, and then precisely design urban planning solutions to mitigate specific thermal discomfort triggers.

In future developments, further descriptions of the urban canyons should be included in the analysis, like surface materials, to better understand why the temperature profiles differ among the streets. Moreover, the monitoring should be repeated during summer to investigate the seasonal differences of the UHI in a coastal city. In addition, some studies have reported that water bodies have the opposite effect (i.e., a warming effect) during the night [14,31]. Hence, repeating this monitoring during night-time could be useful to confirm and further describe this phenomenon.

References

1. United Nations Human Settlements Programme *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*; 2020; ISBN 978-92-1-0054386.
2. Kousis, I.; Pigliautile, I.; Pisello, A.L. Intra-Urban Microclimate Investigation in Urban Heat Island through a Novel Mobile Monitoring System. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 9732, doi:10.1038/s41598-021-88344-y.
3. Santamouris, M. Recent Progress on Urban Overheating and Heat Island Research. Integrated Assessment of the Energy, Environmental, Vulnerability and Health Impact. Synergies with the Global Climate Change. *Energy Build.* **2020**, *207*, 109482, doi:10.1016/J.ENBUILD.2019.109482.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Santamouris, M.; Osmond, P. Increasing Green Infrastructure in Cities: Impact on Ambient Temperature, Air Quality and Heat-Related Mortality and Morbidity. *Buildings* **2020**, *10*, doi:10.3390/buildings10120233.
5. Yang, X.; Peng, L.L.H.; Jiang, Z.; Chen, Y.; Yao, L.; He, Y.; Xu, T. Impact of Urban Heat Island on Energy Demand in Buildings: Local Climate Zones in Nanjing. *Appl. Energy* **2020**, *260*, 114279, doi:10.1016/J.APENERGY.2019.114279.
6. Arghavani, S.; Malakooti, H.; Ali Akbari Bidokhti, A.A. Numerical Assessment of the Urban Green Space Scenarios on Urban Heat Island and Thermal Comfort Level in Tehran Metropolis. *J. Clean. Prod.* **2020**, *261*, 121183, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.121183.
7. Norton, B.A.; Coutts, A.M.; Livesley, S.J.; Harris, R.J.; Hunter, A.M.; Williams, N.S.G. Planning for Cooler Cities: A Framework to Prioritise Green Infrastructure to Mitigate High Temperatures in Urban Landscapes. *Landsc. Urban Plan.* **2015**, *134*, 127–138, doi:10.1016/J.LANDURBPLAN.2014.10.018.
8. Wong, N.H.; Tan, C.L.; Kolokotsa, D.D.; Takebayashi, H. Greenery as a Mitigation and Adaptation Strategy to Urban Heat. *Nat. Rev. Earth Environ.* **2021**, *2*, 166–181, doi:10.1038/s43017-020-00129-5.
9. Wang, Y.; Ouyang, W. Investigating the Heterogeneity of Water Cooling Effect for Cooler Cities. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *75*, doi:10.1016/J.SCS.2021.103281.
10. Zhou, X.; Zhang, S.; Zhu, D. Impact of Urban Water Networks on Microclimate and PM2.5 Distribution in Downtown Areas: A Case Study of Wuhan. *Build. Environ.* **2021**, *203*, doi:10.1016/J.BUILDENV.2021.108073.
11. Fabiani, C.; Pisello, A.L.; Bou-Zeid, E.; Yang, J.; Cotana, F. Adaptive Measures for Mitigating Urban Heat Islands: The Potential of Thermochromic Materials to Control Roofing Energy Balance. *Appl. Energy* **2019**, *247*, 155–170, doi:10.1016/J.APENERGY.2019.04.020.
12. Chiatti, C.; Fabiani, C.; Cotana, F.; Pisello, A.L. Exploring the Potential of Photoluminescence for Urban Passive Cooling and Lighting Applications: A New Approach towards Materials' Optimization. *Energy* **2021**, *231*, 120815, doi:10.1016/J.ENERGY.2021.120815.
13. Gunawardena, K.R.; Wells, M.J.; Kershaw, T. Utilising Green and Bluespace to Mitigate Urban Heat Island Intensity. *Sci. Total Environ.* **2017**, *584–585*, 1040–1055, doi:10.1016/J.SCITOTENV.2017.01.158.
14. Moyer, A.N.; Hawkins, T.W. River Effects on the Heat Island of a Small Urban Area. *Urban Clim.* **2017**, *21*, 262–277, doi:10.1016/J.UCLIM.2017.07.004.
15. Peng, W.; Yuan, X.; Gao, W.; Wang, R.; Chen, W. Assessment of Urban Cooling Effect Based on Downscaled Land Surface Temperature: A Case Study for Fukuoka, Japan. *Urban Clim.* **2021**, *36*, 100790, doi:10.1016/J.UCLIM.2021.100790.
16. Wu, Z.; Zhang, Y. Water Bodies' Cooling Effects on Urban Land Daytime Surface Temperature: Ecosystem Service Reducing Heat Island Effect. *Sustain.* 2019, *11*.
17. Hathway, E.A.; Sharples, S. The Interaction of Rivers and Urban Form in Mitigating the Urban Heat Island Effect: A UK Case Study. *Build. Environ.* **2012**, *58*, 14–22,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

doi:10.1016/J.BUILDENV.2012.06.013.

18. Cai, Z.; Han, G.; Chen, M. Do Water Bodies Play an Important Role in the Relationship between Urban Form and Land Surface Temperature? *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *39*, 487–498, doi:10.1016/J.SCS.2018.02.033.
19. Sun, R.; Chen, L. How Can Urban Water Bodies Be Designed for Climate Adaptation? *Landsc. Urban Plan.* **2012**, *105*, 27–33, doi:10.1016/J.LANDURBPLAN.2011.11.018.
20. Zheng, Y.; Li, Y.; Hou, H.; Murayama, Y.; Wang, R.; Hu, T. Quantifying the Cooling Effect and Scale of Large Inner-City Lakes Based on Landscape Patterns: A Case Study of Hangzhou and Nanjing. *Remote Sens.* 2021, *13*.
21. Sharmin, T.; Steemers, K.; Matzarakis, A. Microclimatic Modelling in Assessing the Impact of Urban Geometry on Urban Thermal Environment. *Sustain. Cities Soc.* **2017**, *34*, 293–308, doi:10.1016/J.SCS.2017.07.006.
22. Yan, H.; Fan, S.; Guo, C.; Wu, F.; Zhang, N.; Dong, L. Assessing the Effects of Landscape Design Parameters on Intra-Urban Air Temperature Variability: The Case of Beijing, China. *Build. Environ.* **2014**, *76*, 44–53, doi:10.1016/J.BUILDENV.2014.03.007.
23. Pigliautile, I.; D'Eramo, S.; Pisello, A.L. Intra-Urban Microclimate Mapping for Citizens' Wellbeing: Novel Wearable Sensing Techniques and Automatized Data-Processing. *J. Clean. Prod.* **2021**, *279*, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.123748.
24. Pigliautile, I.; Pisello, A.L. A New Wearable Monitoring System for Investigating Pedestrians' Environmental Conditions: Development of the Experimental Tool and Start-up Findings. *Sci. Total Environ.* **2018**, *630*, 690–706, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.02.208.
25. Cureau, R.J.; Pigliautile, I.; Pisello, A.L. A New Wearable System for Sensing Outdoor Environmental Conditions for Monitoring Hyper-Microclimate. *Sensors* 2022, *22*.
26. Chew, R.; Thornburg, J.; Jack, D.; Smith, C.; Yang, Q.; Chillrud, S. Identification of Bicycling Periods Using the MicroPEM Personal Exposure Monitor. *Sensors* 2019, *19*.
27. Steadman, R.G. A Universal Scale of Apparent Temperature. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **1984**, *23*, 1674–1687, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<1674:AUSOAT>2.0.CO;2.
28. Yin, Q.; Cao, Y.; Sun, C. Research on Outdoor Thermal Comfort of High-Density Urban Center in Severe Cold Area. *Build. Environ.* **2021**, *200*, 107938, doi:10.1016/J.BUILDENV.2021.107938.
29. Honjo, T.; Lin, T.-P.; Seo, Y. Sky View Factor Measurement by Using a Spherical Camera. *J. Agric. Meteorol.* **2019**, *75*, 59–66, doi:10.2480/agrmet.D-18-00027.
30. Beck, H.E.; Zimmermann, N.E.; McVicar, T.R.; Vergopolan, N.; Berg, A.; Wood, E.F. Present and Future Köppen-Geiger Climate Classification Maps at 1-Km Resolution. *Sci. Data* **2018**, *5*, 180214, doi:10.1038/sdata.2018.214.
31. Steeneveld, G.J.; Koopmans, S.; Heusinkveld, B.G.; Theeuwes, N.E. Refreshing the Role of Open Water Surfaces on Mitigating the Maximum Urban Heat Island Effect. *Landsc. Urban Plan.* **2014**, *121*, 92–96, doi:10.1016/J.LANDURBPLAN.2013.09.001.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Green books ad alta voce per una transizione ecologica e culturale

Maria Ermelinda De Carlo 1,*

[1] Università degli Studi di Perugia

*** Autore di riferimento: E-Mail: Ermelinda.decarlo@unipg.it**

Abstract: Il contributo sostiene la necessità di ricostruire una mentalità green nel post pandemia, attraverso la ricerca di modelli e percorsi formativi che promuovano azioni per la transizione ecologica e culturale, coinvolgendo l'area pedagogica, e quindi la dimensione educativa in termini di mobilitazione delle green skills a partire dalle scuole. Dopo aver scandagliato il costrutto di competenza ecologica, si presenta il progetto triennale *Green Books ad alta voce per una transizione ecologica e culturale* in collaborazione con TIM. La ricerca, ancora nei primi mesi della sua attuazione, si propone di sfruttare le potenzialità della pratica della lettura ad alta voce, che come la letteratura scientifica ha dimostrato negli anni agisce su diverse dimensioni cognitive, linguistiche ed emotivo-relazionali, e del potere delle narrazioni a tema ecologico (green books) per incoraggiare comportamenti ecosostenibili. Operativamente sarà condotta una ricerca standard su un campione tra gruppi sperimentali e di controllo è di circa 500 studenti tra i 3 e i 14 anni sul territorio nazionale a cui verrà proposto un training di lettura ad alta voce di green books di 60 ore. Si mira a mettere a punto, per il primo ciclo di istruzione, un modello educativo efficace per lo sviluppo delle competenze ecologiche, monitorando quantitativamente e qualitativamente gli effetti dell'impatto del training su ecological literacy, ecological skills, ecological awareness e eco-friendly living. Allo stesso tempo si intende dare nuovo impulso alla letteratura per l'infanzia e la preadolescenza green, individuando nell'editoria nazionale e internazionale testi di narrativa selezionati per progressività e bibliodiversità, attraverso l'implementazione di un catalogo digitale ad hoc.

Keywords: Competenze ecologiche; green books; green school skills; reading aloud; transazione ecologica.

1. Introduzione: ricostruire una mentalità green a partire dalla scuola

La pandemia del Covid-19 ha messo in evidenza in modo significativo le interrelazioni esistenti tra i nostri sistemi naturali e quelli sociali. Nello sconvolgere la vita e le abitudini di tutta l'umanità, i lockdown nazionali e le misure preventive hanno avuto un significativo impatto sull'ambiente e su Pianeta.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Il Report redatto dall'European Environment Agency [1] riporta tra le principali conseguenze ambientali della pandemia globale, sia quelle positive e sia quelle negative.

Da un lato ad esempio c'è il miglioramento della qualità dell'aria. L'aumento dello smart working ha, infatti, provocato la riduzione dell'uso di mezzi di trasporto inquinanti e favorito la scelta di privilegiare il digitale al cartaceo. Sono pertanto diminuite le concentrazioni di NO2 e PM10 [2]), che hanno contribuito ad un 30% in meno dell'inquinamento atmosferico (Cina, Francia, Europa, Italia, Spagna e Stati Uniti). Nelle città più inquinate, come Milano e Madrid, questa riduzione è arrivata addirittura al 70%. Si è riscontrato inoltre anche una riduzione dell'inquinamento acustico [3]. Allo stesso tempo, tuttavia, si è rilevato un aumento dei rifiuti di plastica monouso [4], determinato fondamentalmente da motivazioni di ordine igienico-sanitario: mascherine, guanti in lattice, contenitori di plastica per igienizzanti e tanti altri dispositivi di sicurezza, necessari per il contenimento del virus, che hanno fatto crescere esponenzialmente questa tipologia di rifiuti [5-6].

Secondo la World Health Organization [7] l'uso di imballaggi di plastica per gli ordini di merci online, di prodotti di plastica usa e getta nel take away è destinato ad aumentare [8]. Lo smaltimento sicuro della plastica dopo l'uso è diventato una questione di grave preoccupazione. I prodotti finiscono sulle strade, negli habitat selvatici e nei mari (DW 2020). Anche lo smaltimento sicuro dei DPI è fonte di preoccupazione [9].

Queste sole due conseguenze citate sono sufficienti a far riflettere su come le azioni umane, influenzano l'ambiente e gli ecosistemi naturali. Si pensi, inoltre che, la disinfezione di massa e l'uso a livello mondiale di disinfettanti per le mani contenenti alcol e isopropanolo e di detergenti antibatterici, ha comportato ulteriori danni [10]. Se da un lato ci sono prodotti come l'ipoclorito di sodio, gli acidi ipoclorosi e il cloro, molto utilizzati e molto tossici per l'ambiente e i microrganismi, che sono degradabili e possono essere rimossi prima di raggiungere l'ambiente; ci sono altri saponi antibatterici che contengono triclocarban e triclosan, elementi nocivi sia per l'uomo sia per la salute dell'ambiente, perché difficili da degradare, che costituiscono il 60% della massa di tutti i farmaci che si trovano nei fanghi degli impianti di trattamento delle acque reflue e nelle acque di scarico [12].

D'altronde non è una novità che la distruzione dell'ambiente e la conseguente perdita di biodiversità, causata dall'urbanizzazione, dall'inquinamento e dai moderni metodi di allevamento industriale degli animali determini danni sulla salute umana. È stato ampiamente dimostrato che il Coronavirus è una zoonosi, ovvero una malattia diffusa in alcune specie animali, ha trasferito infezioni e virus da una specie all'altra. Si prevede che la crescente impronta che l'essere umano sta avendo sull'ambiente porterà alla crescita esponenziale di queste zoonosi: circa il 60% delle nuove malattie che si svilupperanno saranno infatti di origine animale.

Con la ripresa di varie attività a livelli normali, anche gli effetti ambientali positivi hanno iniziato a svanire. Da qui l'urgenza di ripensare un nuovo rapporto con la natura, privilegiando uno stile di vita sostenibile e rispettoso delle specie vegetali e animali che abitano il nostro pianeta.

La resilienza della società dipende da un sistema di supporto ambientale resiliente [13]. Si rende pertanto necessario ricostruire una cultura green attraverso la ricerca di modelli e percorsi formativi che promuovano azioni per la transizione ecologica e culturale, coinvolgendo anche l'area pedagogica [14].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

La salvaguardia dell'ecosistema, infatti, non può prescindere dai comportamenti individuali e collettivi e, dunque, interessa profondamente la dimensione educativa in termini di promozione e mobilitazione delle green skills a partire dai bambini [15].

L'apprendimento ambientale in questo caso ha un ruolo importante nel fornire una varietà di conoscenze agli studenti, futuri cittadini del nostro pianeta e destinatari principali delle azioni e dei goals dell'Agenda 2030. Nel documento "Trasformare il nostro mondo. L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile", adottato dai governi dei 193 Paesi membri delle Nazioni Unite in occasione del Summit sullo Sviluppo Sostenibile del 25-27 settembre 2015 si legge:

I bambini e le giovani donne e uomini sono agenti critici del cambiamento e troveranno nei nuovi Obiettivi una piattaforma per canalizzare le loro infinite capacità di attivismo nella creazione di un mondo migliore [16].

L'Agenda 2030 affida il suo programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità, ai giovani. È, questa, la più grande sfida globale, basata su uno spirito di rafforzata solidarietà globale: portare il mondo sul percorso della sostenibilità e della resilienza, in un viaggio collettivo in cui nessuno viene lasciato indietro.

A partire da questo documento, ancor prima della pandemia, nelle Indicazioni Nazionali e Nuovi scenari del 2018, si prospettava all'interno delle scuole uno scenario del tutto coerente agli 17 obiettivi enunciati dall'ONU:

L'istruzione, tuttavia, può fare molto per tutti gli obiettivi enunciati nell'Agenda, fornendo competenze culturali, metodologiche, sociali per la costruzione di una consapevole cittadinanza globale e per dotare i giovani cittadini di strumenti per agire nella società del futuro in modo da migliorarne gli assetti [17].

La Missione 2 prevista dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) [18], rivoluzione verde e transizione ecologica, è possibile se si agisce su più fronti. Proteggere il patrimonio naturale e la biodiversità, scegliere di privilegiare le risorse rinnovabili, ridurre gli abusi ecologici, sono comportamenti che per essere agiti devono coinvolgere tutti ed entrare in un *modus vivendi et operandi* di una Green Communities, attraverso l'educazione e la promozione di competenze.

Nel PNRR si riporta infatti:

Cultura e consapevolezza dei temi e delle sfide ambientali, diffuse in modo ampio nella cittadinanza, in particolar modo nelle nuove generazioni, rappresentano un presupposto essenziale per affrontare con successo la transizione ecologica. Tale investimento si propone di contribuire al raggiungimento di tre obiettivi prioritari: i) aumentare il livello di consapevolezza sugli scenari di cambiamento climatico e sulle relative conseguenze; ii) educare in merito alle opzioni a disposizione per l'adozione di stili di vita e consumi più sostenibili a livello di individui, famiglie e comunità; iii) promuovere l'adozione di comportamenti virtuosi, anche a livello di comunità (e.g. coinvolgendo insegnanti, famiglie, stakeholder locali)" [18, p.128).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Se sul piano politico istituzionale Governi e Capi di Stato hanno messo in campo documenti e azioni come *l'European Green Deal* [19], come per l'Italia il Piano nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR); allo stesso tempo le aziende hanno introdotto sistemi di gestione ambientale, ottimizzato i loro processi di produzione e migliorato la qualità ecologica dei loro prodotti, hanno intrapreso azioni virtuose, magari avvalendosi di agevolazioni fiscali. Anche il Sistema educativo può fare la sua parte nella costruzione di una mentalità green resiliente e duratura. Anzi è il luogo privilegiato in cui può essere coltivata quell'intelligenza ecologica, determinante per agire, per scegliere e per risolvere problemi in un'ottica di sostenibilità.

Le sollecitazioni presenti nei documenti dell'UE, del Consiglio d'Europa, dell'ONU e nelle Indicazioni 2012 hanno iniziato a richiamare le comunità professionali delle scuole a organizzare il curricolo e le proposte didattiche in modo da inquadrarle nella cornice di senso e significato della cittadinanza, con un'attenzione all'ambiente. È su questa scia che la legge 19/2019 sull'Educazione civica [20] ha previsto all'interno del curricolo un nucleo espressamente dedicato allo sviluppo sostenibile e all'ambiente.

Per accompagnare in questo processo il Miur ha avviato il Piano RiGenerazione Scuola [21], uno strumento a disposizione delle scuole allo scopo di mettere a sistema e rendere visibili le diverse attività formative che già si attuano all'interno; fornire strumenti didattici sull'educazione alla sostenibilità; monitorare e implementare le attività di educazione civica per quanto riguarda l'educazione ambientale; offrire strumenti di formazione e risorse per i docenti; creare legami educativi attraverso l'istituzione di Green Community. Gli obiettivi del Piano sono proposti su tre livelli: sociali, ambientali ed economici (Tabella 1).

Tabella 1. Gli obiettivi del Piano RiGenerazione Scuola

Obiettivi sociali	- Recuperare la socialità - Superare il pensiero antropocentrico - Maturare la consapevolezza del legame fra solidarietà ed ecologia - Abbandonare la cultura dello scarto - Maturare il diritto all'accesso dei beni comuni
Obiettivi ambientali	- Maturare la consapevolezza del legame imprescindibile fra le persone e la CASA COMUNE - Maturare la consapevolezza dei diritti ecologici di tutti gli esseri viventi - Diventare consapevoli che i problemi ambientali vanno affrontati in modo sistemico - Imparare a minimizzare gli impatti dell'azione dell'uomo sulla natura - Maturare la consapevolezza dell'importanza del suolo
Obiettivi economici	- Conoscere la bioeconomia - Conoscere il sistema dell'economia circolare - Acquisire la consapevolezza che gli sconvolgimenti climatici sono anche un problema economico - Imparare a costruire i mestieri e le imprese del futuro a zero emissioni, circolari e rigenerative - Acquisire competenze green

Al centro del nostro discorso sono le competenze green e le diverse azioni didattiche per mobilitarle fin dalla prima infanzia.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Il costrutto di base: le competenze ecologiche

Prima di poter pensare ad azioni efficaci e durature che incoraggino le competenze ecologiche, è fondamentale destrutturarne il costrutto, al fine di operazionalizzare la variabile e renderla osservabile e misurabile.

Orientarsi nella giungla dei termini non è sempre così semplice: competenze green, competenze ambientali, competenze ecologiche, competenze verdi, competenze sostenibili, eco-competenze, ecc…[22].

Nella triangolazione della letteratura di riferimento emerge che l'educazione alla sostenibilità comprende l'educazione ambientale, e quella ambientale a sua volta quella ecologica.

L'educazione alla sostenibilità, dunque, assume quindi un significato interdisciplinare, coinvolgendo ogni disciplina in una sorta di aggiornamento continuo e che si traduce in un sistema di educazione permanente che concorre ad uno sviluppo sostenibile non solo ambientale, ma anche economico-sociale equilibrato.

L'educazione ambientale implica lo stimolare i rapporti e le relazioni che un soggetto sviluppa nel contesto in cui è inserito, permettendo la costruzione di capacità educative che consentono all'individuo di intraprendere un percorso ricco di esperienze concrete che lo rendono protagonista dei suoi processi di conoscenza, percorsi che favoriscono la consapevolezza del sé, dell'altro e delle relazioni con l'ambiente. L'educazione ecologica è quella che operativamente fornisce gli strumenti e le abilità tesi all'assunzione di comportamenti responsabili e consapevoli.

Al di là delle accezioni, tuttavia, la dimensione ecologica deve essere letta come "noologica", relativa cioè agli strumenti di pensiero. Luigina Mortari (2022) [23] sostiene che all'origine dell'inquinamento materiale ci sia un inquinamento meno visibile, ma non meno problematico: l'inquinamento culturale, ovvero l'assenza di un tessuto concettuale, che spesso porta alla circolazione di un concetto semplificato di educazione ambientale negli ambienti scolastici.

Figura 1. Le competenze per un'educazione sostenibile (Unesco, 2017)



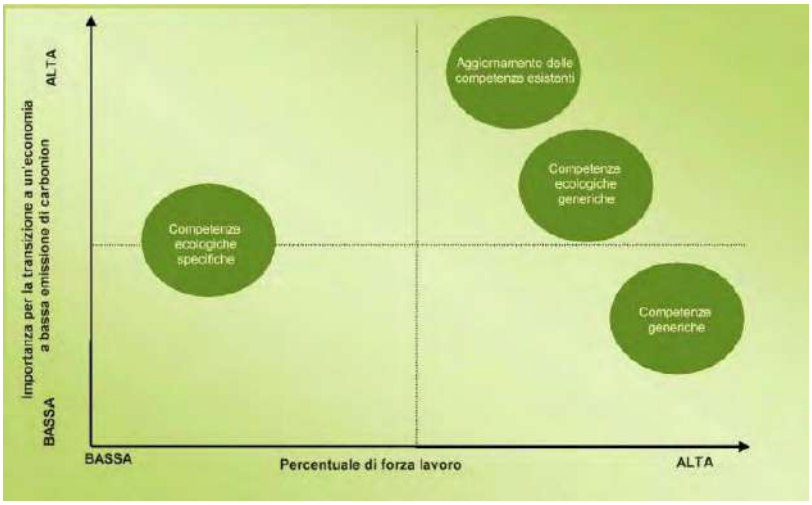
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Per poter scegliere gli strumenti e le azioni didattiche che possano concretamente agire sullo sviluppo di una competenza è dunque necessario smontarla nella sua complessità in dimensioni.

Il documento dell'UNESCO "Educazione agli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile. Obiettivi di apprendimento" (2017) [24] individua otto competenze trasversali fondamentali per il raggiungimento di tutti gli obiettivi dell'Agenda 2030 (Figura 1).

In ambito più aziendale un interessante studio condotto da Cedefop propone un quadro in cui acquistano rilevanza le competenze ecologiche generiche (Figura 2), definite come "competenze determinanti per il passaggio a un'economia a bassa emissione di carbonio è indispensabile migliorare le competenze attuali anziché definire nuovi programmi di studio e di formazione per fornire nuove competenze ecologiche" [25].

Figura 2. Fabbisogno di competenze per l'economia a bassa emissione di carbonio



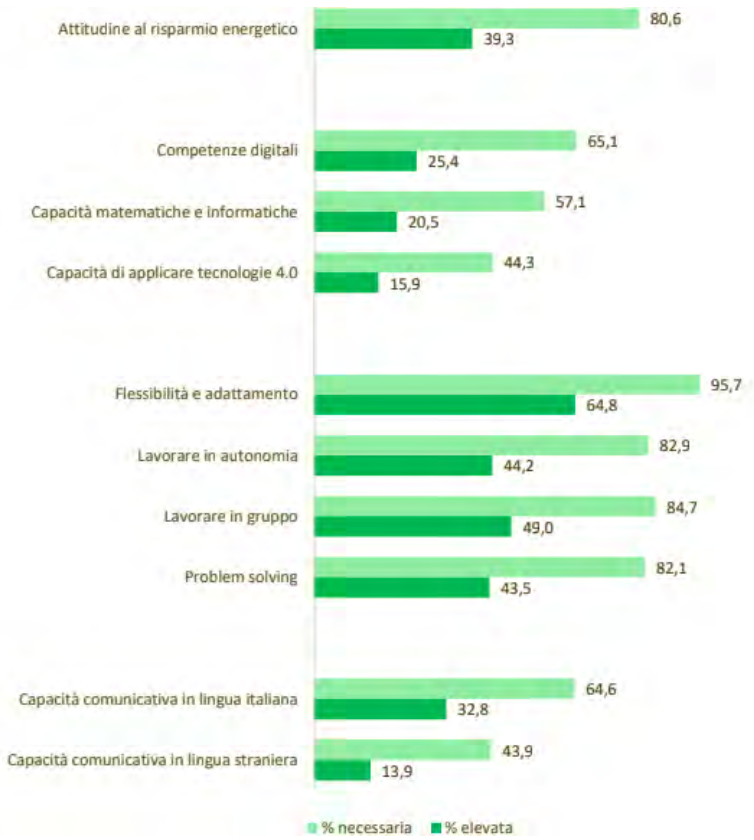
Fonte: Cedefop, 2010

Nel 2021 il sistema Informativo Excelsior all'interno di un'indagine per UnionCamere [26] sull'analisi della domanda di competenze legate alla green economy nelle imprese ha isolato le competenze più richieste nei green jobs. Lo studio completa il concetto di competenze ecologiche generiche, offrendo uno sguardo più ampio. Dall'analisi emerge come le competenze "verdi" non si limitano solo allo sviluppo di un'attitudine al risparmio energetico e ad una sensibilità alla riduzione dell'impatto ambientale delle nostre attività. La mappatura che ne viene fatta ingloba competenze più ampie (Figura 3): le competenze digitali, capacità matematiche e informatiche, capacità di applicare le tecnologie; la flessibilità e l'adattamento, la capacità di lavorare in gruppo, la capacità di lavorare in autonomia e l'attitudine al problem solving; a capacità comunicativa in lingua italiana, la capacità comunicativa in lingua straniera.

Si tratta di competenze alla base dell'inclusione a scuola, che influenzano non solo il successo formativo, ma anche i comportamenti sociali [27].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 3. Domanda di competenze di grado necessario ed elevato per i green jobs nel 2020 (% sul totale entrate)



Fonte: Unioncamere-ANPAL, Sistema Informativo Excelsior, 2020

Sul piano didattico le proposte di ricostruzione delle competenze da parte delle Eco-school sono di certo da approfondire. In particolare la Green School di Bali [29], una delle eco-school più rinomate al mondo propone ben 9 competenze individuali da perseguire a scuola, che sono integrate verticalmente in tutti i settori del curricolo di apprendimento per la creazione di una comunità di studenti che renda il mondo sostenibile.

Tabella 1. Le nove Green School Skills proposto dalla Green school di Bali

Pensare in modo creativo – Essere originale. Essere fantasiosi	**Attivare** – Sentirsi responsabilizzati. Dare potere agli altri. Prendere azione. Fare la differenza.	**Adattarsi** - Piegarsi come un bambù
Pensare in modo critico – Scavare più a fondo. Chiedere perché. Creare collegamenti.	**Essere consapevoli** - Guardarsi dentro. Cerca di capire se stesso.	**Collaborare** – Essere Fiduciosi da soli. Più forti insieme. Trovare la vostra strada.
Pensare per sistemi - Fare un passo indietro e vedere l'intero quadro	**Comunicare** - Elaborare, organizzare ed esprimere coerentemente idee	**Risolvere i problemi** - Capire risolvere il problema. Andare al sodo.

I diversi modelli proposti sono stati messi in connessione con quello basato su Raccomandazione europea, 2018), in cui la competenza viene definita come la combinazione di conoscenze, abilità e

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

atteggiamenti, rivisitato e integrato all'interno della cornice del *trasformative learning* di Mezirow [30].

Saper, saper fare e saper essere nella versione rinnovata di matrice francese legata a Le Boterf [31], fortemente radicato ad un concetto di competenza individuale, vengono ricollocate in una logica di ricerca-azione partecipata che alla fine porta al cambiamento.

La competenza ecologica è una competenza che deve essere letta nella logica di un apprendimento trasformativo, cioè di un processo che porta al cambiamento dei sistemi di riferimento dell'individuo e del Pianeta.

La conoscenza e le riflessioni sulle distorsioni socio-culturali, devono condurre ad una problematizzazione, che tuttavia deve essere in grado di attivare cambiamenti nelle relazioni sia a livello individuale/locale sia sociale/di sistema.

Il modello dunque integrato propone una competenza trasformazionale, orientata all'azione, che supporti un apprendimento autogestito, la partecipazione e la collaborazione, un approccio alla soluzione dei problemi

In particolare si propone un modello di competenza ecologica organizzato per livelli (Tabella 2) di complessità. Per ciascun livello si riportano gli indicatori e i processi messi in atto. Per la declinazione si è tenuto conto del documento delle Nazioni Unite "Learning for the future – Competences in education for Sustainable Development" (UNECE 2012) [32].

Tabella 2. Modello della competenza ecologica elaborato per il progetto "Green Books"

Dimensioni della competenza ecologica	Indicatori	Processi
Ecological literacy (ovvero il sapere ecologico)	Conoscenza del lessico e concetti di base dell'ecologia, le relazioni tra gli esseri umani e tutti i sistemi viventi, l'impronta ecologica, l'overshootday, i principi della sostenibilità ambientale, le risorse ecologiche, le pratiche green, ecc...	**Learning to Know:** Imparare a conoscere si riferisce alla comprensione delle sfide che la società deve affrontare sia a livello locale che globale e al ruolo potenziale degli educatori.
Ecological Skills (ovvero il saper fare ecologico)	Capacità di attenzione per cogliere i dettagli del mondo fenomenico; le abilità percettivo-sensoriali per fare esperienza dell'ambiente, per entrare in contatto con il mondo circostante; l'environmental problem-solving skill.	**Learning to do:** Imparare a fare si riferisce allo sviluppo di abilità pratiche e competenze d'azione in relazione all'educazione allo sviluppo sostenibile.
Ecological Awareness (ovvero il saper essere ecologico)	Azioni concrete, in particolare azioni promosse, limitate e libere. Le relazioni fisiche tra il soggetto e l'ambiente, ma anche le regole del contesto e le opportunità emotive, sociali e culturali che l'individuo percepisce nell'ambiente.	**Learning to be:** Imparare a essere si rivolge allo sviluppo delle proprie caratteristiche personali e della capacità di agire con maggiore autonomia, giudizio e responsabilità personale in relazione allo sviluppo sostenibile.
Eco-friendly living (ovvero il saper vivere in modo ecologico)	Capacità di apportare modifiche alle proprie routine e riconsiderare il coinvolgimento con i sistemi intorno a sè. Capacità di immaginare il cambiamento e realizzare la trasformazione.	**Learning to live together:** Imparare a vivere insieme contribuisce allo sviluppo di partenariati e all'apprezzamento dell'interdipendenza, del pluralismo, della comprensione reciproca e della pace.

Sul piano metodologico un assetto del genere richiede un approccio olistico capace di integrare il pensiero e la pratica e di cambiare il modo in cui le persone apprendono e i sistemi che supportano l'apprendimento.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Le eco-narrazioni per la promozione delle skills green

La domanda che i pedagogisti e studiosi di settore si pongono è questa: come si sviluppa la competenza ecologica? È sufficiente ridurla all'interno di 33 ore di Educazione civica obbligatorie da proporre attraverso lo studio di tematiche ambientali? Le iniziative a tema ecologico, talvolta isolate, outdoor possono fare la differenza da sole?

La sostenibilità è fatta di valori e di principi che è necessario apprendere a scuola, soprattutto, e all'interno completo sistema di istruzione. La difesa dell'ambiente, dunque, deve essere considerata un fattore culturale e come tale ha bisogno di un percorso di apprendimento che va costruito.

Quale strumento didattico scegliere per agire su conoscenze, abilità e atteggiamenti? Tra le varie possibilità esiste uno strumento universale: le storie.

Da sempre le narrazioni hanno accompagnato l'umanità nell'acquisizione di valori e di un patrimonio culturale e sociale. Le storie hanno consentito agli uomini e alle donne di costruirsi impalcature di pensiero narrativo in grado di sorreggere intere comunità [33]. Tra metafore e immaginazione la nostra esistenza si è intrisa di memoria storica. Le storie a tema green diventano strategiche per lo sviluppo in primis dell'ecological literacy [34].

Negli anni '70 –'80 negli Stati Uniti si è sviluppato un filone di eco-letteratura finalizzato a raccontare la relazione tra gli esseri umani e l'ambiente in tutte le aree della produzione culturale. Attraverso testi narrativi gli ecocritici hanno raccontato l'inquinamento, la natura selvaggia, l'apocalisse, l'abitazione, gli animali, la terra. Gli eco-narratori diventano una sorta di attivisti per la difesa dell'ambiente e per la promozione di una coscienza ecologista attraverso la letteratura e della consapevolezza che "ogni cosa è connessa con qualsiasi altra"[35].

E che dire delle fiabe? Le fiabe influenzano la nostra relazione con la natura selvaggia e con i suoi abitanti non umani [36]. Nel pieno di una crisi climatica, ascoltiamo storie in cui i protagonisti sposano gli orsi o imparano il linguaggio dei serpenti, imparando a vedere oltre il progresso industriale ed economico, a comprendere che non siamo soli sulla Terra e che condividiamo il mondo naturale con serpenti, orsi e lupi. Le fiabe offrono l'occasione per immaginare mondi possibili e opportunità di cambiamento a cui una società potrebbe ispirarsi. In questa prospettiva si è sviluppata negli ultimi anni l'editoria dei Green Books, libri a tema ecologico, dai silent books agli albi illustrati, alle graphic novel, alla narrativa per ragazzi [37].

Di recente ha avuto un grande impulso anche la climate-fiction ("cli-fi") [38], un genere letterario, un misto di *distopico e fantascientifico* che narra la storia di personaggi che vivono in ambienti e luoghi successivi ad un disastro climatico.

Nella lettura è impossibile non rimanere coinvolti dalle avventure dei protagonisti e nel non sviluppare un rapporto empatico con loro. Piccoli, grandi eroi, umani e non umani si pongono in ascolto della natura e decidono di prendersene cura. Quando i bambini si identificano e vivono le esperienze e i sentimenti dei personaggi delle storie, sono in grado di anticipare le conseguenze e capire le cose da una prospettiva più chiara [39].

Il ruolo delle storie anche nel processo di apprendimento, e nello sviluppo dell'intelligenza ecologica [40] è certamente rilevante, in quanto agisce sulla "capacità di leggere" i significati della natura, in

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

contrasto con i modelli comportamentali. Nello sviluppo delle narrazioni si incoraggia la sperimentazione di nuovi tipi di modelli tra scienza e educazione in grado di esprimere i principi generali della natura in termini di modelli cognitivi per il comportamento umano e sociale. Ne scaturisce la possibilità di una raccolta non solo di repertori emotivi, prosociali, ma anche di sistemi socio-ecologici, di quadri scientifici in grado di esprimere la conoscenza ecologica in modo compatibile con le prospettive culturali, in un'unità necessaria tra mente e natura [41].

In Cina le eco-favole sono diventate un modello educativo. Nel 2019 infatti il Governo ha affidato a Gunter Pauli, scrittore vincitore del premio "Best Education on Nature", migliore autore di libri di educazione ambientale, l'incarico di scrivere e pubblicare 365 favole dedicate all'ambiente, una per ogni giorno dell'anno. Parallelamente lo stesso scrittore si è occupato di formare oltre 35.000 insegnanti. Le sue lezioni modello sono considerate così autorevoli che il governo ha deciso che entro un decennio saranno presentate in ogni provincia da Gunter Pauli in persona [42].

Se la lettura di storie è importante, le ricerche, dimostrano che la lettura ad alta voce delle storie, ovvero quella pratica educativa in cui un soggetto adulto legge ad alta voce ad altri soggetti in modo sistematico, quotidiano e continuativo ha certamente un ritorno ancora maggiore in termini di benefici [44-45-46].

Dare un nome alle cose e ai fenomeni. La lettura ad alta voce agisce in modo più efficace nell'allenamento della comprensione ricettiva, in quanto si avvale della memoria fonica che facilita il processo di completamento delle informazioni. Allo stesso tempo, come dimostra la letteratura internazionale agisce su una serie di dimensioni a partire da quelle linguistiche. Infatti, le evidenze registrano che training di lettura ad alta voce già con sole 10 settimane comportano un'espansione del vocabolario sia nella Scuola Primaria [47] sia nelle secondarie [48] e un accrescimento non solo della quantità ma anche della qualità delle parole [49]. In questa direzione proponendo testi a tema ecologico è possibile ipotizzare per deduzione l'acquisizione di lessico specifico [50].

Comprendere anche la complessità. Il riconoscimento dei modelli delle storie, inoltre facilita la comprensione ricettiva, favorendo una migliore comprensione di tematiche anche complesse [51].
L'esposizione alle storie inoltre aiuta gli studenti a diventare ascoltatori migliori e ad essere in grado di prevedere il testo [52] ma anche di leggere oltre e diventare "creatori di idee" [53].

Essere capaci di attenzione. Si tratta di un'abilità fondamentale; questa disposizione della mente dovrebbe costituire uno degli obiettivi prioritari dell'educazione, perchè è la capacità di attenzione che consente alla mente di cogliere quei minimi dettagli su cui è possibile costruire una conoscenza rigorosa del mondo fenomenico: il mondo esterno per il bambino e il mondo della coscienza per il fenomenologo. Si tratta di imparare a pensare in modo attento alla vita nella misura in cui si decide a coltivare uno sguardo sensibile alle cose nel loro apparire. Ricerche svolte nella fascia 6-10 anni [54] sia con ragazzi tra 11 e 13 anni [55] hanno indagato le relazioni tra abilità di lettura e alcune componenti attentive (tempi di reazione visivi, lo span e la selettività) evidenziando incrementi significativi.

Essere ricettivi ovvero attenzione non precodificata. La capacità di stare in un atteggiamento apertamente recettivo nei confronti della realtà è una capacità che va educata; è necessario creare le condizioni in cui i bambini possano esperire stati di passività, dove la mente possa vagabondare

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

liberamente [56]. L'acquisire conoscenze non è legato solo all'esercitare un'azione sull'oggetto, ma anche al lasciare che l'oggetto "pensi dentro di me". Le storie permettono di attingere ai ricordi e all'immaginazione, e aiuta ad ordinare le esperienze passate in sequenze. L'ascolto di una storia porta a un'elaborazione più intensa e profonda delle informazioni [57].

Essere curiosi e allenarsi all'immaginazione. Leggere ad alta voce aiuta i bambini a sviluppare la curiosità [58]. L'esposizione alle storie consente di conoscere le "vite riccamente strutturate al di fuori della sua esperienza", come scriveva Trelease, di sognare come sarebbe crescere in una terra diversa dove la gente rispetta il pianeta, dove si riescono ad ascoltare il respiro della Terra o le voci segrete degli alberi; di visualizzare come sarebbe navigare su un'isola, vivere con i dinosauri, attraversare foreste incontaminate; salvare il mare dalla plastica insieme a balene e delfini; sfidare le montagne o il freddo dei poli per ripristinare l'equilibrio climatico; immaginare come sarebbe essere Mowgli o il Principe Tigre, vivendo tra lupi e animali pericolosi, ma senza averne paura.

Sviluppare il problem solving. Uno studio qualitativo ha dimostrato che il problem solving è influenzato dalla capacità di comprensione (influenzata dall'esposizione alla lettura ad alta voce) [59]. È stato riscontrato, in un campione di bambini tra i 9 e 10 anni, che le abilità di comprensione del testo influenzano in modo significativo e positivo la capacità di risolvere problemi matematici [60], e dunque anche ecologici, come ha dimostrato una ricerca condotta in Indonesia [61].

Fare esperienza percettivo-sensoriale. L'esperienza di ascolto delle storie consente ai bambini e ai ragazzi di tutte le età di entrare nella realtà [62], di attraversare torrenti di parole, immagini e ritmi sintattici che non potrebbero ottenere altrove; di portare gli odori, i suoni e le viste di una storia alla vita, la loro; di sviluppare l'acquisizione di una grammatica dell'arte visiva e sensoriale attraverso un ritorno ai sensi, un mettersi in ascolto delle sensazioni e delle emozioni che emergono dall'incontro partecipato col mondo, ovvero la narrazione di esso.

Diventare empatici. I guadagni come la letteratura di riferimento dimostra sono anche di natura emotivo-relazionali, espandere la comprensione emotiva; migliorare la capacità di regolazione emotiva [63]; aumentare gli indici di intelligenza emotiva e favorire la stabilità emotiva [64]. Allo stesso tempo migliora le abilità interpersonali e prosociali. Le ricerche dimostrano che attività di lettura ad alta voce in classe si associano a comportamenti più rispettosi delle regole di convivenza e che la lettura ad alta voce consente un miglioramento delle attitudini prosociali [65].

Sviluppare il pensiero critico e l'agentività. La lettura ad alta voce sostiene la formazione di sistemi motivazionali, di valori e la progettualità futura [66]. Attraverso storie familiari, poesie, fiabe e canzoni, i bambini e i ragazzi non solo sviluppano le capacità riflessive e metariflessive, ma imparano il nostro patrimonio di valori e ideali [67].

Mobilitare la capacità di empowerment. Uno degli aspetti importanti per vivere eco-friendly è quello di sviluppare consapevolezza di sé e del controllo sulle proprie scelte, decisioni e azioni. L'ascolto delle storie oltre ad agire sull'autoconsapevolezza, favorisce i processi di prefigurazione di situazioni e percorsi possibili, aiuta a costruire un repertorio di modelli e azioni possibili, più o meno plurali o stereotipati, che diventano materiale per ricomporsi in modo originale e agire in modo proattivo.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Il progetto "Green Books per una transazione ecologica e culturale"

Da queste premesse nasce il progetto nazionale triennale "Green books ad alta voce per una transizione ecologica e culturale" proposto dal Dipartimento di Filosofia, Scienze Sociali, Umane e della Formazione in partnership con TIM, attualmente nei primi mesi di attuazione.

L'ipotesi di ricerca è quella di sfruttare da un lato le potenzialità della pratica della lettura ad alta voce, che come la letteratura scientifica ha dimostrato negli anni agisce su diverse dimensioni cognitive, linguistiche ed emotivo-relazionali e dall'altro il potere delle narrazioni a tema ecologico (green books) per promuovere ed educare a comportamenti ecosostenibili.

I macro-obiettivi del progetto sono principalmente due:

- definire protocolli di lettura di qualità capaci di favorire nei bambini tra i 3-14 anni comportamenti e convinzioni improntati alla sostenibilità ambientale;
- individuare le esperienze editoriali internazionali di green books più interessanti per una diffusione in Italia.

L'idea di fondo è di supportare l'approccio per competenze presente nelle Linee Guida sull'educazione ambientale redatte dal MIUR e dal Ministero dell'Ambiente nel 2015, con il contributo tecnico del Formez.

L'educazione allo sviluppo sostenibile si candida a diventare il progetto nell'ambito del quale promuovere le competenze necessarie per mettere in discussione i modelli esistenti, per migliorarli e per costruirne insieme di nuovi. Educare gli italiani, i nostri figli e noi stessi, alla sostenibilità significa attivare processi virtuosi di cambiamento complessivo dei comportamenti e degli stili di vita. Un nuovo approccio all'ambiente fondato sulla sfera valoriale prima che su quella cognitiva [68].

Nelle Linee Guida vi sono infatti le indicazioni per qualificare l'educazione ambientale come didattica per competenze. È previsto l'inserimento dell'educazione ambientale nei programmi scolastici non come nuova disciplina, ma come approccio interdisciplinare che attraversa tutti i livelli d'istruzione, dalla scuola dell'infanzia alla secondaria di II grado, toccando temi quali la tutela delle acque, la biodiversità, l'alimentazione sostenibile, la gestione dei rifiuti, la green economy, l'inquinamento, e così via. L'ora di lettura ad alta voce di green book si colloca nei curricula scolastici in questa cornice, sulla base anche delle diverse sperimentazioni non solo internazionali, ma anche italiane. In particolare un modello è il progetto triennale Leggere:Forte! Promosso dalla Regione Toscana [69] con il coordinamento dell'Università degli Studi di Perugia, del Ufficio scolastico Regionale, dell'Indire, del Centro per il libro e la lettura del Ministero dei Beni Culturali (Cepell) e dell'Associazione NausiKa (Volontari LaaV).

Il progetto ha introdotto la lettura ad alta voce nel sistema scolastico dallo 0-6 allo scolare. I monitoraggi longitudinali degli esiti e i benefici del confermano come lungimirante la scelta di farne una politica educativa regionale.

Forte di questa esperienza il progetto "Green Books" vuole dare nuovo impulso alla letteratura per l'infanzia e la preadolescenza "green" dall'altro vuole agire a livello didattico. L'idea è quella di contribuire a elaborare un modello educativo in grado di favorire lo sviluppo delle competenze per la

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sostenibilità ambientale all'interno delle scuole, che sia monitorabile in termini di impatto e impronta ecologica.

A livello operativo il progetto quasi sperimentale intende sviluppare dei training di lettura ad alta voce di 60 ore in 9 gruppi di studenti dai 3 ai 14 anni, appartenenti alle scuole individuate tra quelle frequentante dai figli dei dipendenti TIM.

La partecipazione della TIM all'interno del progetto è strategica in quanto consente di attivare azioni esplorative in ambito aziendale, con particolare attenzione ai lavoratori con figli tra i 3 e i 14 anni, per individuare categorie di indagine, analizzare visioni e percezioni e per ricostruire una mappatura completa nelle green skills richieste nel mondo del lavoro. A tale scopo vengono proposti focus groups, survay, interviste partecipative, call to action.

La ricerca, inoltre, intende:

- individuare le esperienze editoriali nazionali e internazionali di green books ad alto impatto emotivo per una diffusione nelle scuole;

- implementare uno strumento narrativo digitale in grado di valutare l'impronta ecologica in collaborazione con gli uffici ambiente dei Comuni interessati.

È prevista, infine, la realizzazione di una piattaforma on line su spazio TIM che raccoglierà gli esiti della ricerca, un catalogo nazionale di green books 3-14 anni e altre buone pratiche.

Tabella 3. Le azioni principali previste dal progetto "Green Books aloud"

AZIONI ESPLORATIVE IN AZIENDA	focus groups, survay, interviste partecipative, call to action ai dipendenti TIM con figli tra i 3 e i 14 anni
AZIONI DI RICERCA NELLA LETTERATURA DI SETTORE	ricerca di testi green per ricostruire un catalogo per fascia 3-14
AZIONI NELLE SCUOLE	somministrazione test ex ante ed ex post a classi sperimentali e di controllo; formazione dei docenti sulla lettura ad alta voce; training nelle scuole (60 ore per gruppo)
AZIONI DI PRODUZIONE MATERIALI	traduzioni di green books, realizzazione di audio green books; green e-book; toolkit per docenti; webinar per dipendenti TIM; catalogo nazionale libri green per fascia 3-14
AZIONI SUL TERRITORIO	costruzione di uno strumento narrativo digitale in grado di valutare l'impronta ecologica
AZIONI DI DIFFUSIONE E DISSEMINAZIONE	piattaforma on line su spazio TIM per caricare materiali; eventi narrativi green; laboratori di lettura ad alta voce di green books per i figli dei dipendenti, seminari, pillole di divulgazione….

4.1. Campione, metodo e strumenti

I destinatari diretti del progetto saranno 9 gruppi di studenti di cui di: n.100 bambini 3-6 anni, n. 250 bambini 6-11 scuola primaria (50 per anno), n.150 11-14 anni (50 per anno) appartenenti alle scuole frequentate dai figli dei dipendenti TIM e segnalate in seguito ad una call to action.

E' prevista una formazione di 20 ore del personale docente che sarà formato da esperti sulle tecniche di lettura ad alta voce e sulle modalità di gestione di un training di lettura.

I gruppi di studenti saranno divisi in sottogruppi sperimentali, che saranno esposti alle 60 ore di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

lettura, in sottogruppi di controllo che eseguiranno solo i test ex ante ed ex post.

L'obiettivo principale infatti è quello di misurare gli effetti dell'azione sulle green skills per poter definire protocolli di lettura di qualità, improntati alla sostenibilità ambientale.

Per misurare infatti gli effetti in termini di acquisizione delle competenze ecologiche saranno somministrati strumenti di matrice neuropsicopedagogica individuati sulla base delle dimensioni da osservare e misurare.

In particolare a livello di ricerca quantitativa saranno oggetto di misurazione:

- Benefici linguistici, attraverso la quantificazione del lessico green acquisito al termine del training;
- Benefici cognitivi, attraverso la misurazione delle capacità attentive, del problem solving e delle funzioni esecutive;
- Benefici prosociali, attraverso la misurazione dell'intelligenza sociale.

Parallelamente sarà condotta una ricerca qualitativa volta a misurare le interactional affordances [70] che si collocano in tre campi: promoted action, constrained action; free action. Le effordances comprendono le relazioni fisiche tra il soggetto e l'ambiente, ma anche le regole del contesto e le opportunità emotive, sociali e culturali che l'individuo percepisce nell'ambiente, sono analizzabili attraverso il modello Waters [71]: l'osservazione, l'interrogazione, la problematizzazione.

Gli strumenti utilizzati saranno in questo caso di tipo osservativo, narrativo digitale: check list per l'osservazione diretta delle azioni individuate e decise (in coerenza con l'età anagrafica); raccolta di interviste sul posto; diario di bordo settimanale.

Sarà valutata qualitativamente anche la traduzione in azioni concrete dagli studenti partecipanti, incrociando una logica student voice che si trasforma in una logica student action [72].

L'obiettivo principale sarà quello di misurare gli effetti dell'azione sullo sviluppo delle competenze ecologiche.

I corpus delle indagini qualitative saranno codificati con il supporto del software per l'analisi qualitativa NVivo 12 per individuare le categorie, per analizzare visioni e percezioni, per la costruzione del questionario ai dipendenti, ma anche per la selezione dei green books e per l'implementazione dello strumento narrativo digitale per la valutazione dell'impronta ecologica.

Le analisi quantitative dei dati raccolti sia con il questionario somministrato ai dipendenti sia di quelli raccolti con gli strumenti di matrice neuropsicopedagogica somministrati agli studenti saranno eseguite interamente utilizzando il software IBM SPSS v.26.0.

I testi proposti apparterranno alla bibliovarietà dei libri green, a tema ecologico selezionati per diversi livelli di complessità. Nella selezione dei testi sul piano tematico saranno tenuti in considerazione gli otto percorsi didattici declinati per ordini e gradi di istruzione delle Linee Guida.

I criteri di selezione dei green books saranno principalmente due:

- Progressività: si presterà attenzione alla ricchezza del lessico, alla complessità di costrutti, alla presenza di immagini, alla lunghezza dei testi, alla presenza di inferenza, alla strutturazione della storia in modo da garantire un passaggio graduale da ascoltatore/lettore inesperto a quello esperto.
- Bibliodiversità: per non incorrere o favorire inconsapevolmente pregiudizi e stereotipi si

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

valorizzeranno testi provenienti da culture differenti, con protagonisti diversi, con trame e schemi diversificati.

Tabella 4. Esempi di proposte bibliografiche su tematiche green

Tematica	Ordine di scuola	Proposte di Green Books
Tutela delle acque e del mare	Infanzia	Katy-Kat Missione mare pulito, di Marija Markovic, Edizione ambiente, 2019.
	Primaria	Oceani di plastica, di Beatrice Peruffo, Raffaello, 2019
Tutela della biodiversità: Flora e Fauna	Infanzia	Betta salva le api di Catherine Jacob, Lucy Fleming, e al., Gallucci 2021
	Primaria	Alla ricerca del Pianeta Verde, di Danilo Bonato, Edizioni Ambiente, 2014. Quattordici lupi di Catherine Barr, Editoriale Scienza, 2021 L'isola delle balene Michael Morpurgo, Il Castoro, 2017
Alimentazione sostenibile	Infanzia	Ma che Bontà!, di Elisa Mazzoli , Margherita Borin, Il leone verde, 2020 Dai, tutti a tavola! di Patricia Geis, Giochi Educativi, 2017
	Primaria	La signorina Euforbia, di Luigi Ballerini, San Paolo Edizioni, 2014 Storie golose per bambini curiosi, di Ilaria Mazzarotta, Editoriale Domus, 2022 Le fiabe per... imparare a mangiare in modo sano. Un aiuto per grandi e piccini, di Teresa Denise Spagnoli, Franco Angeli, 2017
	Secondaria primo grado	La stagione delle conserve, di Polly Horvath, Piemme, 2016 Gastón e la ricetta perfetta, di Anna Lavatelli, Giunti Editore, 2019
Gestione dei rifiuti	Infanzia	Ada e i rifiuti, di Adonella Comazzetto Carthusia, 2011 La Meravigliosa Ricicletta, di Emanuela Bussolati Silvio Boselli, Terre di Mezzo, 2019
	Primaria	Le (dis)avventure della famiglia zero rifiuti o quasi... Come sopravvivere un anno senza rifiuti, di Bénédicte Moret Sonda, 2020
	Secondaria primo grado	Anche le cose hanno bisogno, di Eliana Albertini Rizzoli Lizard, 2022
Tutela della biodiversità: servizi ecosistemici	Secondaria primo grado,	L'uomo che piantava gli alberi, di Jean Giono, Salani, 2010 Il sussurro del mondo di Richard Powers, La Nave di Teseo, 2019 Gli ecoviaggi di Gulliver. Alla scoperta delle energie rinnovabili, di C. Cannito, M.B. Loiodice, La Meridiana, 2020

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5. Le prospettive di sviluppo del progetto

Attualmente sono in corso le prime analisi qualitative a carattere esplorativo. Il progetto tuttavia nel suo sviluppo prevede al termine del triennio:

- training di lettura di 60 ore su gruppi di circa 25 bambini/ragazzi per volta per un totale di 500 bambini tra i 3 e gli 14 anni come destinatari diretti e oltre 20.000 destinatari indiretti;
- circa 1100 misurazioni quali-quantitative con disegno quasi sperimentale relative a tutte le dimensioni indicate in narrativa progettuale per le diverse età 3-14; e circa 2000 misurazioni descrittive quantitative (posizionamento e convinzioni green) di adulti;
- definizione di almeno una forma innovativa di misurazione degli impatti sui comportamenti reali in collaborazione con gli uffici ambiente dei Comuni interessati
- almeno n. 5 nuove pubblicazioni di green books pubblicate in collaborazione con case editrici e impresa; e almeno n. 10 traduzioni di "green books" di qualità pubblicate in collaborazioni con case editrici e impresa.
- accordo con almeno un progetto nazionale di promozione della lettura per veicolazione delle bibliografie e dei protocolli di intervento con green books;
- almeno 5 vademecum gratuiti per insegnanti per i percorsi, le strategie, le attività collegate e i repertori bibliografici (almeno 50.000 scaricamenti) in collaborazione con casa editrice specializzata; almeno 1 protocollo bibliografico validato per ogni grado scolastico coinvolto;
- almeno 5.000 insegnanti (dei diversi ordini e gradi) coinvolti nei seminari di diffusione degli esiti e presentazione dei protocolli; e almeno 250.000 visualizzazioni e 100.000 scaricamenti degli e-green books e audio green books free messi a disposizione insieme all'impresa.

Si tratta di un percorso che attraversa storie e geografie di un Paese, per supportare i docenti e le famiglie nel processo di formazione di cittadini attivi, agenti di cambiamento e costruttori di sostenibilità, in cui i green books diventano parte integrante dell'agenda ambientale.

La competenza ecologica, o meglio le competenze ecologiche, ormai richiestissime nei diversi contesti lavorativi, non si sviluppano all'improvviso, ma richiedono politiche educative pensate e una revisione profonda delle azioni e degli stili vita. Occorre pertanto agire a livello di sistema, in una logica di Business University School, in cui scuole, imprese e ricerca accademica lavorano insieme per migliorare il futuro. Perché possa avvenire una serena transazione ecologica e culturale c'è bisogno di scienziati, di biologi, di antropologi per risolvere la crisi, ma anche di scrittori e studiosi in grado di raccontare non solo l'emergenza ma anche la bellezza della Terra, ma c'è bisogno soprattutto di cittadini "trasformanti", in grado di «stringere amicizia con la materia» del mondo della natura [73] sensibili e capaci di stupore di fronte alla vita, capacità di costruire la bellezza del mondo.

Bibliografia

1. European Environment Agency (2021). *Air quality in Europe 2021*, Report no. 15/2021 HTML - TH-AL-21-014-EN-Q - ISBN 978-92-9480-403-7 - ISSN 1977-8449 - doi: 10.2800/549289.
2. Srivastava, A. K.; Bhoyar, P. D.; Kanawade, V. P.; Devara, P. C.; Thomas, A.; & Soni, V. K. (2021). Improved air quality during COVID-19 at an urban megacity over the Indo-Gangetic Basin: from stringent to relaxed lockdown phases. *Urban climate*, *36*, 100791.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Zambrano-Monserrate, M. A.; Ruano M. A.; & Sanchez-Alcalde, L. (2020). Indirect effects of COVID-19 on the environment. *Science of the total environment*, *728*, 138813.
4. Klemeš, J. J.; Van Fan, Y.; Tan, R. R.; & Jiang, P. (2020). Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *127*, 109883.
5. Herron, J. B. T.; Hay-David, A. G. C.; Gilliam, A. D.; & Brennan, P. A. (2020). Personal protective equipment and Covid 19-a risk to healthcare staff?. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, *58*(5), 500-502.
6. Shakil, M. H.; Munim, Z. H.; Tasnia, M.; & Sarowar, S. (2020). COVID-19 and the environment: A critical review and research agenda. *Science of the Total Environment*, *745*, 141022.
7. WHO, C. O. (2020). World health organization. *Responding to Community Spread of COVID-19. Reference WHO/COVID-19/Community_Transmission/2020.1*.
8. Prata, J. C.; Silva, A. L.; Walker, T. R.; Duarte, A. C.; & Rocha-Santos, T. (2020). COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics. *Environmental science & technology*, *54*(13), 7760-7765.
9. Sharma, H. B.; Vanapalli, K. R.; Cheela, V. S.; Ranjan, V. P.; Jaglan, A. K.; Dubey, B.; ... & Bhattacharya, J. (2020). Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. *Resources, conservation and recycling*, *162*, 105052.
10. Mahmood, H.; Alkhateeb, T. T. Y.; & Furqan, M. (2020). Industrialization, urbanization and CO2 emissions in Saudi Arabia: Asymmetry analysis. *Energy Reports*, *6*, 1553-1560.
11. Wilson, D. J.; Gabriel, E.; Leatherbarrow, A. J.; Cheesbrough, J.; Gee, S.; Bolton, E.; ... & Diggle, P. J. (2008). Tracing the source of campylobacteriosis. *PLoS genetics*, *4*(9), e1000203.
12. Yueh, M. F.; & Tukey, R. H. (2016). Triclosan: a widespread environmental toxicant with many biological effects. *Annual review of pharmacology and toxicology*, *56*, 251.
13. Barouki, R.; Kogevinas, M.; Audouze, K.; Belesova, K.; Bergman, A.; Birnbaum, L.; ... & HERA-COVID-19 working group. (2021). The COVID-19 pandemic and global environmental change: Emerging research needs. *Environment international*, *146*, 106272.
14. Iavarone, M. L.; Malavasi, P.; Orefice, P.; & Pinto Minerva, F. (2017). Pedagogia dell'ambiente 2017. *Tra sviluppo umano e responsabilità sociale. Lecce-Brescia: Pensa MultiMedia*.
15. Antonietti, M.; Bertolino, F.; Guerra, M.; & Schenetti, M. (2022). *Educazione e natura: Fondamenti, prospettive, possibilità.* FrancoAngeli: Milano.
16. Assemblea Generale ONU (2015). *Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015. Trasformare il nostro mondo: l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile.* Disponibile online https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf
17. Miur (2018). Indicazioni Nazionali e Nuovi Scenari 2018. Documento a cura del Comitato Scientifico Nazionale per le Indicazioni Nazionali per il curricolo della scuola dell'infanzia e del primo ciclo di istruzione. Disponibile online https://www.miur.gov.it/documents/20182/0/Indicazioni+nazionali+e+nuovi+scenari/

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

18. Italiano, G. (2021). Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Disponibile online https://www.governo.it/sites/governo.it/files/PNRR.pdf
19. Claeys, G.; Tagliapietra, S.; & Zachmann, G. (2019). *How to make the European Green Deal work*. Brussels, Belgium: Bruegel.
20. Miur (2019). Legge 20 agosto 2019, n. 92 Introduzione dell'insegnamento scolastico dell'educazione civica. Disponibile online https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/08/21/19G00105/sg
21. Giovanazzi, T. (2022). RiGenerazione Scuola. Un Piano per orientare l'educazione alla transizione ecologica. *FORMAZIONE & INSEGNAMENTO. Rivista internazionale di Scienze dell'educazione e della formazione*, *20*(1), 127-135.
22. Angelini, A.; & Pizzuto, P. (2007). *Manuale di ecologia, sostenibilità ed educazione ambientale*. F. Angeli.
23. Mortari, L. (2022). *The Practice of Self-Care*. Cambridge Scholars Publishing.
24. Unesco (2017). *Educazione agli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile Obiettivi di apprendimento*. Disponibile online https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf
25. Strietska-Ilina, O.; Hofmann, C.; Haro, M. D.; & Jeon, S. (2012). *Skills for green jobs: A global view*. Geneva: International Labour Organisation. Disponibile online https://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---dgreports/---dcomm/---publ/documents/publication/wcms_159585.pdf
26. Cedefop (2010). Nota informativa. Competenze per lavori ecologici ("verdi"). Disponibile online https://www.bollettinoadapt.it/old/files/document/8286CEDEFOP_10_06.pdf
27. Sistema Excelsior (2021). Le competenze green. Analisi della domanda di competenze legate alla green economy nelle imprese, indagine 2021. UnionCamere. Disponibile online https://www.bollettinoadapt.it/wp-content/uploads/2022/04/CompetenzeGreen_2021.pdf
28. Holec, V.; & Marynowski, R. (2020). Does it matter where you teach? Insights from a quasi-experimental study on student engagement in an active learning classroom. *Teaching and Learning Inquiry*, *8*(2), 140-164.
29. Macrory, B. (2013). Green school in Bali. *Green Teacher*, *99*, 25-27.
30. Mezirow, J. (2008). An overview on transformative learning. *Lifelong learning*, 40-54.
31. Le Boterf, G. (2016). *Professionnaliser: construire des parcours personnalisés de professionnalisation*. Editions Eyrolles.
32. UNECE (2012). Learning for the future – Competences in education for SustainableDevelopment. Disponibile online https://unece.org/fileadmin/DAM/env/esd/ESD_Publications/Competences_Publication.pdf
33. Cajelli, D.; & Toniolo, F. (2018). *Storytelling crossmediale. Dalla letteratura ai videogiochi*. UNICOPLI.
34. De Carlo, M. E.; Pugachowa, A. (2021). Le eco-narrazioni come dispositivo pedagogico sfidante dell'Agenda 2030. *Lifelong Lifewide Learning*, *17*(39), 169-182.
35. Commoner, B. (1978). Energy Environment Employment. *Australian Left Review*, *1*(67), 5-17.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

36. Marchetti, L. (2014). *La Fiaba, la Natura, la Matria. Pensare la decrescita con i Grimm* (Vol. 1). Il Melangolo.
37. Indire (2022). Quando la letteratura per l'infanzia si fa green. Fiabe e pensiero ecologico.
38. Milkoreit, M. (2016). The promise of climate fiction: imagination, storytelling, and the politics of the future. *Reimagining climate change*. Routledge, 171-191.
39. Shermis, M. (1991). *Parents Sharing Books: Self-Esteem and Reading*.
40. Sterling, S. (2009). Ecological intelligence. *The handbook of sustainability literacy*, 77-83.
41. Bateson, G.; & Longo, G. (2000). *Verso un'ecologia della mente* (Vol. 17). Adelphi.
42. Bottero, M. (2008). *Progetto ambiente*. Maggioli Editore.
43. Batini, F. (2018). *Leggimi ancora. Lettura ad alta voce e Life Skills*. Giunti: Firenze.
44. Batini, F. (a cura di, 2021), *Ad alta voce. La lettura che fa bene a tutti*. Giunti: Firenze.
45. Batini, F. (2022). *Lettura ad alta voce. Ricerca e strumenti per educatori, insegnanti e genitori*. Carocci: Roma.
46. Batini, F. (a cura) (2022). *Il futuro della lettura ad alta voce. Alcuni risultati della ricerca educativa internazionale*. Franco Angeli: Milano.
47. Wright, C. Z.; & Dunsmuir, S. (2019). The effect of storytelling at school on children's oral and written language abilities and self-perception. *Reading & Writing Quarterly*, *35*(2), 137-153.
48. Marchessault, J. K.; & Larwin, K. H. (2014). The Potential Impact of Structured Read-Aloud on Middle School Reading Achievement. *International Journal of Evaluation and Research in Education*, *3*(3), 187-196.
49. Tijms, J.; Stoop, M. A.; & Polleck, J. N. (2018). Bibliotherapeutic book club intervention to promote reading skills and social–emotional competencies in low SES community-based high schools: A randomised controlled trial. *Journal of Research in Reading*, *41*(3), 525-545.
50. Sénéchal, M.; LeFevre, J. A.; Hudson, E.; & Lawson, E. P. (1996). Knowledge of storybooks as a predictor of young children's vocabulary. *Journal of Educational psychology*, *88*(3), 520.
51. Westbrook, J.; Sutherland, J.; Oakhill, J.; & Sullivan, S. (2019). 'Just reading': the impact of a faster pace of reading narratives on the comprehension of poorer adolescent readers in English classrooms. *Literacy*, *53*(2), 60-68.
52. Trelease, J. (1995). *Read-Aloud Handbook*. London: Penguin.
53. Hennigan, K. (2010). Therapeutic potential of time in nature: Implications for body image in women. *Ecopsychology*, *2*(3), 135-140.
54. Dragan, P. B. (2001). *Literacy from Day One*. Heinemann, 88 Post Road West, PO Box 5007, Westport, CT 06881.
55. Commodari, E.; & Guarnera, M. (2012). Difficoltà di lettura e funzioni attentive. *Annali della facoltà di Scienze della formazione Università degli studi di Catania*, *2*, p-85.
56. Dolto, F. (1996). *Solitudine felice*. Mondadori: Milano.
57. Batini, F.; Bartolucci, M.; & Timpone, A. (2018). The effects of reading aloud in the primary school. *Psychology and education*, *55*(1-2), 111-122.
58. Durkin, D. (1978). What classroom observations reveal about reading comprehension instruction. *Reading research quarterly*, 481-533.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

59. Özsoy, G.; Kuruyer, H. G.; & Çakıroğlu, A. (2015). Evaluation of students' mathematical problem solving skills in relation to their reading levels. *International Electronic Journal of Elementary Education*, *8*(1), pp. 113-132.
60. Vilenius-Tuohimaa, P. M.; Aunola, K.; & Nurmi, J. E. (2008). The association between mathematical word problems and reading comprehension. *Educational Psychology*, *28*(4), 409-426.
61. Setiawan, A. (2017, September). Identification of green skills acquisition in Indonesian TVET curricula. *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1887, No. 1, p. 020074). AIP Publishing LLC.
62. Zambrano, M. (2002). *Filosofia e poesia* (Vol. 24). Edizioni Pendragon.
63. Mendelsohn, A. L.; Cates, C. B.; Weisleder, A.; Berkule Johnson, S.; Seery, A. M.; Canfield, C. F.; ... & Dreyer, B. P. (2018). Reading aloud, play, and social-emotional development. *Pediatrics*, *141*(5).
64. Abdolrezapour, P.; & Tavakoli, M. (2012). The relationship between emotional intelligence and EFL learners' achievement in reading comprehension. *Innovation in Language Learning and Teaching*, *6*(1), 1-13.
65. Brokamp, S. K.; Houtveen, A. A.; & van de Grift, W. J. (2019). The relationship among students' reading performance, their classroom behavior, and teacher skills. *The Journal of Educational Research*, *112*(1), 1-11.
66. Van den Broek, P.; Lorch, R. F.; Linderholm, T.; & Gustafson, M. (2001). The effects of readers' goals on inference generation and memory for texts. *Memory & Cognition*, *29*(8), 1081-1087.
67. Huus, H. (1972). The Role of Literature in Children's Education. *Educational Horizons*, *50*(3), 139-145.
68. Zamberlan, S. (2019). Istruzione: riflessioni sulle "Linee guida educazione ambientale per lo sviluppo sostenibile". *Economia e Ambiente*, 38(1-2), 25-30.
69. Batini, F. (a cura di, 2021). *Un anno di Leggere:forte! in Toscana. L'esperienza di una ricerca azione*. Franco Angeli, Milano. Disponibile online https://series.francoangeli.it/index.php/oa/catalog/book/658.
70. Kyttä, M. (2002). Affordances of children's environments in the context of cities, small towns, suburbs and rural villages in Finland and Belarus. *Journal of environmental psychology*, 22(1-2), 109-123.
71. Waters, J. (2017). Affordance theory in outdoor play. In Waller T., Ärlemalm-Hagsér E., Hansen Sandseter E.B., Lee-Hammond L., Lekies K., Wyver S., eds, The Sage handbook of outdoor play and learning. Sage Publications: London, pp. 40- 54.
72. Grion, V. (2017). 'Student Voice'in Italy: the State of the Art. *Teaching and Learning Together in Higher Education*, *1*(20), 3.
73. Emerson, R.W. (1998). *Natura ed altri saggi*. Rizzoli: Milano.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Three-dimensional model of bifacial photovoltaic systems, experimental validation, and evaluation of temperature, albedo and perimeter effects

Roberto Corso [1,*], Marco Leonardi [1], Andrea Scuto [1], Gabriella Milazzo [1], Marina Foti [2], Cosimo Gerardi [2], Fabrizio Bizzarri [3], Stefania M. Privitera [1] and Salvatore A. Lombardo [1]

[1] Institute for Microelectronics and Microsystems (IMM), National Research Council (CNR), Strada VIII, 5, 95121 Catania, Italy

[2] Enel Green Power, Zona Industriale, Contrada Blocco Torrazze, 95121 Catania, Italy

[3] Enel Green Power, Viale Regina Margherita 125, 00198 Rome, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: Roberto.Corso@imm.cnr.it

Abstract: Bifacial photovoltaics has recently appeared on the photovoltaics market and is expected to become the dominant module technology over the next few years. To improve the understanding of this technology and of its implementation we have developed a computational model of photovoltaic systems. The model is specifically suited for bifacial systems as it considers the full three-dimensional geometry of the system to determine the albedo irradiance impinging on the back of the modules. We have employed our model to evaluate perimeter effects in bifacial photovoltaic strings of different sizes by comparing the current produced by the rear of the edge and central modules. We have also estimated the impact of the ground surface area on the daily energy yield of the strings. Finally, in order to further validate our model, we have monitored a bifacial mini-module on a highly reflective white plastic sheet and compared experimental data with modelled values.

Keywords: Bifacial photovoltaics; modelling; perimeter effects; outdoor; temperature effects; silicon heterojunction; temperature coefficient.

1. Introduction

Energy production and sustainability are two of the main challenges of our society in XXI century. Photovoltaics (PV), as a clean and renewable energy source, tackles both issues simultaneously and has

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

received increasing interest for large-scale industrial applications [1]. In recent years, a new cell technology has been designed in order to increase the current generation by collecting albedo and diffuse radiation impinging on the back side of the cell. This new cell and module design, denominated "bifacial" in opposition to conventional "monofacial" cells and modules, has appeared relatively recently on the market, but is expected to become dominant by the end of the decade [2].

As more attention by industries and governments is being directed towards the installation of solar farms, the need for specific simulation tools of photovoltaic systems is rising, in order to determine the most suited locations and optimize installation parameters of large PV strings. To this end, commercial programs are already available [3], but for bifacial photovoltaics (BPV) specific modifications are needed, especially to evaluate correctly the light collected by the module back side.

In our previous works, we have proposed a three-dimensional computational model to simulate the current, voltage and energy production of PV systems [4]. The model has been designed specifically for bifacial systems and implements an algorithm to calculate the albedo light from the geometry of the system and the characteristics of the ground. In [4] we have employed our model to optimize the ground clearance and tilt angle of a mini-module in our test site in Catania. In [5] we have studied the spatial current distribution among the modules of a string due to the uneven shading between the edges and the center of the string. In [6] we have validated our model by comparing it with experimental data of mini-modules operating in outdoor.

In this work, we investigate the impact of perimeter effects on strings of different sizes in terms of current and energy yield and we examine the influence of different grounds on the current of a bifacial PV system by comparing experimental data of two mini-modules with values predicted by the model.

2. Model description

To calculate the current produced by a PV system one must first determine the global irradiance impinging on the system. To this purpose, the solar spectrum (restricted to the wavelengths between 300 nm and 1100 nm) at any time of the day is determined by the air mass coefficient AM, which indicates the optical path length of direct light compared to the atmosphere's height, calculated according to the spherical approximation [7] as:

$$AM = \sqrt{(r \cdot cos\theta_z)^2 + 2r + 1} - r \cdot cos\theta_z \quad (1)$$

where $r \cong 708$ is the ratio between Earth's radius and the height of the atmosphere and θ_z is the zenith angle.

Then, our model employs the ASHRAE model [8] to determine the direct and diffuse components of solar light with a month-by-month parameterization, and it assumes the diffused light as isotropic according to Liu and Jordan's model [9].

To determine the albedo light, the model considers a ground surface extending from the string of a length XA along the north-south direction and of a length YB along the west-east direction; the surface is divided into elements of length dX and height dY. Light impinges on the ground and is reflected based on the ground's dispersive reflectivity. Each ground element is assumed to act as an

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

isotropic light source. Then, for each module of the string the solid angle subtended by the module as it is seen from each ground element is calculated, given the string's ground clearance and tilt angle and the position of the module and the ground element relatively to the string and ground surface, respectively.

In summary, the short-circuit current produced by the module front is defined as

$$I_{sc}^{F} = A \cdot cos(\theta) \int_{300}^{1100} EQE_F(\lambda) \cdot I.S.S.(AM, \lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

where A is the module area, θ is the tilt angle, EQE_F is the external quantum efficiency of the front side, $I.S.S.$ is the spectrum incident on the front side (which depends on the direct and diffuse spectra as described above and on the tilt angle) and λ is the wavelength. The short-circuit current produced by the module rear is defined as

$$I_{sc}^{R} = \int \frac{d\Omega(dA_g)}{2\pi} \cdot ssh(dA_g) \cdot \int_{300}^{1100} EQE_B(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot H.S.S.(AM, \lambda) \cdot d\lambda \cdot d\,A_g \quad (3)$$

where $d\Omega$ is the solid angle, dA_g is the ground element, ssh is a function that represents the module self-shading, EQE_B is the external quantum efficiency of the module back side, R is the ground reflectivity and $H.S.S.$ is the spectrum incident on the ground (calculated analogously to $I.S.S.$ but considering a surface with a 0° tilt angle).

The complete current-voltage (I-V) characteristics of the module is calculated according to the diode model of the solar cell [10]:

$$I = I_{sc}^{F} + I_{sc}^{R} - I_0 \left(e^{\frac{qV_i}{nkT}} - 1 \right) \quad (4a)$$

$$V = V_i - R_s I \quad (4b)$$

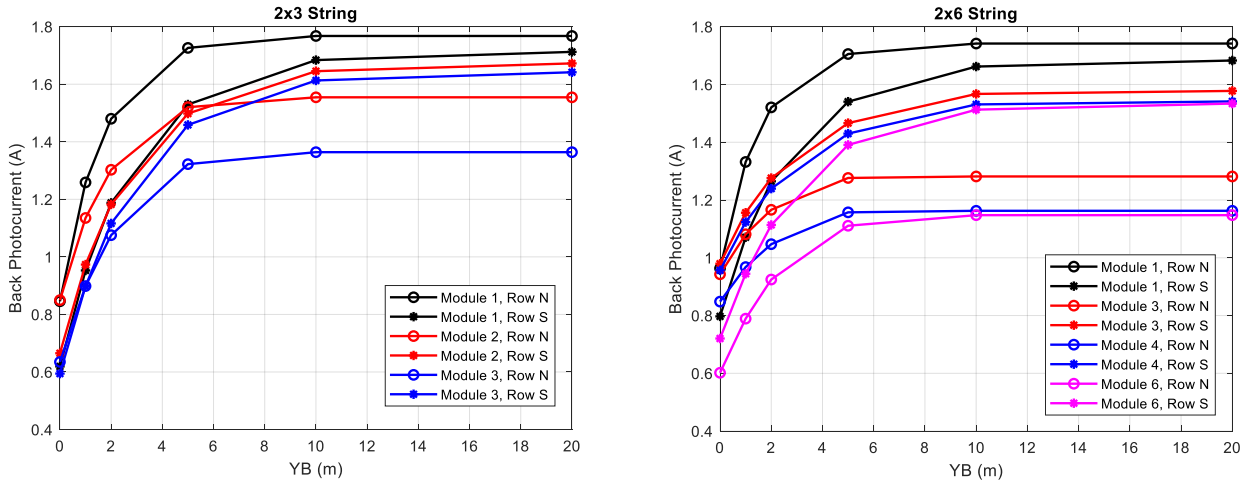
where I_0 is the dark saturation current, q is the electron charge, V_i is the voltage drop across the diode, n is the diode ideality factor, k is the Boltzmann constant, T is the module temperature and R_s is the series resistance of the module.

3. Perimeter effect analysis

We have simulated the current produced by the rear side of the modules in a bifacial PV string. In particular, we have considered a 2x3 string and a 2x6 string, both in landscape configurations, installed with a ground clearance of 2 m and a tilt angle of 35° (optimal for the latitude of Catania, as illustrated in [4]). The day considered for the simulations is the spring equinox, at 10 a.m. For these simulations XA has been set to 5 m, while YB ranges from 0 m to 20 m. The results are reported in Fig. 1.

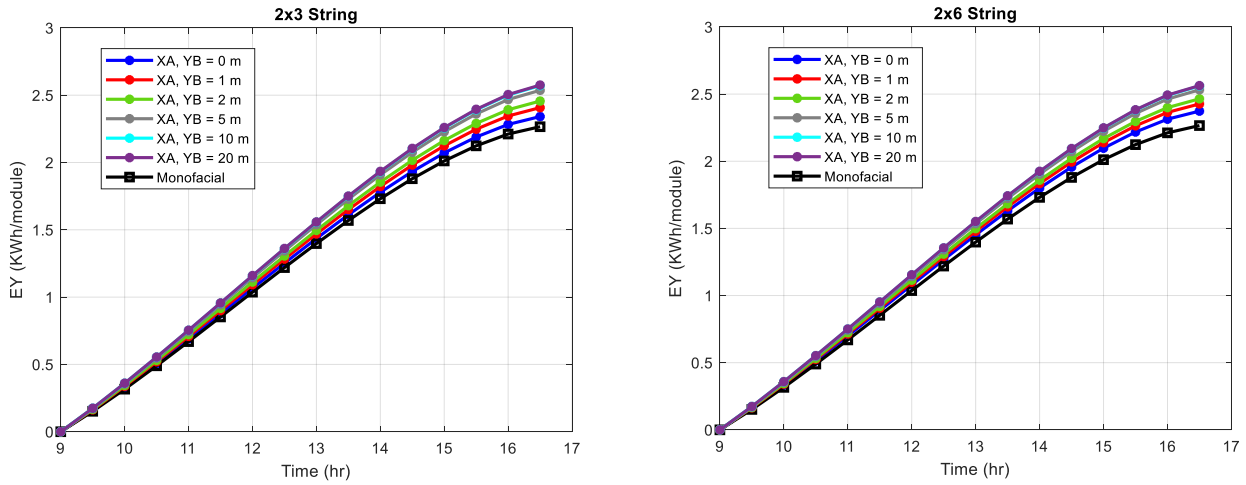
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1. Back Photocurrent of the central and edge modules for varying YB for a string of 6 modules and a string of 12 modules. XA is fixed to 5 m.



From the values reported in Fig. 1 it can be seen that the current produced by the modules generally increases with YB up to 10 m, whereas further extending the ground surface would have a negligible effect on the current production. Moreover, for the case of the 2x3 string, we can observe similar trends for all the modules, with differences in absolute values due to the asymmetrical position of the sun with respect to the string. However, in the case of the 2x6 string, the additional current generated by the rear side of the central modules (Module 3 and Module 4) varies by about 0.5 A for the range of values of YB considered, while it increases by up to 1 A for the edge modules (Module 1 and Module 6). We have also calculated the daily energy yield EY (from 9 a.m. to 5 p.m.) per module of the same strings while increasing both XA and YB simultaneously. The results indicate that, in both cases, the bifaciality of the modules implies a performance increase of about 5% compared to a monofacial string even when the only ground surface considered is the one directly beneath the string ($XA, YB = 0\ m$). The advantage of the bifacial strings increases with the ground area up to 13% compared with the energy yield of the monofacial strings.

Figure 2. Daily energy yield per module of the two strings for increasing ground area. The monofacial string is obtained by excluding the contribution of the module rear side.

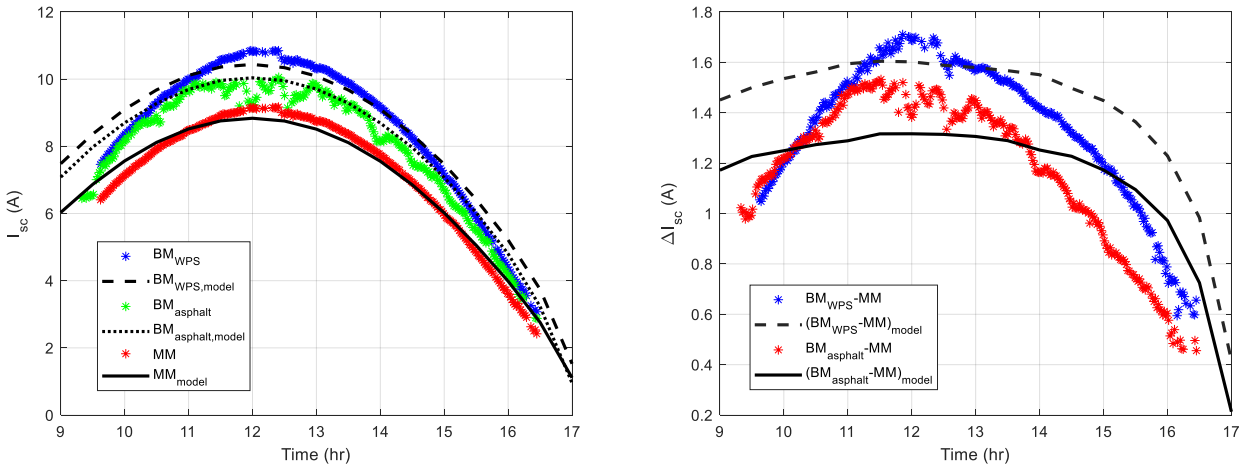


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Model validation

The validation of the model presented in [6] has been extended by monitoring three mini-modules of 3 n-type SHJ bifacial cells connected in series with the same setup described in the reference. The mini-modules have been installed with a ground clearance of 55 cm and a tilt angle of 35° in our test site in Catania (37°26'32" N, 15°3'47" E). One of the mini-modules (indicated with "MM" in this work) has been covered with a white cardboard on its back to simulate a monofacial mini-module. Of the other bifacial mini-modules (indicated with "BM"), one has been placed on a 1x1 m^2 white plastic sheet (WPS) to evaluate the impact of different albedo values on the current production of the mini-module. The experimental values of short-circuit current have been compared with the values predicted by the model. The results are shown in Fig. 3.

Figure 3. Comparison between the experimental and predicted values of short-circuit current of the monofacial mini-module and the bifacial-minimodules.



The figure shows a good agreement between the model and the experimental values. Moreover, compared to the monofacial mini-module, the bifacial mini-module installed on asphalt produced a current higher by 1.5 A at 12 p.m., whereas the bifacial mini-module installed on the WPS produced 1.7 A more current compared to the monofacial mini-module.

5. Conclusions

In this work we have employed the model we had previously developed and validated to investigate the correlation between the special current distribution in a bifacial string caused by the uneven shading under the string and the extension of the ground surface beneath the string, showing that the perimeter effect is more noticeable in larger strings and that its impact increases with the ground area up to 10 m around the string. We have also calculated the energy yield of bifacial strings for increasing ground areas, observing a production increase up to 13% compared to monofacial strings.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The previous validation of the model has been extended by considering a different ground (a highly reflective white plastic sheet), confirming the good agreement with the experimental data previously observed and showing a current increase of 1.7 A compared to an identical monofacial system.

References

1. Miles, R. W., Hynes, K. M., & Forbes, I. (2005). Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues. *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 51(1-3), 1-42.
2. International Technology Roadmap for Photovoltaics, 12th ed. 2021. Available online: https://itrpv.vdma.org/en/ (accessed on 13 April 2022).
3. PV Performance Modeling Collaborative, https://pvpmc. sandia.gov/, accessed 14 April 2022
4. Galluzzo, Fabio Ricco, et al. A new model for predicting bifacial PV modules performance: First validation results. In: 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). IEEE, 2019. p. 1293-1297.
5. Ricco Galluzzo, F., Zani, P. E., Foti, M., Canino, A., Gerardi, C., & Lombardo, S. (2020). Numerical modeling of bifacial PV string performance: Perimeter effect and influence of uniaxial solar trackers. Energies, 13(4), 869.
6. Leonardi, M., Corso, R., Milazzo, R. G., Connelli, C., Foti, M., Gerardi, C., ... & Lombardo, S. A. (2021). The Effects of Module Temperature on the Energy Yield of Bifacial Photovoltaics: Data and Model. Energies, 15(1), 22.
7. Rapp-Arrarás, Í., and Domingo-Santos, J. M. (2011), Functional forms for approximating the relative optical air mass, J. Geophys. Res., 116, D24308, doi:10.1029/2011JD016706.
8. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook, 1985 Fundamentals: An Instrument of Service Prepared for the Profession Containing Technical Information; The Society: Atlanta, GA, USA, 1985.
9. Liu, B.; Jordan, R. Daily insolation on surfaces tilted towards equator. ASHRAE J. 1961, 10, 53–59.
10. Schroder, D. K. Series Resistance, Channel Length and Width, and Threshold Voltage. In *Semiconductor material and device characterization*, 3rd ed.;. John Wiley & Sons, 2006.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Le comunità energetiche rinnovabili come modello innovativo di gestione dell'energia: aspetti normativi, benefici e analisi tecnico-economica per un caso di studio

Luca Brunelli[1], Elisa Moretti[1,2,*], Benedetta Pioppi[1], Anna Laura Pisello[1,2], Silvia Bini[3], Luciano Zepparelli[3] and Franco Cotana[1,2]

[1] CIRIAF, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia

[2] Dipartimento di Ingegneria, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia

[3] Techne Srl, Via dei Partigiani, 46 – 06055 Marsciano

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: elisa.moretti@unipg.it

Abstract: Le Comunità Energetiche Rinnovabili rappresentano uno strumento fondamentale nell'affrontare il processo di transizione energetica. Infatti, nella prospettiva della totale decarbonizzazione, il ricorrere alla generazione distribuita di energia, basata su numerosi impianti di piccola taglia diffusi nel territorio, integrati da sistemi di accumulo, facilita lo sviluppo di fonti di energia rinnovabile. Questi, inizialmente concepiti per soddisfare il fabbisogno delle singole utenze, sono spesso in grado di eccedere la domanda di energia, che può essere immessa in rete. Si è dunque aperta una nuova fase, in cui l'autoconsumo avviene anche attraverso la rete pubblica e può essere effettuato in forma collettiva. In questa prospettiva, i benefici non sono legati solamente alla quantità di energia che si evita di prelevare dalla rete, ma anche a quella che si riesce a produrre e consumare simultaneamente a livello locale. All'interno di questa nuovo modello di gestione dell'energia, si introduce la Comunità energetica, un soggetto giuridico, che produce, consuma e accumula energia rinnovabile, con l'obiettivo di fornire benefici ambientali, economici o sociali, piuttosto che profitti finanziari, ai propri membri, la cui partecipazione è aperta e volontaria. Il lavoro presenta il caso di studio della "Comunità Energetica Via dei Partigiani" nel comune di Marsciano, uno dei primi esempi di Comunità energetica nella regione Umbria. Sono presentate analisi di tipo energetico, economico e finanziario e sono confrontati diversi scenari, al fine di evidenziare i benefici e le eventuali criticità dell'applicazione del nuovo modello di gestione dell'energia su scala locale con impianti di piccola taglia.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_037_pp_315

Keywords: Comunità energetiche rinnovabili; fonti energetiche rinnovabili; impianti fotovoltaici; generazione distribuita di energia; analisi economica.

1. Introduzione

In un contesto europeo, all'interno del quale i diversi paesi tra cui anche il nostro, cercano vie alternative alle fonti fossili per l'approvvigionamento di energia, la rivoluzione dei sistemi energetici è favorita indubbiamente dalla disponibilità di nuove tecnologie di conversione che permettono di ricavare energia elettrica da fonte solare e dalla fonte eolica. Queste tecnologie, caratterizzate da modularità, che rende meno indispensabile lo sfruttamento di economie di scala e quindi consente il dispiegarsi di tecnologie diffuse in scala medio-piccola, stanno cambiando da più di un decennio i sistemi elettrici. Si è assistito ad una «generazione distribuita»[1], caratterizzata da un rapido incremento della produzione da fonti di energia rinnovabili, attraverso impianti di piccola dimensione diffusi nel territorio, che ha costituito dunque una fase di transizione da un sistema di generazione dell'energia centralizzato ad uno sempre più distribuito. Inoltre, l'integrazione di sistemi di accumulo volti a massimizzare l'energia autoconsumata, ossia prodotta e consumata in situ dall'utente, ha fatto sì che si passasse da una valorizzazione della produzione di energia ad una valorizzazione del risparmio per mancato acquisto di energia. In questo contesto lo sviluppo di un sistema a energie rinnovabili combinate, unito ad una smart-grid per la gestione e distribuzione intelligente ed efficiente, garantirebbe energia pulita e sicura per il futuro. Una possibile soluzione è data dunque dalla Comunità Energetica Rinnovabile, un nuovo modello di gestione energetica, attraverso il quale più soggetti si uniscono con l'intento di produrre, consumare e vendere energia da fonti rinnovabili, traendone benefici sociali, ambientali ed economici. Queste nuove forme di aggregazione non solo sono fondamentali nel processo di riduzione delle emissioni climalteranti, ma conferiscono ai cittadini, in qualità di consumatori, un ruolo centrale all'interno delle strategie di decarbonizzazione. Le Comunità Energetiche rappresentano un'opportunità di sfruttamento virtuoso delle fonti di energia rinnovabile, in grado di tutelare le risorse territoriali, ambientali, paesaggistiche, riducendo la propria impronta ecologica, al fine di creare filiere di approvvigionamento più corte e una conseguente indipendenza energetica dei territori. A questo proposito, è fondamentale che la diffusione delle Fonti di Energia Rinnovabili (FER) sia in grado di coniugare le esigenze energetiche dei cittadini con quelle dei territori, evitando una competizione con altre funzioni fondamentali delle aree oggetto di intervento, tra le quali ad esempio la filiera agricola e alimentare, oltre a valori naturalistici e paesaggistici.

L'obiettivo del presente lavoro consiste è lo studio della Comunità Energetica come schema di autoconsumo di energia su scala locale. Sarà fatto inizialmente riferimento al percorso normativo che ha portato alla disciplina di tale modello di gestione e come ciò è stato recepito nell'ordinamento italiano. Sarà quindi presentato un caso di studio, rappresentato da una comunità energetica nel comune di Marsciano, Umbria, del quale saranno effettuati dei bilanci energetici ed economici, al fine di verificare la presenza effettiva di benefici. Infine sarà descritta l'implementazione del caso di studio,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

facendo riferimento agli aspetti burocratici e normativi a cui è soggetta una comunità energetica, e ai possibili sviluppi futuri.

2. Le comunità energetiche rinnovabili: stato dell'arte e prospettive future

2.1. Quadro normativo di riferimento

A livello normativo le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) sono state introdotte attraverso la Direttive Europee 2001/2018 (RED II)[2] e 944/2019 (IEM)[3]. Esse sono state recepite in Italia inizialmente attraverso l'articolo 42-bis del Decreto Legislativo 162/2019, "Decreto Milleproroghe"[4], e successivamente in forma definitiva attraverso il Decreto Legislativo 199/2021[5]. La Comunità Energetica Rinnovabile è definita come un *«soggetto giuridico:*

a) che, conformemente al diritto nazionale applicabile, si basa sulla partecipazione aperta e volontaria, è autonomo ed è effettivamente controllato da azionisti o membri che sono situati nelle vicinanze degli impianti di produzione di energia da fonti rinnovabili che appartengono e sono sviluppati dal soggetto giuridico in questione;

b) i cui azionisti o membri sono persone fisiche, PMI o autorità locali, comprese le amministrazioni comunali;

c) il cui obiettivo principale è fornire benefici ambientali, economici o sociali a livello di comunità ai suoi azionisti o membri o alle aree locali in cui opera, piuttosto che profitti finanziari».

Sono inoltre definiti tramite la Normativa i limiti di una Comunità Energetica. In termini di impianti, nel primo recepimento, essi dovevano aver una potenza complessiva non superiore a 200 kW. Successivamente, attraverso il DL 199/2021, tale limite è stato esteso a 1 MW. Inoltre, per quanto riguarda il perimetro di una CER, inizialmente i membri dovevano essere connessi alla medesima cabina secondaria, mentre nel recepimento definitivo il limite è stato esteso alla cabina primaria.

Rispetto alla proprietà degli impianti, i membri di una Comunità Energetica Rinnovabile possono assumere diversi ruoli:

- Consumer: consumatore, soggetto che non dispone di un impianto proprio, ma consuma l'energia condivisa dagli impianti della comunità.
- Producer: produttore, soggetto che dispone di un impianto, immette energia in rete senza autoconsumo.
- Prosumer: termine che deriva dall'unione delle due parole inglesi producer (produttore) e consumer (consumatore) e che sta ad indicare una figura che non si limita solo a consumare energia, ma che ne è anche produttore.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2. Benefici

La Comunità Energetica Rinnovabile è in grado di fornire diverse tipologie di benefici[6]:

- Benefici Elettro-Energetici: La generazione distribuita delle comunità, nel caso in cui sia temporalmente coerente con richiesta dei carichi, comporta una riduzione delle perdite di rete, legata ad un minor transito netto sull'infrastruttura;
- Benefici Tecnologici: A supporto di una comunità energetica esistono molte tecnologie che facilitano il monitoraggio dei consumi e aiutano gli utenti della comunità a risparmiare e a consumare energia in modo più efficiente e intelligente. Tra questi è possibile annoverare sistemi di accumulo e *smart meters*, ossia "contatori intelligenti", in grado di monitorare il consumo e l'autoconsumo di ogni utente della comunità, monitorati attraverso una piattaforma di gestione virtuale;
- Benefici Ambientali: Una piena realizzazione del potenziale delle Comunità Energetiche permetterebbe non solo di incrementare la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili nel mix elettrico nazionale, ma favorirebbe anche il processo di decarbonizzazione nei settori termico e trasporti, traslando i consumi dai vettori energetici fossili a quello elettrico;
- Benefici Sociali: Le comunità energetiche possono affrontare il contrasto al fenomeno della povertà energetica e al conseguente accesso all'energia, riducendo ad esempio la spesa energetica delle famiglie in difficoltà, o fornendo strumenti e informazioni per una corretta gestione in ambito domestico;
- Benefici Economici: La Comunità Energetica fornisce benefici economici agli utenti che ne fanno parte, pur rimanendo il limite di non costituire per quest'ultimi l'attività commerciale e/o industriale principale:

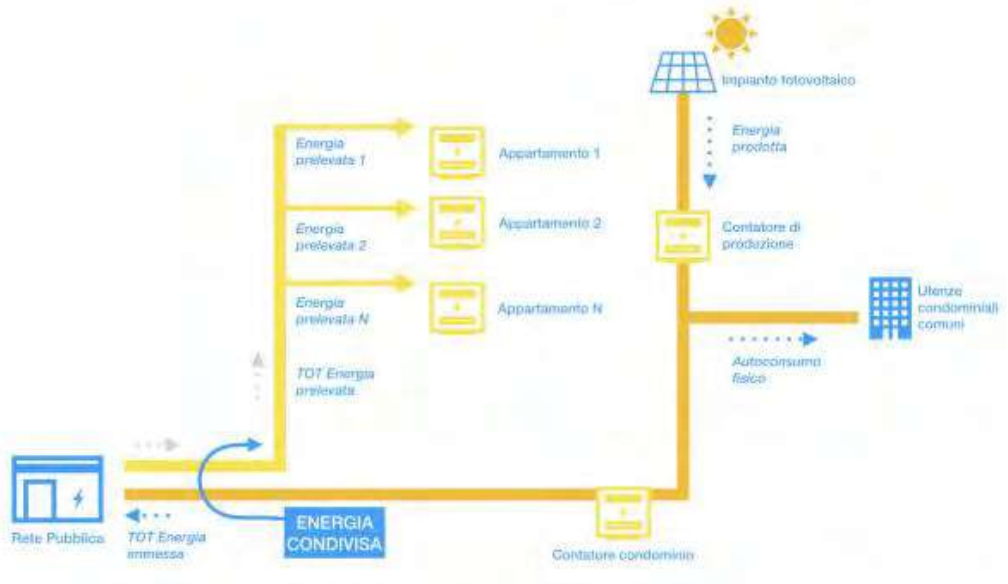
    - L'autoconsumatore collegato all'impianto continua a pagare le componenti fisse della bolletta, quota fissa e quota potenza, ma vede ridursi il costo relativo alle componenti variabili, ossia quota energia, oneri di rete e relative imposte quali accise e IVA, in misura tanto maggiore quanto maggiore è la quota di energia autoconsumata;

    - Il GSE, Gestore dei Servizi Energetici, eroga alle configurazioni di Gruppi di Autoconsumatori e Comunità Energetica Rinnovabile, dei contributi economici per ciascun impianto di produzione per la durata di 20 anni. Essi, valutati per kWh di energia condivisa, riguardano una valorizzazione di questa attraverso un corrispettivo unitario e un'incentivazione attraverso una tariffa premio, pari a 110€/MWh.

Si definisce energia condivisa, il minimo orario tra la somma dell'energia elettrica immessa in rete e la somma dell'energia prelevata (Figura 1).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1. Esempio di funzionamento di una CER: Energia Condivisa



2.3 Esempi di CER in Italia e nel mondo

Numerose iniziative di Comunità Energetica hanno cominciato a nascere in tutta Europa negli ultimi anni. La stessa Commissione Europea ha finanziato, tramite il programma Horizon2020[7], il progetto triennale NRG2Peers[8], con lo scopo di incentivare la creazione di Comunità Energetiche rinnovabili e di facilitare la loro gestione. Un esempio è dato da Schoonship Community [9], situata ad Amsterdam in Olanda, costituita da 46 famiglie, residenti su 30 edifici su una piattaforma galleggiante, che attraverso oltre 500 impianti fotovoltaici, per una potenza di 150 kWp, integrati da un sistema di batterie di accumulo di 7,5 kW, mira a generare la maggior parte possibile della sua energia, con l'obiettivo di creare "Il quartiere galleggiante più sostenibile d'Europa". Collegata ai sistemi di smart-grid, è stata implementata una "Smart Community Platform" per consentire alla comunità di gestire le proprie attività locali di scambio e amministrazione dell'energia (Figura 2).

Figura 2. Schoonship Community



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In Italia il primo caso di Comunità Energetica Rinnovabile è stato realizzato nel comune di Magliano d'Alpi, in provincia di Cuneo, promosso dall'Energy Center del Politecnico di Torino[10], e prende il nome "Comunità Energetica City Hall"[11]. Essa si sviluppa intorno ad un impianto solare fotovoltaico avente una potenza installata di 20 kW, collocato sul tetto del palazzo Comunale, che produce annualmente 24 MWh di energia. L'impianto è finalizzato a garantire l'autosufficienza dell'edificio stesso, della biblioteca comunale, della palestra e delle scuole comunali, oltre a scambiare l'energia in surplus con cinque famiglie partecipanti alla comunità, per una copertura dei consumi elettrici pari al 40% del totale, oltre ad alimentare una colonnina di ricarica per auto elettriche, gratuita per i soci della CER. Il Comune ha inoltre acquistato gli *smart meters*, o contatori intelligenti, in grado di ricavare dati di consumo puntuali relativi all'energia elettrica, collegati a tutti i POD degli utenti che partecipano alla CER. In questo modo è possibile monitorare e registrare i consumi di ciascuna utenza, anche grazie alla piattaforma di gestione Energy4Com, realizzata in collaborazione con l'omonima startup innovativa a valenza sociale[12] (Figura 3).

Figura 3. Comunità Energetica Energy City Hall



3. Descrizione del caso di studio

Il progetto della "Comunità Energetica Via dei Partigiani", situata a Marsciano, in provincia di Perugia, è stato avviato all'inizio del 2021, sulla spinta del recepimento anticipato della direttiva RED II tramite il la Legge 8/2020 e grazie agli sforzi di un'impresa locale che offre servizi orientati nel settore delle energie rinnovabili. Hanno collaborato alla realizzazione della Comunità, come partners e fornitori di materiali, uno per la colonnina elettrica[13] in qualità di operatore infrastrutturale nel campo della mobilità elettrica, ed uno per la piattaforma[14] in qualità di azienda che progetta e sviluppa soluzioni per la gestione dell'energia e delle risorse naturali. Inoltre, essendo la Comunità Energetica Rinnovabile un progetto innovativo e sperimentale, i soci fondatori si sono avvalsi del supporto tecnico-scientifico del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia, nell'ambito del Progetto NRG2peers, "Towards a new generation of EU peer-to-peer Energy Communieties facilitated by a

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

gamefied platform and empowered by user-centred trading mechanism and businnes models", finanziato da Horizon2020, programma di finanziamento della Commissione Europea. La Comunità Energetica è in corrispondenza di due edifici adiacenti, all'interno dei quali hanno sede due diversi condomini. Alla base del progetto vi è l'installazione di un impianto fotovoltaico di potenza 9,75 kWp sulla copertura di uno dei due edifici, messa a disposizione da uno degli utenti della comunità. I due edifici sono indicati in Figura 4 come "Edificio 1" e "Edificio 2".

Figura 4. Immagine Satellitare degli edifici selezionati



Costituita come associazione senza scopo di lucro, regolata tramite uno statuto, la CER oggetto di studio ha quattro soci fondatori:

- Società di servizi tecnici: società di servizi orientati all'innovazione tecnologica, alla sostenibilità globale, alla progettazione di sistemi energetici efficienti, operante da agosto 2010 nel settore delle energie rinnovabili. Assunto il ruolo di consumer all'interno della comunità energetica, l'azienda è stata determinante non solo nel farsi promotrice dell'iniziativa della Comunità Energetica, attraverso un'opera di convincimento e sensibilizzazione degli altri utenti, ma anche sotto l'aspetto tecnico, occupandosi del reperimento dei materiali necessari e dell'installazione dell'impianto, e burocratico, curando gli aspetti normativi e regolatori che hanno portato alla formazione dell'associazione;
- Caseificio: caseificio e negozio di prodotti artigianali tipici del settore lattiero Umbro. Assume il ruolo di consumer;
- Centro Medico: centro medico polispecialistico di fisioterapia e riabilitazione. Assume il ruolo di Consumer;
- Utenza privata: proprietaria del tetto dell'edificio, presso il quale è stato realizzato l'impianto fotovoltaico su cui si basa la produzione di energia elettrica della comunità, oltre che finanziatore dello stesso impianto. Quest'ultimo è dunque collegato all'utenza, che pertanto ricopre il ruolo di prosumer della Comunità;

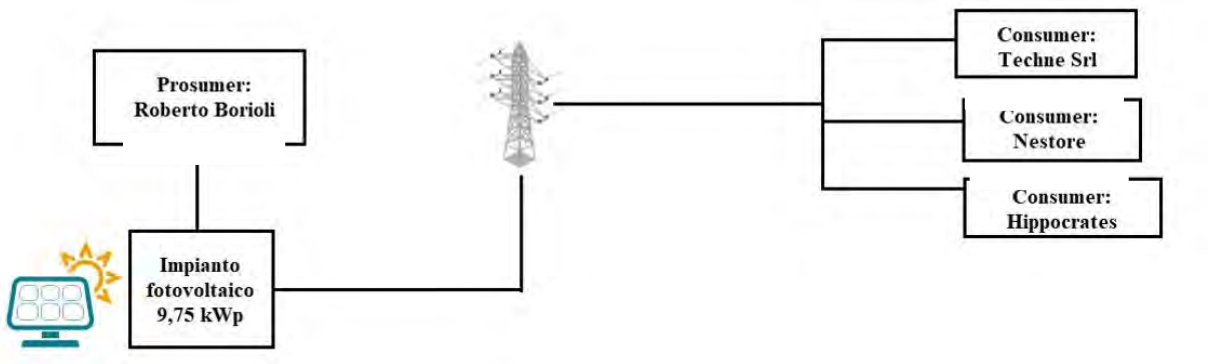
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Nella Tabella 1 e nella Figura 5 viene riassunta la composizione della comunità oggetto di studio.

Tabella 1. Utenti della Comunità

Utente	Locazione	Ruolo all'interno della comunità	Potenza Impegnata	Consumo energetico annuale (kWh)
Utenza privata	Edificio 2	Prosumer	3kW, monofase	Ftot=3161 F1=955
Società di servizi energetici	Edificio 1	Consumer	6kW, monofase	Ftot=8148 F1=4437
Centro Medico	Edificio 2	Consumer	6kW, trifase	Ftot= 5724 F1=3820
Caseificio	Edificio 1	Consumer	10kW, trifase	Ftot=10903 F1=5642

Figura 5. Utenti della Comunità



4. Analisi energetica ed economica: scenari di confronto

4.1 Ipotesi di lavoro

RECON[15] è un applicativo web realizzato da ENEA finalizzato a supportare valutazioni preliminari di tipo energetico, economico e finanziario per la nascita di comunità energetiche rinnovabili, è stato possibile effettuare un'analisi tecnico-economica per il caso di studio.

Mediante questo strumento, sono stati messi in evidenza i ricavi e le spese della CER.

Per quanto riguarda i primi, si dividono in più contributi:

- Remunerazione dell'energia elettrica immessa dagli impianti di produzione: l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico al netto dell'autoconsumo del singolo prosumer, ossia l'energia in "extra-produzione", è immessa in rete e può essere venduta sul mercato oppure essere ritirata dal GSE con il sistema di ritiro dedicato (RID);
- Mancato prelievo dalla rete pubblica: I prosumer agiscono sia come consumatori che come produttori. Una quota dell'energia autoprodotta è utilizzata da essi stessi per il loro fabbisogno energetico e di conseguenza per tale quota non necessitano di prelevare dalla rete elettrica nazionale. Questo mancato prelievo corrisponde a un risparmio diretto in bolletta;

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

- Tariffa premio e rimborso ARERA su energia condivisa: La quota di energia condivisa è incentivata con la tariffa premio di 110 €/MWh stabilita dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) con il Decreto Ministeriale del 16/09/2020[16]. Sulla stessa quantità di energia condivisa si aggiunge il rimborso previsto da ARERA per il mancato utilizzo della linea di trasmissione nazionale che è stato identificato pari a 8,22 €/MWh.

Le spese della CER possono essere suddivise in costi iniziali:

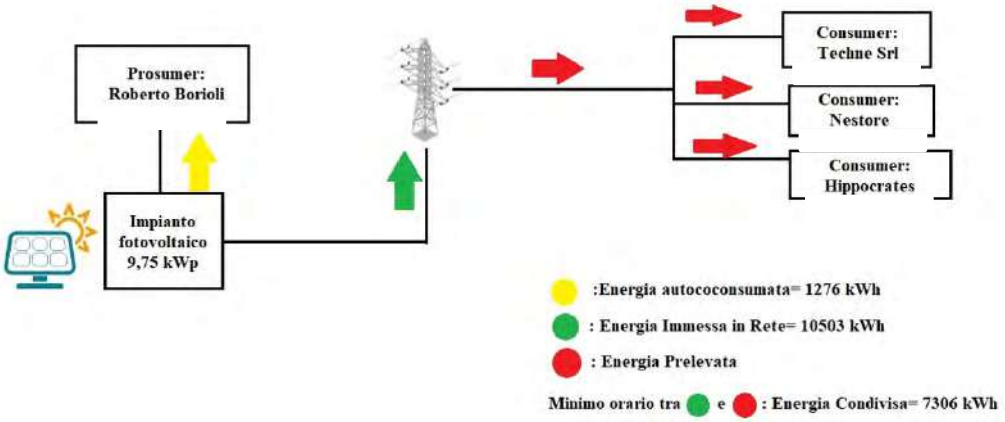
- installazione dell'impianto fotovoltaico: 1500 €/kWp+Iva;
- Acquisto Smart Meters: monofase=194€+iva, trifase=245€+Iva, router 4G: 225€+Iva;
- Licenza Piattaforma: 500€+Iva;
- Registrazione Statuto dell'associazione: 264 €;
- Apertura conto corrente dell'associazione: 100€;
- spese legali per la costituzione dell'ente giuridico Comunità Energetica Rinnovabile: non considerate poiché sostenute dalla azienda di servizi energetici;

e annuali:

- Manutenzione ordinaria dell'impianto: 550 €/anno + Iva;
- Gestione degli smart meters: 75€/anno + Iva;
- Gestione della Piattaforma: 500€/anno + Iva;
- Spese amministrative Gse: 46€/anno;
- Spese annuali Conto Corrente della Comunità Energetica: 292€/anno.

Sulla base di un set di input, quali informazioni sull'edificio, impianto, consumi elettrici ricavati dalle bollette, caratteristiche dell'impianto da FER e i costi di investimento e annuali, RECON calcola la resa energetica dell'impianto, l'energia condivisa e autoconsumata, i ricavi e i principali parametri finanziari tra cui il tempo di ritorno (Figura 6).

Figura 6. Analisi Energetica



Dai risultati in Figura 5 è possibile verificare una produzione annua dell'impianto di 11779 kWh. Dall'analisi dell'andamento mensile emerge il primato di produzione nei mesi centrali, con il picco nel mese di luglio. Dell'energia prodotta, 1276 kWh sono autoconsumati fisicamente dal prosumer

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

rappresentato dall'utenza privata, mentre i restanti 10503 kWh sono immessi in rete. L'energia condivisa, ossia il minimo orario tra l'energia immessa in rete e quella prelevata, è di 7306 kWh. Si hanno buone percentuali di autoconsumo, con un indice di autoconsumo totale, dato dal rapporto tra la somma di energia autoconsumata fisicamente e quella condivisa, e l'energia totale prodotta, pari al 72,86%. Ciò è dovuto ai consumi e agli usi finali differenziati degli utenti che fanno parte della comunità.

4.2 Analisi di Scenario

Nell'analisi sono stati ipotizzati cinque diversi scenari economici, al fine di poter individuare la soluzione più vantaggiosa per la Comunità energetica e i suoi utenti, minimizzando le spese e massimizzando i profitti (Tabella 2).

Tabella 2. Scenari Economici

Scenario	Finanziamento (€)	Spese Smart Meters e Piattaforma (€)	Spese di Manutenzione (Ordinaria+ Smart Meters e Piattaforma) (€/anno)	Spese amministrative (Statuto, conto corrente, GSE) (€/anno)	Costo energia (€/kWh)
1	9621(50%)	2741	1373	360 (1° anno) 338 (dal 2°anno	0,24
2	Non presente	2741	1373	410 (1° anno) 338 (dal 2°anno	0,24
3	Non presente	Non presenti	Non presenti	360 (1° anno) 338 (dal 2°anno	0,24
4	Non presente	Non presenti	Non presenti	360 (1° anno) 338 (dal 2°anno)	0,46
5	Non presente	2741	1373	360 (1° anno) 338 (dal 2°anno)	0,46

- *Scenario 1*: In questo primo scenario è stato supposto che l'investimento dell'impianto fotovoltaico venga realizzato attraverso un finanziamento bancario. La somma finanziata è stata indicata pari a 9621 €, ossia il 50% dell'investimento iniziale per l'impianto, Smart Meters e piattaforma di gestione essendo la rimanente aliquota coperta dalle detrazioni fiscali, tramite la pratica dello sconto di fattura;
- *Scenario 2*: In questa seconda ipotesi di progetto, rispetto allo Scenario 1, non è stato considerato un finanziamento per sostenere le spese di investimento;
- *Scenario 3*: In questo terzo scenario si è tentato di ridurre le spese previste all'interno della Comunità Energetica. Questo è stato possibile affidando la cura dell'impianto alla Società di servizi tecnici, mentre gli investimenti iniziali degli smart meters e della piattaforma di gestione (Figura 7) e le relative spese annuali, sono stati coperti grazie alle partnership con le aziende del settore;

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 7: Piattaforma di gestione ER-LIBRA CE



- *Scenario 4*: a partire dalle condizioni dello Scenario 3, viene cambiato il prezzo medio di acquisto dell'energia elettrica, posto pari a 0,46€/kWh, facendo riferimento alla crisi energetica del 2022;
- *Scenario 5*: In questo caso sono state riprese le condizioni dello Scenario 2, dunque tenendo conto delle spese di manutenzione, degli smart meters, della piattaforma non appoggiate da partnership, considerando, però i prezzi di acquisto dell'energia elettrica pari a quelli utilizzati nello Scenario 4.

4.3 Risultati

Attraverso la seguente Tabella 3 vengono posti a confronto i cinque scenari analizzati.

Tabella 3. risultati degli scenari

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5
Risparmio da autoconsumo fisico (€/anno)	306	306	306	587	587
Ricavi da energia immessa in rete (€/anno)	420				
Incentivo MISE Energia Condivisa (€/anno)	804				
Restituzione Componenti tariffarie (€/anno)	60				
Ricavi totali annuali (€/anno)	1590	1590	1590	1871	1871
Spese totali annuali (€/anno)	1711	1711	338	338	1711
Ricavo netto annuale (€/anno)	n/a	n/a	1252	1533	160
Tempo di Ritorno attualizzato (anni)	>20	>20	7,7	6	>20
Van a 20 anni (€)	n/a	n/a	7919	n/a	n/a
CO_2 annuale evitata (t)	3,88				

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Alla luce dei risultati ottenuti, è possibile affermare come la Comunità Energetica "Via dei Partigiani", in assenza di sponsorizzazioni in grado di coprire parte delle spese, fornisca bassi benefici economici. Se infatti da una parte è necessario ricordare come il fine della comunità energetica non sia quello di generare profitti finanziari, gli Scenari 1,2 e 5, in cui i Costi degli Smart Meters, della Piattaforma e della Manutenzione Ordinaria non sono coperti dai partner, forniscono tempi di ritorno elevati, maggiori di 20anni con VAN negativo. In tutti gli scenari, la CER evita l'emissione di 3,88 t/annuali di CO_2. La rimozione di tali spese conduce allo scenario numero 3, chiaramente più vantaggioso, con un periodo di recupero dell'investimento iniziale sensibilmente ridoto rispetto agli altri, di 7,7 anni. Il quarto scenario evidenzia tuttavia l'importanza della comunità energetica rinnovabile come strumento fondamentale per affrontare la crisi energetica. L'aumento dei prezzi dell'energia elettrica rappresenta infatti un vantaggio per l'autoconsumatore di energia rinnovabile, dal momento che, a parità di energia prodotta dal proprio impianto e consumata in situ, e di conseguenza non prelevata dalla rete, egli usufruisce di un risparmio in bolletta maggiore. In questo modo aumentano i ricavi annui dell'associazione, come dimostra l'analisi effettuata, in cui l'aumento stimato del prezzo medio di acquisto dell'energia da 0,24€/kWh a 0,46€/kWh ha determinato un consistente aumento dei risparmi da autoconsumo fisico, passati da 306 a 587 €/anno. Sia ha pertanto un'ulteriore diminuzione del tempo di ritorno, che scende a 6 anni. Tuttavia tali benefici vengono persi nell'ultimo scenario, in cui si ha nuovamente l'assenza di sponsorizzazioni dovute a partnership, che fanno aumentare fino alle condizioni iniziali i tempi di recupero dell'investimento.

5. Implementazione della CER

La comunità si è costituita in data 13 gennaio 2022, sotto forma di associazione senza scopo di lucro. L'impianto fotovoltaico è stato installato nel mese di aprile 2022 (Figura 8, Figura 9). Costituito da 26 moduli, ciascuno di potenza 375W, per una potenza installata totale di 9,75 kW.

Figura 8: Impianto fotovoltaico installato (vista 1)



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 9. Impianto fotovoltaico installato (vista 2)



5.1 Divisione degli utili all'interno dell'associazione

Al fine di distribuire i benefici della comunità energetica in modo equo, è stata fatta un'ipotesi preliminare di suddivisione. Come già precisato, l'impianto è interamente finanziato dall'utenza privata, prosumer della Comunità Energetica, essendo di sua proprietà. Per questo motivo è stato concordato che a tale utente, a fronte dei maggiori investimenti iniziali, spetti la maggior parte dei ricavi:

- Utenza Privata
  - 52% Incentivo MISE sull'energia Condivisa
  - Ricavi da Energia immessa in rete
  - Risparmi da autoconsumo Fisico (risparmio in bolletta)
  - 25% Restituzione componenti tariffarie
- Centro Medico
  - 16% Incentivo MISE sull'energia Condivisa
  - 25% Restituzione componenti tariffarie
- Società di servizi tecnici
  - 16% Incentivo MISE sull'energia Condivisa
  - 25% Restituzione componenti tariffarie
- Caseificio
  - 16% Incentivo MISE sull'energia Condivisa
  - 25% Restituzione componenti tariffarie

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5.2 Nuovi Membri della Comunità Energetica: Partecipazione Be Charge

In seguito alla fondazione dell'Associazione "Via dei Partigiani", l'operatore partner nel campo della mobilità elettrica, già partner tecnico di questa, ha manifestato interesse ad entrare all'interno di tale comunità energetica. L'ingresso è avvenuto il 15 marzo 2022, in occasione dell'assemblea dei soci della comunità. L'utenza del partner è rappresentata da una colonnina di ricarica per veicoli elettrici di proprietà della stessa compagnia, situata presso il parcheggio dei due edifici dove sorge la comunità, a Marsciano (Figura 6).

Figura 10. colonnina di ricarica Be Charge



Il ruolo del partner all'interno della comunità energetica è quello di consumer ed è entrato nell'associazione come socio senza poteri di controllo.

La presenza di un nuovo membro cambia le valutazioni energetiche ed economiche svolte finora. Pertanto, svolgendo nuovamente le simulazioni, si ottengono risultati differenti. Questi sono riportati e posti a confronto con gli scenari precedenti nella seguente Tabella 4.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 4. confronto tra gli scenari

Bilancio Economico CER	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 3 con Be Charge	Scenario 4 con Be Charge
Consumi elettrici totali(kWh)	28204					32231	
Produzione Fotovoltaica (kWh)	11779						
Autoconsumo fisico (kWh)	1276						
Energia immessa in rete (kWh)	10503						
Consumi elettrici diurni (kWh)	16955					20270	
Energia Condivisa (kWh)	7306					7823	
Energia in Eccedenza (kWh)	3197					2680	
Prezzo medio acquisto energia (€/ kWh)	0,24	0,24	0,24	0,46	0,46	0,24	0,46
Prezzo vendita energia immessa in rete (€/kWh)	0,04						
Risparmio da autoconsumo fisico (€/anno)	306	306	306	587	587	306	587
Ricavi da innergia immessa in rete (€/anno)	420						
Incentivo MISE Energia Condivisa (€/anno)	804					861	
Restituzione Componenti tariffarie (€/anno)	60					64	
Ricavi totali annuali (€/anno)	1590	1590	1590	1871	1871	1651	1932
Spese totali annuali (€/anno)	1711	1711	338	338	1711	342	342
Ricavo netto annuale (€/anno)	n/a	n/a	1252	1533	160	1309	1590
Tempo di Ritorno (anni)	>20	>20	5,6	7,7	>20	7,3	5,8

La presenza del partner fa crescere i consumi elettrici della comunità. Si osserva l'aumento di energia condivisa dovuto all'utenza in più, che anche se di poco, permette di aumentare la somma percepita grazie all'incentivo MiSE. Tutto ciò porta ad una modesta diminuzione del tempo di ritorno, che conferma ancora una volta l'importanza di aggiungere nuovi utenti alla comunità. Lo Scenario più favorevole appare sicuramente l'ultimo, in cui alle ipotesi del numero 4 è stata aggiunta la presenza del partner. In questo caso, l'aumento dei costi di acquisto dell'energia e di energia condivisa portano ad un valore del tempo di ritorno pari a 5,8 anni. Anche nello "Scenario 3 con partner", con prezzi convenzionali dell'energia, si rileva una diminuzione del tempo di ritorno, che scende a 7,3 anni.

L'entrata del partner nella Comunità Energetica condiziona anche la suddivisione interna dei ricavi e dei costi derivanti dall'associazione. Tenendo anche in questo caso conto della maggiore spesa che l'utenza privata sostiene con il finanziamento dell'impianto, è stata ipotizzata una soluzione analoga a quella precedentemente descritta: per l'utenza Privata è riconosciuto un 52% dell'incentivo MISE

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sull'energia Condivisa , i ricavi da Energia immessa in rete, i risparmi da autoconsumo fisico (risparmio in bolletta) e un 20% Restituzione componenti tariffarie.; la quota restante dell'incentivo MISE sull'energia Condivisa e della restituzione componenti tariffarie è suddivisa equamente tra i consumer, rispettivamente pari al 12% e al 20%.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Analizzando i diversi scenari di simulazione è emerso come la comunità energetica oggetto di studio non sia in grado di offrire elevati benefici economici. I motivi sono imputabili alle dimensioni dell'impianto fotovoltaico, dal quale deriva una bassa produzione annuale di energia rinnovabile e di conseguenza poca energia condivisa che può usufruire del sistema di incentivazione. Tuttavia, la comunità energetica è aperta all'entrata di nuovi soci, che potrebbero incrementare i benefici di questa. In particolare, sarebbe fondamentale aumentare il numero di prosumer, permettendo l'ingresso nella comunità di soggetti in possesso di impianti da fonti rinnovabili. La loro presenza garantirebbe infatti un aumento della produzione complessiva che, unito alla massimizzazione dell'energia condivisa anche grazie all'utilizzo di sistemi di accumulo, garantirebbe una crescita dei benefici economici. Inoltre, come già evidenziato con l'ingresso del partner fornitore della colonnina di ricarica, la presenza di nuovi utenti comporterebbe una nuova suddivisione dei guadagni all'interno dell'associazione. Una suddivisione dei benefici è possibile anche attraverso la piattaforma [17] (Figura 7), in grado di monitorare l'autoconsumo dei membri della comunità. Tramite quest'ultima è infatti possibile stimare gli indicatori di prestazione (KPI) a livello di singolo POD e di comunità, attuare confronti tra i consumi ed effettuare previsioni. In seguito la piattaforma è in grado di attuare una ripartizione dell'energia condivisa e dei conseguenti incentivi attraverso regole parametriche, dashboard di sintesi e report collettivi e dei singoli utenti. In questo modo sono premiati i comportamenti virtuosi di quest'ultimi, al fine di incentivarli per migliorare sempre di più anche i benefici energetici ed ambientali. Seguendo il modello proposto da NRG2peers, l'utilizzo della piattaforma nasce con l'intento di implementare una gestione dell'energia peer-to-peer, fornendo meccanismi per ottimizzare il consumo di energia e i picchi di domanda a livello di comunità. In questo modo, le abitudini del consumatore possono essere modulate al fine di venire incontro alle necessità di rete, effettuando così, in forma ridotta, un bilanciamento di sistema. Il consumatore viene dunque responsabilizzato e non solo ottiene benefici, ma viene a conoscenza dei meccanismi di vendita e produzione di energia, assumendo un ruolo da protagonista all'interno del processo. Si è inoltre visto come l'aumento dei prezzi dell'energia, che coinvolge anche quella elettrica, comporta esiti molto positivi per i membri di una comunità energetica rinnovabile, in particolare per il prosumer, ossia colui la cui utenza energetica è allacciata all'impianto di produzione. L'elevato prezzo della materia energia che non viene acquistata da quest'ultimo, poiché autoconsumata, comporta maggiori valori del risparmio in bolletta, che nel bilancio annuo aumentano i ricavi, facendo diminuire il tempo di ritorno. Questo risultato dimostra come la comunità energetica rinnovabile possa rappresentare uno strumento fondamentale all'interno del processo di transizione energetica, in grado di garantire autonomia e autosufficienza, coinvolgendo i cittadini all'interno di un modello nuovo di gestione e

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

produzione di energia. Infatti, anche in uno scenario di crisi, tale configurazione non rappresenta solamente una soluzione ecosostenibile e rinnovabile, ma è anche in grado di portare benefici ai consumatori, già gravati da costi sempre maggiori, che in questo modo verrebbero appianati.

Ringraziamenti

Il progetto della Comunità Energetica oggetto di studio è stato sviluppato nell'ambito del Progetto Europeo NRG2peers ("Towards a new generation of EU peer-to-peer Energy Communities facilita-ted by a gamified platform and empowered by user-centred energy trading mechanisms and business models", finanziato da H2020- Id n. 890345). Gli autori ringraziano inoltre i partners tecnici della Comunità Energetica Via dei Partigiani: Techne Srl, azienda di servizi energetici, che ha curato la manutenzione ordinaria dell'impianto fotovoltaico e le spese legali di costituzione dell'associazione "Via dei Partigiani"; Be Charge Srl, operatore infrastrutturale nel campo della mobilità elettrica, fornitore degli smart meters; AlgoWatt Spa, azienda che progetta e sviluppa soluzioni per la gestione dell'energia e delle risorse naturali, che ha fornito la piattaforma di gestione virtuale della comunità.

Bibliografia

[1] P.M Service, "PICCOLO MANUALE DELLE Comunità Energetiche," 2020.

[2] "DIRETTIVA (UE) 2018/ 2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO - dell'11 dicembre 2018 - sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili", [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX:32018L2001

[3] "DIRETTIVA (UE) 2019/ 944 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO - del 5 giugno 2019 - relativa a norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica e che modifica la direttiva 20 12/ 27/ UE", Accessed: Jan. 08, 2022. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/LSU/?uri=CELEX:32019L0944

[4] "Decreto-legge del 30/12/2019 n. 162," 2019. [Online]. Available: https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/02/29/20A01353/sg

[5] "DECRETO-LEGISLATIVO-8-novembre-2021-n.-199," 2021, [Online]. Available: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2021-11-30&atto.codiceRedazionale=21G00214&elenco30giorni=true

[6] GSE, "Guida all'autoconsumo fotovoltaico: Gruppo di Autoconsumatori e Comunità di Energia Rinnovabil".

[7] "Horizon 2020 | Horizon 2020." https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/home

[8] "Home - NRG2Peers." https://nrg2peers.com/

[9] "Schoonschip - a pioneering floating energy community - Housing Evolutions Hub." https://www.housingevolutions.eu/project/1798/

[10] "ENERGY CENTER Politecnico di Torino." https://www.energycenter.polito.it/

[11] "Homepage - CER Magliano Alpi." https://cermaglianoalpi.it/

[12] "Energy 4 Com – Sviluppo Comunità Energetiche." https://energy4com.eu/

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[13] “Be Charge: colonnine di ricarica auto elettriche a portata di app.” https://www.bec.energy/
[14] “algoWatt Business | algoWatt S.p.A.” https://algowatt.com/
[15] “Recon | Recon.” https://recon.smartenergycommunity.enea.it/
[16] Ministero dello Sviluppo Economico, *Decreto Ministeriale 16 Settembre 2020*. 2020. [Online]. Available: https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/11/16/20A06224/sg
[17] “Algowatt ER-LIBRA CE.” https://algowatt.com/portfolio-items/er-libra-ce/#

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Raman and SEM remarks of CO_2 and CH_4 gas hydrates

Rita Giovannetti[1,*], Andrea Rossi[1], Marco Minicucci[2], Marco Zannotti[1]

[1] School of Science and Technology, Chemistry Division, ChIP Research Center, University of Camerino, Via Madonna delle Carceri, 1, 62032 Camerino, Italy.

[2] School of Science and Technology, Physics Division, University of Camerino, Via Madonna delle Carceri, 9, 62032 Camerino, Italy.

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: rita.giovannetti@unicam.it

Abstract: In this study, in accord to the program of 2017 Italian PRIN Project entitled "Methane recovery and carbon dioxide sequestration in methane hydrate reservoirs", different CH_4, CO_2 and CO_2/CH_4 hydrates prepared with two different apparatus, were ex situ analyzed by use Raman-spectroscopy that represents a powerful technique used for hydrate characterization. A special metal copper sample holder with increased dimensions with respect to that supplied by the Raman instrument was used in order to perform measurements on a larger sample volume and thus to obtain more correct analytical data. The experiments were performed by using a green laser at 532nm (max power 50 mW). The gas uptake in the hydrate structures was confirmed by identification of the fingerprint of CH_4 and CO_2 and the OH stretching bands. To observe the morphological characteristics of the different gas hydrates, these were analyzed by Field Emission Scanning Electron Microscopy instrument (SEM) at low temperature (-25°C) by using a "Coolstage head" under high vacuum condition. Images were collected by using the in-lens detector in order to obtain full information about the morphological state of the samples.

Keywords: CO_2 and CH_4 gas hydrates, Raman OH-stretching vibrations, SEM.

1. Introduction

Clathrate hydrates are crystalline structures that are formed from water and gas molecules that react at high pressure and low temperature. Cages of water molecules are formed joined together by hydrogen bonds which are capable of trapping gas molecules [1-3]. The size of the host molecule determines the type of structure; for this, smaller molecules such as methane, ethane, CO_2, etc., form

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sI hydrates, while larger gases such as propane and butane or small molecules such as hydrogen, oxygen and nitrogen, form sII hydrates. Also in mixed gas hydrates, the composition affects the structure of the hydrates, so each molecule will be housed in appropriately sized cages. The sH hydrate is always composed of several host components; furthermore, the pressure and concentration of the gas also influence the type of crystal structure [4-6].

Raman spectroscopy is a very interesting technique useful for the investigation of the molecular structure and is appropriate for the analysis of water, aqueous solutions, and its solid phases. Raman spectrum of water can be divided into three zones corresponding to translational/vibrational bands (below 400 cm^{-1}), OH–bending bands (at about 1600 cm^{-1}) and the most intense OH– stretching bands (OHs in the range 3000–4000 cm^{-1}). Raman measurements developed on gas hydrate samples permit to confirm the gas uptake in the hydrate structures by identification of the fingerprint of host molecule present in the cages of the hydrates, the unreacted water fraction, and the possible structural changes. Specifically, qualitative analysis of the specific gas hydrates can describe the composition and the structure type identification, while quantitative analysis provided information about cage occupancy and hydration number [7-11].

In this study, in accord to the program of 2017 Italian PRIN Project entitled “Methane recovery and carbon dioxide sequestration in methane hydrate reservoirs”, different CH_4, CO_2 and CO_2/CH_4 hydrates prepared with two different apparatus, were ex situ analyzed by use Raman-spectroscopy. The gas uptake in the hydrate structures was confirmed by identification of the fingerprint of CH_4 and CO_2 and by the changes in the OH stretching bands. The morphological characteristics of the different gas hydrates were analyzed at low temperature by Field Emission Scanning Electron Microscopy instrument (SEM) and the images were collected.

2. Methods

2.1. Gas hydrates

Gas hydrates samples (see Table 1) prepared by two different apparatus of University of Perugia and University of Chieti respectively (see Fig.1 and Fig.2), were collected in liquid Nitrogen and ex situ analyzed.

Table 1. Analyzed GHs samples.

UniPG samples		**UniChieti samples**			
Type	**Name**	**Type**	**Name**	**Type**	**Name**
CO_2 GH - Pure water	A	CO_2 GH - Pure water	E	CH_4 GH - Pure water	I
CO_2 GH - Pure water + sand	B	CO_2 GH - Sea water	F	CH_4 GH - Sea water	L
CO_2 GH - Pure water + NaCl	C	CO_2 GH - Pure water + TS2	G	CH_4 GH - Pure water + TS2	M
*(CO_2 + CH_4) GH – Pure water	D	CO_2 GH – Pure water + S4045	H	CH_4 GH – Pure water + S4045	N

*This sample was prepared on the replacement of CH_4 with CO_2 molecules into GH.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1. UniPG lab-scale reactor.

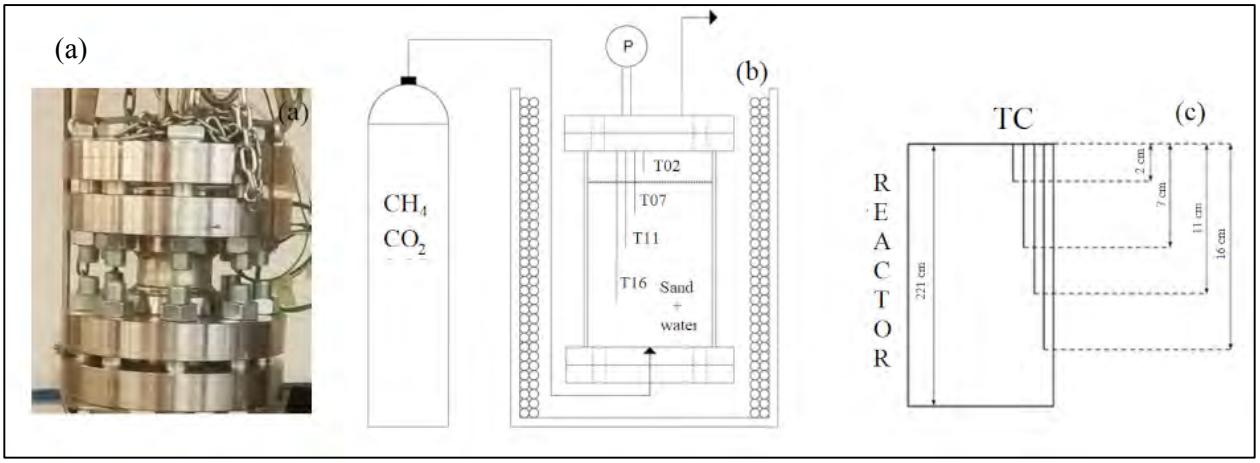
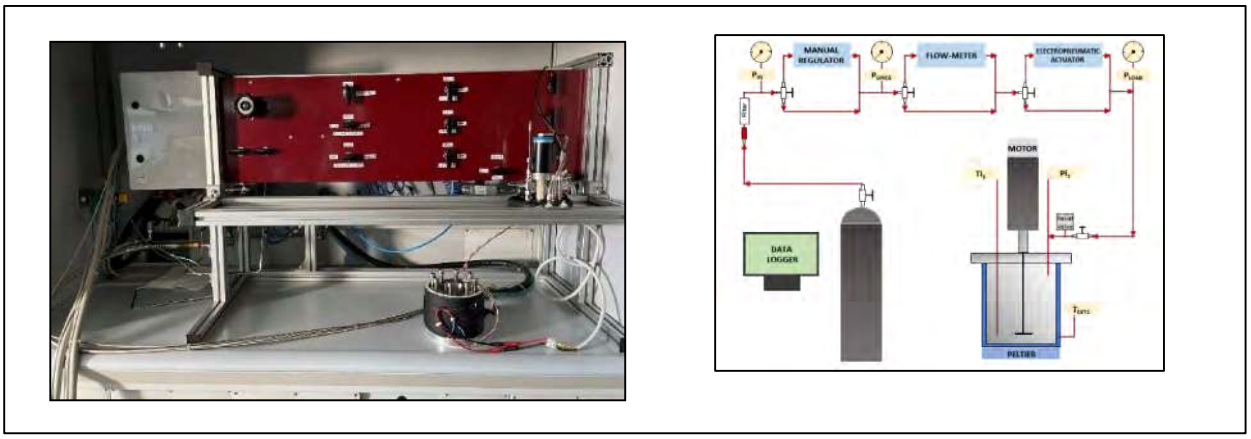


Figure 2. UniChieti lab-scale reactor.



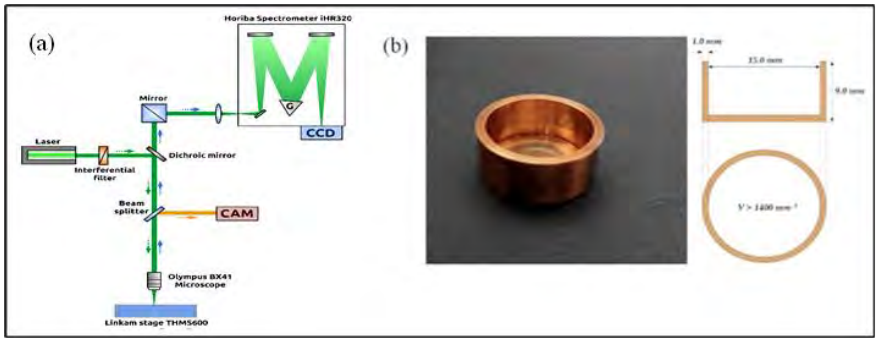
2.2. Raman setup

A Micro-Raman setup (Figure 3a) was used to collect Raman spectra. This instrument consists of a Czerny-Turner spectrometer (iHR320 Horiba Scientific) equipped with 600/1800/2400 g/mm grating (resolution 7.0 cm^{-1}) and an open space microscope to accommodate a Linkam THMS600 cell for low/high temperature conditions (ranging from -195 °C to 600 °C).

The experiments were performed with a laser having an excitation wavelength of 532 nm (max power 50mW), the total acquisition time for each spectrum was 300 s and the working-temperature was -100 °C. This Raman setup was based on a back-scattering configuration and allowed to collect the spectrum through an Olympus LMPLFLN50XBD long-distance objective (working distance of 10.6mm). The backscattered radiation is collected by a Syncerity cooled CCD camera with 1024x226 pixels. To be able to carry out measurements on a larger sample volume and thus obtain more correct analytical measurements, a special metal copper sample holder has been designed and realized modifying the factory setup, with increased dimensions respect to that supplied by the instrument, as shown in Figure 3b.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Raman setup (a); sample holder (b).



2.3. Morphological study by SEM

Morphological information of the surfaces of the different GHs were obtained by low-temperature SEM experiments by using Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM, Sigma 300, Zeiss) operating at 7.0 kV and equipped with Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX, Quantax, EDS, Bruker) and with a special temperature-controlled device (Coolstage by Seben). Images at T = -25 °C were collected by using the in-lens detector in order to obtain full information about the surface state of the sample [11].

3. Results and discussion

3.1. Raman information

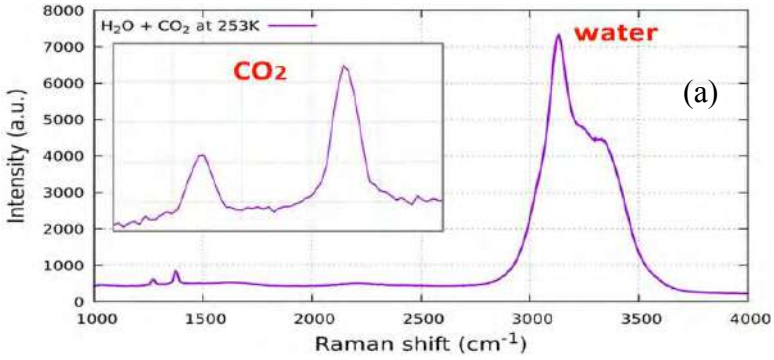
The gas uptake in the hydrate structures was confirmed by Raman analysis that was applied in order to permit the identification of the fingerprint of CH_4 and CO_2 and also the changes in the OH stretching bands.

Specifically, Fig.4a shows the Raman spectrum of CO_2GH (sample A of table 1) obtained at 253K. The graph demonstrates the presence of one pair of peaks in the region 1200-1400 cm^{-1}, which correspond to the well-known CO_2 Fermi-diad peaks from CO_2 in the hydrate. The peak presents at lower frequency is related to stretching vibration C–O (v1) while that at higher frequency is the overtone of the folding modes O-C-O (2v2) [13]. Sample B showed similar behavior, while the Raman analysis of sample C do not showed the presence of CO_2 due to probable instability of this GH during the transportation in the laboratory. The range of frequencies between 2800 and 3800 cm^{-1} are closely related to the structure of water and are referred to O–H stretching bands with a typical profile similar to that of ice water[11].

In addition, Fig.4 (b) shows the Raman spectrum of (CO_2-CH_4)GH (sample D of Table 1) that demonstrates the presence of both CH_4 and CO_2 signals; the CO_2 Fermi-diad peaks are in fact present, while methane stretching vibration is confirmed in the region from 2900 to 2910 cm^{-1} where the couple of signals are related to the symmetric C–H stretching of CH_4 in large cages (lower shift) and in small cages (higher shift). Moreover in Fig. 5 are reported the Raman spectra of CO_2GHs (samples E-H) and of CH_4GHs (samples I-N) respectively [11-13].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 4. Raman spectra of CO_2GHs (a) and (CO_2-CH_4)GHs (b) (samples A and D respectively).



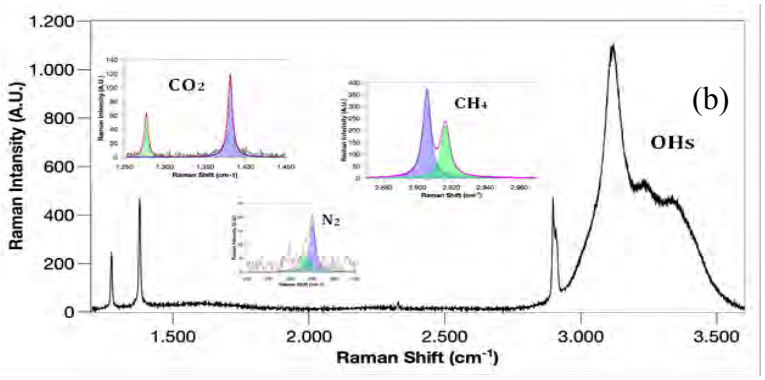
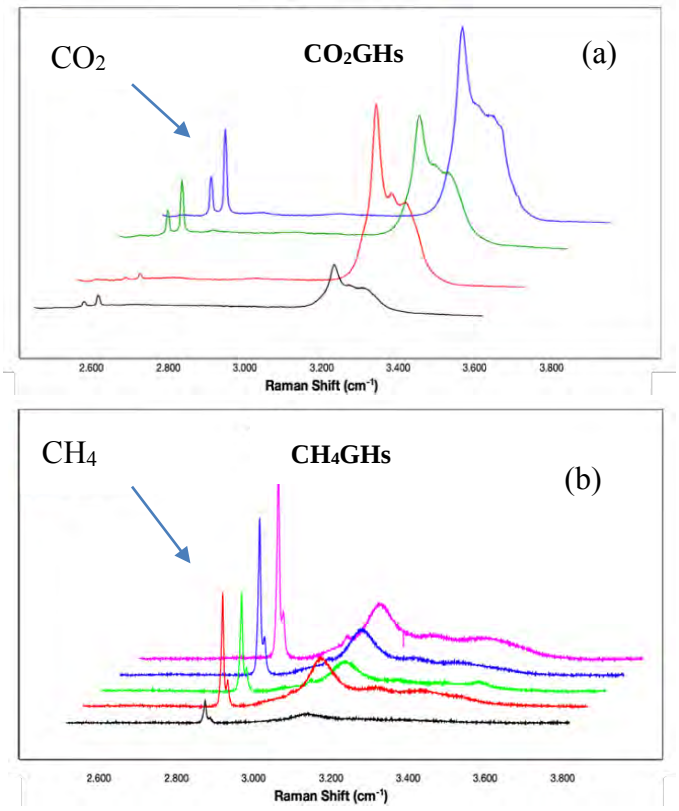


Figure 5. Raman spectra of CO_2GHs (a) and CH_4GHs (b) (samples E-H and I-N respectively).



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The relative shift positions of CO_2 (Table 2) and CH_4 (Table 3) observed in the Raman spectra of all GHs were in accord to literature data to prove the efficiency of the preparation conditions of all GHs [11-13]. Moreover, differences in the shift positions can be observed in the group of A-D samples and, from this and the group of E-H samples, that can be attributed to different preparation conditions.

Table 2. Raman shifts of CO_2GHs samples.

from UniPG	**Name**	**CO_2 stretching mode v1** (cm^{-1})	**CO_2 vibrational mode 2v2** (cm^{-1})
CO_2 GH - Pure water	A	1271,1	1375,3
CO_2 GH - Pure water + sand	B	1272,3	1377,5
(CO_2 + CH_4) GH - Pure water	D	1277,5	1382,0
from UniChieti			
CO_2 GH - Pure water	E	1275.6	1379.4
CO_2 GH - Sea water	F	1275.2	1379.4
CO_2 GH - Pure water + TS2	G	1275.7	1379.6
CO_2 GH - Pure water + S4045	H	1275.1	1379.3

Table 3. Raman shifts of CH_4GHs samples.

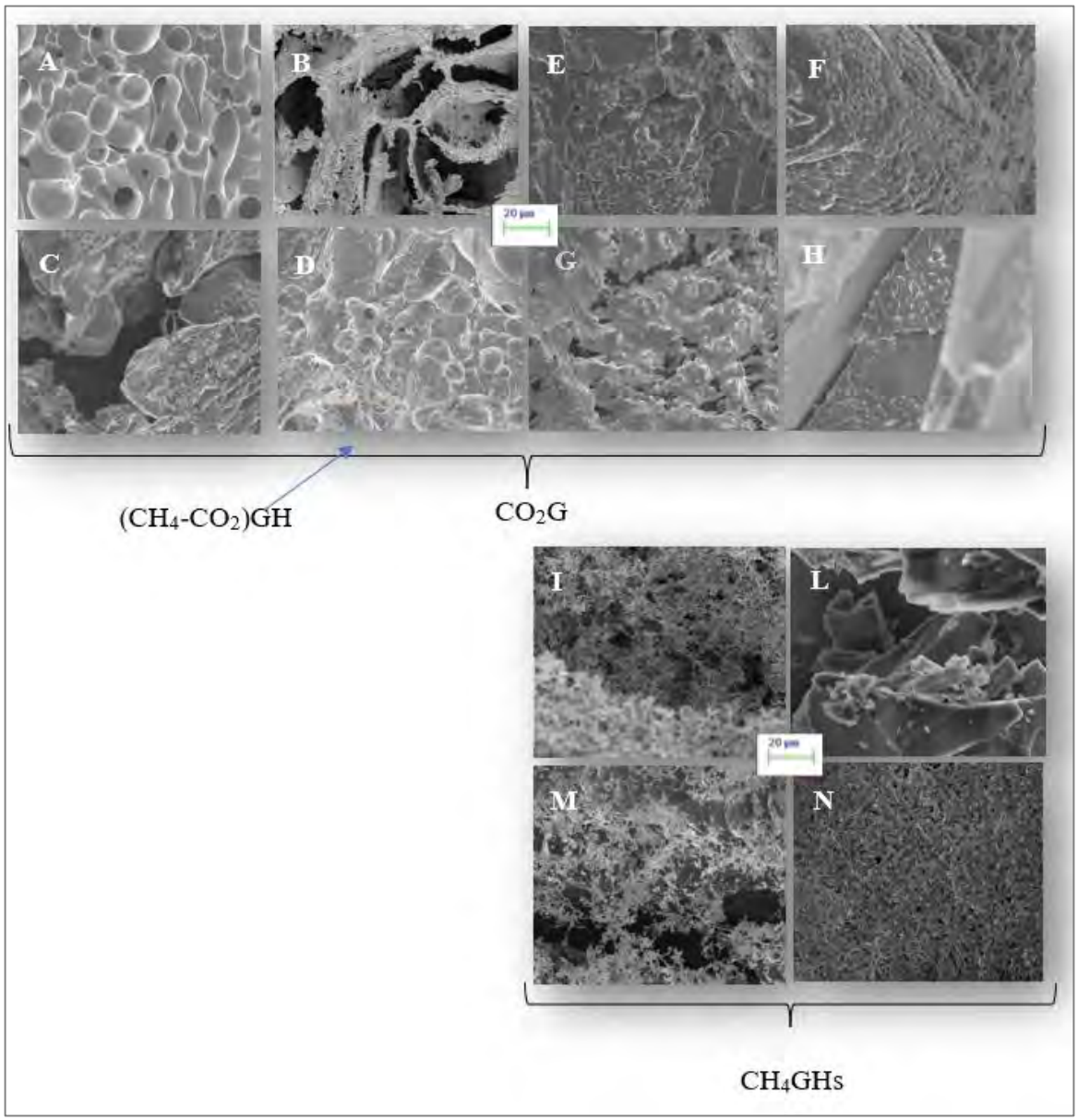
from UniChieti	**Name**	**CH_4 large cages** (cm^{-1})	**CH_4 small cages** (cm^{-1})
CH_4 GH - Pure water	I	2904.2	2915.7
CH_4 GH - Sea water	L	2904.4	2915.7
CH_4 GH - Pure water + TS2	M	2904.6	2915.9
CH_4 GH - Pure water + S4045	N	2904.5	2916.0
(CO_2 + CH_4) GH - Pure water	D	2905.4	2916.4

3.2. Morphology of GHs

Figure 6 shows the SEM images of all the surfaces of CO_2GHs produced in different experimental conditions showing particularity in the morphology. Specifically, the images A-C are referred to CO_2GHs produced by UniPG lab-scale reactor while the images E-H to CO_2GHs produced by UniChieti lab-scale reactor. Differences can be also observed between the two typologies of CO_2GHs (group A-D vs group E-H) demonstrating that the modality in the production of GHs influenced the porosity and the consistency of these. Moreover, as can be observed from Fig. 5, the image of the (CH_4-CO_2)GH (D sample) obtained by UniPG lab-scale reactor shows morphological similarity with the CO_2GHs (A sample). In addition, the image of the CH_4GHs (I-N samples) produced by UniChieti lab-scale reactor shows morphological differences in the different experimental conditions.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Morphology of GHs surfaces.



4. Conclusions.

This study proves how the proposed analytical methods are appropriate for the characterization of GHs. In fact, for define the quality of gas hydrates, the Raman analysis of different CH_4, CO_2 and CO_2/CH_4 hydrates, prepared with two different apparatus, was performed by using of special metal copper sample holder with increased dimensions with respect to that supplied by the Raman instrument in order to obtain more precise information. The gas uptake in the hydrate structures was confirmed by identification of the fingerprint of CH_4 and CO_2 and of the OH stretching bands. The obtained data evidenced that the modality in the production of GHs, and the chemical and physical environment used in this preparation influenced the positions of the Raman signals.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Moreover, the images collected by low temperature analysis (-25 °C), performed with SEM instrument under high vacuum condition, evidenced changes in the morphology of the different GHs. The results showed differences in the porosity and in the consistency between the different types of GHs confirming as the modality in the production of GHs can influence their main properties. A future analysis of the results will be addressed to the calculation of the relative cage occupancies, the occupancy ratio, and the hydration number of CO_2 and CH_4 gas hydrates prepared in different experimental conditions.

5. References

1. Sloan E.D.; Khon C.A.; Clathrate Hydrates of Natural Gases, third edition ed., CRC Press, **2007**.
2. McMullan R.K.; Jeffrey G.A.; Polyhedral clathrate hydrates. IX. Structure of ethylene oxide hydrate, *J. Chem. Phys.* **1965**, 42, 2725–2732.
3. Kumar K.V.; Preuss K.; Titirici M.-M.; Rodríguez-Reinoso F.; Nanoporous Materials for the Onboard Storage of Natural Gas, *Chem. Rev.* **2017**, 117.
4. R.K. McMullan, G.A. Jeffrey, Polyhedral clathrate hydrates. IX. Structure of ethylene oxide hydrate, *J. Chem. Phys.* 42 (8) (1965) 2725–2732.
5. K.V. Kumar, K. Preuss, M.-M. Titirici, F. Rodríguez-Reinoso, Nanoporous Materials for the Onboard Storage of Natural Gas, *Chem. Rev.* 117 (2017) 1796–1825,
6. Naeiji P.; Mona Mottahedin M.; Varaminian F.; Separation of methane–ethane gas mixtures via gas hydrate formation, *Separation and Purification Technology* **2014**, 123, 139–144.
7. Carey D.M.; Korenowski G.M.; Measurement of the Raman spectrum of liquid water, J. *Chem. Phys.* **1998**, 108, 2669–2675.
8. Monosmith W.B.; Walrafen G.E.; Temperature dependence of the Raman OH stretching overtone from liquid water, *J. Chem. Phys*. **1984**, 81, 669–674.
9. Shimoaka, T.; Hasegawa T.; Ohno K.; Katsumoto Y.; Correlation between the local OH stretching vibration wavenumber and the hydrogen bonding pattern of water in a condensed phase: Quantum chemical approach to analyze the broad OH band, *J. Mol. Struct.* **2012**, 1029, 209–216.
10. Huang X.; Zhang L.; Cai W.; et al. Study on the characteristic spectral bands of water molecule and hydrogen bond of methane hydrate, *Chemical Engineering Science* **2022**, 248, 17117.
11. Giovannetti R.; Gambelli A.M; Castellani B.; Rossi A.; Minicucci M.; Zannotti M.;, Yan L.; Rossi F.; May sediments affect the inhibiting properties of NaCl on CH_4 and CO_2 hydrates formation? an experimental report, *Journal of Molecular Liquids* **2022**, 359, 119-300.
12. Huang X.; Cai W., Zhan L.; Hailong Lu H. Study on the reaction of methane hydrate with gaseous CO_2 by Raman imaging microscopy, *Chemical Engineering Science* **2020**, 115.
13. Chen L.; Lu H.; Ripmeester J.A.; Raman spectroscopic study of CO_2 in hydrate cages, *Chemical Engineering Science* **2015**, 138, 706–711.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Preliminary experimental study on CO_2 absorption with novel choline-proline Ionic Liquid to the methane upgrade

Salvatore Cannone[1], Andrea Lanzini[1], Massimo Santarelli[1]

[1] Politecnico di Torino

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: salvatore.cannone@polito.it

Abstract: Natural gas hydrates (NGH) constitute the largest reservoir of natural gas in the World, and the methane contained within the crystalline structure can be replaced by carbon dioxide, with an effect of Carbon substitution that can assure Carbon neutrality of the extracted methane. Carbon capture technologies are expected to play a significant role in the energy transition, as a powerful tool for the decarbonisation of the already existing power stations and the hard-to-abate industrial sectors, and as part of natural gas upgrading systems and blue hydrogen production processes. Nowadays, amine (MEA) scrubbing stands among the most solid technologies in the carbon sequestration field, though being renowned for the high energy requirements, the toxicity, the corrosiveness and the fast degradation they undergo. Ionic liquids (ILs) are emerging as a viable alternative to the aqueous amine solutions for carbon capture processes. In this regard, recent studies show that choline proline ([Cho][Pro]) has good potential, thanks to its ring structure and to the presence of amine functionalities in the amino acid moiety – which promotes the physical and the chemical CO2 absorption, respectively. On the downside, the high viscosity values constitute a serious drawback in practical applications, which can be overcome through the use of solutions of [Cho][Pro] in solvents such as DMSO. The present work aims at providing insights into the thermo-physical properties and performance of 25%wt of [Cho][Pro] in DMSO. A comparison between the new solutions and MEA was performed, highlighting how the theoretical limit of the MEA solution can be overcome.

Introduction

Natural gas hydrates (NGHs) are crystalline compounds made up of guest molecules (e.g., CH_4, CO_2, C_2H_6, C_3H_8) encapsulated in H_2-bonded water cages and stable at low temperature and high-pressure conditions (White & McGrail, 2009). Solan et al, have estimated $2.1x10^{16}$ m^3 of natural gas contained

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

in gas hydrate resources and therefore can be defined as the largest reservoir of natural gas in the world (Sloan Jr. et al., 2007). One of the most promising methods for extracting methane from these fields is through CO2 injection. This solution can enhance methane extraction and sequestrate carbon dioxide that forms a stable hydrate structure at lower pressure conditions than methane and it results in a neutral fuel (Cannone et al., 2021). When natural gas is extracted from this reservoir, a mixture of gases composed mainly of CH_4 and CO_2 needs to be treated, in order to purify methane and recirculate the CO_2 inside the deposits.

The most used commercial method is based on gas scrubbing with an aqueous amine solution. CO2 is captured by the liquid solvent inside an absorption column at relatively low temperatures (40-60 °C) and then released during the solvent regeneration process. In this process, the solvent is recovered at high temperatures (100-140 °C) in the stripper column and then cooled to the absorption condition to be recycled for continuous use (Gibbins & Chalmers, 2008). Two molecules of primary amines react with one molecule of CO_2 resulting in an ammonium carbamate formation with a molar efficiency of 0.5 as shown in the following equation (Blauwhoff et al., 1984):

$$CO_2 + 2R_1R_2NH \leftrightarrow R_1R_2NCO_2^- + R_1R_2NH_2^+$$

On the contrary, amine scrubbings have several drawbacks such as solvent loss during regeneration, corrosion, and toxicity. In addition, the energy consumption of the desorption process is currently considered to be still too high $\left(3.6 - 3.8\ \frac{GJ}{t_{CO_2}}\right)$ (Notz et al., 2012).

Ionic liquids (ILs) are an emerging class of material able to overcome some critical issues related to the CO_2 capture with amines solution. They are non-volatile, non-corrosive and highly stable. In this work, we have analysed biodegradable functionalized IL constituted by environmentally friendly metabolic molecules such as choline, and an amino acid anion like a proline. During the CO_2 absorption process, the IL viscosity increases, limiting this step due to a reduction of the gas diffusion properties in the solution. Therefore, dimethyl sulfoxide (DMSO) was used to dilute the [Cho] [Pro] ionic liquid. DMSO was chosen because inhibits carbonates formation, it has a high boiling point, it is not toxic, and it is completely miscible with the IL reported in this work (Latini et al., 2019).

Methods

The density values of the pure [Cho][Pro] and at 25% of [Cho][Pro] in DMSO were determined using a Gay-Lussac pycnometer – a glass flask with a capillary stopper to be put into the opening.

Figure 1. Pycnometer used for the density measurements.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The procedure consists of 2 main steps: (i) estimation of the volume of the pycnometer using the well-known values of the water density, and (ii) estimation of the densities of the solutions at different temperatures. After estimating the volume of the pycnometer and its mass, it is filled with the IL solution and put in the oven at the desired temperature. When the desired temperature is reached, eventually excess ILs are removed. The mass of the IL solution is evaluated at least three times, and a mean value is considered. The density of the solution can be calculated as the ratio of the average mass over the volume of the flask.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

The kinematic viscosities of the solutions have been measured through a Cannon-Fenske viscometer reported in the figure below and according to the method indicated in the ASTM D445 and D446 standards. The dynamic viscosity has been obtained by dividing the kinematic viscosities by the proper values of density.

Figure 2. Experimental setup and viscometer.



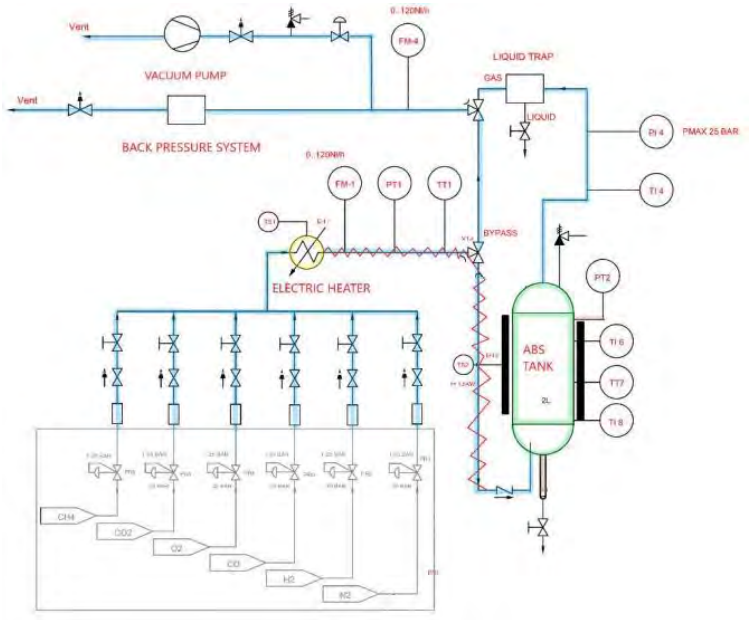
At this early stage, one parameter is used to measure the CO_2 uptake performance of the new IL solution and compare it with the MEA (i.e., state of the art): The molar efficiency considers the mole of CO_2 absorbed (n_{CO_2}) over the moles of IL (n_{IL}) in the solution

$$\alpha = \frac{n_{CO_2}}{n_{IL}}$$

The two mixtures in comparison consist of 25%wt [Cho] [Pro] in DMSO and 30%wt MEA in water. They have been tested in a bench-scale test rig installed in the CO_2 Circle Lab (CCL) at Environment Park (Turin) and shown in figure below.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Scheme of the test bench composed of a heated stainless steel packed column of 2 litres, calibrated to work with a maximum of 25 bar and 120°C. A heated gas line supplies the inlet gas flow to the bottom of the reactor. The non-absorbed gas leaves the reactor, passes through a liquid trap and is sent to the vent (or to a spectrometer).



Before the start of the tests, the column was filled with 1 kg of the mixture both for IL and MEA solutions. The isothermal absorptions were evaluated at a starting temperature of 30°C. A mixture composed of 65% CH_4 and CO_2 was injected at 97 NL/h.

Results

The data obtained from the density measurements performed are reported in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. The data points well match a straight line, thus a linear dependence of density with temperature is assumed and the empirical equation is obtained. The values of the two fitting coefficients A_1 and A_2, the correlation coefficients R^2 and the standard deviations SDs are reported in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

$$\rho(T) = A_1 x\, T + A_2$$

Figure 4. Density at different temperatures for pure IL and 25%wt of IL in DMSO

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

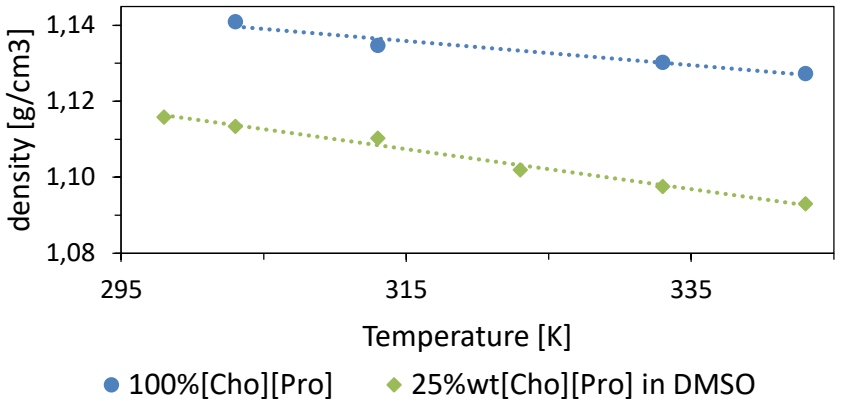


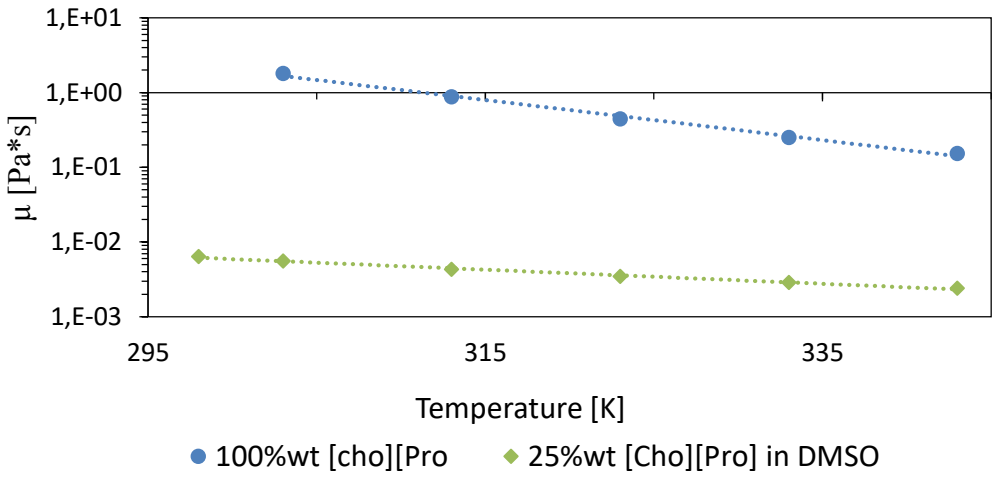
Table 1. Fitting parameters A_1 and A_2, SDs and R^2 of the obtained empirical equations of density as functions of temperature.

Solution	A_1	A_2	SD	R^2
100%wt [Cho] [Pro]	-0.0003	1.2364	0.006	95.323
25%wt [Cho] [Pro] in DMSO	-0.0005	1.2727	0.008	0.98704

As expected, a general decreasing trend can be observed with increasing temperatures, with the correlation coefficient assuming values over 0.98. Furthermore, density goes down for decreasing IL concentrations, due to the much higher molecular weight of [Cho][Pro] in comparison to DMSO – respectively 219.3008 g/mol and 78.13 g/mol. The density of 25% [Cho] [Pro] diluted in DMSO is close to that of aqueous MEA (1 g/cm^3).

Dilution in DMSO strongly reduces viscosity to a value close to that of aqueous MEA (6*10^{-4} Pa s) as shown in the figure below.

Figure 5. Dynamic viscosity as a function of temperature

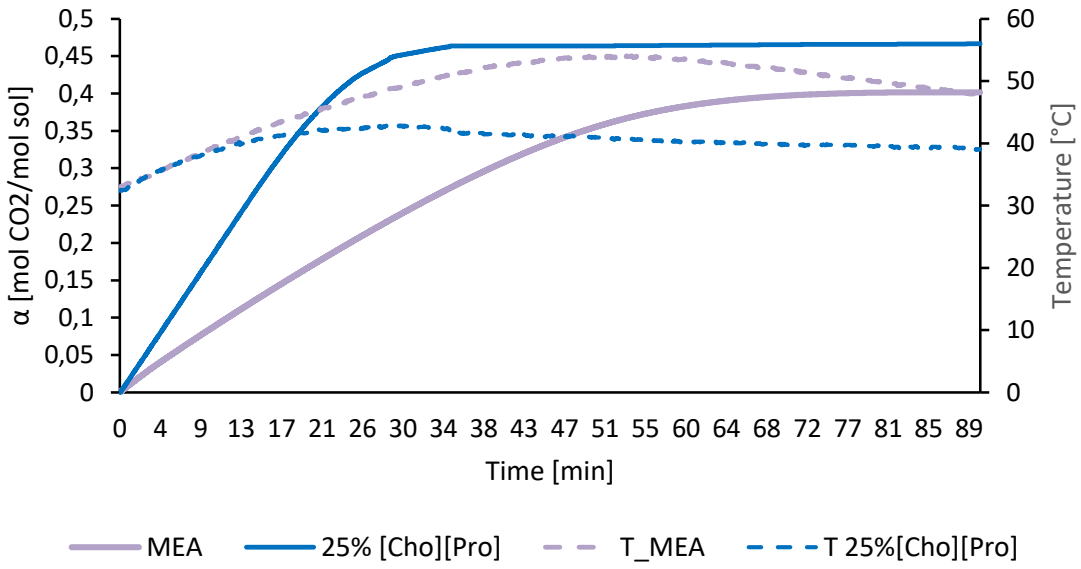


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

This supports the unavoidable necessity of diluting IL in a solvent when it is implied in carbon capture processes and mass transfer phenomena have to be optimized.

The result of the CO_2 absorption test is shown in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. Due to the exothermic nature of the reaction, the temperature inside the absorption column has increased. The CO2 capture with MEA solution is highly exothermic. Instead, the temperature during the absorption test with the solution of IL remains quite constant.

Figure 6. Comparison of the molar efficiency between a solution composed of 25%wt [Cho] [Pro] in DMSO and MEA solution 30%wt in water.



The mixture consisting of 25%wt of [Cho] [Pro] in DMSO seems to perform better during the absorption phase than aqueous MEA solution. It can be noted that the two mixtures reach a molar efficiency at the peak equal to 0.47 [$mol\ CO_2/mol\ IL$] and 0.40 [$mol\ CO_2/mol\ MEA$]. Furthermore, the mixture with IL reaches a plateau after about 35 min, while the MEA solution achieves the peak 40 minutes later.

Conclusion

In previous work, we analysed the upgrading of gas from NGH reserves through the use of CO_2 selective membranes (Cannone et al., 2021). In this work, however, we have laid the groundwork for comparing membrane technology with IL CO_2 capture one. From the literature, it has been seen that

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

the mixture of [Cho] [Pro] is more environmentally sustainable than the current state of the art (MEA). Furthermore, the mixture containing IL appears to be more efficient in the absorption phase than MEA. The high viscosity of IL, which represents the major disadvantage in this application, seems to be overcome by diluting them in DMSO, a high boiling solvent which is not dangerous for the environment. Further analyses such as the absorption at different temperatures, the desorption of CO2 and the cycling of the mixture will be carried out to better evaluate its performance in the CO2 capture process and natural gas upgrade.

Bibliography

1 Blauwhoff, P. M. M., Versteeg, G. F., & van Swaaij, W. P. M. (1984). A study on the reaction between CO2 and alkanolamines in aqueous solutions. *Chemical Engineering Science*, *39*(2), 207–225. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0009-2509(84)80021-4

2 Cannone, S. F., Lanzini, A., & Santarelli, M. (2021). A Review on CO2 Capture Technologies with Focus on CO2-Enhanced Methane Recovery from Hydrates. *Energies*, *14*(2). https://doi.org/10.3390/en14020387

3 Gibbins, J., & Chalmers, H. (2008). Carbon capture and storage. *Energy Policy*, *36*(12), 4317–4322. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.058

4 Latini, G., Signorile, M., Crocellà, V., Bocchini, S., Pirri, C. F., & Bordiga, S. (2019). Unraveling the CO2 reaction mechanism in bio-based amino-acid ionic liquids by operando ATR-IR spectroscopy. *Catalysis Today*, *336*, 148–160. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.12.050

5 Notz, R., Mangalapally, H. P., & Hasse, H. (2012). Post combustion CO2 capture by reactive absorption: Pilot plant description and results of systematic studies with MEA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *6*, 84–112. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.11.004

6 Sloan Jr., E. D., Koh, C. A., & Koh, C. A. (2007). *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781420008494

7 White, M., & McGrail, P. (2009). Designing a pilot-scale experiment for the production of natural gas hydrates and sequestration of CO2 in class 1 hydrate accumulations. *Energy Procedia*, *1*(1), 3099–3106. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2009.02.090

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Wood 4 Green Umbria.
Il legno per la Next Generation

Fabio Bianconi[1], Marco Filippucci[1], Simona Ceccaroni[1*]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Via G. Duranti 93, 06125 Perugia, Italy

* E-Mail: ceccaroni.simona@gmail.com

Abstract: La ricerca mostra il percorso attualmente in essere a supporto delle amministrazioni pubbliche del territorio umbro, definito nell'ottica delle coordinate del PNNR. L'obiettivo del processo è attivare un'innovazione territoriale per innescare una profonda trasformazione dei nostri luoghi valorizzandone le potenzialità presenti, e in particolare al centro è posto quell'eccezionale materiale naturale rinnovabile che è il legno, risorsa chiave per l'innovazione territoriale, capace di aprire un'economia circolare attraverso molteplici filiere fra di loro connesse. L'idea progettuale propone di innovare i processi di gestione sostenibile delle foreste come fondamento per lo sviluppo di una nuova filiera del legno, vocata a gestire l'intero processo di produzione, dalla materia prima alla fornitura del prodotto, leva per processi industriali di economia circolare. Si vogliono quindi attivare un insieme di progettualità integrate, capaci di valorizzare l'ambiente e il paesaggio e rispondere alle sfide del cambiamento climatico promuovendo concretamente una rinnovata cultura della sostenibilità. Il modello propone quindi una rivoluzione culturale, sociale ed economica insita in una concreta esaltazione delle foreste intese come fornitore di risorse rinnovabili, con la produzione del legno come primo obiettivo e la creazione di energia come soluzione integrata volta a valorizzarne a cascata i residui. L'innovazione delle politiche di decarbonizzazione che stanno investendo la nostra società contemporanea si riflette nella proposta progettuale, che intende accelerare la transizione energetica dai combustibili tradizionali alle fonti rinnovabili promuovendo il graduale abbandono del carbone, con il sito di Pietrafitta che si presenta come emblema di un modello di energia che nasce dallo sfruttamento di fonti non rinnovabili (lignite), per convertirsi come luogo di innovazione delle logiche green capaci di valorizzare le risorse locali.

Keywords: economia circolare, innovazione, decarbonizzazione, rigenerazione urbana, legno, filiera.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Verso un cluster del legno italiano

Il patrimonio forestale italiano, secondo i dati tratti dal 1° Rapporto sullo stato delle foreste italiane - RAF Italia [1] è in costante espansione e raggiunge ormai i 12 milioni di ettari, pari circa al 40% della superficie nazionale. Il 72,6% delle foreste si è affermato tra il 1936 ed il 2015 (fino agli anni Sessanta del secolo scorso frutto di politiche attive di rimboschimento e rinfoltimento di boschi degradati, poi per spontaneo ingresso di specie forestali in terreni agricoli collinari e montani). Dal 2015 si stima ancora una estensione in crescita pari a +4,8%; la FAO stima il trend ancora in crescita almeno fino al 2030. Il 100% dei boschi italiani è vincolato per scopi paesaggistici e non può essere trasformato in altra qualità di coltura senza preventiva autorizzazione, a pena di una sanzione penale. L'87% dei boschi italiani è utilizzabile per produrre legname solo secondo norme precise, dettate dalle Regioni, volte alla prevenzione del dissesto idrogeologico in base ad una legge quadro nazionale ormai centenaria; le regole sono state estese anche a tutti gli altri boschi, essendo direttive di buon governo delle superfici boscate, consentendone la permanenza in salute e la perennità di presenza.

Il 28% dei boschi ricade in aree protette secondo norme statali e regionali, o in aree afferenti alla Rete europea denominata Natura 2000, volta a proteggere specie rare ed i loro habitat vitali. Il patrimonio forestale italiano è caratterizzato da un'ampia varietà di formazioni, con diversa composizione specifica: le categorie forestali più diffuse sono rappresentate da boschi di quercia, poi faggete, altri boschi misti di latifoglie, e poi a seguire boschi di conifere, puri o misti. Il 60% dei boschi è di proprietà privata, con notevoli differenze tra regione e regione. Si tratta di un numero imprecisato di proprietari privati, aventi in media 7.000 metri quadrati di bosco, con punte anche di molto inferiori (2.000 mq in Veneto, secondo una recente ricerca). Si tratta di superfici che nella loro frammentarietà non consentono la benché minima possibilità mantenere un flusso continuo di redditi e quindi attività di gestione.

Per quanto riguarda i prelievi di materiale legnoso, in Italia non si preleva più del 37,4% dell'incremento annuo di volume dei boschi (in Europa i valori oscillano tra il 50 ed il 70%). Si tratta prevalentemente di popolamenti governati a ceduo, ossia di latifoglie in grado di rigettare fusti dalle radici e gestite su turni relativamente brevi (20-30 anni); in termini di rese, però, i volumi di materiale legnoso ricavabili da boschi gestiti ad alto fusto (con turni variabili da 70 a 120 anni e oltre) sono quasi il doppio di quelli provenienti dai boschi cedui. Secondo dati ISTAT aggiornati al 2016, dei 13 milioni di metri cubi di legname prelevato in Italia solo 2,5 milioni sono stati destinati ad un uso industriale, mentre 9,5 milioni di metri cubi provenienti da boschi cedui e 1 milione di metri cubi provenienti da boschi di conifere sono stati destinati ad uso energetico, alimentando una filiera cortissima.

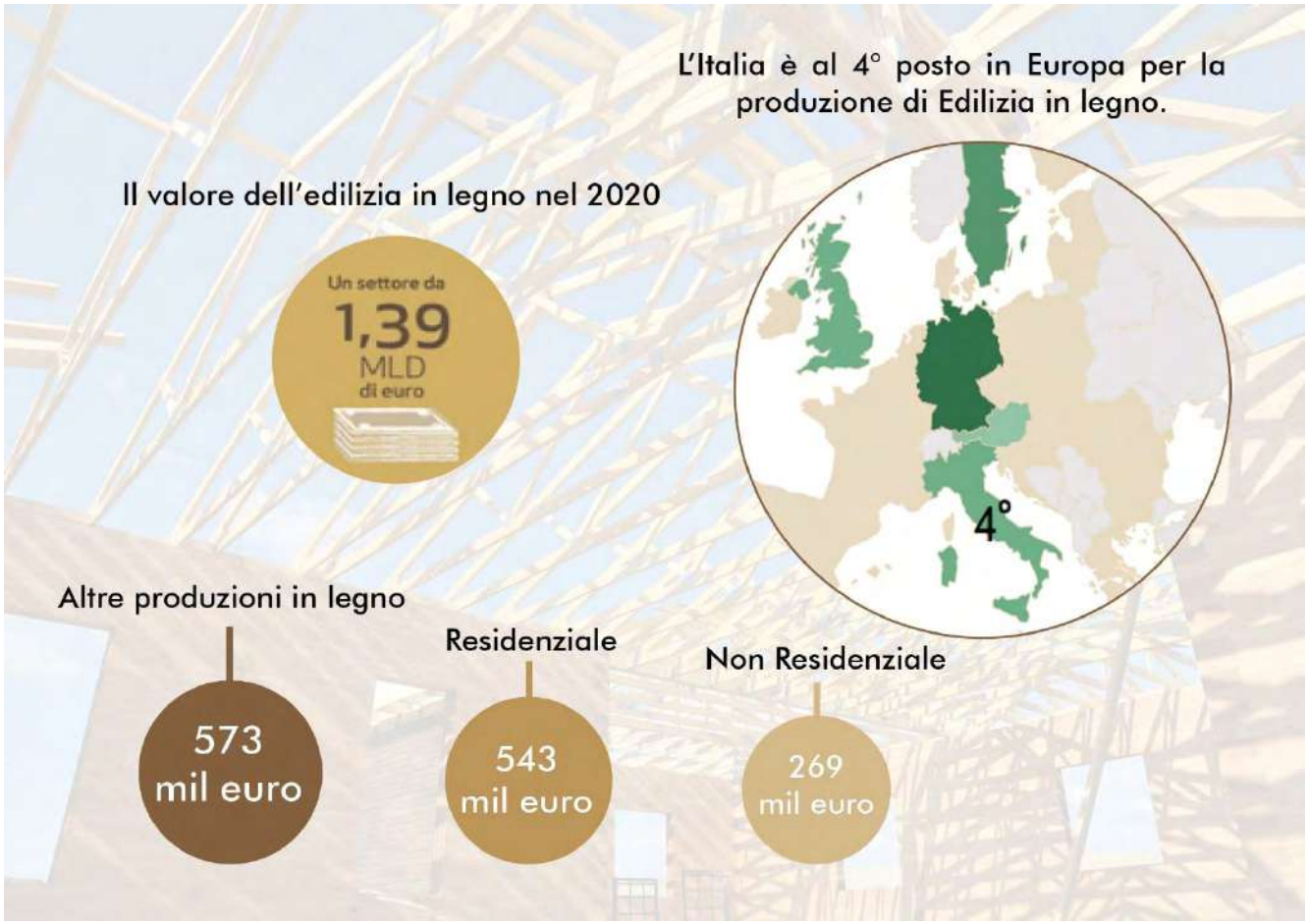
Dati più recenti sui consumi sono affetti da numerose problematiche che si sta cercando con grande difficoltà di superare, anche grazie a nuove collaborazioni interistituzionali ed il ricorso a moderne tecnologie. Nove milioni di italiani si riscaldano con legna o suoi derivati, ma non tutti di provenienza italiana: infatti l'Italia è il più grande importatore mondiale di legna da ardere, e il più grande importatore europeo di pellet ad uso residenziale. E' rilevante osservare che l'Italia importa l'80% del suo fabbisogno di legno dall'estero, esponendosi al problema dell'importazione di legname di origine illegale (l'UE stima che almeno il 20% di tutto il legname che entra nel mercato europeo derivi da tagli

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

illegali o trasportato, acquistato o venduto in violazione alle leggi nazionali).

Dal punto di vista dell'occupazione, gli addetti nel settore della prima trasformazione (da bosco a legno grezzo in catasta su piazzale) sono, secondo il 1° RAF Italia con dati provenienti dal Registro statistico delle imprese attive di ISTAT, 12.166; sono attive complessivamente 6.471 imprese. Il loro numero è in leggera crescita, confrontando i dati del 2011 con quelli raccolti nel 2016. L'industria italiana del legno arredo impiega secondo FLA 104.000 addetti e conta 73.000 aziende di tutta la filiera, fatturando 42,5 miliardi di euro. Secondo i dati del 1° RAF Italia, sono censiti con il codice ATECO 16b: "Industria del legno e dei prodotti in legno e sughero (esclusi mobili); fabbricazione di articoli in paglia e materiali da intreccio" circa 27.000 imprese con 100.000 addetti.

Figura 1. Valore dell'edilizia in legno.



Con oltre 8 miliardi di dollari di saldo commerciale netto, si colloca nella prima posizione in Europa e nella seconda al mondo dopo la Cina. Molto del materiale legnoso lavorato proviene dall'estero, anche da Paesi tropicali. Alcuni Paesi esportatori di legname, soprattutto nell'area tropicale ed equatoriale, non hanno la capacità di assicurare i principi di legalità e sostenibilità nell'utilizzo delle proprie risorse forestali. I sistemi internazionali volontari di certificazione della legalità e sostenibilità forestale e del legno sono ancora poco diffusi nel Sud del mondo (su scala globale rappresentano l'11%,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

nel Sud meno del 1%) e si stima che il mercato del legno illegale oscilli tra i 30 e i 100 miliardi di euro ogni anno. L'industria italiana del legno-arredo e della carta è all'avanguardia nel mondo per l'alto contenuto di materiale riciclato: oltre il 95% dei materiali legnosi post-consumo è avviato ad impianti per la produzione di semilavorati utilizzati per mobili e complementi d'arredo.

Le imprese nazionali nel 2019 hanno destinato, secondo Federlegno Arredo, il 4,7% del fatturato in progetti di innovazione, connessi con un rinnovamento di prodotto e di processo, ma anche come miglioramento delle performance ambientali. Il comparto legno-arredo italiano è anche leader in Europa per il concorso alla riduzione di emissioni climalteranti: secondo il Rapporto Green Italy 2020 sono emessi 26 chili di anidride carbonica ed altri gas climalteranti ogni 1.000 euro di valore di produzione, a fronte dei 43 della Germania, 49 della Francia, e oltre 200 della Spagna.

Il trend dei consumi di materiali a base di legno è in crescita nel mondo; aumentando il reddito medio pro-capite cresce anche l'utilizzo dei prodotti di matrice lignea, con un collegamento ancora più forte di quello che si delinea per i prodotti alimentari. Salgono i consumi di mobili, legname per costruzione, imballaggi, e si impennano anche gli impieghi energetici. Le stime parlano di un uso attuale di legname a livello mondiale pari a 3 miliardi di metri cubi l'anno; nel 2030 salirà verso 8,5 e nel 2050 a 13 miliardi. È evidente in Italia il grande scollamento tra il settore del legno-arredo ed il settore della lavorazione boschiva (taglio ed esbosco dei tronchi) e della prima trasformazione industriale (dai tronchi a semilavorati come i segati, le travi, i compensati, i tranciati) a cominciare dall'anello più debole, quello delle segherie, come mostrano i dati nazionali.

Per quello che riguarda il legno da costruzione, è tornato protagonista, anche grazie alla riscoperta delle caratteristiche di questo straordinario materiale. Naturale, rinnovabile e sostenibile, il legno, se ben coltivato e sfruttato, è una risorsa inesauribile. Il legno da costruzione non è però solo ecologico, questo materiale garantisce un'ottimale protezione dall'inquinamento acustico, ha eccellenti caratteristiche isolanti e migliora la qualità dell'aria indoor. L'Italia si piazza al 4° posto in Europa (dietro a Germania, Svezia, UK e davanti all'Austria) nella produzione di edifici prefabbricati in legno con un complessivo di circa 1,39 miliardi di euro. Le regioni più redditizie sono il Trentino Alto Adige (21%), Veneto (16%), Lombardia (16%) ed Emilia Romagna (8%).

Esistono esperienze pregevoli di utilizzo di legno nazionale per produzioni di qualità, che le moderne tecnologie possono produrre anche a partire dal legname ottenuto dai boschi nazionali, e per utilizzi alternativi, ad esempio in edilizia. Si tratta sempre di percorsi legati alla valorizzazione delle potenzialità locali, quali ad esempio il portale "Legno trentino" (spazio web gestito dalla locale Camera di Commercio dedicato alla diffusione di informazioni su prodotti, aziende, vendite di legname, eventi, mediazione organizzativa tra domanda e offerta) oppure il Cluster legno-arredo del Friuli Venezia Giulia (consorzio che opera per lo sviluppo del comparto proponendo servizi e progetti a favore di imprese e istituzioni, e che recentemente si è federato con la Cooperativa friulana "Legno servizi", che raccoglie imprese di prima e seconda lavorazione e proprietari boschivi). Esistono in alcune regioni, come la Lombardia, Consorzi forestali tra proprietari comunali e nuove forme di affiliazione tra proprietari privati come le Associazioni fondiarie in Piemonte, semplici unioni di scopo che collegano proprietà forestali e agropastorali per una coltivazione associata dei loro possedimenti. Si tratta di mettere a

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sistema le migliori pratiche, rafforzare le esperienze che hanno prodotto risultati positivi di integrazione verticale lungo le filiere, incentivare la creazione di iniziative in zone che ne sono del tutto prive, partendo dall'esperienza accumulata dai distretti del legno già esistenti (dal distretto della sedia in Friuli al distretto dei divani in Puglia). L'ipotesi della creazione di un cluster legno italiano, inteso verosimilmente come "cluster dei cluster" per rispettare le diverse realtà locali, può essere la soluzione per un nuovo sviluppo della filiera che valorizzi le produzioni legnose nazionali, creando nuovi percorsi di bioeconomia circolare e nuova occupazione autenticamente green. Anche per l'Umbria ci si può proiettare per la costituzione di uno specifico Cluster, frutto a sua volta dell'aggregazione di logiche distrettuali. Su tali orizzonti si attesta pertanto la presente proposta, nell'ipotesi di testare le condizioni necessarie alla replicabilità del processo. L'Umbria, occupa una superficie territoriale complessiva di 845.604 ha, con 390.255 ha di superficie forestale totale di cui 371.574 ha costituiscono il bosco e 18.681 ha altre terre boscate. Confrontandola con l'Alto Adige, si nota che l'Umbria riesce a concorrere in ambito di sviluppo territoriale con le regioni ed i luoghi in cui si ha un'elevata produzione di legno, ma allo stesso tempo il legname da lavoro che si riesce a ricavare è nettamente inferiore rispetto all'Alto Adige.

Figura 2. Superficie territoriale di ciascuna regione.

Distretto territoriale	Bosco		Altre terre boscate		Superficie forestale totale		Superficie territoriale
	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	(ha)
Piemonte	870 594	1.1	69 522	7.2	940 116	1.0	2 539 983
Valle d'Aosta	98 439	3.1	7 489	21.4	105 928	2.7	326 322
Lombardia	606 045	1.4	59 657	8.2	665 703	1.2	2 386 285
Alto Adige	336 689	1.6	35 485	9.9	372 174	1.3	739 997
Trentino	375 402	1.4	32 129	10.3	407 531	1.1	620 690
Veneto	397 889	1.7	48 967	8.3	446 856	1.4	1 839 122
Friuli V.G.	323 832	1.7	33 392	9.9	357 224	1.3	785 648
Liguria	339 107	1.5	36 027	9.5	375 134	1.1	542 024
Emilia Romagna	563 263	1.4	45 555	8.5	608 818	1.2	2 212 309
Toscana	1 015 728	1.0	135 811	4.9	1 151 539	0.7	2 299 018
Umbria	371 574	1.4	18 681	13.4	390 255	1.2	845 604
Marche	291 394	1.8	16 682	12.8	308 076	1.6	969 406
Lazio	543 884	1.4	61 974	7.3	605 859	1.2	1 720 768
Abruzzo	391 492	1.5	47 099	7.6	438 590	1.3	1 079 512
Molise	132 562	2.9	16 079	14.2	148 641	2.3	443 765
Campania	384 395	1.9	60 879	7.3	445 274	1.5	1 359 025
Puglia	145 889	3.4	33 151	10.0	179 040	2.6	1 936 580
Basilicata	263 098	2.4	93 329	5.6	356 426	1.5	999 461
Calabria	468 151	1.8	144 781	4.6	612 931	1.1	1 508 055
Sicilia	256 303	2.7	81 868	6.2	338 171	1.9	2 570 282
Sardegna	583 472	2.0	629 778	1.8	1 213 250	0.8	2 408 989
Italia	8 759 200	0.4	1 708 333	1.3	10 467 533	0.3	30 132 845

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 3. Legname da lavoro.

Province	Legname da lavoro					
	Tondame grezzo [c]	Legname per pasta e pannelli	Altri assortimenti [d]	Totale	Legna per combustibili	Totale
Piemonte	20.398	-	-	20.398	124.774	145.172
Valle d'Aosta/Vallée d'Aoste	152	249	3	404	5.624	6.028
Lombardia	462.313	147.944	30.464	640.721	552.129	1.192.850
Liguria	-	-	-	-	5.017	5.017
Bolzano/Bozen	340.214	382.781	92.775	815.770	239.037	1.054.807
Trento	169.874	64.427	93.601	327.902	171.337	499.239
Trentino-Alto Adige	510.088	447.208	186.376	1.143.672	410.374	1.554.046
Veneto	58.354	-	7.527	65.881	60.804	126.685
Friuli-Venezia Giulia	-	-	-	-	3.737	3.737
Emilia-Romagna	2.917	185	10.971	14.073	203.654	217.727
Toscana	11.092	66.897	2.472	80.461	539.196	619.657
Umbria	976	29	160	1.165	182.497	183.662
Marche	-	180	36	216	89.262	89.478
Lazio	20.394	1.288	2.120	23.802	277.970	301.772
Abruzzo	-	56	2.834	2.890	233.087	235.977
Molise	-	-	15	15	64.414	64.429
Campania	3.252	204	33.826	37.282	27.224	64.506
Puglia	-	-	3	3	64.414	64.417
Basilicata	-	-	13	13	25.357	25.370
Calabria	-	-	-	-	-	-
Sicilia	8.158	3.826	2.800	14.784	21.077	35.861
Sardegna	-	915	1.769	2.684	113.366	116.050
ITALIA	1.098.094	668.981	281.389	2.048.464	3.003.977	5.052.441

2. Gli orizzonti di Next Generation EU

Da tali dati emerge il potenziale della risorsa “legno” [2], materiale rinnovabile e sostenibile che può diventare un elemento chiave nelle logiche dell’industria 4.0 [3] per rafforzare e trasformare il nostro territorio verso l’innovazione, capace di aprire un’economia circolare [4] valorizzandone le molteplici filiere fra di loro connesse. L’attuale situazione socioeconomica dei territori è analizzata e proiettata verso il futuro in accordo alle strategie segnate dai pilastri designati dalla strategia della Comunità Europea quali sono transizione verde, trasformazione digitale, crescita intelligente, sostenibile e inclusiva, che comprenda coesione economica, occupazione, produttività, competitività, ricerca, sviluppo e innovazione, coesione sociale e territoriale, salute e resilienza economica, sociale e istituzionale, politiche per la prossima generazione, l’infanzia e i giovani.

Gli orizzonti di questa visione, che è chiamata Next Generation EU, esplicano l’obiettivo di attivare la ripresa e la resilienza del territorio a seguito anche della recente crisi e delle trasformazioni che incidono sugli attuali modelli in essere. La visione proietta l’area a ritrovare il suo bilanciamento nel rapporto fra ambiente, paesaggio e territorio [5], ponendo al centro la persona [6], ripensando i luoghi

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

della comunità[7], ridefinendo le separazioni concettuali e strutturali delle nostre logiche insediative [8], rileggendo la relazione fra città e campagna [9,10] e il valore dello spazio pubblico [11,12]. La produzione e la valorizzazione di una materia prima rinnovabile come il legno, si pone in parallelo ad una strategia energetica proiettata all'abbattimento delle emissioni [13–15], in un processo che colloca al centro l'abitare e la vita [16,17], generando nuove relazioni con l'ambiente fortificato rendendolo così in grado di rispondere con i suoi servizi ecosistemici [18–20]. La rigenerazione territoriale [21] si basa allora sulla gestione sostenibile di una risorsa preziosa non valorizzata, proponendo una progettualità e infrastrutture su ciò che esiste. Parallelamente gli investimenti infrastrutturali rendono di primo interesse la riconversione agricola di aree coltivate per la produzione arborea, del quale si riesce a stimare però i vantaggi produttivi e ambientali a lungo termine. Attraverso processi di pianificazione e la partecipazione diffusa degli attori del territorio [22,22], si innesta così un percorso di trasformazione paesaggistica proiettata a vantaggio della biodiversità [23,24], con chiari benefici sull'uomo e sul suo abitare, con un'implicita valorizzazione dei luoghi.

Il progetto nasce in accordo alle strategie mondiali proiettate allo sviluppo sostenibile, all'abbattimento delle emissioni, all'adattamento e mitigazione ai cambiamenti climatici, coordinate proprie del Green Deal europeo [25]. La proposta trova infatti il suo fondamento su "tecnologie verdi e digitali, in innovazione e ricerca, inclusi quelli per un'economia basata sulla conoscenza, nella transizione verso l'energia pulita …. per conseguire una crescita giusta, inclusiva e sostenibile, contribuire alla creazione di posti di lavoro e raggiungere la neutralità climatica dell'UE entro il 2050".

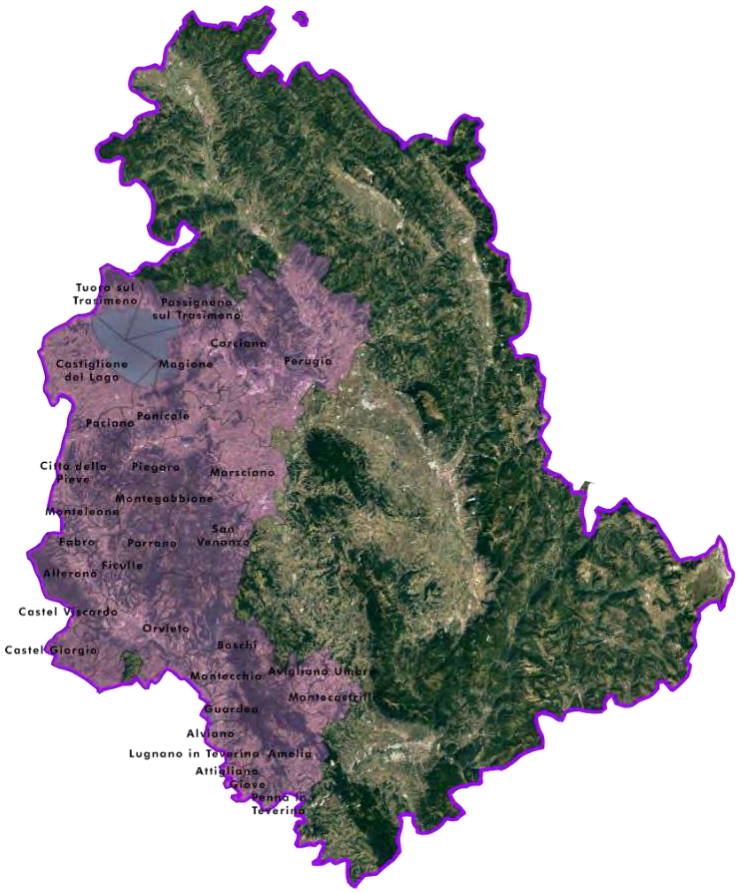
Figura 4. Missioni del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

La visione promossa genera “un valore aggiunto europeo” per l’integrazione fra ricerca, sviluppo sociale, innovazione tecnologica, tutela ambientale e valorizzazione delle risorse uniche del patrimonio territoriale. Si vuole strutturare così la definizione di un modello “resiliente” capace di attivare le logiche di prossimità per la “diversificazione delle principali catene di approvvigionamento” con una particolare attenzione al tema della “biodiversità” e alla rete ecologica. Si tratta di fornire una visione e una prospettiva per mettere in atto un processo che guarda al futuro, comunque con ritorni a medio-breve termine, che necessita di sperimentazioni e di approfondimenti ed include un reale coinvolgimento delle imprese del territorio senza le quali non ci sarebbe l’abitare. L’esigenza di paesaggio [21], il desiderio che questo luogo fa nascere nell’assenza di una funzione che ne caratterizza una strutturale incompiutezza, proietta le nostre aree oltre la condanna dell’eterno presente nella quale paiono essere rilegate. I nuovi orizzonti che si dischiudono attestano come la grande sfida in cui tutta la società e la “politica” è immersa, innovazione sostanziale che vuole trainare la rigenerazione non solo di questo territorio, ma di un modo differente di porre l’uomo con i suoi bisogni più profondi al centro dell’abitare. L’approccio fornito non fa perdere la possibilità di stimare l’efficacia del piano, intesa in termini di effetto duraturo dell’impatto e l’utilità del meccanismo di controllo sull’andamento dei progetti. In parallelo è anche possibile determinare l’efficienza del piano, da intendersi quanto sia credibile e attuabile il programma dei costi degli interventi e quanto siano efficaci le misure. Le preposte fasi di coprogettazione e sperimentazione sono lette come premessa e fondamento per l’attuazione, all’interno della quale è possibile analizzare.

Figura 5. Sviluppo territoriale della proposta progettuale.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Wood 4 Green Umbria

Entrando nella operatività della proposta, "Wood 4 Green Umbria" prende le mosse dalla pianificazione e gestione sostenibile dei boschi [26–28], nell'obiettivo di aumentare e valorizzare tale grande patrimonio: si tratta di oltre la metà del territorio regionale, areale che fa comprendere la potenziale offerta di materie prime e la conseguenziale importanza di una sfida epocale, complessa e ambiziosa, intorno al quale si vogliono far rinascere filiere basate sulla rivalutazione del legno e dei suoi prodotti. Si vuole così attivare un'economia circolare incentrate su questo materiale unico [29,30] attraverso progettualità integrate, capaci di valorizzare l'ambiente e il paesaggio e rispondere alle sfide del cambiamento climatico promuovendo concretamente una rinnovata cultura della sostenibilità. Il modello così sviluppato propone una rivoluzione culturale, sociale ed economica insita in una concreta esaltazione delle foreste intese come bene comune [31–33] e anche come fornitore di risorse rinnovabili [34,35], con la produzione del legno come primo obiettivo e la creazione di energia come soluzione integrata volta a valorizzarne a cascata i residui, legando il materiale ai luoghi e alla valorizzazione delle peculiari specificità.

L'ipotesi progettuale, si sviluppa partendo dall'intenzione di promuovere una gestione sostenibile delle foreste [36] secondo la logica del distretto, in un areale fra i 60.000 e gli 80.000 ettari, frutto di un percorso di monitoraggio e pianificazione del distretto forestale (WP1) in cui, il primo asse di interesse è una progettualità integrata sul patrimonio agro – forestale (task 1.1), e il secondo è il coinvolgimento dei vari stakeholder del territorio con l'attivazione di contratti di foreste (task 1.2) per attivare una piena partecipazione delle forze imprenditoriali del territorio. A premessa dello sviluppo è posto quindi il primo settore, nell'idea chiara di tornare a coltivare i boschi [37], per i vantaggi che crea la diversificazione [38] dell'attività in termini anche di reddito aggiunto. Tale progettualità è preposta come condizioni di sviluppo per una piena innovazione nella gestione del settore forestale e agroalimentare (WP2) con l'obiettivo di coinvolgere in maniera integrata tutti gli interessati alla valorizzazione del territorio attraverso investimenti infrastrutturali multifunzionali [39–43] come lo sviluppo di una logistica per il settore forestale ed agroalimentare (task 2.1), la creazione di un parco agrisolare (task 2.2) e l'ammodernamento dei macchinari e del settore alimentare correlato (task 2.3), atti a rafforzare la collaborazione fra pubblico e privato in consonanza alle logiche delle proprietà collettive [44,45].

La proposta mira ad intervenire concretamente sulle infrastrutture verdi, valorizzando gli ecosistemi e i loro servizi che rappresentano una ricchezza fondamentale per l'Umbria, il suo paesaggio e la sua comunità. Gli alberi diventano l'icona della rigenerazione dell'area grazie alla loro multifunzionalità, capaci di trasformare il settore agricolo mostrando i vantaggi dell'arboricoltura [46] (WP3) in termini di redditività e ricucitura della frammentarietà presente negli spazi insediativi (task 3.1), oltre che bonificare le zone compromesse (task 3.2), prendendo come primo caso l'area di Pietrafitta e la sua rigenerazione anche urbanistica, basata sull'idea di un bosco orizzontale per innovare l'abitare e l'immagine. La costruzione di una filiera industriale del legno [47] di prossimità nel distretto (WP4) nasce dall'investimento infrastrutturale nel territorio di insediamenti industriali proiettati ad una transizione 4.0 (task 4.1), supporta investimenti ad alto contenuto tecnologico (task 4.2) e rafforza le

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

politiche industriali della filiera verso logiche di internazionalizzazione (task 4.3). L'innovazione delle politiche di decarbonizzazione che stanno investendo la nostra società contemporanea si riflette nella proposta progettuale, che intende accelerare la transizione energetica dai combustibili tradizionali alle fonti rinnovabili promuovendo il graduale abbandono del carbone, con il sito di Pietrafitta che si presenta come emblema di un modello di energia che nasce dallo sfruttamento di fonti non rinnovabili (lignite) [48], per convertirsi come luogo di innovazione delle logiche green capaci di valorizzare le risorse locali. Vi è quindi la necessità di riconvertire dal punto di vista energetico l'area (WP5) e produrre energia rinnovabile [49] ricavandola da impianti ibridi in grado di rispettare la vocazione agricola del territorio ipotizzando dei sistemi agro – voltaici (task 5.1).

Inoltre la proposta vuole costruire una comunità di comunità CER, proiettata ad autoprodurre e fornire energia rinnovabile per i propri membri (task5.2) e ad integrazione, la realizzazione di ulteriori impianti per lo sviluppo di nuove forme di produzione di energia. La centralità della risorsa legno non si esaurisce alla produzione di materia prima ma, nella logica di una reale economia circolare, ne utilizza i suoi disavanzi, i suoi scarti, stimati con il processo a regime in un intorno del 20%, per creare energia green. Si attiva pertanto all'interno del distretto, la filiera dell'idrogeno verde (WP6) [50] che a partire dalle biomasse legnose produce tale risorsa strategica nell'area di Pietrafitta (task.6.1), trasformando gli spazi e gli impianti presenti (task 6.2). Il polo integrerà un impianto di conversione delle biomasse per il bioidrogeno, al fine di produrre un quantitativo di carburante di elevata purezza per alimentare due distributori promuovendo un uso per i trasporti e in particolare per il servizio pubblico, inclusa la navigazione del lago Trasimeno (task 6.3, utilizzare per le utenze civili e industriali e per la produzione di metano blu a partire dall'anidride carbonica catturata ai camini dagli impianti industriali (task 6.4).

Figura 6. Pietrafitta, insediamenti produttivi in disuso per produzione di energia con fonti non rinnovabili.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'evoluzione del sito di Pietrafitta come epicentro della filiera del legno, il recupero degli scarti ai fini energetici e la riconversione energetica indirizzano il territorio verso processi di transizione energetica (WP7) globali, capaci di accogliere le molteplici forme di produzione da fonti rinnovabili, includendo la possibilità di stoccare energia (task 7.1). Inoltre, si vuole dotare l'area di impianti per la produzione di idrogeno da biomasse ligno – cellulosiche e consolidare le competenze per lo sviluppo dell'idrogeno (task 7.2). Nella stessa logica si vogliono promuovere la realizzazione di bus elettrici (task 7.3) con l'obiettivo di stimolare una trasformazione integrata e il supporto alle start – up (task 7.4) e al venture capital, nell'ipotesi di promuovere il dinamismo e la creatività imprenditoriale. Tali investimenti, rafforzati dalla sottesa finalità di rigenerare il polo produttivo di Pietrafitta, sono motivo del rafforzamento dell'interconnettività del territorio (WP8). In particolare, la proposta vuole rafforzare la mobilità leggera (task 8.1) supportata da dispositivi per la ricarica elettrica (task 8.3) e lo sviluppo di un trasporto pubblico sostenibile utilizzando il trasporto rapido di massa (task 8.2) con l'introduzione del BRT (task 8.4) per offrire un servizio di trasporto pubblico atto ad unire la Toscana con il capoluogo umbro e a rendere maggiormente attrattivo ed efficiente tale polo.

L'obiettivo dell'idea progettuale è di accelerare infatti in modo pieno ed integrato i processi di innovazione dell'area (WP9), trovando come leva fondamentale la ricerca, nella costituzione di un centro sperimentale denominato "Wood, Hydrogen and Transportation Design Lab", che si occuperà di attività di ricerca e di trasferimento tecnologico. Seguendo le logiche dei laboratori di contaminazione, si vuole quindi introdurre un sistema integrato di infrastrutture di ricerca e innovazione (task 9.1), definendo una cabina di regia e management segnata dal protagonismo degli imprenditori e dei protagonisti locali. Diviene utile perciò supportare attraverso finanziamenti lo sviluppo di start - up (task 9.2) e sostenere un'alta formazione specialistica promuovendo anche dottorati innovativi che rispondano ai fabbisogni di innovazione delle imprese (task 9.3).

4. Gli orizzonti della proposta

La proposta qui presentata trova i suoi orizzonti nel concetto di distretto necessario per l'aggregazione dell'offerta e della domanda, strutturato in una scala subregionale comunque essenziale per la sostenibilità delle operazioni. Si definisce quindi la replicabilità della visione, nella ferma ipotesi della trasferibilità ad altri comparti territoriali in risposta ad esigenze locali specifiche. In parallelo l'idea progettuale trova le sue coordinate nell'interazioni fra filiere integrate, in una attuazione pratica di un processo di economia circolare proiettato alla produzione di materiale di pregio, il legno, che viene convertito in energia solo nei suoi scarti di biomassa e in quelle pezzature secondarie trasformate comunque in energia pulita nella generazione di idrogeno verde [50]. La proposta vuole infatti ripartire dal valore della terra, da quei boschi in continua crescita che, per le modifiche socioeconomiche dell'ultimo secolo e per un'assenza di investimenti e di interessi, sono stati abbandonati e non più contenuti, hanno smesso di essere di una risorsa. La perdita di produttività per le imprese rurali [51,52] ha bloccato i possibili processi industriali di valorizzazione di tale risorsa [53], oggi quasi esclusivamente importata, con consequenziale privazione di lavoro per tutto un settore terziario di servizi. Date per scontate le necessarie logiche di tutela dell'apporto ambientale offerto da questo patrimonio, è

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

possibile contestualmente proporre una pianificazione di area vasta [54] che possa garantire la piena sostenibilità ambientale di tali patrimoni ma anche una rinnovata produttività di una risorsa dai molteplici usi, nell'ipotesi di superare la frammentarietà dell'offerta e della domanda attraverso un processo di coesione territoriale insito nell'ottica di una green community [55]. La questione produttiva incide sullo spazio urbano, rurale e naturale, interconnettendosi alle numerose cause del consumo di suolo [56], imponendo nuove riflessioni sui modelli insediativi e sulle qualità dell'abitare, sulle logiche agronomiche legate alle coltivazioni arboree, sulla gestione sostenibile delle foreste. In suddetta visione si vuole propugnare una nuova centralità della rete ecosistemica per valorizzarne i servizi [57], in una compenetrazione fra temi ambientali e paesaggistici.

Il percorso vuole essere basato sulla creazione del primo modello di filiera del legno dell'Umbria, innescando un processo che nasce a partire dalla coltivazione arborea e dalla gestione delle foreste per la produzione del legname e di prodotti semilavorati e finiti, con percorsi di ingegnerizzazione del legno strutturalmente inseriti alle nuove logiche dell'industria 4.0 integrando la filiera con il recupero e la valorizzazione energetica della biomassa legnosa residuale (20%) al fine di produrre idrogeno verde. A fondamento del percorso è proposto un processo di innovazione del settore agricolo e del settore forestale nello sviluppo dell'arboricoltura e della sua filiera. A catena la rivalutazione della materia prima si indirizza verso logiche di industrializzazione di un settore ad oggi assente in Umbria. Tale pianificazione si alimenta e si fonda sulle ricerche e sugli sviluppi di rinnovamento sul legno e sui suoi sottoprodotti, proiettati a definire soluzioni produttive a medio e a lungo termine, che abbiano come primo obiettivo la sfera delle costruzioni per gli interessi economici posti in essere e sull'impatto ambientale che tali sistemi realizzativi potrebbero apportare in termini di ciclo di vita, ma anche per tutti i settori collegati come il design e la filiera del mobile.

La proposta progettuale trova i suoi orizzonti sulla costruzione di filiere produttive interconnesse, ponendo al centro l'obiettivo di innescare un'economia circolare, come si può leggere dalla produzione di energia e dalla valorizzazione dei prodotti e i sottoprodotti, utilizzando ad esempio l'ossigeno generato per settori hard–to–abate, l'idrogeno ai fini trasportistici, attivando una filiera tecnologica per la produzione di bio-materiali innovativi e biochar,[58] per tornare alla fine del ciclo al settore agricolo e integrarsi al settore agroalimentare. Il processo trova quindi la sua linfa nell'integrazione e concatenazione della progettualità, stimolo alla valorizzazione delle relazioni distrettuali e delle possibilità offerte dalle reti di impresa, la cui aggregazione rende possibile in primo luogo il soddisfacimento dell'offerta locale e quindi anche la proiezione internazionale.

È epicentro sperimentale del progetto il territorio di Pietrafitta [21], area industriale paradigmatica di un modello di produzione di energia basato sul consumo, fino all'esaurimento, delle risorse non rinnovabili: tale luogo, che presenta un'immagine oramai compromessa nei valori, vuole essere rigenerato per diventare il cuore di un nuovo prototipo di produzione sostenibile dell'energia. Si tratta infatti di un contesto rurale segnato profondamente [21,48,59–63] da interventi insediativi di carattere produttivo che si sono susseguiti nel tempo, un'area definita di "crisi non complessa", frammentata, sofferente anche come immagine e come immaginario oltre che per la perdita di attrattività produttiva. L'idea progettuale ambisce a ridare vigore in quest'area al polo produttivo già presente, ma con un

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

modello differente, innovativo e sostenibile. Si vuole così proporre attraverso gli alberi una rideterminazione dei confini e dei ruoli dello spazio rurale e naturale rispetto a quello antropizzato, proponendo la riconversione degli spazi industriali in disuso, delle aree rurali da bonificare, degli insediamenti antropici contigui da valorizzare e una contestuale riattivazione dell'attrattività dell'area verso imprese vocate alle logiche green.

La necessità di rigenerare un luogo per lo più abbandonato quale è lo spazio produttivo parzialmente dismesso si lega ad un processo di ripensamento dei modelli di governo del territorio replicabile per molteplici areali, e non limitato alla sola area industriale, in un nuovo rapporto di scambio con le comunità urbane. Contestualmente infatti saranno valorizzate i poli e le qualità del paesaggio preesistente, in un progetto di fruizione di quello che può diventare un parco boschivo, segnato da percorsi carrabili e ciclopedonali, e connotato dai reperti di archeologia industriale presenti nell'area (draghe). Si tratta allora di promuovere un turismo sostenibile incentrato sulle qualità paesaggistiche e sul benessere nella logica del "Forest bathing"[64] e sulla scoperta dei luoghi, dei manufatti, dei tesori del contiguo museo paleontologico, delle strutture, dei processi e della storia di uno specifico territorio, con un museo diffuso capace di offrire un racconto degli sviluppi di innovazione in essere.

La riconversione dell'area di 300 ettari si proietta pertanto al rafforzamento e all'attrattività di questo polo industriale già esistente all'idea di distretto, con spazi inseriti fra gli alberi che propongono un ripensamento delle qualità del vivere e del lavorare. L'obiettivo è di arrivare a rigenerare i contigui insediamenti preesistenti, attivando l'interesse internazionale anche con un concorso d'architettura, al fine di attirare nell'area i più importanti centri di ricerca, i grandi progettisti e potenziali investitori, sinergia che vuole segnare il progetto con spazi di trasformazione e stoccaggio. Riprendendo la vocazione di produzione di energia dell'area, in virtù anche della presenza di Enel nel territorio con gli impianti già in essere e in progetto, la conversione del polo energico legato alla lignite vuole lasciare spazio a infrastrutture produttive, che si proiettino a valorizzare gli specifici settori trainanti del legno e dell'idrogeno, ma che si integrino con un piano di distretto industriale capace di mettere in risalto le specificità locali preesistenti così come di far nascere start up e nuovi rami d'impresa.

L'attrattività del luogo si lega però in modo molto stringente ai servizi offerti, connessi alla polarizzazione del settore del legno, ma anche ai vantaggi economici che si vogliono offrire con la proposta di comunità di comunità energetiche rinnovabili, rafforzati anche da una serie di interventi diffusi di produzione di energia rinnovabile che determinano un sistema.

L'energia prodotta viene quindi messa a disposizione per la produzione industriale locale e per quei settori già presenti nell'area hard to abate, mettendo a sistema anche l'ossigeno generato nei processi di trasformazione della biomassa in idrogeno, secondo quei principi di circolarità sostanziali in tutta la proposta. Oltre la connettività digitale, è fondamentale la valorizzazione trasportistica, già in parte attuata dagli investimenti sui tracciati stradali. Agli stessi si desidera però sovrapporre il servizio di trasporto pubblico, in particolare il Bus Rapid Transport che vuole essere esteso dentro quest'area per proiettarsi all'interconnessione con la regione Toscana nel polo di Chiusi a valorizzazione del trasporto su ferro. Si propone contestualmente un collegamento fra il tema trasportistico e la produzione dell'idrogeno verde, proiettando l'area a trovare in tale segmento un filone di sviluppo.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

A trainare il processo è infatti posta la ricerca, con la creazione di WHT Design Lab "Wood, Green Hydrogen and Transportation Design Lab", proponendo una visione di contaminazione fra imprese e centri di ricerca istituzionali, con l'obiettivo di concretizzare l'innovazione. In particolare il percorso attuativo è anticipato da una fase preliminare volta alla sperimentazione delle migliori soluzioni in rapporto alle specificità del contesto, e all'accompagnamento del processo di trasformazione, con tracciati vocati all'innovazione che disegnano l'anima stessa del polo. Grande attenzione vuole essere posta in particolare all'ingegnerizzazione del materiale, per rimediare all'assenza di pianificazione del settore forestale valorizzando lo stato attuale delle risorse disponibili, così come ai processi di digitalizzazione che stanno trasformando il design del legno, senza perdere gli orizzonti della visione integrata fondata sull'abitare e sul paesaggio, sul concetto di azioni e visioni necessario per un reale sviluppo sostenibile dei nostri luoghi.

References

[1] Direzione generale delle foreste del Mipaaft, "*RAPPORTO SULLO STATO DELLE FORESTE E DEL SETTORE FORESTALE IN ITALIA - RAF,*" 2019, p. 284.

[2] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, eds., *Digital Wood Design*, Springer International Publishing, Cham, 2019.

[3] Kamarul Bahrin, Mohd Aiman, Mohd Fauzi Othman, Nor Hayati Nor Azli, & Muhamad Farihin Talib, "*INDUSTRY 4.0: A REVIEW ON INDUSTRIAL AUTOMATION AND ROBOTIC,*" J. Teknol., 78(6–13), 2016, p. .

[4] Di Maria, Eleonora, Valentina De Marchi, Silvia Blasi, Marco Mancini, & Giorgio Zampetti, *L'economia Circolare Nelle Imprese Italiane e Il Contributo Di Industria 4.0*, 2018.

[5] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, "*Il Disegno Del Prossimo Paesaggio,*" *Il Prossimo Paesaggio. Realtà, Rappresentazione, Progetto*, F. Bianconi, and M. Filippucci, eds., Gangemi, Roma, 2018, 2018, pp. 26–27.

[6] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, *Landscape Lab. Drawing, Perception and Design for the Next Landscape Models*, Springer, Basingstoke, 2019.

[7] Bauman, Zygmunt, *Voglia Di Comunità*, Laterza, Bari, 2007.

[8] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, "*Torneranno i Boschi Orizzontali? Processi Di Innovazione e Di Ricerca per La Rigenerazione Del Paesaggio Urbano Di San Mariano a Corciano (PG),*" *XX Congresso Nazionale CIRIAF Sviluppo Sostenibile Tutela Dell'Ambiente e Della Salute Umana*, Morlacchi Editore University Press, 2020, 2020, pp. 590–602.

[9] Filippucci, Marco, "*Rappresentazione e Percezione per Nuove Strategie Di Sviluppo Territoriale Dell'Umbria. Il Cibo Come Riflesso Del Paesaggio, Il Paesaggio Come Riflesso Del Cibo,*" *Riflessioni: L'arte Del Disegno/Il Disegno Dell'arte*, Gangemi, 2019, 2019, pp. 1589–1602.

[10] Pazzagli, R;, "*Il Rapporto Città-Campagna Tra Agricoltura e Paesaggio,*" *Il Territorio Bene Comune*, A. Magnaghi, ed., Firenze University Press, Firenze, 2014, 2014, p. .

[11] Gehl, Jan, *Life Between Buildings*, 2011.

[12] Gehl, Jan, "*Public Spaces for a Changing Public Life,*" Open Sp. People Sp., (2), 2007, pp. 3–11.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[13] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Michela Meschini, "*Zero Emission Burg. Riqualificazione Energetica Nel Territorio Di Campello Sul Clitunno,*" *XX Congresso Nazionale CIRIAF Sviluppo Sostenibile Tutela Dell'Ambiente e Della Salute Umana*, Morlacchi Editore University Press, 2020, 2020, pp. 110–122.

[14] Lavagna, Monica, Claudia De Flumeri, & Marcella Bonanomi, *Edifici a Consumo Energetico Zero: Orientamenti Normativi, Criteri Progettuali Ed Esempi Di Zero Energy e Zero Emissioni Buildings*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna, 2012.

[15] Bianco, Vincenzo, Furio Cascetta, Alfonso Marino, & Sergio Nardini, "*Understanding Energy Consumption and Carbon Emissions in Europe: A Focus on Inequality Issues,*" Energy, 170, 2019, pp. 120–130.

[16] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, "*Visione e Disegno. Percezione, Rilievo e Progetto per Nuovi Modelli Di Spazi Urbani,*" *Mondi e Modi Dell'abitare Per Una Sociologia Della Convivenza*, Rubbettino, Soveria Mannelli (CZ), 2019, 2019, pp. 81–104.

[17] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Giulia Pelliccia, *Abitare. Sperimentazioni e Modelli per l'innovazione Del Costruire in Legno*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna, 2021.

[18] Gobster, Paul H., Joan I. Nassauer, Terry C. Daniel, & Gary Fry, "*The Shared Landscape: What Does Aesthetics Have to Do with Ecology?,*" Landsc. Ecol., 22(7), 2007, pp. 959–972.

[19] Millennium Ecosystem Assessment, *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis*, 2005.

[20] Tzoulasa, Konstantinos, Kalevi Korpelab, Stephen Vennc, Vesa Yli-Pelkonenc, Aleksandra Kaźmierczaka, Jari Niemelac, & Philip Jamesa, "*Promoting Ecosystem and Human Health in Urban Areas Using Green Infrastructure: A Literature Review,*" Landsc. Urban Plan., 81(3), 2007, pp. 167–178.

[21] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Simona Ceccaroni, "*L'esigenza Di Paesaggio. Processi Di Ricerca e Sperimentazioni per La Rigenerazione Dell'area Di Pietrafitta,*" *L'Italia Centrale e i Paesaggi Sociali Dei Territori Urbani in Trasformazione*, Mimesis, Milano, 2021, 2021, pp. 63–80.

[22] Bianconi, Fabio, Ambra Ciarapica, & Marco Filippucci, "*Paesaggio, Territorio, Conoscenza. Dall'Atlante Degli Obiettivi Della Regione Umbria Ai Contratti Di Paesaggio Del Lago Trasimeno,*" *Proceedings of the 16th CIRIAF National Congress. Sustainable Development, Human Health and Environmental Protection*, Proceedings of the 16th CIRIAF National Congress, 2016, 2016, p. .

[23] Ahern, Jack, "*Urban Landscape Sustainability and Resilience: The Promise and Challenges of Integrating Ecology with Urban Planning and Design,*" Landsc. Ecol., 28(6), 2013, pp. 1203–1212.

[24] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Matteo Clemente, "*Biodiversity Protection and Landscape Evaluation: Two Proposals for Umbria Region in Europe 2020 Strategy,*" *Crisis Landscape. Opportunities and Weaknesses for a Sustainable Development*, M. Clemente, R. Biasi, and L. Salvati, eds., Franco Angeli, Milano, 2017, 2017, pp. 111–124.

[25] Lionello, Luca, "*Il Grean Deal Europeo. Inquadramento Giuridico e Prospettive Di Attuazione.,*" JUS, 2020, pp. 105–142.

[26] Fell, David Robert, "*Wood in the Human Environment : Restorative Properties of Wood in the Built*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Indoor Environment," University of British Columbia.

[27] Marchetti, Marco, Renzo Motta, Davide Pettenella, Lorenzo Sallustio, & Giorgio Vacchiano, "*Forests and Forest-Wood System in Italy: Towards a New Strategy to Address Local and Global Challenges,*" J. Silvic. For. Ecol., 15, 2018, pp. 41–50.

[28] Nicholls, David L, John I Zerbe, Richard D Bergman, & Peter M Crimp, *Use of Wood Energy for Lumber Drying and Community Heating in Southeast Alaska*, Madison, Wis., 2004.

[29] Buchanan, Andrew H, & S Bry Levine, "*Wood-Based Building Materials and Atmospheric Carbon Emissions,*" Environ. Sci. Policy, 2(6), 1999, pp. 427–437.

[30] Youngquist, J.A., "*Wood-Based Composites and Panel Products,*" *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, 1999, 1999, pp. 1–31.

[31] Ostrom, Elinor, *Governing the Commons : The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge University Press, 2015.

[32] Ostrom, Elinor, "*Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action,*" Gov. commons Evol. institutions Collect. action, 1990, p. .

[33] Harvey, D, "*The Future of the Commons,*" Radic. Hist. Rev., (109), 2011, pp. 101–107.

[34] Pereira, Guillermo Ivan, & Patrícia Pereira da Silva, "*Energy Efficiency Governance in the EU-28: Analysis of Institutional, Human, Financial, and Political Dimensions,*" Energy Effic., 10(5), 2017, pp. 1279–1297.

[35] Ramage, Michael H., Henry Burridge, Marta Busse-Wicher, George Fereday, Thomas Reynolds, Darshil U. Shah, Guanglu Wu, Li Yu, Patrick Fleming, Danielle Densley-Tingley, Julian Allwood, Paul Dupree, P. F. Linden, & Oren Scherman, "*The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction,*" Renew. Sustain. Energy Rev., 68, 2017, pp. 333–359.

[36] Zanuttini, Roberto, & Filippo Brun, "*La Certificazione Forestale Secondo Il Sistema PEFC (Pan-European Forest Certification),*" GENIO Rural. ESTIMO E Territ., 7–8(49–59), 2000, p. .

[37] Ferrario, Viviana, "*Paesaggi Coltivati (Multifunzionali). Lo Spazio Dell'agricoltura Nella Trasformazione Della Città Contemporanea.,*" *Paesaggi in Mutamento. L'approccio Paesaggistico Alla Trasformazione Della Città Europea*, A. Magnier, and M. Morandi, eds., FrancoAngeli, Milano, 2013, 2013, p. .

[38] Torreggiani, Daniele, Enrica Dall'Ara, & Patrizia Tassinari, "*The Urban Nature of Agriculture: Bidirectional Trends between City and Countryside,*" Cities, 2012, p. .

[39] Velazquez, Beatriz E, "*Il Concetto Di Multifunzionalità in Agricoltura: Una Rassegna,*" QA Riv. dell'Associazione Ross., (3), 2001, p. .

[40] Todorova, Stela, & Jordanka Ikova, "*Multifunctional Agriculture: Social and Ecological Impacts on the Organic Farms in Bulgaria,*" Procedia Econ. Financ., 2014, p. .

[41] Heilig, Gerhard K, "*Multifunctionality of Landscapes and Ecosystem Services with Respect to Rural Development,*" *Sustainable Development of Multifunctional Landscapes*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2003, 2003, pp. 39–51.

[42] Loch, Carlos, Paola Beatriz May Rebollar, Yuzi Anai Zanardo Rosenfeldt, & Marines Walkoski, "*Landscape Multifuncionality Evaluation as a Subsidy to Public Policies for Sustainable Rural*

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Development," Cienc. Rural, 2014, p. .

[43] Wilson, Geoffrey Alan, *Multifunctional Agriculture: A Transition Theory Perspective*, CABI, Wallingford, 2007.

[44] Maddalena, Paolo, & Salvatore Settis, *Il Territorio Bene Comune Degli Italiani: Proprietà Collettiva, Proprietà Privata e Interesse Pubblico*, Donzelli, Roma, 2014.

[45] Marinelli, Fabrizio, *Gli Usi Civici: Aspetti e Problemi Delle Proprietà Collettive*, Jovene, Napoli, 2000.

[46] Giannini, R., & L. Susmel, "*Foreste, Boschi, Arboricoltura Da Legno,*" For. - J. Silvic. For. Ecol., 3, 2006, pp. 464–487.

[47] Gargiulo, Teresa, Fabrizio Onida, & Fabrizio Traù, *La Capacità Competitiva Della Filiera Italiana Del Legno-Arredamento*, Franco Angeli Editore, 2015.

[48] Lepri, Luciano, & Renato Vernata, *Pietrafitta e La Lignite*, Arteè grafica, Città della Pieve, 2014.

[49] Campiotti, Carlo A, C Viola, M Scoccianti, & G Giagnacovo, *Le Filiere Del Sistema Agricolo per l'energia e l'efficienza Energetica*, Roma, 2011.

[50] Castellani, Beatrice, Sara Rinaldi, Emanuele Bonamente, Andrea Nicolini, Federico Rossi, & Franco Cotana, "*Carbon and Energy Footprint of the Hydrate-Based Biogas Upgrading Process Integrated with CO2 Valorization,*" Sci. Total Environ., 615, 2018, pp. 404–411.

[51] Storelli, M., "*Dall'agricoltura All'industria: Gli Assetti Territoriali,*" *Corciano Nella Grande Trasformazione Da Comune Rurale Ad Area Industriale. 1950-1990*, S. Sacchi, ed., Ediesse, Roma, 2008, 2008, pp. 73–103.

[52] Romano, Donato, *Agricoltura*, Jaca Book, Milano, 1997.

[53] Levkoe, Charles Zalman, "*Towards a Transformative Food Politics,*" Local Environ., 2011, p. .

[54] Bianconi, Fabio, & Marco Filippucci, *Iperografie Amerine*, Maggioli spa, Santarcangelo di Romagna, 2021.

[55] Bianconi, Fabio, Marco Filippucci, & Andrea Fancelli, "*Regenerating Chiascio: The First Green Community in Umbria,*" *De- Sign Environment Landscape City*, Genova University Press, 2020, 2020, pp. 75–88.

[56] Serra, Sergio, *Diritti Edificatori e Consumo Di Suolo: Governare Il Territorio in Trasformazione*, Franco Angeli, Milano, 2018.

[57] Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, *Consumo Di Suolo, Dinamiche Territoriali e Servizi Ecosistemici*, Roma, 2016.

[58] Barbanera, M., F. Cotana, & U. Di Matteo, "*Co-Combustion Performance and Kinetic Study of Solid Digestate with Gasification Biochar,*" Renew. Energy, 121, 2018, pp. 597–605.

[59] Gregori, Lucilia, ed., *Pietrafitta Memoria Di Un Geosito*, Promos, Città di Castello, 2010.

[60] Mazza, Paul, Benedetto Sala, & Miikael Fortelius, "*A Small Latest Villafranchian (Late Early Pleistocene) Rhinoceros from Pietrafitta (Perugia, . Umbria, Central Italy), with Notes on the Pirro and Westerhoven Rhinoceroses,*" Palaeontogr. Italica, 1993, pp. 25–50.

[61] Ambrosetti Pierluigi, *Geomorfologia e Neotettonica Nel Bacino Di Tavernelle/Pietrafitta (Umbria)*, 1989.

[62] Martinetto, Edoardo, Adele Bertini, Giorgio Basilici, Angela Baldanza, Roberto Bizzarri, Marco

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cherin, Sergio GentilI, & Maria Rita Pontini, "*The Plant Record of the Dunarobba and Pietrafitta Sites in the Plio-Pleistocene Palaeoenvironmental Context of Central Italy,*" Alp. Mediterr. Quat., 2014, pp. 29–72.

[63] Ambrosetti, Pierluigi, Capurso Romano, Renato Corvino, Gianpaolo Gallo, Roberto Monicchia, & Bruno Salvatici, *Storia, Energia, Ambiente. Un Modello Di Centrale a Pietrafitta*, Protagon, 1992.

[64] Qing, L., "*Effect of Forest Bathing Trips on Human Immune Function,*" *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2009, 2009, pp. 9–17.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Improved utilization of Trasimeno undervalued fish towards a valuable food

Raffaella Franceschini[1], David Ranucci[2], Rossana Roila[2], Andrea Valiani[3], Naceur Haouet[3], Marisa Framboas[3], Caterina Altissimi[2], Raffaella Branciari[2]

[1]Dipartimento di Ingegneria della Sostenibilità, Università degli Studi Guglielmo Marconi, Via Plinio 44, 00193 Roma, Italy
[2] Dipartimento di Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Perugia, Via San Costanzo 4, 06126 Perugia (PG), Italy
[3] Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche, "Togo Rosati", Via Salvemini 1, 06126 Perugia (PG), Italy

***** Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: raffaella.branciari@unipg.it

Abstract: A new processing techniques was developed for the production of underutilized protein resources to make them useful and palatable food for human consumption. Two e different product were elaborated in the fishery processing plant: fish roe packaged in glass jars and fish sausage. The nutritional profile, and sensory properties of the above mentioned products were evaluated. The fish roe, was thermally treated according to the method applied in the canning industry. The products showed high nutritional properties, characterized by lower contents of cholesterol and saturated fatty acids and a high level of unsaturated fatty acids. Consumers' evaluation established an high grade of acceptance of the products who displayed also a higher purchase intent.

Keywords: fish eggs, fish sausage, freshwater fish, fish products

1. Main information

Fish and fish-derived are considered an excellent source of n-3 polyunsaturated fatty acids (n-3 PUFA) such as eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA). Many studies showed that they are positively involved in human health among which anti-inflammatory effects in cancer, cardiovascular diseases, obesity, and other metabolic disorders [1]. Many studies showed that fish flesh and other fish derived-products such as fish roe contain significant amount of long chain n-3 PUFA, mainly EPA and DHA [2-3]. Many freshwater fish species are still now underutilized for various

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_041_pp_366

reasons, including bony flesh, characteristic flavour and odour, small size, unacceptable textural properties and other factors. However, the utilization of such fish species would be desirable for their valuable nutritional properties [4]. A strategy to increase the consumption of freshwater fish is processing the fish [5]. This approach is in line with consumers' demand towards safe, user-friendly and high in nutritional value products and with the strong attitude in consuming locally-sourced products, both typical and innovative [5-7].

The objective of this research is to evaluate the chemical and reological characteristics of the process carp roes and carp sausage of fish caught from Trasimeno Lake (Umbria, Italy).

2. Materials and Methods

Preparation of carp sausage and carp caviar

Carp average length 78 ± 12.24 cm, used for the fish sausage formulation was caught from Trasimeno Lake (Umbria, Italy- 43°08'N 12°06'E) from September to March. The fish were transferred to a local UE-approved establishment for fish processing and were processed. Three batches of each fish burger were produced. The fishes were gutted, washed, and filleted. The fish fillets were ground twice through a meat grinder (Mod. C/E32R, La Minerva, Bologna, Italy) fitted with a 5mm plate to obtain fish pulp without visible fishbone (as an average of 35% of yield each). The fish sausage were composed of ground fillets (70 %), and other ingredients. The fish sausage was stuffed into artificial casings of collagen (22 mm dia.; Tripocel Ltda), with the aid of a manual sausage stuffer (model E8, CAF Maquinas).

Figure 1 Carp fish sausage



Carp Roe are processed when gravid female fishes, are harvested. The roes were taken out from the fish. The mean weight and length of the roes were 4.99±0.36 g and 5.37±0.14 cm, respectively. The roes were washed gently water. Later, the roes were put in boiling water and boiled them for 4-5 min. During this process, the roes became tougher by absorbing water. They were taken out from boiling water with a slotted spoon and left for cooling, they were mixed with different ingredient and placed in a jar (212-mL volume) and transferred to the autoclave (Frigojollinox Stery 50, Frigojollinox, Campobasso, Italy). Three batches of 90 jars were produced for the experiment. In order to ensure the product's safety, the steriliser was set in accordance to the standard thermal treatment parameters used in the canning industry: 121.1°C for 12 s [8].
20 individuals of freshwater fish species and three batch of fish products were
were used for the analysis.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 2. Raw eggs and processed eggs



The chemical composition and fatty acid profiles of each individual were determined according to the procedure of [7].

A series of consumer tests was performed at the Department of Veterinary Medicine, University of Perugia. Consumers (mainly represented by students and staff members) were asked to complete a questionnaire that included information regarding their age, sex and frequency of freshwater fish consumption [7]. The consumer tests were performed in different sessions For each session, 100 regular fish consumers (aged 20–60, 50 females and 50 males) were used (regular consumers were those who had a consumption frequency of at least once a week). A practicing session was performed before the test to allow consumers to become familiar with the use of a nine point hedonic scale (from 1, “dislike extremely” to 9, “like extremely”). In the first session, 1 sample/group was monadically served on white plastic plates identified by three random digit codes.

3. Results and discussions

The physicochemical characteristics of flesh and sausage as well as raw and canned eggs are reported in table 1.

Table 1. Proximate composition (%) of raw and processed products

	Fillet	**Sausage**	**Raw eggs**	**Canned eggs**
Energy kcal	117,26	129,19	575,71	1815,30
Carboidrates	0,38	9,40	1,97	5,24
Fat	5,22	5,07	3,09	41,04
Protein	17,19	11,49	25,17	12,22
Moisture	76,02	70,76	68,29	40,00
Cholesterol mg/100g	53,11	33,41	436,13	237,80
Ash	1,19	3,28	1,48	1,5
Salt	n.d.	1,2	n.d.	0,5

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Sausage and canned egg are products of considerable nutritional value, mainly due to its high protein content and lipid profile.

Even thought differences in lipid profile were recorded among the two final products both are constituted mainly by monounsaturated fatty acids, in particular the presence of olive oil in the recipe of canned eggs limited the increase of SFA as olive oil is high in MUFA with a considerable amount of oleic acid [9].

This aspect is of utmost importance, considering that a diet rich in MUFA containing oleic acid from virgin olive oil has been found have several beneficial effect in the prevention of cardiovascular disease [10].

The oleic acid is responsible for the reduction of plasmatic cholesterol levels and the improvement of the low-density lipoprotein/high-density lipoprotein ratio.

The European Food Safety Authority [11] recommends the replacement of SFA with an equal amount of MUFA in order to reduce blood low-density lipoprotein and cholesterol levels. Cholesterol content varied among the two formulations.The literature states that this value can vary in freshwater fish, especially carp, depending on the age and harvest season [12]. The amount of cholesterol was low in the sausage reflecting the low amount registered in the carp muscle while the amount registered in the canned eggs was low in comparison with other analogues products made of fish egg.

The consumer acceptance data highlighted differences in the examined attributes and consumer acceptability among the groups. The canned eggs received the highest scores for taste and overall liking while carp sausage received the lowest score for overall liking. Differences in the acceptance of overall liking were found, probably because species, such as Carp, could present a muddy/hearty odour and flavour, owing to their ecological habits.

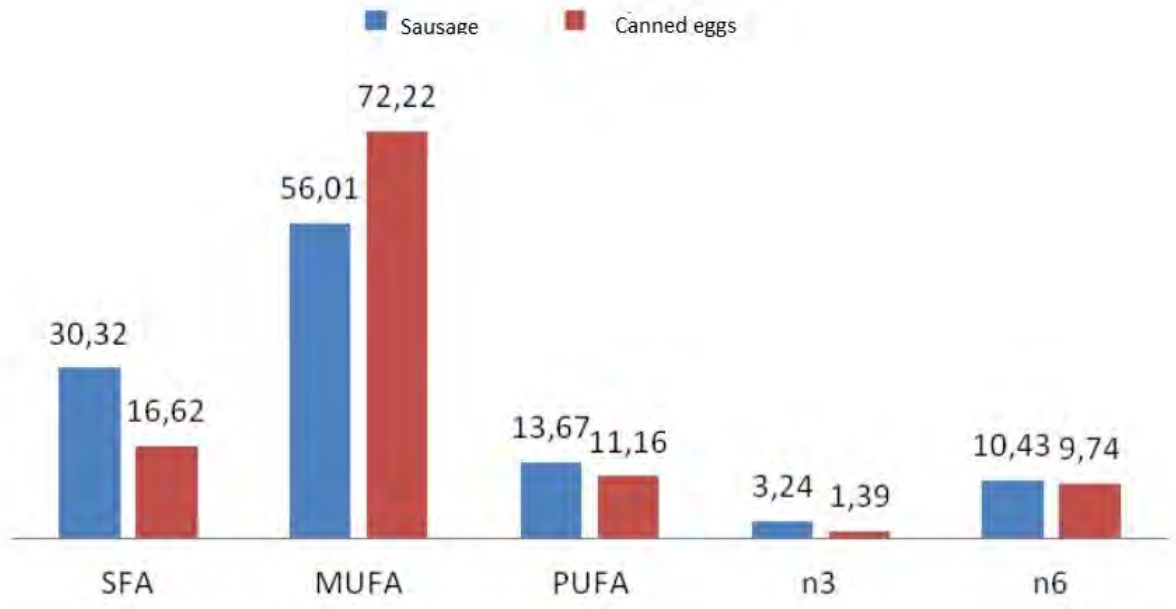
This off-flavour is mainly caused by two isoprene compounds, geosmin and 2-methylisoborneol, usually found in pond bottom soil, which is the major feed intake of this species [13-14]. The process and the ingredients in sausage recipes removed almost totally the presence of this off-flavour. The canned eggs receive an higher appreciation by consumers showing also an affirmative purchase intent equal to 85%.

The two new formulation of freshwater fish proved to healthy products for human consumption, with significant nutritional values and sensory acceptance, especially canned eggs. Therefore, considering the actual life style directed toward fast-food consumption, the two products can be a time-saving strategy, more easily incorporable into busy lifestyles compared with homemade food [15].

The study suggests that processing undervalued fish is a promising approach for the use of underutilized species but it also permit the production a value-added product able to contribute to freshwater food consumption

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Fatty acids profile of sausage and processed fish eggs



References

1. Wang, Y., & Huang, F. N-3 polyunsaturated fatty acids and inflammation in obesity: local effect and systemic benefit. *BioMed research international*, **2015,** *2015*.
2. Scano, P., Rosa, A., Pisano, M. B., Piras, C., & Cosentino, S. Lipid components and water soluble metabolites in salted and dried tuna (Thunnus thynnus L.) roes. *Food chemistry*, 2013, *138*(4), 2115-2121.
3. Scano, P., Rosa, A., Locci, E., Dessi, M. A., & Lai, A. NMR study of the lipid profile of mullet raw roe and bottarga. *European journal of lipid science and technology*, 2009, *111*(5), 505-512.Vasconi, M., Caprino, F., Bellagamba, F., Busetto, M. L., Bernardi, C., Puzzi, C., & Moretti, V. M. (2015). Fatty acid composition of freshwater wild fish in subalpine lakes: a comparative study. *Lipids*, 2015, *50*(3), 2015, 283-302.
4. Venugopal, V., Shahidi, F., & Lee, T. C. Value-added products from underutilized fish species. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 1995, *35*(5), 431-453.
5. de Quadros, D. A., de Oliveira Rocha, I. F., Ferreira, S. M. R., & Bolini, H. M. A. Low-sodium fish burgers: Sensory profile and drivers of liking. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, *63*(1), 236-242.
6. Branciari, R., Valiani, A., Franceschini, R., Ranucci, D., Lupattelli, A., Urbani, E., & Ortenzi, R. Thermal inactivation and growth potential of Listeria monocytogenes in smoked tench. *Italian journal of food safety*, 2016, *5*(3).
7. Branciari, R., Ranucci, D., Urbani, E., Valiani, A., Trabalza-Marinucci, M., Dal Bosco, A., & Franceschini, R. Freshwater fish burgers made from four different fish species as a valuable strategy appreciated by consumers for introducing EPA and DHA into a human diet. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, *26*(6), 686-694.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

8. Diao, M. M., André, S., & Membré, J. M. (2014). Meta-analysis of D-values of proteolytic Clostridium botulinum and its surrogate strain Clostridium sporogenes PA 3679. *International journal of food microbiology*, 2014, *174*, 23-30.
9. Visioli, F., & Galli, C. Olive oil phenols and their potential effects on human health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, *46*(10), 4292-4296.
10. Schwingshackl, L., & Hoffmann, G. Comparison of the long-term effects of high-fat v. low-fat diet consumption on cardiometabolic risk factors in subjects with abnormal glucose metabolism: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Nutrition*, 2014, *111*(12), 2047-2058.
11. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to the replacement of mixtures of saturated fatty acids (SFAs) as present in foods or diets with mixtures of monounsaturated fatty acids (MUFAs) and/or mixtures of polyunsaturated fatty acids (PUFAs), and maintenance of normal blood LDL cholesterol concentrations (ID 621, 1190, 1203, 2906, 2910, 3065) pursuant to Article 13 (1) of Regulation (EC) No 1924/2006. *EFSA Journal*, 2011, *9*(4), 2069.
12. KopiCoVá, Z., & VaVreiNoVá, S. Occurrence of squalene and cholesterol in various species of Czech freshwater fish. *Czech journal of food sciences*, 2007, *25*(4), 195.
13. Papp, Z. G., Kerepeczki, E., Pekar, F., & Gal, D. (Natural origins of off-flavours in fish related to feeding habits. *Water science and technology*, 2007, *55*(5), 301-309.
14. Varga, D., Sándor, Z., Hancz, C., Csengeri, I., Jeney, Z., & Papp, Z. Off-flavour compounds in common carp (Cyprinus carpio L.) flesh in context of type of fish pond. *Acta Alimentaria*, 2015, *44*(2), 311-315.
15. van der Horst, K., Brunner, T. A., & Siegrist, M. Fast food and take-away food consumption are associated with different lifestyle characteristics. *Journal of human nutrition and dietetics*, 2011, *24*(6), 596-602.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

In detail description of a new lab-scale experimental apparatus, designed to investigate clathrate hydrate formation and CO_2-CH_4 replacement.

Beatrice Castellani[1*], Federico Rossi[1], Alberto Maria Gambelli[1], Andrea Nicolini[1], Mirko Filipponi[1]

[1] Department of Engineering, CIRIAF, University of Perugia, Via G. Duranti 65, Perugia, Italy

***Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: beatrice.castellani@unipg.it**

Abstract: Natural gas hydrates are ice like crystalline compounds, composed by water molecules which, in presence of suitable thermodynamic conditions, are capable to form solid cages around specific typologies of gases, such as methane and carbon dioxide. The present work deals with a detailed description of a lab scale experimental apparatus, designed to produce clathrate hydrates and study the of CO_2-CH_4 replacement in marine natural gas hydrates. The device was realized on order to avoid internal gradient of temperature in radial direction; moreover, it is positioned inside a refrigerated room, which allow to reach uniform and constant environmental conditions, needed for the proper completion of hydrate tests. The article will provide a detailed description of the reactor, together with the scheme of the whole apparatus.

Keywords: natural gas hydrate, CO_2 replacement, lab equipment; clathrate hydrates; green fuels; lab design

1. Introduction

In hydrate structures, the gas molecules are entrapped inside cage-like cavities composed by hydrogen-bonded water molecules [1]. They are solid crystalline compounds formed under favourable thermodynamic conditions from mixtures of water molecules (also called hosts) and small molecules of gaseous compound (guests), such as methane (CH_4), hydrogen (H_2), nitrogen (N_2), helium (He) and carbon dioxide (CO_2). Three main structures were identified: structural I (sI) and structural II (sII), which are cubic, and structure H (sH), which is hexagonal [2]. The structure shape is mainly affected by the gas guest molecules and thermodynamic conditions. Natural gas hydrate is mainly formed by two

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

different phenomena: thermogenic and biogenic. The first one originates from the decomposition of organics, which causes the production of methane and other hydrocarbons, such as ethane (C2H6) and propane (C3H8); the second one is instead generated from methanogens. NGH reservoirs have been discovered in marine sediments and in permafrost regions. The most important marine deposits were founded in Gulf of Mexico, Indian Ocean, South China, Japan, Korea and Bearing Strait [3]. On the other side, the greatest permafrost areas dominated by hydrate presence are Alaska, Siberia, Qinghai-Tibet and Mackenzie Delta [4]. At least 99% of discovered NGH reservoirs has been found in marine continental margins, mostly at depths greater than 1000 m. Boswell and Collett (2011) affirmed that nowadays approximately 3*1015 m3 of methane are entrapped into water cages and form NGH deposits [5]. Sediments containing natural gas hydrates are divided in three different types, in function of their morphology: pore filling, naturally fractured and massive/noddle. The most common type is the first one, where hydrates accumulate in pore spaces present in sandstones or carbonate rocks. Since their discovery, NGHs have been considered a potential weapon for contrasting critical problems, such as the growing of energy demand and the climate change.

Depressurization strategy consists in lowering the deposit pressure below the hydrate equilibrium value at the local temperature, without varying this last parameter. Thermal stimulation consists on a similar method, but modifying temperature and keeping pressure constant. Chemical inhibitor injection is a strategy based on moving the NGH equilibrium curve to higher pressure and lower temperature, leaving hydrate unstable at the local thermodynamic conditions. Finally, the CO2 – CH4 replacement method expects the methane recovery through a little variation of the deposit conditions, in order to generate instability for NGH at the local conditions, and via carbon dioxide injection, which is able to form hydrate even at higher temperature and/or lower pressure than methane [6]. Moreover, this solution leads to a carbon dioxide permanent storage and permits to generate a carbon neutral energy source [7]. In the present experimental work, an investigation about the CO2 - CH4 replacement process in presence of a natural chemical inhibitor, sodium chloride (NaCl), was carried out. The hydrate formation is indeed hindered in presence of electrolytes dissolved in liquid water [8]. Experimental data, models and simulations about hydrate formation and dissociation in presence of electrolytes are widely shown in literature [9-11]. All these works prove how the presence of salt dissolved in water causes an increase of hydrate equilibrium pressure and/or a decrease of the equilibrium temperature [12]. The inhibitor effect is due to the competition between ions and guest molecules, which leads to a decrease of hydrogen bonds between water molecules [13]. Thus, the formation of water cages is hindered, and also clathrate structure stability is reduced [14]. Moreover, sodium chloride permits to avoid the greatest part of problems related to using chemical inhibitors: diffusion and effective permeability to solution in the reservoir, costs and environment preservation. The feasibility of carbon dioxide replacement process is due to the distance between CO_2 and CH_4 hydrate equilibrium curves [15].

The purpose of this paper is to describe in detail a new lab-scale experimental apparatus, designed to investigate clathrate hydrate formation and CO_2-CH_4 replacement. The experimental apparatus is used for the activities of a National Project PRIN 2017 “Methane recovery and carbon dioxide disposal

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

in natural gas hydrate reservoirs". For the scope of this research project also another previous reactor was used. Starting from the features of this previous reactor, two new and improved apparatuses were built.

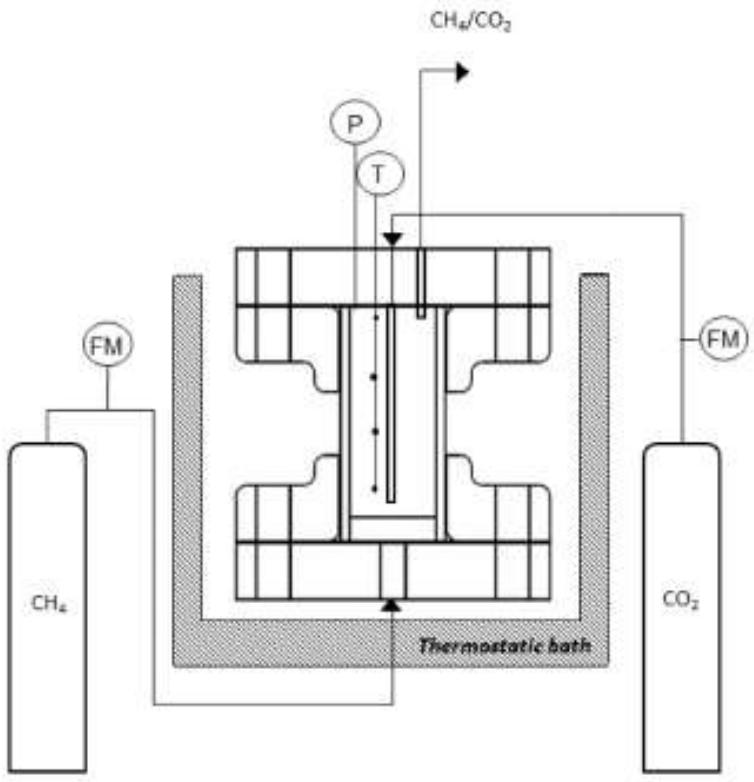
2. Lab-scale reactors

2.1. The previous experimental apparatus

The whole reactor was realized with 316SS stainless steel and has an internal cylindrical volume of 949 cm^3; in particular, the diameter is 7.3 cm while the internal height is about 22.1 cm. Both the upper and the lower surface of that volume are sealed with two 316SS stainless steel flanges (both of them composed by two 4.7 cm thick plates).

Methane injection pipe goes through the lower flange, while the one for carbon dioxide injection is inserted in the upper flange. Here, other four channels are built for the insertion of four thermocouples and a manometer inside the internal volume. Thermocouples are located at different depths, in order to precisely monitor the temperature and well identify the differences due to hydrate formation or dissociation. All devices are connected with a data acquisition system manufactured by National Instruments for monitoring and recording experimental data, which is operated with Labview software. Figure 1 shows a scheme of the completely assembled experimental apparatus. In that figure, each thermocouple position is indicated with a black dot situated on a vertical line defined with letter "T".

Figure 1. Schematisation of the completely assembled experimental apparatus.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In the figure, thermocouples and the manometer are indicated respectively with “T” and “P” letters; fluximeters are described with “FM” and are situated between the reactor and the gas cylinders, for constantly monitoring the gas quantities injected inside the reactor. Finally, the whole reactor is inserted inside a thermostatic bath, used for regulating its internal temperature. That vessel is filled with water and glycol, and is refrigerated by a chiller, model GC – LT (by Euro – chiller) (Figure 2).

Figure 2. Reactor in the thermostatic bath.



2.2. The new experimental apparatus

We have completed the construction of two reactors for hydrate formation and study, which will work simultaneously. The reactors are realized with 316SS stainless steel and have a diameter of 8.89 cm while the internal height is about 24 cm. Only the upper surface of that volume is sealed with a 316SS stainless steel flange, while the bottom surface is welded to the cylindrical body of the vessel. The geometry is shown in Figure 3.

Methane and CO_2 are injected from the bottom surfaces through two pipes *(Figure 4)*. Two channels are in the upper flange to insert two sets of thermocouples (TC). The two TC sets have different radial positions to investigate the radial distribution of temperature, in addition to the longitudinal distribution carried out thanks to the TCs position at different depths. Each TC set has three probes. A manometer is mounted on the top flange. TC sets precisely monitor the temperature and well identify the differences due to hydrate formation or dissociation, both in radial and longitudinal directions. All devices are connected with a data acquisition system manufactured by National Instruments for monitoring and recording experimental data, which is operated with Labview software.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Geometry of the new reactors.

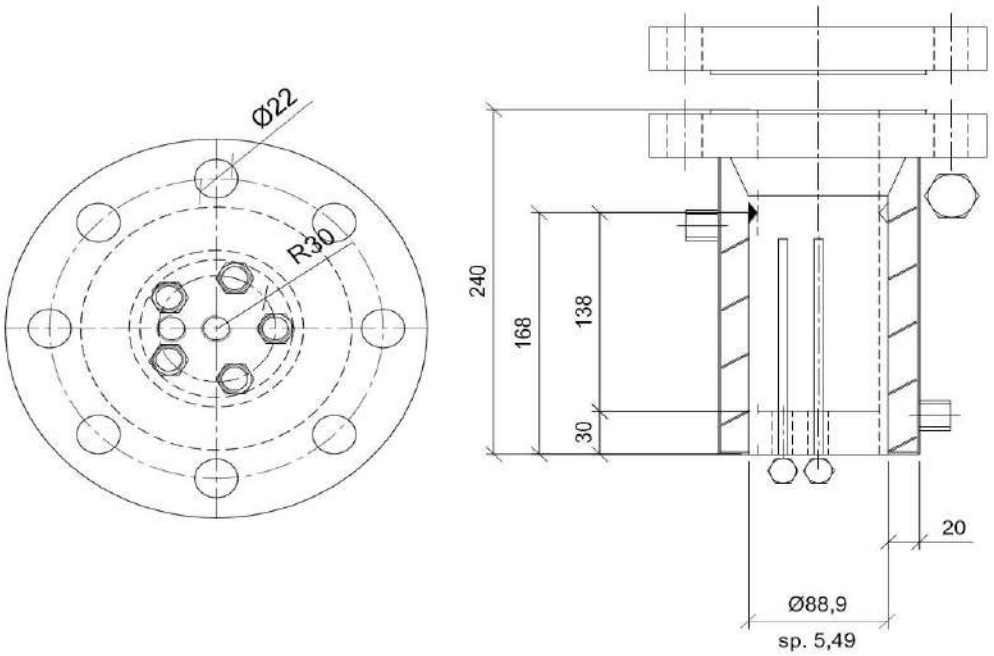
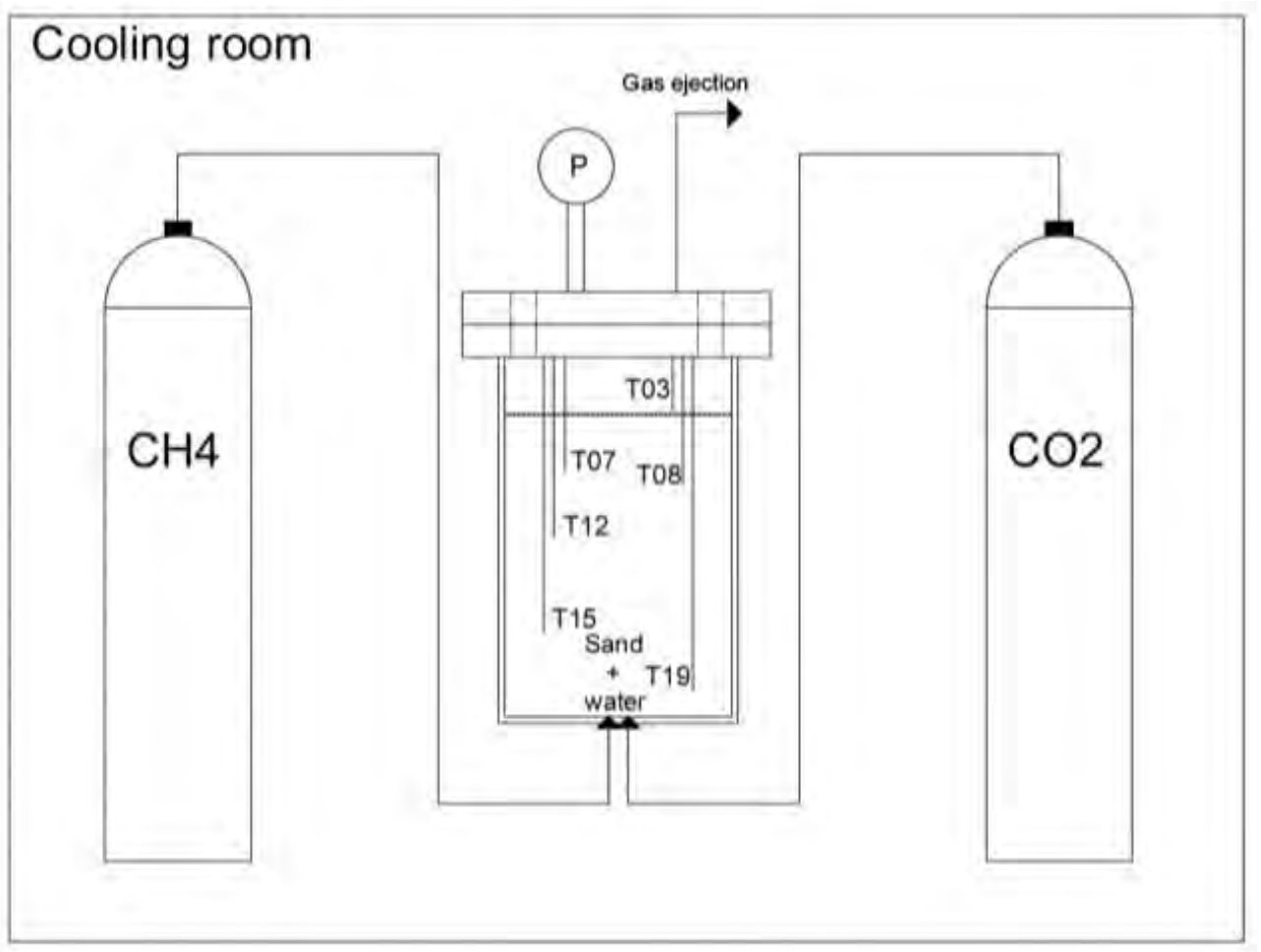


Figure 4. Schematic of the new reactors.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The two reactors are positioned inside a controlled refrigerated room. This will guarantee a more precise control of the environment temperature, especially at the beginning of the formation.

Figure 5. The new reactors in the refrigerated room.



5. Conclusion

For the purpose of the research activities in the National Project PRIN 2017 “Methane recovery and carbon dioxide disposal in natural gas hydrate reservoirs”, two new lab-scale reactors were built with improved features with respect to the existing one. The temperature analysis is improved thanks to

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

two sets of thermocouple in different radial and longitudinal positions. We have built two reactors which work simultaneously in a refrigerated room for a better control of the environmental conditions. The purpose of the new lab-scale experimental apparatus is to investigate clathrate hydrate formation and CO_2-CH_4 replacement.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Italian Ministry of University and Scientific Research and University of Perugia for financially supporting the PRIN project.

References

1. E.D. Sloan, C.A. Koh, Clathrate Hydrates of Natural Gases, third ed., CRC Press,Boca Raton, FL, 2008.
2. Li XS, Xu CG, Zhang Y, Ruan XK, Li G, Wang Y. Investigation into gas production from natural gas hydrate: A review. Applied Energy 172(2016) 286-322.
3. Paull C, Reeburgh WS, Dallimore SR, Enciso G, Koh CA, Kvenvolden KA, et al. Realizing the energy potential of methane hydrate for the UnitedState. Washington DC: National Research Council of the National Academies; 2010.
4. L Liua, BJ Ryu, Z Sunb, N Wu, H Cao, W Geng, X Zhang, Y Jia, C Xu, L Guo, L Wang Monitoring and research on environmental impacts related to marine natural gas hydrates: Review and future perspective. Journal of natural gas science and engineering 65 (2019) 82-107.
5. Boswell R, Collett TS. Current perspectives on gas hydrate resources. Energy Environ. Sci. 4 (2011) 1206 – 1215.
6. Englezos P. Clathrate hydrates. Ind Eng Chem Res 1993;32:1251–74.
7. B. Castellani, A.M. Gambelli, A. Nicolini and F. Rossi. Energy and Environmental Analysis of Membrane-Based CH4-CO2 Replacement Processes in Natural Gas Hydrates. Energies 2019, 12, 850.
8. K.M. Sabil, A.R.C. Duarte, C. Zevenbergen, M.M. Ahmad, S. Yusup, A.A. Omar, C.J. Peters, Kinetic of formation for single carbon dioxide and mixed carbon dioxide and tetrahydrofuran hydrates in water and sodium chloride aqueous solution, Int. J. Greenh. Gas Con. 4 (2010) 798e805.
9. A.H. Mohammadi, W. Afzal, D. Richon, Gas hydrates of methane, ethane, propane, and carbon dioxide in the presence of single NaCl, KCl, and CaCl2 aqueous solutions: experimental measurements and predictions of dissociation conditions, J. Chem. Thermodyn. 40 (2008) 1693e1697.
10. M. Kharrat, D. Dalmazzone, Experimental determination of stability conditions of methane hydrate in aqueous calcium chloride solutions using high pressure differential scanning calorimetry, J. Chem. Thermodyn. 35 (2003) 1489e1505.
11. M.J. Cha, Y. Hu, A.K. Sum, Methane hydrate phase equilibria for systems containing NaCl, KCl, and NH4Cl, Fluid Phase Equilib. 413 (2016) 2e9.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

12. R.W. Bradshaw, J.A. Greathouse, R.T. Cygan, B.A. Simmons, D.E. Dedrick, E.H. Majzoub, Desalination utilizing clathrate hydrates, 2008. LDRD Final Report. Sandia report SAND2007-6565.
13. R.H. Tromp, G.W. Neilson, A.K. Soper, Water structure in concentrated lithium chloride solutions, J. Chem. Phys. 96 (1992) 8460e8469.
14. H. Lu, R. Matsumoto, Y. Tsuji, H. Oda, Anion plays a more important role than cation in affecting gas hydrate stability in electrolyte solution? -A recognition from experimental results, Fluid Phase Equilib. 178 (2001) 225e232.
15. A.M. Gambelli, F. Rossi: Natural gas hydrates: Comparison between two different applications of thermal stimulation for performing CO2 replacement. Energy 172 (2019) 423 – 434.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Production of small scale CO_2-CH_4 hydrate samples, simulating natural deposits after replacement processes and used for Raman analyses

Beatrice Castellani[1]*, Federico Rossi[1], Alberto Maria Gambelli[1], Mirko Filipponi[1], Giorgio Minelli[2], Andrea Nicolini[1]

[1]Department of Engineering, CIRIAF, University of Perugia, Via G. Duranti 65, Perugia, Italy
[2]Department of Physics and Geology, University of Perugia, Via Pascoli, Perugia, Italy

*Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: beatrice.castellani@unipg.it

Abstract: Since 1980, the recovery of methane from natural hydrate reservoirs, was proposed to be applied in conjunction with the injection of carbon dioxide, in order to improve the recovery of methane, obtain a theoretically carbon neutral energy source and prevent the dissociation of water cages and the consequent deformation of soils. Being the offshore deposits sited at relatively high depths in the continental margins, the possibility of studying the replacement process in academic laboratories is crucial for the development of innovative and effective strategies. In this regard, this article deals with the production of samples which approximate the composition and morphology of natural and porous sediment containing CO_2-CH_4 hydrates (post replacement analyses). The casing was realized via 3-D printing, to ensure the reproducibility and similarity of samples.

Keywords: natural gas hydrate, CO_2 replacement, methane reservoir; clathrate hydrates; green fuels

1. Introduction

Gas hydrates are ice – like crystalline compounds, whose structure is composed by water molecules, commonly referred as hosts [1]. Natural hydrate reservoirs mainly occur in deep ocean sediments (97%) and in terrestrial permafrost [2]. The most relevant offshore reservoirs were discovered in the South China Sea, Indian ocean, Japan Sea, Gulf of Mexico and Bearing Strait, while the most abundant

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

onshore reservoirs exist in Alaska, Siberia and Qinghai – Tibet Plateau [3]. The most explored and applied techniques for methane recovery from hydrates are depressurization [4], thermal stimulation [5,6], chemical inhibitor injection [7], or a combination of them [8]. The first strategy is based on lowering the local pressure of the reservoir, while keeping the temperature constant, in order to move the local conditions outside from the stability zone for methane hydrates. With thermal stimulation, the opposite action is exercised to obtain the same effect: the local temperature is increased, while pressure is kept constant. Also for such technique, the local pressure must be carefully controlled, because it might increase, due to the dissociation of hydrates, until re-establishing a configuration of equilibrium and stability for the system. Depressurization and thermal stimulation are the most widespread techniques and show the highest energy produced/energy spent ratio [9]; especially when applied simultaneously.

Hassanpouryouzband et al. asserted that, by itself, thermal stimulation is not a viable solution and must be combined with depressurization to become really effective [10]. Finally, the injection of chemical inhibitors allows to make the local thermodynamic conditions unfeasible for hydrates stability, without varying them [11]. The main critical aspects associated to the present technique consists of the diffusion of the inhibiting species through the layers of the deposit, its relatively high cost and its environmental impact.

Since 1980, a further potential solution was discovered [1]: the CO2/CH4 replacement process. Such method does not exclusively work on the recovery of methane, it also allows to perform carbon dioxide sequestration in form of hydrates [12]. The exchange process is favoured by the capability of carbon dioxide molecules to form hydrates at milder conditions than those required for methane hydrates. The reason can be found in the lower enthalpy of formation, which is equal to – 57.98 kJ/mol for CO2 hydrates and to – 54.49 kJ/mol for CH4 hydrates. It means that, at the same thermodynamic conditions, the hydrates containing carbon dioxide are more stable [13]. Two different possibilities, for CO2/CH4 replacement, exist: i) the initial dissociation of methane hydrates, with the following formation of carbon dioxide hydrates, or ii) the direct exchange between the two gaseous species, within the already formed water cages. The second solution is preferred because it avoids the production of water and preserve the morphology of the sediment, thus reducing the risk of hydrogeological instability. In addition, the exchange ratio between the two species is theoretically equal to one, because both of them naturally form the same structure of hydrates, or the cubic sI.

However, some limiting aspects must be considered and discussed. Even if these species are trapped within the same typology of crystalline ratio, the difference in size leads to a different filling of the cavities. It means that CO_2 mainly occupies the large cavities, while it is difficult to obtain high occupancy degree of large cavities for this species [14]. Moreover, further variables can affect the process negatively. The replacement is feasible only within a narrow thermodynamic region, where the formation of hydrates is possible exclusively for carbon dioxide. For that reason, the re – formation of methane hydrates often occur during the field applications, with a consequent reduction in the overall efficiency of the process. In addition, also the diffusion of carbon dioxide within the deposit often represents a limiting factor.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

As a conclusion, even if the theoretical exchange ratio is equal to one, the complete recovery of methane is currently unfeasible and, once the replacement is finished, the deposit will consist of hydrates containing both the types of species. More in depth, after replacement, the reservoir will host pure methane, pure carbon dioxide (mainly associated to the formation of ex – novo structures) and mixed CO2/CH4 hydrates.

This experimental work is focused on the replacement of methane with carbon dioxide molecules into hydrates. This article deals with the production of samples which well approximate the composition and morphology of natural and porous sediment containing CO2-CH4 hydrates (post replacement analyses).

2. Materials and Methods

The apparatus mainly consists of a 316SS lab – scale unstirred reactor, a cooling room, a series of sensors used to monitor the thermodynamic variables of the process and supplementary devices, required for the injection and ejection of gas. The reactor has cylindrical shape and the internal volume is equal to 1000 cm3. The shape was chosen to ensure the thermal uniformity of the internal volume, being the heat provided and/or removed from the external. In particular, the internal diameter is equal to 7.79 cm, while its height is 21 cm. Figure 1 shows in detail the geometry of the reactor. The reactor is also equipped with an integrated coil, which allows to quickly increase or decrease the temperature, when required.

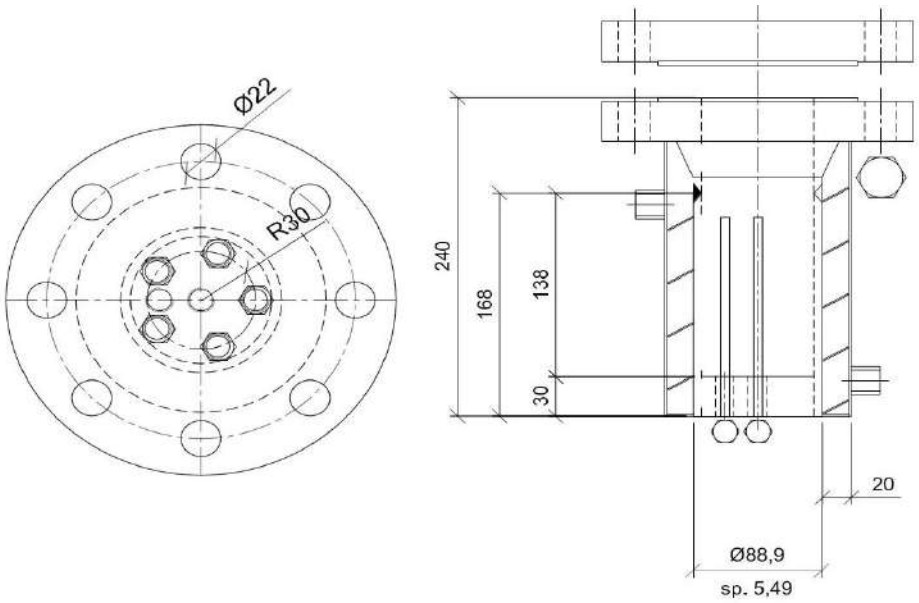
The lower section is closed with a 3 cm thickness plate, directly sealed to the perimetral wall. The top is closed with a flange, whose tightness is ensured with a spiro–metallic gasket (model DN80 PN 10/40 316-FG C8 OR).

The injection of gas is made from the bottom, where two channel are directly connected to cylinders containing the two respective species. The cylinders are positioned inside the cooling room and the guest compound has the same temperature of the system when it is injected inside the reactor. The injection from the bottom ensures a higher diffusion of the guest in the pores of sand. The flange has five channels and hosts all the sensors, a safety valve (model E10 LS/150) and the gas ejection valve. This latter element is equipped with a sub – channel, separated from the main one with a pressure reduced. It allows to isolate little quantities of gas which, thanks to the presence of a porous septum, can be withdrawn and used for gas chromatographic analyses.

The temperature was measured with six Type K thermocouples, having class accuracy 1, while the pressure was monitored with a manometer, model MAN – SD, having class accuracy equal to ± 0.5 of full scale. The positioning of thermocouples allows to identify with accuracy the formation of temperature gradients. The cooling room can lower the temperature until reaching – 10 °C, with an accuracy equal to ± 0.1 °C. The scheme of the completely assembled experimental apparatus is provided in Figure 2.

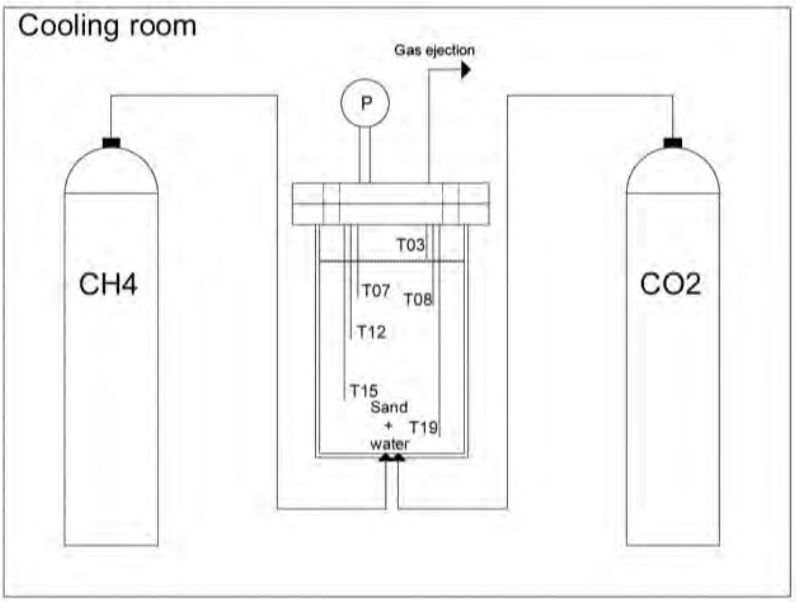
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1. Technical scheme of the reactor.



Finally, all the sensors are connected to a data acquisition system provided by National Instruments and managed in LabView. To carry out the replacement experiments, the reactor was filled with 270 cm^3 of pure demineralized water and 800 cm^3 of sand. The sand is composed by pure silica grains, having spherical shape and diameter in the range of 150 – 250 µm. The porosity of the whole sediment was measured with a porosimeter, model Thermo Scientific Pascal 140 and is equal to 34%. This value considers both the volume of sand pores and the space present between grains. Conversely, the samples used for molecular analyses, where carried out in the only presence of water, in order to characterize the different structure and composition of CO2/CH4 hydrates independently from the morphology and composition of the sediment used. The experiments were carried out with Ultra-High-Purity (UHP) gases, having a certified purity degree equal to 99.99%.

Figure 2. Scheme of the completely assembled experimental apparatus.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Formation of post-replacement hydrate sample

The two tests consisted of a first phase, during which methane hydrates were formed, and a second, where the CO2/CH4 exchange was performed. Before injecting methane, the temperature was brought at 2 – 2.5 °C. The injection of gas occurred from the bottom, according to the scheme shown in Figure 2. The trend of pressure was used to control the evolution of the formation of methane hydrates. The stabilization of pressure allows to establish the ending of this initial phase.

The following replacement phase was carried out in two different ways: via depressurization and via thermal stimulation.

Using the depressurization process, the pressure was decreased about some bars, in order to produce a configuration of instability for methane hydrates. At the same time, the injection and ejection valves were opened and the gaseous phase, existing upon methane hydrates was replaced with a new CO2/CH4 mixture. To do this, a flow of pure carbon dioxide was inserted in the reactor, while a mixture containing both the species was ejected. Thanks to this solution, it was possible to produce a gaseous phase having a concentration in CO2 up to 80 vol%. It was preferred to carry out the replacement process with a mixture of both species instead of pure carbon dioxide, to better represent what effectively happens in field applications. The reactor was then closed and a sample of gas was withdrawn to measure the composition of the gaseous phase immediately after the beginning of the replacement process. The analyses of gases were made with a gas – chromatograph, model VARIAN CP 4900 Micro-GC.

The process was kept free to evolve for a limited time period, whose duration was defined according to what observed in previous studies carried out with the same apparatus. Finally, the reactor was opened and the gaseous phase was completely removed. Then it was closed again and the solid phase dissociated completely and release the gases contained in it. A second gas chromatographic analysis allowed to define the composition of hydrates formed during the experiment.

Thermal stimulation is based on increasing the local temperature while keeping the pressure substantially unchanged. By using the integrated coil, the internal temperature was quickly increased and, at the same time, carbon dioxide was injected in the system (the same procedure, described in the previous section, was followed). Two gas analyses were made: the first to measure the composition in the gaseous phase before the replacement and the second to evaluate the composition of hydrates at the end of the process. Except for the solution adopted to vary the local thermodynamic conditions, the same procedure of the previous section was followed.

Figures 3 and 4 show the samples produced in the described reactor and used for RAMAN and SEM analyses. To produce samples, the casing was built via 3D printing.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Hydrate samples in 3D printed casing.



Figure 4. Hydrate samples.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Conclusion

For the purpose of the research activities in the National Project PRIN 2017 “Methane recovery and carbon dioxide disposal in natural gas hydrate reservoirs”, a lab-scale reactor is used to produce hydrate samples for RAMAN and SEM analysis. The produced samples approximate the composition and morphology of natural and porous sediment containing CO_2-CH_4 hydrates (post replacement analyses). The casing was realized via 3-D printing, to ensure the reproducibility and similarity of samples.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the Italian Ministry of University and Scientific Research for financially supporting the PRIN 2017 project “Methane recovery and carbon dioxide disposal in natural gas hydrate reservoirs”.

References

1. Sloan ED, Koh CA. Clathrate hydrates of natural gases. Third Ed, CRC Press, Boca Raton, FL USA, (2007).
2. Li XY, Li XS, Wang Y, Liu JW, Hu HQ. The optimization mechanism for gas hydrate dissociation by depressurization in the sediment with different water saturations and different particle sizes. Energy, 215 (2021) 119129.
3. Li XS, Xu CG, Zhang Y, Ruan XK, Li G, Wang Y. Investigation into gas production from natural gas hydrate: a review. Applied Energy, 172 (2016) 286 – 322.
4. Xuan K, Yi W, Li XS, Zhang Y, Chen ZY. Influence of heat conduction and heat convection on hydrate dissociation by depressurization in a pilot – scale hydrate simulator. Applied Energy, 251 (2019) 113405.
5. Wang Y, Feng JC, Li XS, Zhang Y. Experimental investigation of optimization of well spacing for gas recovery from methane hydrate reservoir in sandy sediment by heat stimulation. Applied Energy, 207 (2017) 562 – 572.
6. Feng JC, Wang Y, Li XS. Hydrate dissociation induced by depressurization in conjunction with warm brine stimulation in cubic hydrate simulator with silica sand. Applied Energy, 174 (2016) 81 – 91.
7. Tupsakhare SS, Castaldi MJ. Efficiency enhancements in methane recovery from natural gas hydrates using injection of CO_2/N_2 gas mixture simulating in – situ combustion. Applied Energy, 236 (2019) 825 – 836.
8. Gambelli AM, Rossi F. Natural gas hydrates: comparison between two different applications of thermal stimulation for performing CO_2 replacement. Energy, 172 (2019).
9. Wang Y, Feng JC, Li XS, Zhan L, Li XY. Pilot – scale experimental evaluation of gas recovery from methane hydrate using cycling – depressurization scheme. Energy, 160 (2018) 835 – 844.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

10. Hassanpouryouzband A, Joonaki E, Farahani MV, Takeya S, Ruppel C, Yang J, English NJ, Schicks JM, Edlmann K, Mehrabian H, Aman ZM, Tohidi B. Gas hydrates in sustainable chemistry. Chem. Soc. Rev., 15 (2020) 5225.
11. Gambelli AM, Tinivella U, Giovannetti R, Castellani B, Giustiniani M, Rossi A, Zannotti M, Rossi F. Observation of the main parameters influencing the formation of gas hydrates. Energies, 14 (2021) 1803.
12. Ohgaki K, Inoue Y. A proposal for gas – storage on the ocean – floor using gas hydrates. Kagaku Kogaku Ronbun, 17 (1991) 1053 – 1055.
13. Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: current knowledge and issues. Journal of Petroleum Science and Engineering, 51 (2006) 169 – 184.
14. Seo Y, Lee S, Lee J. Experimental verification of methane replacement in gas hydrates by carbon dioxide. Chem. Eng. Trans., 32 (2013) 163 – 168.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Goldfish as a bioindicator of the water quality and health of Trasimeno Lake ecosystem

Francesco Agnetti[1], Arianna Piersanti[1], Rossana Roila[2], Andrea Valiani[1], David Ranucci[2], Tamara Tavoloni[1], Raffaella Franceschini[3], Raffaella Branciari[2]

[1] Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche, "Togo Rosati", Via Salvemini 1, 06126 Perugia (PG), Italy
[2] Dipartimento di Medicina Veterinaria, Università degli Studi di Perugia, Via San Costanzo 4, 06126 Perugia (PG), Italy
[3] Dipartimento di Ingegneria della Sostenibilità, Università degli Studi Guglielmo Marconi, Via Plinio 44, 00193 Roma, Italy

***** Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: raffaella.branciari@unipg.it

Abstract: The pollution of aquatic environments is a global concern that can impact also the presence of aquatic microorganism and parasite. The objective of this study was to assess the health status of Trasimeno lake ecosystem evaluating the presence of old and new generation pollutants, microorganisms, parasites in targeted fish species. Goldfishes were collected by local official competent authorities from fishermen and sent to the official local laboratory. The results of the analysis and the observation revealed very low values of toxicologically relevant contaminants in Trasimeno Lake, indeed the concentrations of the tested chemical contaminant were lower than the ranges recorded in other European water environments. The examined fishes didn't show pathognomonic lesions; the microbial analysis revealed only the presence of Aeromonas sobria even though its presence was limited to a specific time period.

Keywords: chemical contaminant, Aeromonas sobria

1. Main information

Fish are an important source of n-3 polyunsaturated fatty acids, these fatty acids are considered to be important to human health, and substantial benefits are reported in relation to diseases of the cardiovascular system, with guidelines recommending the use of these fatty acids in some cardiac

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

disorders [1-2]. Marine fish generally contain a higher percentage of n-3 polyunsaturated fatty acids than freshwater fish [3]. Nevertheless several author [4-5] found that some freshwater fishes, likewise marine fish, possess a higher content of n-3 PUFA, such as eicosapentaenoic acid (EPA), and docosahexaenoic acid (DHA). EPA, and DHA in the edible meat and related this to the food habits and trophic levels of the fishes. Despite the fact that Fish consumption has a beneficial effect on human health , some concerns have been raised in relation to the presence of undesired chemical pollutants in fish meat such as heavy metals, methyl mercury (MeHg), polychlorinated biphenyls (PCBs), dioxins, and dioxin like contaminants (DLCs), organochlorine pesticides (OCPs) and other environmental contaminants [6-8]. Fish products, indeed, are particularly susceptible to contamination, especially those from inland ecosystems characterized by slow water exchange and elevate anthropization reducing the possibility of using fish for human consumption [9].

Constant monitoring of the lacustrine fauna could be a useful tool to monitor health state of water, as well as to provide guarantees of healthiness of fish captured for daily consumption.

The objective of this study was to assess the health status of Trasimeno lake ecosystem evaluating the presence of old and new generation pollutants, microorganisms, parasites in targeted fish species.

Material and Methods

Aquatic environment

Trasimeno Lake (Umbria, Italy; 43°9’11’’ N -12°15’ E) Figure 1 is the largest laminar lake in Italy and, is the fourth for the extension among the biggest Italian lakes; furthermore in spite of its large size (about 128 km^2), it is considered quite shallow (average depth: 4.72 m; max. depth: 6.3 m). This Umbrian lake is characterized by a remarkable naturalistic importance as it is, indeed, since the XX century ,the composition of Trasimeno Lake fauna, has changed considerably due to several factors such as eutrophication, pollution, significant hydrologic fluctuations and the introduction of allochthonous species. Actually the fish fauna, comprises 21 species dominated by those belonging to the Cyprinidae Family [10]. The fish population in Lake Trasimeno, as in the rest of the River Tiber basin, is compromised by the presence of exotic species, of which the goldfish is one of the most abundant. The presence of the Goldfish (Carassius auratus) in trasimeno lake is a consequence of human introduction, known as a hazardous species for native fish communities because can change the flow of nutrients in the entire ecosystem by re-suspending nutrients[10]. An other unfavorable aspect is that the sex ratio proved to be extremely unbalanced (1:19 in favour of females) and the growth can be deemed rapid [10].

The Goldfish choice as bioindicator

Fish is considered one of the ultimate "targets" of toxic pollution, among aquatic animals [11]. Actually Fish is widely used to define the quality of the aquatic environment and, consequently can be considered a bioindicator of environmental pollution. Biological monitoring is a method of assessing water quality through the response of biological groups to changes in environmental

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

conditions. Therefore, today one of the most crucial tasks is to find and implement inexpensive and effective methods of environmental indicators. The choice of the bioindicator is crucial for establishing the model approach for biomonitoring. Some authors recommend to use those species of fish that occupy different acquatic environment [12]. One such species may be the Goldfish, which is an component of the fish communities of most water bodies worldwide. It is an excellent biological model for toxicological research, this is evidenced by its effectiveness in adapting to a variety of diets, high resistance to disease, rapid reproduction and high level of tolerance against heavy metals.

Analysis of sample

Goldfish were collected by fisherman and sent to the official local laboratory located at Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche "Togo Rosati". Sampling was done randomly.

Fish muscles were analysed to assess heavy metals, methyl mercury, polychlorinated biphenyls, dioxins, and dioxin like contaminants (DLCs), brominated flame retardant with the methods described by Roila et al. and Branciari et al. [13-14]. Furthermore Goldfish were individually subjected to necroscopic examination, to highlight any external and / or visceral macroscopic lesions. Microbial analysis were also carried out to isolate the main freshwater bacterial pathogens. Visual inspection of abdominal cavity, muscle and viscera was conducted to detect the presence of Eustrongylides spp. Finally end-point PCR was carried out for the evaluation of viral agents of cyprinids such as : virus of Spring viraemia of Carp, koi Herpesvirus, carp Edema virus, Cyprinid Herpes virus type 2.

2. Results and discussion

PCBs were detected in 100% of the samples analyzed; nevertheless, all samples showed a low contamination level, well below the European maximum limits. In contrast to this study, data reported for other countries (Belgium, Germany, France, and the Netherlands) show that the EU limit set for PCB was exceed in certain species such as eel, which thereby represents a risk to human health. Although PCBs were banned in most developed countries in the 1970s, the extensive and careless use of these compounds for almost 50 years and their persistence have resulted in widespread contamination of the environment and chronic pollution of terrestrial and aquatic ecosystems in Europe [15–16].

Metal pollutants were also found nevertheless the content was well below the maximum limits set by the European Commission (1881/2006) [17]. Previous study evidence that metals are low in several species studied in Trasimeno lake and the concentration in fish tissues are irrespective of species or lipid content.

Trace of flame retardants were found in some sample of Goldfish indeed the concentrations found in the present study are lower than those observed in several studies conducted in fresh water species from different countries.

The results of the microbial analysis show the presence of *Aeromonas sobria* isolated from the specimens in a specific season. Clinical signs of infected Goldfish and post mortem examination revealed that fish showed dark body coloration, exophthalmia with corneal opacity and hemorrhage

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

in the eyes, loss of balance, frayed and torn tail and fins, scale detachment and skin discoloration with scattered hemorrhages all over the body surface with slight ascites, petechial hemorrhages were seen on the ventral abdominal wall and the base of the fins and deep ulcer. The clinical signs and post mortem examination were the same as described by Matter et al [18]. who determine the clinical alteration due to Aeromonas species infection which include skin alterations as body color, presence of opaque films, exophthalmia, raised and detached scales, eroded opercula, redness, ulcers, body swellings, clubbed and abraded gills, fins and tail.

Aeromonas sobria is considered one of the main causes of economic losses and fish mortalities especially for certain species, the widespread of this microorganism in certain acquatic ecosystem is a consequence of the climate change worldwide and the change in water temperature [19]. No parasite belonging to Eustrongylides spp genus or virus infecting Cyprinidae were found in Goldfish.

Overall, as a consequence of present study results, it can be concluded that Trasimeno lake is not affected by a significant anthropic impact probably because of the absence of a tributary and industrial pressure; climate change indeed creates more favorable conditions for certain microorganism such as Aeromonas spp to proliferate in lentic water negatively affecting some fish population.

Figure 1. Clinic signs of *Aeromonas sobria* in Goldfish



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

References

1. Saravanan, P., Davidson, N. C., Schmidt, E. B., and Calder, P. C. 2010. Cardiovascular effects of marine omega-3 fatty acids. Lancet 376: 540–550.
2. Calder, P. C. (2014). Very long chain omega-3 (n-3) fatty acids and human health. *European journal of lipid science and technology*, *116*(10), 1280-1300.
3. Rahman, S. A., Huah, T. S., Hassan, O., and Daud, N. M. 1995. Fatty acid composition of some Malaysian freshwater fish. Food Chem. 54: 45–49. Li, G.; Sinclair, A.J.; Li, D. Comparison of Lipid Content and Fatty Acid Composition in the Edible Meat of Wild and Cultured Freshwater and Marine Fish and Shrimps from China. J. Agric. Food Chem. **2011**, 59,1871–1881. [CrossRef] [PubMed]
4. Łuczy´ nska, J.; Paszczyk, B.; Łuczy´ nski, M.J. Fatty Acid Profiles in Marine and Freshwater Fish from Fish Markets in Northeastern Poland. Arch. Pol. Fish. **2014**, 22, 181–188. [CrossRef]
5. Domingo, J.L. Nutrients and Chemical Pollutants in Fish and Shellfish. Balancing Health Benefits and Risks of Regular Fish Consumption. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. **2016**, 56, 979–988.
6. Hoekstra, J.; Hart, A.; Owen, H.; Zeilmaker, M.; Bokkers, B.; Thorgilsson, B.; Gunnlaugsdottir, H. Fish, Contaminants and Human Health: Quantifying and Weighing Benefits and Risks. Food Chem. Toxicol. **2013**, 54, 18–29. [CrossRef]
7. Łuczy´ nska, J.; Paszczyk, B. Health Risk Assessment of Heavy Metals and Lipid Quality Indexes in Freshwater Fish from Lakes of Warmia and Mazury Region, Poland. Int. J. Environ. Res. Public Health **2019**, 16, 3780. [CrossRef]
8. Orban, E.; Nevigato, T.; Masci, M.; Di Lena, G.; Casini, I.; Caproni, R.; Gambelli, L.; De Angelis, P.;
9. Rampacci, M. Nutritional Quality and Safety of Perch (Perca fluviatilis) from Three Lakes of Central Italy.Food Chem. **2007**, 100, 482–490. [CrossRef
10. Lorenzoni, M.; Ghetti, L.; Pedicillo, G.; Carosi, A. Analysis of the Biological Features of the Goldfish Carassius auratus auratus (Linnaeus, 1758) in Lake Trasimeno (Umbria, Italy) with a View to Drawing up Plans for Population Control. Folia Zool. **2010**, 59, 142–156. [CrossRef]
11. Prychepa, M., Hrynevych, N., Martseniuk, V., Potrokhov, O., Vodianitskyi, O., Khomiak, O., ... & Makhorin, H. (2021). Rudd (Scardinius Erythrophthalmus l., 1758) as a bioindicator of anthropogenic pollution in freshwater bodies. *Ukrainian Journal of Ecology*, *11*(2), 253-260.
12. Prychepa, M.V., Potrokhov, O.S., & Zin'kovskiy, O.G. (2019). Peculiarities of Biochemical Response of Fish to Anthropogenic Load under Conditions of Urbanization. Hydrobiological journal, 55(3), 44–52. doi: 10.1615/HydrobJ.v55.i3.50
13. Branciari, R.; Franceschini, R.; Roila, R.; Valiani, A.; Pecorelli, I.; Piersanti, A.; Haouet, N.; Framboas, M.; Ranucci, D. Nutri-tional value and contaminant risk assessment of some commercially important fishes and crawfish of Lake Trasimeno, Italy. Int. J. Environ. Res. Pub Health 2020, 17, 2545. [CrossRef]
14. Roila, R., Branciari, R., Ranucci, D., Stramenga, A., Tavoloni, T., Stecconi, T., ... & Piersanti, A. (2021). Risk Characterization and Benefit–Risk Assessment of Brominated Flame Retardant in Commercially Exploited Freshwater Fishes and Crayfish of Lake Trasimeno, Italy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *18*(16), 8763.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

15. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Scientific opinion on polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in food. EFSA J. 2011, 9, 2156. [CrossRef]
16. Tavoloni, T.; Stramenga, A.; Stecconi, T.; Siracusa, M.; Bacchiocchi, S.; Piersanti, A. Single sample preparation for brominated flame retardants in fish and shellfish with dual detection: GC-MS/MS (PBDEs) and LC-MS/MS (HBCDs). Anal. Bioanal. Chem. 2019, 412, 397–411. [CrossRef]
17. European Commission. Commission regulation (EU) no 1259/2011 of 2 December 2011 amending Regulation (EC) no 1881/2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstu_s as regards dioxin-like PCBs non-dioxin-like PCBs. O_. J. Eur. Union **2011**, 320, 18–23.
18. Matter, A. F., El Asely, A. M., Shaheen, A. A., El-Gawad, E. A. A., El-Abd, H., & Abbass, A. A. (2018). Phenotypic and molecular characterization of bacterial pathogens isolated from diseased freshwater fishes. *Int. J. Fish. Aquat. Stud*, *6*, 34-41.
19. Austin, B., & Austin, D. A. (2012). Aeromonadaceae representatives (motile aeromonads). In *Bacterial Fish Pathogens* (pp. 119-146). Springer, Dordrecht

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Micro interventi rigenerativi dello spazio pubblico Vision, interscalarità, interdisciplinarietà. Il caso di piazza Sant'Angela a Foligno

Paolo Verducci [1,*], Elisa Moretti [1], Valerio Palini [1] and Francesco Demma [1]

[1] Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Perugia, Via Oberdan, 119 - 06034 Foligno (PG)

* Autore di riferimento. E-Mail: paolo.verducci@unipg.it

Abstract: La pandemia da Covid-19 ha portato a una nuova visione dello spazio pubblico focalizzando l'attenzione sul ruolo che tale spazio potrà ricoprire nelle città del futuro, anche nel contesto del nuovo modello di "città intelligente" e con l'ausilio delle nuove tecnologie. La smart city non solo ha l'ambizione di gestire le risorse in modo intelligente, mirando a trasformare la città esistente in una città economicamente sostenibile ed energeticamente autosufficiente, ma si propone anche come modello per rafforzare la qualità architettonica e urbana con particolare attenzione alla qualità della vita e ai bisogni dei cittadini. In tale contesto, la rigenerazione di una piccola piazza nel centro storico di Foligno si propone come un interessante caso studio: si propone una trasformazione leggera e poco impattante sul piano della modificazione dello spazio fisico, mettendo in campo soluzioni reversibili, intelligenti e flessibili. La proposta progettuale è stata pensata anche in termini di costi-benefici, quale modello che possa essere replicato. Nella nuova logica della città intelligente occorre sviluppare una capacità di design integrato dei concept applicativi che possano incontrare il consenso dei cittadini. In questo senso, le soluzioni e le strategie proposte si possono riassumere in: impostare un approccio flessibile alla progettazione architettonica e urbana, considerando la temporaneità come un valore; utilizzare efficientemente le risorse energetiche e quelle ambientali, affrontando il cambiamento climatico, le isole di calore urbane; utilizzare le tecnologie più avanzate come valore aggiunto, sviluppando soluzioni che garantiscano pari opportunità per tutti.

Keywords: pandemia; città; spazio pubblico; sostenibilità; smart city; rigenerazione urbana.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduzione

La condizione di impotenza determinata dal lockdown forzato ha innescato un processo critico che ha riguardato le nostre modalità di vita, le nostre consuetudini e la città nel suo complesso. Come sappiamo infatti le misure adottate per contenere la pandemia Covid-19 hanno portato a una limitazione delle libertà fondamentali, con particolare attenzione alle prescrizioni sul distanziamento fisico e sullo spazio sociale, aprendo a una nuova visione dello spazio pubblico e sul ruolo che tale spazio potrà ricoprire nelle città del futuro. Una riflessione che non può non incrociare il concetto di "città intelligente" e analizzare il ruolo che le nuove tecnologie potranno rivestire nel futuro prossimo. Come sappiamo infatti la smart city è un modello di città che si propone di gestire le risorse in modo intelligente, mirando a trasformare la città esistente in una città economicamente sostenibile ed energeticamente autosufficiente; ma nella sua ultima versione si propone anche come modello per rafforzare la qualità architettonica e urbana, ritenendo centrali le esigenze dei cittadini e cercando di migliorare la qualità della vita grazie all'utilizzo di soluzioni e sistemi tecnologici connessi e integrati tra loro.

In tale contesto, la rigenerazione di una piccola piazza nel centro storico di Foligno si propone come un interessante caso studio per una diretta applicazione delle strategie di Progetto. Il progetto nasce da una specifica richiesta della Fondazione Carifol di Foligno, proprietaria sia dello spazio urbano e sia degli edifici che la perimetrano su due lati della piazza: Palazzo Cattani a est e il complesso dei Casalini a sud. Attualmente la piazza si presenta come un luogo inadeguato e poco attrattivo, sia per i turisti e sia per eventuali associazioni interessante ad organizzare eventi e iniziative di carattere culturale nel rispetto delle norme covid.

2. Rigenerazione dello spazio pubblico in ambito smart city

Parlare di rigenerazione urbana significa ripartire dalla famosa "Dichiarazione di Toledo".

Il 22 giugno 2010, a Toledo, in Spagna, ebbe luogo la riunione informale dei Ministri europei responsabili per lo sviluppo urbano degli Stati Membri dell'Unione Europea (UE) sul tema della "rigenerazione urbana integrata", in risposta all'invito fatto dalla Presidenza spagnola del Consiglio dell'Unione Europea.

In quell'occasione furono riconsiderate alcune questioni centrali sul rapporto tra dimensione sociale e dimensione urbana.

Due strade da percorrere in parallelo.

Successivamente, l'irrompere della dimensione ambientale e, in particolare, la valutazione delle aree metropolitane come attori chiave per la sostenibilità globale e per la lotta al cambiamento climatico, spostò l'asse di riferimento verso la riduzione dei gas-serra, l'aumento della percentuale di fonti rinnovabili, l'aumento dell'efficienza energetica e la ricerca di un'eco-efficienza dei nuovi sviluppi urbani (ad esempio, attraverso lo sviluppo di nuovi "eco-quartieri"), quale condizione necessaria, ma non sufficiente per una rigenerazione integrata.

In questa 'battaglia' la riduzione del consumo di territorio e il riuso dei suoli (con la riconversione o

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

il riutilizzo di aree dismesse, abbandonate o non utilizzate, ecc.) rappresentano due strategie fondamentali per combattere la dispersione insediativa riducendo le emissioni di CO_2.

Per affrontare questa complessità occorre cambiare paradigma, passando da una visione scalare ad una transcalare e interdisciplinare, volta a cogliere i requisiti di sostenibilità ambientale in modo integrale: dalla riduzione del consumo di suolo alle questioni climatiche, dall'impatto locale a quello globale, dalla scala dell'edifico a quella territoriale, dall'aspetto economico a quello estetico-formale, dove il concetto di riuso e di riciclo in architettura può contribuire, come avvenuto in altri settori dell'economia, a sviluppare un'innovazione ambientalmente consapevole, attraverso la riprogettazione complessiva non solo di ex_aree industriali ed ex_contenitori urbani, ma anche del sistema produttivo nel suo complesso, comprensivo del prodotto edilizio e del suo assemblaggio/disassemblaggio del sistema edificio.

Attualmente, le dinamiche innescate dalla situazione pandemica ha ulteriormente accentuato la necessità di mettere mano alla riqualificazione di ampie porzioni di territorio e di strutture urbane complesse.

Occuparsi di rigenerazione urbana in ambito smart city significa scomporre la città in tre principali livelli: esistente, in trasformazione, virtuale.

Significa 'ricomporre' lo strato della città fisica con lo strato della città virtuale, nel quale la 'progettazione architettonica/urbana' si rendono disponibili a facilitare la 'ricomposizione' fra gli strati 'fisici' e quelli 'digitali'.

Per conseguire il 'risultato' occorre lavorare su tre fronti: a. costruire una visione (tecnico politica a breve-medio termine) supportata da una fattibilità economica fondamentale per finalizzare i progetti; b. immaginare un sistema di 'strategie intelligenti'; c. elaborare un elenco di azioni (progetti specifici).

La metodologia vincente sarà elaborare 'singoli' progetti, tenendo ben presente la strategia globale di riqualificazione. In questo senso si possono sviluppare progetti relativi a smart street, o smart park, quartieri smart, smart building, piazze smart, o smart village.

Tali progetti pilota servono a valutare sul campo le prestazioni ottenibili, i rapporti costi/benefici, la risposta della comunità a mettere a punto un modello che possa essere replicato sull'intera città e funga da coagulatore della filiera produttiva.

Non è pensabile di affrontare oggi lo sviluppo di una città intelligente ex-novo, ma occorre invece creare modelli modulari, ovvero occorre sviluppare una capacita di design integrato dei concept applicativi, dimostrarli su scala reale urbana ed infine modellarne i modelli di business che possano incontrare il consenso e la fiducia dei cittadini garantendo la loro partecipazione e supportare la penetrazione applicativa sul mercato e nelle città.

3. Rigenerazione urbana e cambiamento climatico

La comunità scientifica internazionale, come espresso puntualmente dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) nei vari report annuali, è ormai unanime sull'influenza dell'attività antropica sull'aumento del contenuto di CO_2 (e di altri gas serra) in atmosfera e sul conseguente incremento delle temperature medie globali.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Il cambiamento climatico costituisce, per il genere umano, al tempo stesso una minaccia e un'occasione di mettersi alla prova nel contesto del XXI secolo caratterizzato da una considerevole incertezza e da una rapida e continua evoluzione.

A causa dell'urbanesimo, fenomeno che consiste nell'esodo della popolazione agricola nei centri urbani, gli effetti del cambiamento climatico nelle città coinvolgono sempre più persone, spesso con un decadimento della qualità della vita.

Ciò presuppone un drastico ripensamento dell'approccio che fino a oggi ha caratterizzato la ricerca e la progettazione in ambito urbano.

Nelle città il fenomeno isola di calore rende le aree densamente edificate più calde rispetto alle aree rurali circostanti, questo dipende da diversi fattori tra i quali: ridotta evaporazione dell'acqua, minore ombreggiatura da parte della vegetazione, proprietà fisiche dei materiali da costruzione che assorbono e riemettono l'energia solare incidente.

Questo fenomeno ha risvolti negativi principalmente nella stagione estiva soprattutto considerando il continuo aumento delle temperature medie a causa del cambiamento climatico, questi due aspetti infatti si sovrappongono surriscaldando sempre più le aree urbane.

Il surriscaldamento delle città in estate provoca innanzitutto un aumento di fabbisogno energetico per il raffrescamento degli edifici che implica un aumento di costi, emissioni di gas serra e delle temperature esterne dovute al trasferimento di calore verso l'esterno degli edifici (instaurando un circolo vizioso).

L'incremento delle temperature in combinazione con l'inquinamento atmosferico e con le ondate di calore, con frequenza in aumento sempre a causa del cambiamento climatico, hanno un'altra grave conseguenza: l'aumento della mortalità per malattie cardiovascolari e respiratorie soprattutto nella popolazione più vulnerabili (anziani e soggetti affetti da patologie croniche).

In questo scenario è evidente l'importanza dell'applicazione di strategie di mitigazione degli effetti del cambiamento climatico in tutti gli interventi di riqualificazione urbana attraverso linee guida generali che possano essere messe in atto nei singoli progetti.

Le azioni maggiormente efficaci per questo scopo sono: 1. riduzione delle superfici impermeabili - *de-sealing* (aumentando complessivamente la resilienza ai cambiamenti climatici e assorbendo calore attraverso l'evaporazione dell'acqua trattenuta); 2. inserimento di aree vegetate e alberature (incrementando ombreggiatura ed evapotraspirazione); 3. introduzione dell'elemento acqua (migliora il microclima grazie all'assorbimento di calore); 4. impiego di materiali ad alto albedo - *cool materials* (sfruttando la maggiore riflettanza solare delle superfici).

In generale elementi dell'infrastruttura verde come i tetti verdi, le pareti verdi e le foreste urbane forniscono molteplici servizi ecosistemici di regolazione dell'ambiente urbano.

Questi includono la gestione delle acque piovane, il controllo dell'isola di calore, il valore estetico e il miglioramento della qualità dell'aria e dell'acqua.

La ricerca nel campo ha dimostrato il potenziale dei tetti verdi e delle foreste urbane come strategia per adattare gli ecosistemi urbani agli impatti dei cambiamenti climatici.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Rigenerazione urbana e autosufficienza energetica

Il Green Deal europeo impone una forte accelerazione del processo di transizione ecologica, con l'obiettivo ambizioso di riduzione del 55% delle emissioni di gas serra entro il 2030 % rispetto al 1990 (Pacchetto climatico "Fit for 55") e di divenire al 2050 "il primo continente climaticamente neutro". Le città sono responsabili di circa il 75% del consumo totale d'energia e dell'80% delle emissioni dei gas serra.

Le città sono quindi un importante terreno di sfida per la transizione ecologica, ma anche un'innegabile opportunità per far avanzare la transizione sostenibile. Gli sforzi per accelerare la diffusione delle rinnovabili nelle città e ottimizzare la gestione e l'uso dell'energia sono guidati non solo da obiettivi ambientali (lotta l'inquinamento atmosferico locale; mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici), ma anche economici (scenari internazionali, sviluppo) e sociali (riduzione povertà energetica).

In tale contesto un progetto di rigenerazione urbana, che ha come obiettivo principale proprio quello di migliorare la qualità della vita urbana, non può che ispirarsi ai principi della sostenibilità e dell'autosufficienza energetica. Gli spazi urbani possono altresì diventare un laboratorio urbano per la gestione dell'energia, completamente autosufficiente e interattivo, che porta i cittadini a riappropriarsi degli spazi della comunità e allo stesso tempo educa ad un uso consapevole delle fonti energetiche.

La smart city oltre a proporre una realtà urbana intelligente deve mettere in primo piano la sostenibilità energetica, l'utilizzo di fonti rinnovabili, la riduzione dei consumi energetici e la diminuzione delle emissioni di CO_2. Per fare questo, vi sono molteplici soluzioni e tecnologie, partendo dai più comuni pannelli solari, passando per i sensori IoT, fino alla creazione di comunità energetiche, le quali, attraverso lo scambio e la gestione condivisa dell'energia, riescono a essere autonome e quindi energeticamente sostenibili.

Il nuovo paradigma energetico prevede una «generazione distribuita», caratterizzata da un rapido incremento della produzione da fonti di energia rinnovabili, attraverso impianti di piccola dimensione diffusi nel territorio, che ha costituito dunque una fase di transizione da un sistema di generazione dell'energia centralizzato ad uno sempre più distribuito. In tale contesto le città e gli spazi pubblici possono prevedere sistemi di generazione di energia rinnovabile, con soluzioni anche innovative.

Un'altra soluzione è rappresentata dalla Comunità Energetica Rinnovabile, un nuovo modello di gestione energetica, attraverso il quale più soggetti si uniscono con l'intento di produrre, consumare e vendere energia da fonti rinnovabili, traendone benefici sociali, ambientali ed economici. Essa si basa sulla diffusione di impianti di piccola scala, spesso integrati da sistemi di accumulo, al fine di valorizzare il più possibile l'energia autoconsumata. L'investimento tali schemi di gestione dell'energia non solo faciliterebbe la diffusione e l'implementazione di fonti di rinnovabili, ma garantirebbe anche lo sviluppo di un modello di consumo virtuoso, in grado di sfruttare al massimo le risorse di un territorio. Inoltre aprirebbe la strada ad un nuovo modello di gestione dell'energia, basato su un autoconsumo non più solo individuale, ma svolto in forma collettiva.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1. Esempi di sistemi di generazione distribuita di energia rinnovabile



5. Caso studio: il recupero di Piazza Sant'Angela a Foligno

Il progetto di riqualificazione di Piazza Sant'Angela, ubicata nel centro storico della città di Foligno e di proprietà della Fondazione Carifol, si basa su una metodologia progettuale che prevede come vision quella di creare uno spazio pubblico polifunzionale accessibile, riqualificato architettonicamente e funzionalmente attraverso l'impiego di tecnologie in ottica smart city. Per conseguire tale vision sono stati fissati i seguenti obiettivi progettuali: la gestione e riqualificazione dello spazio pubblico in ottica post pandemica, il miglioramento dell'accessibilità urbana, il miglioramento della sicurezza e della gestione dello spazio pubblico, la creazione di un modello di piazza smart replicabile.

Seguendo i principi proposti nel paragrafo 4, il progetto prevede un sistema di autosufficienza energetica che configuri il luogo come autonomo produttore e consumatore di energia attraverso fonti rinnovabili e quindi sostenibili. La piazza deve quindi avere un bilancio energetico «zero» su base annua, prevedendo di produrre energia da fonti rinnovabili per compensare i consumi degli elementi

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

a servizio dello spazio pubblico (illuminazione, sistema audio-video, colonnina ricarica, totem, fontane, ecc.). Dal punto di vista tecnologico si prevede l'installazione di pali multifunzione con fotovoltaico integrato (moduli ad alta efficienza verticali) e possibilità di accumulo e/o installazioni con vetrate integrate con moduli fotovoltaici. Nel caso di una producibilità inferiore ai valori consumati, visti i limiti spaziali e i vincoli estetici, saranno valutate strategie alternative come la produzione di energia da solare fotovoltaico in edifici prossimi al luogo in esame mediante il modello della comunità energetica rinnovabile.

Figura 2. L'intervento è costituito da una pedana in teak nella parte centrale, sovrapposta alla pavimentazione lapidea esistente. La pedana è delimitata da cinque aree verdi e una fontana che rappresentano strategie di mitigazione dell'effetto isola urbana di calore. Nella piazza sono presenti panchine smart, un totem interattivo e pali multifunzione, che offrono servizi intelligenti e flessibili in grado di migliorare la fruibilità dello spazio pubblico.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 3. Le cinque aree verdi previste dal progetto occupano una superficie totale di circa 80 m^2 e permettono il miglioramento del microclima urbano e della qualità dell'aria, filtrando il particolato sottile e assorbendo i composti organici volatili (COV) e la CO_2.



Figura 4. La piazza potrà essere utilizzata per proiezioni all'aperto attraverso uno schermo motorizzato e un proiettore. Ai lati della pedana sono presenti dei blocchi polifunzionali contenti le sedute espandibili utilizzabili e modellabili secondo le necessità.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

6. Conclusioni

Il lavoro presenta un nuovo approccio integrato e multidisciplinare per il progetto di interventi di rigenerazione urbana su scala locale, grazie ad un caso di studio rappresentato da una piazza del centro storico del comune di Foligno.

In questo senso, le soluzioni e le strategie proposte si possono riassumere in:

1. impostare un approccio flessibile alla progettazione architettonica e urbana, considerando la temporaneità come un valore;
2. utilizzare efficientemente le risorse energetiche e quelle ambientali, affrontando il cambiamento climatico, le isole di calore urbane;
3. utilizzare le tecnologie più avanzate come valore aggiunto, sviluppando soluzioni che garantiscano pari opportunità per tutti.

L'approccio progettuale ha anche l'obiettivo di configurare il luogo come autonomo produttore e consumatore di energia attraverso fonti rinnovabili e quindi sostenibili e allo stesso tempo come luogo dove implementare strategie per la mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

La proposta progettuale proposta si presenta come un modello di micro intervento rigenerativo dello spazio pubblico che possa essere replicato anche in altri luoghi o in altre città.

References

1. AA.VV. *Smart City. Città, tecnologia, comunicazione*; Fausto Lupetti: Bologna, Italy, 2014.
2. AA.VV. *Progettare e riqualificare per l'efficienza energetica*; Maggioli Editore: San Marino, 2013.
3. Bauman, Z. *Globalizzazione e glocalizzazione*; Armando Editore: Roma, Italy, 2005.
4. Bauman, Z. *Modernità liquida*; Editore Laterza: Roma, Italy, 2011.
5. Bauman, Z. *Voglia di comunità*; Editore Laterza: Roma, Italy, 2007.
6. Gregotti, V. *Il territorio dell'architettura*; Feltrinelli Universale Economica: Milano, Italy, 2014.
7. Koolhaas, R. The Smart Landscape: Intelligent Architecture. *Artforum*, 2015, Vol. 53. Available online: http://artforum.com/inprint/issue=201504&id=50735 (accessed on 20/04/2022).
8. Lovins, A. *Reinventare il fuoco. Soluzioni vincenti per il business della nuova era energetica*; Edizioni Ambiente: Milano, Italy, 2012.
9. Manigrasso, M. Verso la Città ad_Attiva. Rispondere ai cambiamenti climatici attraverso una nuova concezione del tempo nei processi e negli esiti progettuali. Atti della XV Conferenza Nazionale SIU *Planum. The Journal of Urbanism*, 2012n. 25, vol.2/2012 | ISSN 1723-0993.
10. Mezzi, P.; Pellizzari, P. *La Città Resiliente: Strategie e azioni di resilienza urbana in Italia e nel Mondo*; Edizioni Altraeconomia: Milano, Italy, 2016.
11. Purini, F. *La misura italiana dell'architettura*; Editore Laterza: Roma, Italy, 2008.
12. Ratti, C.; Mattei, M.G. *Smart City, Smart Citizen*; Egea: Milano, Italy, 2014.
13. Ratti, C.; Townsend, A. The social nexus. *Scientific American*, 2011, Vol.305(3), (pp.42-48).
14. Ricci, M. *Nuovi Paradigmi*; ListLab Laboratorio internazionale Editoriale: Trento, Italy, 2012.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

15. Rizzi, F. *Smart City, smart community, smart specialitation per il manegement della sostenibilità*; Franco Angeli: Milano, Italy, 2013.
16. Verducci, P.; Baquè, M., a cura di, *Progettare città intelligenti*; Gangemi editore: Roma, Italy, 2017.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare la Fondazione Carifol di Foligno per la collaborazione, per la disponibilità e la sensibilità verso i temi della qualità urbana, della sostenibilità ambientale e dell'autosufficienza energetica.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Life Cycle Assessment della filiera di trattamento di biomasse residuali: un caso studio

Alberto Brunetti[1], Maurizio Cellura[1], Francesco Guarino[1], Sonia Longo[1], Simona Rosaria La Mantia[1], Roberta Rincione [1]

[1] Università degli Studi di Palermo – Dipartimento di Ingegneria, Viale delle Scienze Ed.9, 90128 Palermo

***** Autore di riferimento. E-Mail: sonia.longo@unipa.it

Abstract: Il presente lavoro descrive i risultati dell'analisi di Life Cycle Assessement, sviluppata in accordo agli standard della serie ISO 14040, di un processo di trattamento di biomasse residuali di origine forestale da impiegare per la successiva valorizzazione energetica. L'analisi è riferita ad 1 kg di cippato, selezionato come unità funzionale. I confini del sistema hanno incluso le fasi di raccolta della biomassa residuale (strascico indiretto e diretto), cippatura della biomassa, raccolta e trasporto del cippato all'impianto di valorizzazione energetica. I risultati dello studio mostrano che la filiera in esame, con riferimento all'unità funzionale, causa un impatto di 0,027 kg CO_{2eq} e determina il consumo di 0,406 MJ di energia primaria. Un'analisi di dominanza ha consentito di identificare le fasi più impattanti della filiera produttiva. In dettaglio, le fasi che maggiormente contribuiscono agli impatti associati alla filiera di approvvigionamento sono lo strascico indiretto e la cippatura, responsabili, ciascuna, di circa il 42% delle emissioni di gas climalteranti e del consumo di energia primaria. Al fine di valutare la variazione degli impatti connessa alla distanza tra il luogo di produzione del cippato e quello di utilizzo è stata effettuata un'analisi di sensibilità, che ha evidenziato il ruolo della filiera corta nell'impiego di biomasse ai fini energetici caratterizzate da ridotti impatti energetico-ambientali. La ricerca è stata sviluppata nell'ambito del PRIN 2017: "BIOmasses Circular Holistic Economy APproach to EneRgy equipments (BIO–CHEAPER)" che ha tra gli obiettivi quello di valutare gli impatti energetico-ambientali connessi alla valorizzazione energetica di diverse tipologie di biomasse residuali.

Keywords: Life Cycle Assessment; biomassa residuale; cippato; energia primaria; gas climalteranti.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_046_pp_404

1. Introduzione

La possibilità di fornire energia pulita, economica e sicura e il raggiungimento di un'economia circolare a basse emissioni di carbonio sono aspetti fondamentali per il raggiungimento di due obiettivi che l'Europa intende raggiungere entro il 2050: emissioni nette zero di gas serra e dissociazione della crescita economica dall'uso delle risorse e dalla produzione di rifiuti [1].

Nel settore energetico, le risorse rinnovabili sono state riconosciute come una delle soluzioni più efficienti ed efficaci ai fini del raggiungimento di suddetti obiettivi [2].

Tra le risorse energetiche rinnovabili disponibili, la bioenergia può svolgere un ruolo fondamentale, in quanto può essere una soluzione affidabile sia per sostituire le fonti fossili nella gestione della domanda di energia sia per creare un'economia circolare (in particolare quando la biomassa impiegata ai fini energetici è di tipo residuale), permettendo dunque di disaccoppiare la produzione di energia dalle risorse primarie [3].

Al fine di valutare la sostenibilità energetico-ambientale della risorsa biomassa a fini energetici è importante effettuare studi di Life Cycle Assessment che consentano di identificare gli impatti incorporati nella supply chain di trasformazione della biomassa da rifiuto a risorsa energetica.

In questo contesto l'obiettivo dello studio è la valutazione degli impatti energetico-ambientali connessi alla produzione di cippato da biomasse residuali di origine forestale da impiegare per la successiva valorizzazione energetica.

Lo studio è sviluppato nell'ambito del progetto PRIN BIO–CHEAPER (BIOmasses Circular Holistic Economy APproach to EneRgy equipments), che ha tra gli obiettivi quello di valutare gli impatti energetico-ambientali connessi alla valorizzazione energetica di diverse tipologie di biomasse residuali.

2. LCA della filiera di trattamento di biomasse residuali

2.1 Obiettivo e campa di applicazione dello studio

Lo studio analizza la filiera di trattamento di biomassa residuale di origine forestale da impiegare per la successiva valorizzazione energetica e si prefigge di analizzare, secondo l'approccio di ciclo di vita, gli impatti energetico-ambientali connessi alla produzione di cippato dalle suddette biomasse.

Il cippato è ottenuto da un processo di trattamento dei residui forestali, denominato cippatura, mediante il quale i residui sono ridotti in scaglie generando un materiale omogeneo, che presenta una densità maggiore rispetto al residuo tal quale consentendo di semplificarne trasporto, movimentazione e di aumentare il carico utile del mezzo di trasporto.

La funzione del sistema di prodotto analizzato è la produzione di cippato, pertanto l'unità funzionale scelta è 1 kg di cippato.

I confini del sistema sono scelti con un approccio "from cradle to gate" e includono l'analisi delle fasi di raccolta della biomassa residuale (strascico indiretto e diretto), cippatura della biomassa, raccolta e trasporto del cippato all'impianto di valorizzazione energetica.

Nell'analisi sono stati inclusi tutti i processi di approvvigionamento degli input impiegati nelle diverse fasi della filiera produttiva (ad esempio, il gasolio per l'alimentazione della trattrice usata per

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

la raccolta). Il ciclo di vita dei macchinari utilizzati nelle varie unità di processo non è stato incluso nello studio poiché, considerando una vita utile dei macchinari superiore a 10 anni, il loro impatto sulla singola unità funzionale può considerarsi trascurabile. Inoltre, potendo assimilare la biomassa residuale a un rifiuto, si è applicato il principio "zero burden".

Le categorie di impatto selezionate per la valutazione delle prestazioni energetico – ambientali sono: consumo di energia primaria e potenziale di riscaldamento globale (GWP).

La stima del consumo di energia primaria è stata effettuata impiegando il metodo Cumulative Energy Demand (CED), che permette di valutare il consumo di risorse energetiche del sistema di prodotto lungo l'intero ciclo di vita considerando sia gli usi diretti di energia che quelli indiretti e suddividendo l'energia primaria in rinnovabile e non rinnovabile [4].

La categoria di impatto GWP, che considera la forzante radiativa lungo un orizzonte temporale di 100 anni, è stata stimata con il metodo ILCD 2011 Midpoint [5] [6], [7].

I dati secondari sono stati modellizzati attraverso l'impiego del database Ecoinvent [8].

2.2 Analisi di inventario

L'analisi di inventario ha previsto una raccolta ed elaborazione dei dati per ogni unità di processo coinvolta nella filiera di produzione del cippato.

2.2.1 Raccolta della biomassa

Le biomasse raccolte appartengono alla tipologia residuale di origine forestale costituita da necromassa, biomassa legnosa non vivente contenuta nella lettiera, sia essa in piedi, a terra o nel suolo, prodotta da eventi naturali o da passate utilizzazioni forestali.

La biomassa residuale di origine forestale viene raccolta in bosco mediante trattore e verricello (macchina impiegata nei cantieri forestali per la movimentazione di masse vegetali poste in posizioni non raggiungibili da mezzi semoventi).

Le modalità di concentramento e di esbosco sono:

- Strascico indiretto: il trattore rimane ferma e il concentramento si effettua per mezzo del verricello;
- Strascico diretto: condizione operativa in cui il carico si muove assieme al mezzo di traino (trattore e verricello).

Con riferimento allo strascico indiretto della biomassa residuale (uso del trattore munito di verricello) (Tabella 1), è stata calcolata una produttività di 1,35 t/h per l'esbosco munito di verricello forestale [9] e misurato un consumo medio di 4,6 l/h di gasolio [10]. Per potere valutare, oltre che della fase di strascico indiretto del residuo forestale, anche la movimentazione del legname verso l'imposto (strascico diretto), ossia l'esbosco vero e proprio, si è assunto che la distanza media di esbosco sia pari a 1.000 m [11].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 1. Dati sull'esbosco con trattore e verricello

Dati	Valore
Produttività media di esbosco con verricello [ton/h]	1,35
Consumo medio di gasolio [l/h]	4,6
Carico medio [ton]	0,6
Distanza media bosco-imposto [m]	1.000

Con riferimento ai dati secondari, il ciclo di vita del gasolio impiegato nel processo (potere calorifico inferiore di 44,4 MJ/kg), incluse le emissioni generate dal processo di raccolta con trattore e verricello, sono state modellizzate utilizzando il dataset "Diesel, burned in building machine processing". Lo strascico diretto della biomassa residuale dal luogo di raccolta all'imposto è stato modellizzato utilizzando il dataset "Transport, tractor and trailer, agricultural processing".

2.2.2 Cippatura

Il processo di cippatura è effettuato con una cippatrice di tipo semi-industriale, che ha un consumo medio di combustibile (gasolio) pari a 3,632 l/ton [12]. Il gasolio è stato modellizzato utilizzando il dataset "Diesel, burned in building machine {GLO}| processing".

2.2.3 Trasporto all'impianto

Il trasporto del cippato all'impianto può avvenire mediante l'utilizzo di un trattore dotato di rimorchio quando le distanze siano inferiori a 10 km o mediante l'utilizzo di un autocarro quando le distanze siano maggiori. La produttività del trasporto dipende da tre variabili chiave [13]: la distanza percorsa, la forma in cui la biomassa viene trasportata (tronchetti, ramaglia, cippato fresco) e il mezzo di trasporto impiegato.

Per modellizzare la fase di trasporto all'impianto di valorizzazione energetica della biomassa e per confrontare mezzi di trasporto impiegabili e potenziali distanze di approvvigionamento, sono stati analizzati gli scenari riportati in Tabella 2.

Tabella 2. Mezzi e distanze di trasporto del cippato alla centrale a biomassa

Mezzo di trasporto	Distanza imposto - centrale [km]	[ton*km]
Trattore con rimorchio	10	0,008
Autocarro	50	0,039
Autocarro	100	0,077

Gli impatti generati dal processo di trasporto sono stati modellizzati utilizzando il dataset "Transport, tractor and trailer, agricultural {RoW}| processing". Per valutare il trasporto con autocarro è stato considerato il dataset "Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4 {RER}| transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO4".

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.3 Analisi degli impatti e interpretazione dei risultati

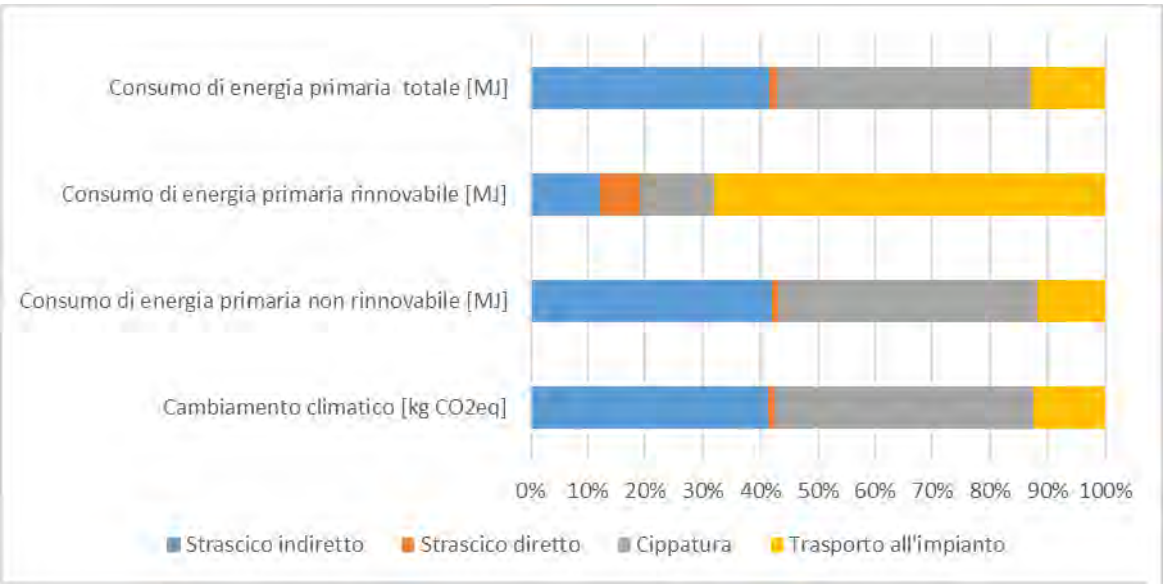
Nell'analisi degli impatti è stato definito un caso base, riferimento per condurre le analisi di sensibilità. Nello scenario base la fase di trasporto avviene con trattore e rimorchio su una distanza di 10 km. I risultati presentati in questo paragrafo riguardano gli impatti totali associati alla filiera di approvvigionamento (dalla raccolta della biomassa al trasporto del cippato all'impianto) (Tabella 3) con riferimento allo scenario base.

Tabella 3. Impatti totali dell'intero sistema connessi alla produzione di 1 kg di cippato

Indice	UM	Strascico indiretto	Strascico diretto	Cippatura	Trasporto all'impianto	Totale
Cambiamento climatico	$kgCO_{2eq}$	1,10E-02	3,30E-04	1,20E-02	3,30E-03	2,66E-02
Consumo di energia primaria, non rinnovabile	MJ	1,67E-01	4,70E-03	1,79E-01	4,70E-02	3,98E-01
Consumo di energia primaria rinnovabile	MJ	8,50E-04	4,79E-04	9, 10E-04	4,79E-03	7,00E-03
Consumo di energia primaria totale	MJ	1,68E-01	5,20E-03	1,79E-01	5,20E-02	4,06E-01

Un'analisi di dominanza (Figura 1) ha permesso di identificare che le fasi che maggiormente contribuiscono agli impatti associati alla filiera di approvvigionamento sono lo strascico indiretto e la cippatura. Entrambi sono responsabili di circa il 42% delle emissioni di gas climalteranti e del consumo di energia primaria.

Figura 1. Analisi di dominanza delle fasi della filiera di approvvigionamento



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

L'analisi di sensibilità condotta sui risultati relativi alla filiera di approvvigionamento ha incluso i seguenti scenari:

- Scenario base: la fase di trasporto avviene con trattore e rimorchio su una distanza di 10 km;
- Scenario 2: la variazione rispetto allo scenario base consiste nell'utilizzo in fase di trasporto di un autocarro su una distanza di 50 km;
- Scenario 3: la variazione rispetto allo scenario base consiste nell'utilizzo in fase di trasporto di un autocarro su una distanza di 100 km.

Di seguito sono presentati i risultati relativi all'analisi di sensibilità condotta sugli impatti associati alla filiera di approvvigionamento al variare del mezzo e della distanza percorsa (Tabella 4).

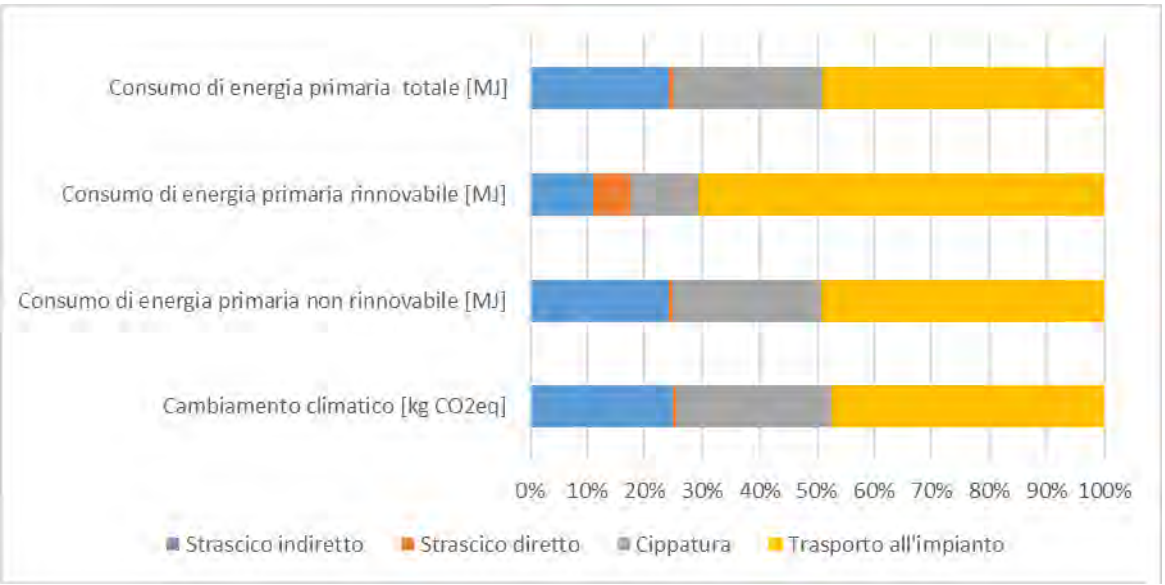
Tabella 4. Impatti associati alla fase di trasporto al variare del mezzo e della distanza percorsa

Indice	UM	Trasporto con trattore e rimorchio	Trasporto con autocarro (50 km)	Trasporto con autocarro (100 km)
Cambiamento climatico	kg CO_{2eq}	3,30E-03	1,00E-02	2,10E-02
Consumo di energia primaria, non rinnovabile	MJ	4,80E-02	1,70E-01	3,40E-01
Consumo di energia primaria rinnovabile	MJ	4,79E-03	2,70E-03	5,40E-03
Consumo di energia primaria totale	MJ	5,20E-02	1,74E-01	3,40E-01

Gli impatti associati alla fase di trasporto, e con essi quelli complessivi della filiera di approvvigionamento, generalmente aumentano al crescere della distanza di approvvigionamento.

Un'analisi di dominanza relativa allo scenario 3 (Figura 2) evidenzia come il contributo del trasporto sull'impatto totale (emissioni di gas climalteranti e consumo di energia primaria) è di circa il 50%, mentre nel caso dello scenario base esso risulta pari a circa il 10%.

Figura 2. Analisi di dominanza delle fasi della filiera di approvvigionamento per lo Scenario 3



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3. Conclusioni

Lo studio ha presentato una valutazione degli impatti energetico – ambientali connessi alla produzione di 1 kg di cippato da biomasse di origine forestale.

L'analisi dei risultati ottenuti per la filiera di approvvigionamento ha consentito di stabilire che gli hot-spots ambientali della filiera sono lo strascico indiretto e la cippatura.

A causa della variabilità delle distanze tra il luogo di produzione del cippato e il luogo di utilizzo è stato necessario effettuare un'analisi di sensibilità. Gli impatti generati dalla fase di trasporto del cippato, infatti, dipendono dal mezzo di trasporto e dalla distanza percorsa.

L'analisi di sensibilità ha permesso di stabilire che gli impatti aumentano all'aumentare della distanza. Pertanto, la realizzazione di filiere corte per la produzione e impiego di biomassa consente di ottimizzarne la gestione in un'ottica di sostenibilità energetico-ambientale.

Bibliografia

[1] European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions- The European Green Deal,* 2019.

[2] M. Cusenza, F. Guarino, S. Longo, M. Mistretta e M. Cellura, «Environmental assessment of 2030 electricity generation scenarios in Sicily: an integrated approach,» *Renew. Energy,* vol. 160, pp. 1148-1159, 2020.

[3] European Commission, «A sustainable Bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy,» 2018.

[4] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, C. Bauer, G. Doka, R. Dones, R. Hischier, S. Hellweg, S. Humbert, T. Köllner, Y. Loerincik, M. Margni e T. Nemecek, «Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories,» Dubendorf, 2007.

[5] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability, International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook -- General guide for Life Cycle Assessment -- Detailed guidance, 2010.

[6] European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability , *Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and supporting information,* 2012.

[7] IPCC, *IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change,* 2007.

[8] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz e B. Weidema, «The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology,» *The International Journal of Life Cycle Assessment volume 21,* p. 1218–1230, 2016.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[9] S. Baldini, F. Di Fulvio e G. Laudati, «Analisi della filiera di biomassa legnosa proveniente da interventi di diradamento: un caso studio in una pineta dell'Italia centrale,» *Forest@-Journal of Silvicolture and Forest Ecology, 7(5),* p. 177, 2010.

[10] A. Paletto, I. De Meo, P. Cantiani, U. Chiavetta, C. Fagarazzi, G. Mazza, E. Pieratti, G. M. Rillo Migliorini e A. Lagomarsino, «Analisi della filiera foresta-legno in una prospettiva di (bio)economia circolare: il caso studio della foresta di Monte Morello,» *L'Italia Forestale e Montana, 73(3),* pp. 107-128, 2018.

[11] CNR Ivalsa, «Foresta - Legno - Energia. Linee guida per lo sviluppo di un modello di utilizzo del cippato forestale a fini energetici.,» 2007.

[12] N. Magagnotti, *Analisi di cantieri di cippatura in merito ad aspetti operativi e di salvaguardia,* 2012.

[13] R. Spinelli, N. Magagnotti, C. Nati e M. Aguanno, «Produzione di biomassa dalla gestione delle peccete artificiali,» *Dendronatura, 1,* pp. 35-46, 2006.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

La diagnosi energetica della sede di Arpa UMBRIA a Perugia: analisi dei consumi energetici e delle prestazioni dell'edificio e valutazione di interventi di ottimizzazione dell'uso dell'energia

Maria Giulia Proietti [1,*], Ettore Stamponi [1], Andrea Nicolini [1,2], Emanuele Montenovo [3], Cristiana Simoncini [3], Francesco Longhi [3] and Elisa Moretti [1,2]

[1] CIRIAF - Università di Perugia, Via G. Duranti 63 (Perugia, Italia)

[2] Università di Perugia, Dipartimento di Ingegneria, Via G. Duranti 93 (Perugia, Italia)

[3] ARPA UMBRIA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale), Via Carlo Alberto dalla Chiesa 32 (Terni, Italia)

* E-Mail: maria.proietti@studenti.unipg.it

Abstract: Il tema dell'efficienza energetica è sempre più di grande attualità, sia per quanto riguarda le politiche nazionali che quelle comunitarie; i nuovi obiettivi sono infatti legati al contrasto dei cambiamenti climatici in atto e quindi all'implementazione di forme di energia rinnovabile che possano ridurre anche il costo della dipendenza da importazioni di energia. In questo senso gli edifici, in particolare quelli pubblici, possono guidare la comunità di riferimento per quanto riguarda le spese inerenti il consumo di energia e risorse e le possibili misure di miglioramento dell'efficienza energetica. In questo contesto si inserisce il presente lavoro avente per oggetto la diagnosi energetica dell'edificio sede di ARPA UMBRIA a Perugia. È stata infatti condotta un'attenta analisi dei consumi e degli usi finali dell'energia, individuando eventuali criticità del fabbricato e degli impianti presenti. Lo studio ha permesso di definire il bilancio energetico dell'immobile, di individuare possibili modalità per l'ottimizzazione degli usi energetici e di valutare le opportunità tecnico-economiche per la progettazione di interventi di efficientamento. La diagnosi energetica è stata eseguita secondo la metodologia prevista dalle normative vigenti, che prevedono la costruzione di modelli energetici i cui risultati devono convergere con i dati di consumo effettivo. Dall'analisi dei flussi energetici (termici ed elettrici) sono stati proposti degli scenari di intervento quali la sostituzione dei generatori di calore, degli apparecchi di illuminazione artificiale e l'incremento della potenza fotovoltaica. Nei diversi casi proposti, sono stati valutati i costi e i benefici conseguenti rispetto allo stato di fatto, attuando un processo globale di riqualificazione dell'immobile.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_047_pp_412

Keywords: diagnosi energetica; efficienza energetica; sostenibilità ambientale; modellazione energetica; fonti rinnovabili.

1. Introduzione

Le statistiche dimostrano come in Europa gli edifici siano responsabili di circa il 40% del consumo totale di energia, pertanto, una gestione efficiente e automatizzata dei sistemi energetici delle strutture può essere un valido strumento per ottimizzarne i consumi.

L'obiettivo del presente lavoro è proprio quello di indagare le attuali strategie di transizione energetica nel settore edilizio, attraverso la trattazione di un caso di studio reale: la sede operativa dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) di Perugia. Il principale fine dello studio è stato la valutazione di strategie attive e passive volte alla minimizzazione dei consumi di energia, e quindi dei costi di gestione e dell'impatto ambientale, e al parallelo raggiungimento di migliori condizioni di comfort all'interno degli ambienti occupati. Nello specifico, il lavoro ha riguardato l'analisi energetica dell'edificio, tracciando i flussi di consumo delle diverse fonti di energia impiegate a servizio dell'utenza, per definire le prestazioni del sistema nell'utilizzo di tali fonti, individuare le criticità esistenti e dunque pianificare interventi di efficientamento energetico.

Lo studio e la caratterizzazione dello stato attuale della struttura, in termini di involucro edilizio, impianti, prestazioni, usi e consumi energetici, è una fase imprescindibile per qualsiasi intervento di riqualificazione energetica; pertanto il primo step di lavoro ha riguardato la raccolta e l'elaborazione di uno storico di dati di circa un anno attinente ai servizi impiegati nell'edificio e una serie di rilievi necessari a ottenere informazioni su strutture e impianti. Dai dati raccolti è stato quindi possibile sviluppare la successiva fase di creazione e validazione del modello energetico dell'edificio con l'impiego di un opportuno software di settore. Dall'analisi energetica si è proceduto poi allo studio di interventi mirati e non standardizzati, al fine di ottimizzare l'uso delle fonti di energia e conciliare il risparmio energetico con il benessere degli occupanti. Tali interventi sono stati opportunamente implementati nel software di modellazione, attraverso cui è stato possibile eseguire una preliminare analisi economica valutando, per ogni scenario proposto, costi e benefici.

2. Descrizione del caso di studio

2.1. Caratteristiche generali

L'edificio è un immobile destinato al settore terziario ubicato a Perugia, in località San Sisto. L'edificio presenta una superficie complessiva in pianta coperta di circa 4.970 m^2 ripartita su cinque livelli di cui uno seminterrato, per un'altezza media fuori terra di circa 14,70 m. Al suo interno ospita uffici e laboratori di Arpa UMBRIA, ad eccezione di parte del piano terra che ospita invece la sede del Nucleo Operativo Ecologico dei Carabinieri di Perugia (Figura 1).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1: Vista della sede arpa UMBRIA di Perugia.



2.2. Involucro edilizio

La struttura si compone di due parti, costruite in anni diversi e pertanto caratterizzate da differenti tipologie costruttive e impiantistiche: la parte originaria, a pianta rettangolare, risalente agli anni '70 e l'ampliamento, realizzato nel 2015, a pianta quadrata di dimensioni più piccole. La superficie in pianta dell'intero edificio è pari a 4.970 m^2. Per semplicità di trattazione, nel presente lavoro si farà riferimento alla parte vecchia dell'edificio con la dicitura *pv*, mentre alla parte nuova con la dicitura *pn*.

Il corpo originario dell'edificio (parte vecchia) ha struttura in acciaio, completamente vetrata nei piani in elevazione e tamponata con pareti in calcestruzzo ai piani terra e seminterrato prive di isolamento termico; anche fondazione e copertura piana non sono isolate. Gli infissi sono in alluminio (senza taglio termico) con vetro singolo lungo le facciate esposte a Sud/Est, vetro doppio lungo quelle a Nord/Ovest. La parte più recente, invece, consta in una struttura in calcestruzzo coibentata e rivestita esternamente in pannelli di alluminio, con aperture finestrate più performanti dal punto di vista dell'isolamento termico (telaio in alluminio a taglio termico, doppio vetro con trattamento basso emissivo) e dotate di schermature solari esterne a frangisole orientabili; la copertura è anch'essa isolata e ospita un tetto giardino in cui sono alloggiati gli impianti termici a servizio della suddetta parte.

2.3. Impianti

2.3.1. Climatizzazione invernale ed estiva, ventilazione e produzione di ACS

L'impianto termico della parte vecchia è costituito da n. 2 generatori di calore tradizionali alimentati a gas metano, ubicati in apposita centrale termica al piano seminterrato, adibiti al riscaldamento e alla produzione di acqua calda, sia per uso igienico-sanitario e sia per il lavaggio della strumentazione in vetro nel laboratorio Vetreria, che è stoccata in un bollitore avente capacità di 500 litri. Nello stesso piano è inoltre presente uno scaldacqua monoblocco, composto da pompa di calore e bollitore da 250 litri integrato, per la produzione di acqua calda sanitaria a servizio dei soli spogliatoi del personale.

Ai fini della climatizzazione estiva l'impianto della parte vecchia dell'edificio è servito da n. 2 pompe di calore idroniche installate esternamente, con annesso serbatoio inerziale avente capacità di 2000 litri per lo stoccaggio dell'acqua refrigerata prodotta. L'impianto di distribuzione interna della parte vecchia è costituito da terminali del tipo ventilconvettori di diverse tipologie e taglie di potenza, collocati nei corridoi e nei locali adibiti ad ufficio e laboratori; nei bagni sono invece presenti radiatori in alluminio e in ghisa. In alcuni locali già serviti dall'impianto descritto (v. uffici al piano terzo, locali

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

tecnici destinati alle unità server e UPS e alcuni laboratori al piano primo), è prevista anche un'integrazione mediante sistemi di riscaldamento/raffrescamento di tipo ad espansione diretta (split system). Per ciò che concerne l'impianto di ventilazione della parte vecchia, in fase di sopralluogo è stata rilevata un'unità di trattamento dell'aria (UTA) ubicata esternamente all'edificio, predisposta per l'impianto aeraulico (aria primaria) del solo piano primo in cui sono presenti i laboratori. Tale macchina è stata dimensionata in modo da garantire una portata d'immissione molto superiore a quella di ripresa, al fine di poter coprire il fabbisogno per la ventilazione anche quando le numerose cappe di aspirazione presenti nel piano risultino tutte contemporaneamente funzionanti (con una portata d'aria estratta pari a 6000 m^3/h). Al piano seminterrato è presente un locale (sala riunioni) che è invece alimentato da un'unità di trattamento dell'aria autonoma e compatta collocata esternamente, costituita da un'unità frigorifera in pompa di calore e unità termoventilante.

Per quanto riguarda la climatizzazione della parte nuova della struttura, è previsto un impianto ad espansione diretta di tipo VRF (a volume di refrigerante variabile); tale impianto è costituito da un'unità esterna di tipo modulare in pompa di calore condensata ad aria e da unità interne canalizzabili installate nei controsoffitti, che immettono aria nei singoli locali mediante diffusori circolari. La produzione di acqua calda sanitaria della parte nuova viene invece effettuata mediante un'unità in pompa di calore splittata costituita da due sezioni: sezione esterna condensata ad aria e sezione interna in cui avviene lo scambio di calore fra il gas refrigerante e l'acqua. L'acqua calda così prodotta va ad alimentare il circuito primario dello scambiatore a fascio tubiero del bollitore per la produzione di ACS avente la capacità di 200 litri. Il ricambio dell'aria è garantito da un sistema di ventilatori a recupero di calore entalpici installati a servizio di ogni piano, che immettono aria esterna alle condizioni intermedie tra la mandata e la ripresa in entrambe le stagioni di climatizzazione, sfruttando appunto il sistema di scambio termico a flusso incrociato. I terminali di immissione per la ventilazione sono dislocati nei corridoi e nei vari locali.

2.3.2. Illuminazione

L'impianto di illuminazione interno è costituito, per la quasi totalità, da lampade fluorescenti tubolari, presenti nei corridoi, negli uffici e nei laboratori sia della parte vecchia che della parte nuova. Soltanto nei bagni della parte vecchia sono presenti lampade a incandescenza tradizionali. La potenza complessiva di tale impianto è di circa 48.750 W; i piani con una potenza maggiore installata ed equamente distribuita sono quelli in elevazione (superiore a 11.000 W ciascuno).

Per l'impianto di illuminazione esterno, dai rilievi effettuati, è stata stimata una potenza totale di circa 3600 W. Esso si compone di: fari LED monocromatici per l'illuminazione della facciata esterna della parte nuova, lampade fluorescenti e faretti LED per l'illuminazione del parcheggio antistante l'edificio e lampade alogene per l'illuminazione del cortile.

2.3.3. Impianti da fonti rinnovabili

L'edificio è provvisto di un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica in esercizio dal 2012, costituito da tre sezioni installate in anni diversi per una potenza complessiva di **65,50 kWp** (Figura 2, Tabella 1). Durante la realizzazione dell'ultima parte di impianto, che è quella più grande, le

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

sezioni 1 e 3 sono state riunite in un unico impianto. Il nuovo impianto (sezioni 1-3) è collegato a 4 inverter ABB - Aurora PVI-12.5-TL-OUTD-FS.

Tabella 1: Dati riepilogativi dell'impianto fotovoltaico esistente.

Sezione	Anno di allaccio	Ubicazione	P di picco [kW]	N. pannelli	P pannello [W]	Orientamento	Tilt
1	2012	Pensilina S/E	6,44	36	177	Sud	30°
2	2015	Pensiline esterne	9,00	36	250	Sud/Est	15°
3	2018	Pensilina S/O	50,16	176	285	Sud/Ovest	15°

Figura 2: Sezioni costituenti l'impianto fotovoltaico esistente.



3. Analisi dei consumi energetici dell'edificio: stato attuale

3.1. Analisi dei flussi energetici

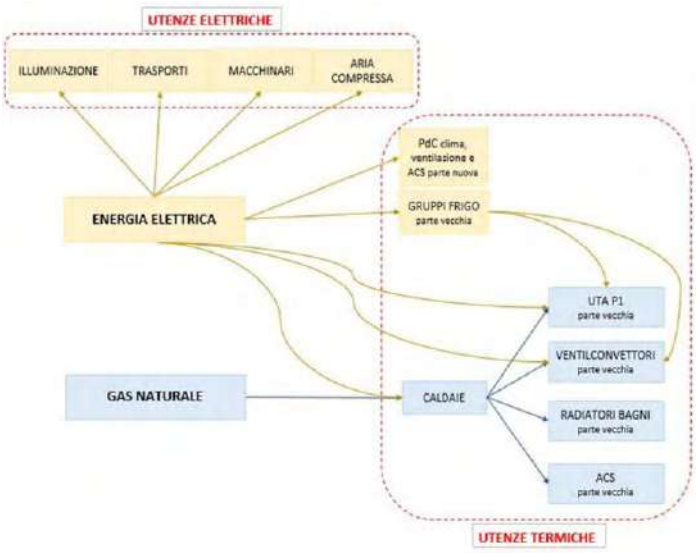
L'analisi dei consumi energetici reali rappresenta il punto di partenza per la definizione del bilancio energetico dell'edificio e per l'individuazione di eventuali interventi di efficientamento che possano superare eventuali criticità degli edifici. La redazione del resoconto delle fatturazioni mensili delle forniture energetiche, l'analisi delle curve di prelievo elettrico e dei dati di produzione e consumo da fonti rinnovabili hanno reso necessario accedere ad uno storico significativo di informazioni che copre il periodo tra dicembre 2017 e febbraio 2022. A ciò è stata affiancata l'elaborazione dei dati ottenuti dalla campagna di monitoraggio degli assorbimenti elettrici attuata nell'autunno 2021. Al fine di fornire un quadro quanto più vicino allo stato attuale, il focus dell'osservazione è stato centrato sull'anno 2021, i cui dati sono stati impiegati nella creazione e validazione, tramite apposito software di calcolo, del modello dell'edificio per la diagnosi energetica.

Dall'analisi delle informazioni pervenute, è emerso che i consumi di gas naturale dell'edificio sono legati principalmente ai sistemi di climatizzazione, ventilazione e produzione di ACS (per l'uso igienico-sanitario nei servizi e per l'uso lavaggio della strumentazione nel laboratorio Vetreria) destinati esclusivamente alla parte vecchia dell'edificio. L'impianto di ventilazione a servizio del solo piano primo, che di norma è in funzione tutto l'anno nelle ore di occupazione, nell'anno 2021 non è mai entrato in funzione nella stagione estiva a causa di un guasto alla batteria fredda. I consumi di energia elettrica sono invece determinati principalmente dal funzionamento degli impianti di climatizzazione, ventilazione e produzione di ACS della parte nuova, dalla climatizzazione estiva della parte vecchia,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

dall'illuminazione interna ed esterna dei locali e delle pertinenze di tutto l'edificio, dai macchinari presenti nei laboratori, dall'aria compressa e dalle numerose apparecchiature d'ufficio. Non rientra nel calcolo dei consumi elettrici totali per l'anno 2021 l'unità di trattamento dell'aria autonoma per la climatizzazione e ventilazione della sala riunioni al piano seminterrato, in quanto non è mai stata attivata. I flussi energetici dei vettori in ingresso fino alle utenze sono riassunti nello schema in Figura 3.

Figura 3: Schema logico dei vettori e dei flussi energetici.



3.2. Consumi di gas naturale

3.2.1. Analisi delle bollette

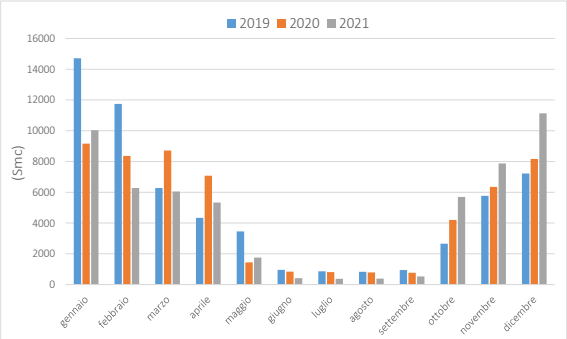
Le fatturazioni di gas naturale fornite dai responsabili degli Uffici Tecnici di Arpa, come detto, coprono complessivamente un periodo compreso tra dicembre 2017 e febbraio 2022. Dalla loro analisi e dai dati acquisiti con letture autonome programmate del contatore a servizio dell'impianto di generazione della parte vecchia, si è potuto ricostruire lo storico omogeneo dei consumi termici per il suddetto intervallo temporale. Nell'ottica di fornire un quadro quanto più vicino allo stato attuale dell'oggetto d'analisi, si è ritenuto di maggiore interesse concentrare l'attenzione sul triennio 2019 - 2020 - 2021, valutando anche l'impatto che la pandemia ha avuto nei consumi energetici dell'edificio, per poi affinare l'analisi per l'ultima annualità, scelta come riferimento per la modellazione tramite software. In Tabella 2 è riportata una sintesi dei consumi di gas naturale annui e dei relativi costi, mentre in Figura 4 sono riportati i consumi mensili nei tre anni esaminati

Tabella 2: Sintesi dei costi e consumi medi annui di gas naturale.

Anno	Consumo totale [Smc]	Costo annuo [€]	Costo unitario IVA inclusa [€/Smc]
2019	59.762	43.684	0,72
2020	56.689	35.374	0,61
2021	55.847	43.872	0,84

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 4: Consumi mensili di gas naturale nei tre anni esaminati.



Come si può osservare, l'andamento generale dei consumi è decrescente procedendo dai primi mesi dell'anno verso la stagione calda, si mantiene circa costante a valori minimi nei mesi estivi per soddisfare i servizi di ACS e ventilazione nei laboratori del pino primo, per poi tornare in crescita verso la stagione fredda. Contrariamente a quanto ci si aspetterebbe per il periodo tra marzo e aprile 2020, interessato dal lockdown nazionale, non sono state registrate sensibili variazioni dei consumi, ipotizzando quindi che i dipendenti abbiano almeno parzialmente continuato la loro attività lavorativa in presenza oppure che, nonostante il calo di presenze, non siano state apportate variazioni nella gestione degli impianti. È importante inoltre notare la netta riduzione dei consumi estivi del 2021 rispetto agli anni passati a causa del guasto alla batteria fredda dell'impianto di ventilazione a servizio del primo piano della parte vecchia dell'edificio.

3.2.2. Ripartizione dei consumi tra i servizi

L'anno 2021 rappresenta il periodo di interesse per l'analisi di dettaglio, indicativo dell'utilizzo tipo annuale dell'energia da parte dell'utenza; per tale intervallo temporale il consumo di gas naturale legato alla produzione di ACS globale è identificabile nel consumo mensile reale da giugno 2021 a settembre 2021, in quanto l'impianto di ventilazione a servizio del piano primo della parte vecchia non è entrato in funzione. Per il resto dell'anno, dai dati ricevuti, il fabbisogno mensile è stato valutato come media dei mesi estivi. La quota parte del fabbisogno per la sola Vetreria è stata invece calcolata secondo l'approccio della Normativa UNI TS 11300-2, sulla base del consumo giornaliero di acqua (indicato pari a circa **2000 litri/giorno**) e delle condizioni di accumulo. Il fabbisogno medio per la produzione di ACS legato al solo uso igienico-sanitario è stato quindi ottenuto per differenza tra il fabbisogno totale di acqua calda sanitaria e quello legato al lavaggio della strumentazione in vetro nel suddetto laboratorio. Per quanto descritto, il fabbisogno di gas metano per la produzione di ACS è così ripartito: il fabbisogno totale dei mesi invernali è di **425 Smc/mese**, di cui **290 Smc/mese** sono per coprire il fabbisogno della Vetreria, i restanti **135 Smc/mese** riguardano invece il fabbisogno ad uso igienico sanitario. In sintesi, in base alle stime effettuate, si ha che: circa il **91%** del consumo annuo di gas naturale è dovuto agli impianti di riscaldamento e di ventilazione, quest'ultimo a servizio del solo piano primo; circa il **6%** è speso per l'uso tecnologico in Vetreria, mentre circa il **3%** è destinato all'uso igienico-sanitario.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.3. Consumi di energia elettrica

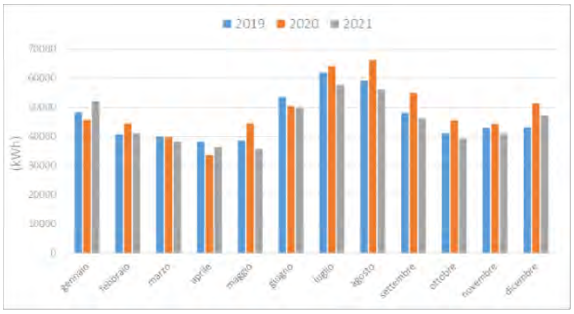
3.3.1. Analisi delle bollette

Lo stesso tipo di analisi condotta per i consumi di gas naturale, è stata ripetuta anche per quelli di energia elettrica, raccogliendo ed elaborando i dati di fatturazione relativi ai tre anni esaminati (Tabella 3). In Figura 5 sono riportati i grafici di confronto dei consumi medi mensili di energia elettrica. Dal grafico si evince che la stagione più critica è quella estiva, per effetto del significativo contributo imputabile al raffrescamento dell'edificio, il quale non subisce interruzioni per tutto il periodo di funzionamento (orientativamente da giugno a settembre). Di contro, nei mesi invernali, i consumi scendono ma non tanto quanto in primavera; questo è probabilmente dovuto al diverso regime di utilizzo, nelle due stagioni, degli impianti di riscaldamento e illuminazione nelle ore di occupazione, in funzione di temperature esterne che, nelle stagioni intermedie, sono più o meno miti e della disponibilità di luce naturale.

Tabella 3: Sintesi dei costi e consumi medi annui di energia elettrica da fornitura.

Anno	Consumo totale [kWh]	Costo totale [€]	Costo medio unitario IVA inclusa [€/kWh]
2019	555.986	*non disponibile*.	*non disponibile*
2020	585.071	99.742	0,17
2021	540.950	146.427	0,27

Figura 5: Consumi mensili di energia elettrica da fornitura nei tre anni esaminati.



3.3.2. Contributo dell'impianto fotovoltaico

Per determinare la totalità degli assorbimenti elettrici dell'utenza occorre aggiungere all'energia acquistata dalla rete di fornitura la quota di produzione dell'impianto fotovoltaico, che si traduce completamente in autoconsumo. La produzione annua di tale impianto, riferita all'anno 2021 è di **72.347 kWh**. Il contributo dell'impianto solare fotovoltaico si traduce quindi in una copertura del **12%** dell'assorbimento elettrico totale. Nei mesi di maggiore produzione (da marzo a settembre) l'impianto fotovoltaico esistente arriva a coprire mediamente circa il 15% del consumo mensile totale (superiore ai 7.000 kWh/mese) e scende al 6% in media nei mesi invernali, da novembre a febbraio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.3.3. Ripartizione dei consumi tra i servizi

Sono numerose le utenze elettriche che determinano i consumi di energia elettrica, pertanto, avvalendoci delle curve di carico, rappresentative degli assorbimenti da rete quartiorari, unitamente ai dati di produzione mensili dell'impianto fotovoltaico, si è potuta stimare una ripartizione dei consumi nei diversi utilizzi relativamente all'anno 2021. L'analisi è stata impostata a partire dalla depurazione dal totale dei consumi mensili della quota parte non destinata all'erogazione dei servizi energetici di riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS, illuminazione e trasporti (quella che sarà considerata per la validazione del modello di diagnosi energetica), quindi, la componente dei consumi cosiddetta "di base". Tale carico di base identifica, infatti, l'assorbimento di energia elettrica che si registra con continuità, non influenzato quindi dalla presenza o meno degli occupanti e dalle attività a loro connesse in termini di gestione degli impianti di climatizzazione, ventilazione e dell'illuminazione (apparecchiature elettroniche negli uffici quali computer, stampanti, fotocopiatrici, distributori automatici e altri accessori, macchinari nei laboratori come gascromatografi, frigoriferi, celle termostatate, cappe aspiranti, compressori, ecc., i server e le unità UPS installate a contrasto di eventuali emergenze nella fornitura da rete). Dall'osservazione delle curve di carico elaborate, nella definizione del valore di riferimento si sono escluse per quanto possibile l'attività degli impianti e l'influenza del fotovoltaico, ponendo l'attenzione sull'analisi del mese di maggio 2021, che rappresenta infatti il periodo più svincolato dal funzionamento degli impianti termici e di ventilazione. Tutto ciò ha permesso di stimare un carico di base orario pari a **46 kW**.

Lo studio del mese di maggio 2021, esente quindi dal funzionamento dei suddetti impianti, ha permesso anche la stima di massima della quota parte di consumo di energia elettrica relativa al servizio di raffrescamento in estate. Il consumo di tale mese è stato infatti depurato dai consumi dei successivi mesi (da giugno a settembre), ottenendo così un valore approssimato del consumo energetico legato agli impianti di climatizzazione estiva. In questo modo si stima in prima approssimazione, nella stagione di raffrescamento, un consumo complessivo di circa **68.000 kWh**, con un'incidenza mensile di tale servizio sul totale (comprendente anche il consumo di base, la produzione di ACS, l'illuminazione e il trasporto di cose e persone) variabile tra il 17% e il 34% circa, dal mese meno caldo a quello più impegnativo per l'impianto.

4. Modellazione energetica dell'edificio

4.1. Diagnosi energetica

La Diagnosi Energetica è definita come "una procedura sistematica volta a fornire un'adeguata conoscenza del profilo di consumo energetico di un edificio o gruppo di edifici, di un'attività o impianto industriale o di servizi pubblici o privati; individuare e quantificare le opportunità di risparmio energetico sotto il profilo costi-benefici; riferire in merito ai risultati". Per tali ragioni, in fase di diagnosi, la valutazione di una struttura è eseguita in condizioni effettive di utilizzo (*tailored rating*), sulla base dei dati relativi all'involucro ed all'impianto reali, seguendo le modalità operative ed i passaggi definiti dalle norme UNI CEI/TR 11428 ed UNI CEI EN 16247. Le modalità di occupazione e di utilizzo dell'edificio e dell'impianto vengono infatti assunte in funzione dei valori effettivi di funzionamento e gestione,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

nelle condizioni reali di intermittenze degli impianti. Lo scopo finale è quello di identificare le cause di eventuali sprechi e definire conseguentemente i possibili interventi per ridurre i consumi energetici.

4.1.1. Scelta del software e modellazione dell'edificio

La modellazione energetica dell'edificio in esame è stata effettuata con l'ausilio del software di certificazione energetica TerMus_v.42.00 CE, distribuito da ACCA Software S.p.A. Dopo aver definito e validato il modello dell'edificio, per la successiva fase di progettazione degli interventi di miglioramento energetico, il software fornisce un'analisi economica del ritorno dell'investimento calcolando parametri economici di riferimento, secondo la UNI EN 15459:2016.

Sulla base della struttura geometrica e dello schema impiantistico, determinati in primo luogo, per la definizione del modello energetico è necessario inserire i dati climatici relativi al Comune di riferimento e i dati di consumo reale per ogni combustibile impiegato nell'edificio, coprendo un arco temporale di almeno un anno (2021); nello specifico, per i consumi di energia elettrica, il software modella soltanto quelli legati ai servizi di riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS, illuminazione e trasporti; è stato pertanto necessario depurare dai consumi totali il carico di base precedentemente calcolato. Successivamente sono stati dettagliati gli impianti a servizio dell'edificio, in riferimento a periodi, modalità di esercizio e relativi fabbisogni reali da soddisfare. Inoltre, all'interno del software è stato specificato il mancato funzionamento dell'UTA autonoma Clivet a servizio della sala riunioni del piano seminterrato e dell'UTA a servizio del piano primo della parte vecchia in raffrescamento. Per ogni zona dell'edificio, creata sulla base della struttura impiantistica, sono state poi impostate le seguenti grandezze: le temperature interne del giorno medio del periodo di accensione degli impianti, gli apporti interni in [W/m^2], la ventilazione naturale in funzione della destinazione d'uso dei locali e il consumo di ACS (in questa sezione, per la zona relativa al piano seminterrato di cui fa parte anche la sala Vetreria, il fabbisogno di ACS per l'uso igienico-sanitario è stato incrementato tenendo conto del consumo per il lavaggio della strumentazione). I valori dei parametri suddetti sono stati opportunamente modificati nella fase di validazione del modello di diagnosi.

4.1.2. Analisi dei risultati e validazione del modello

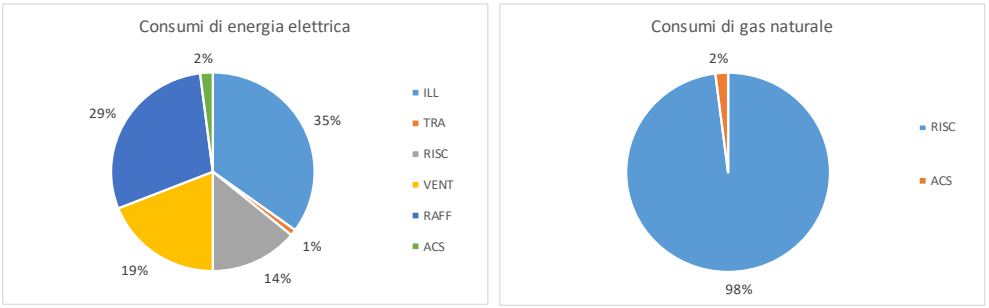
Una volta terminata la fase di modellazione dell'edificio il software restituisce in output lo scostamento tra modello e caso reale. Tale confronto è presentato in termini di "fattore di congruità", indice valutato per stabilire la rispondenza del modello rispetto alla situazione reale e avere il confronto diretto fra i vari combustibili, sia per il consumo totale annuo e sia per i consumi dei singoli servizi energetici. Oltre al fattore di congruità, il confronto è restituito anche in termini assoluti, come mostrato in Tabella 4 (nel caso dell'energia elettrica il dato è ottenuto considerando l'assorbimento da rete nella percentuale di utilizzo stimata per i soli servizi implementati da TerMus sommata poi alla quota di autoconsumo da produzione del fotovoltaico). Il modello realizzato è corrispondente alla realtà con un fattore di congruità globale pari a **1,002**. Sono inoltre riportati i grafici a torta relativi alla ripartizione, stimata dal software, dei consumi di gas metano ed energia elettrica tra i vari servizi modellati (Figura 6).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 4: Confronto tra dati di consumo per i vari usi stimati dal software e dati reali.

GAS NAT. [Smc]	**STIMATO - modello**								**REALE - 2021**
	Servizi	***ILL***	***TRA***	***RICS***	***VENT***	***RAFF***	***ACS***	***Totale***	***Totale***
	Tot. annuo			49.583			4.513	**54.095**	**55.847**
	Scarto							**- 3%**	
EN. ELET. [kWh]	**STIMATO - modello**								**REALE - 2021**
	Servizi	***ILL***	***TRA***	***RICS***	***VENT***	***RAFF***	***ACS***	***Totale***	***Totale***
	Tot. annuo	70.408	2.536	28.293	37.554	58.656	4.440	**201.887**	**198.223**
	Scarto							**+2%**	

Figura 6: Stima del software degli usi finali di energia elettrica e gas naturale per i diversi servizi.



Dai dati riportati in tabella si evince che il modello si discosta poco dai dati reali, con uno scarto minore del ±5%, perciò i risultati rientrano nell'intervallo di accettabilità, considerata anche la complessità del caso di studio e le capacità computazionali del software. Nel caso del gas naturale il consumo annuo per i servizi di riscaldamento e produzione di ACS è sottostimato del **3%** rispetto al consumo reale. Ciò che si è osservato avere maggiormente influenza sulla modellazione sono l'inserimento dei dati di temperatura interna dei locali e le ore di accensione degli impianti; inoltre bisogna precisare che la voce relativa all'acqua calda sanitaria tiene conto sia del consumo imputabile ai servizi igienici, sia del consumo per il lavaggio della vetreria di laboratorio, del quale si è data una stima di massima in base alle indicazioni ricevute. La ripartizione proposta dal modello è dunque in linea con le considerazioni fatte nell'analisi energetica.

Per la parte relativa all'energia elettrica il software prospetta un valore di consumo totale annuo del **+2%** rispetto al dato reale ricostruito per i servizi a disposizione dell'edificio analizzato. Non è stato possibile in questo caso entrare nel dettaglio della suddivisione negli usi finali di energia in modo autonomo, così come invece stimato dal software; ciononostante la suddivisione proposta nelle quote di prelievo da rete e di produzione dell'impianto fotovoltaico è del tutto rispondente alla realtà. In conclusione si può ritenere sufficientemente attendibile il modello, il quale può in definitiva essere sfruttato come valido supporto alla simulazione di interventi migliorativi, al fine di valutarne l'efficacia.

5. Analisi delle criticità e proposte di intervento

5.1. Criticità evidenziate

Sulla base delle considerazioni fatte, dai risultati ottenuti relativamente alla diagnosi energetica e dall'indagine sulla qualità degli ambienti interni condotta sia mediante monitoraggio strumentale e sia

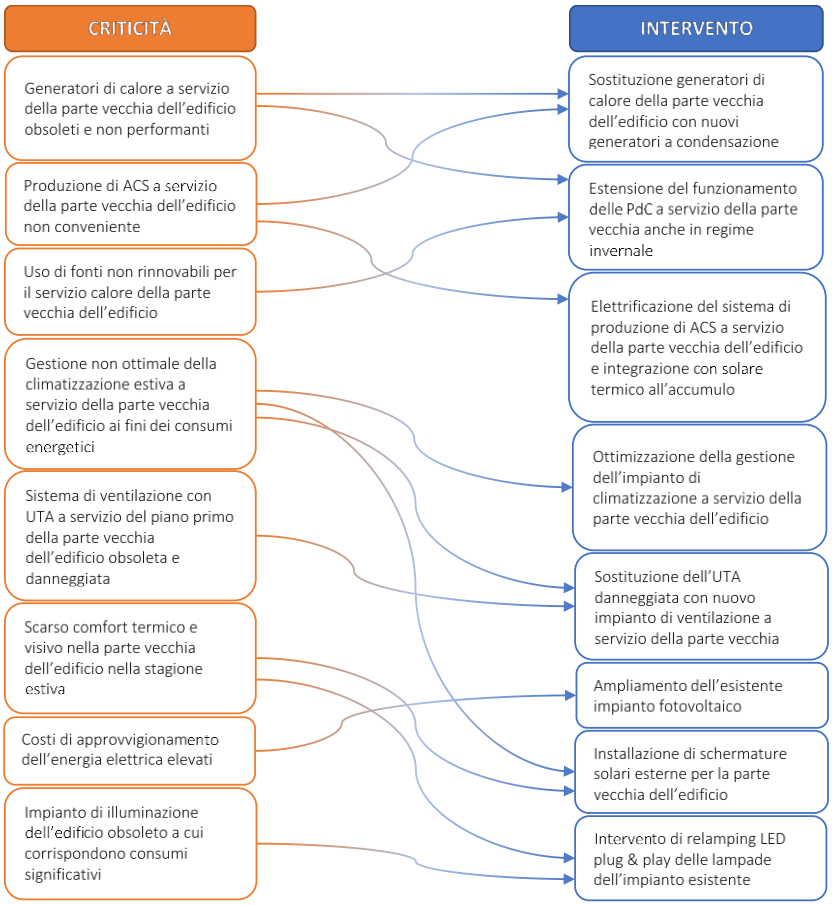
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

attraverso la divulgazione di questionari di gradimento degli ambienti tra gli occupanti (fase del progetto che non è stata trattata nel presente lavoro), sono emerse diverse criticità, con particolare riferimento alla parte più datata dell'edificio:

- il sistema di ventilazione a servizio del primo piano della parte vecchia è obsoleto, non performante dal punto di vista energetico essendo privo di sistemi di recupero del calore dall'aria espulsa e non è in grado di supportare il sistema di climatizzazione nella stagione estiva. Tale impianto inoltre non è dotato di sistemi di regolazione della portata immessa, pertanto non è adeguatamente integrato al funzionamento discontinuo dei sistemi di aspirazione (cappe chimiche e biologiche) presenti nei laboratori del piano ad uso dei tecnici specializzati, con conseguente dispendio energetico;
- i restanti piani della parte vecchia dell'edificio non sono dotati di alcun impianto di ventilazione meccanica per il ricambio dell'aria, come invece sarebbe opportuno, anche per quanto emerso dai questionari sulla percezione del comfort da parte degli occupanti;
- i consumi di gas naturale dell'utenza sono elevati; in particolare per quanto riguarda l'ACS, ne viene fatto un uso significativo per il lavaggio della vetreria di laboratorio, stimato circa pari a 2000 litri/giorno. Inoltre l'utilizzo di un sistema unico di generazione per i due servizi detti comporta il funzionamento dell'impianto a carico parziale per tutti i mesi al di fuori del periodo di riscaldamento, con prestazioni ridotte;
- i generatori di calore a servizio della parte vecchia dell'edificio sono obsoleti, determinando consumi elevati; anche i sistemi di gestione, di distribuzione e di regolazione sono scarsamente efficienti, non consentendo di garantire il giusto comfort termico agli occupanti;
- l'utenza è decisamente energivora anche dal punto di vista elettrico, come effetto complessivo di impianti tradizionali e inadeguata gestione e regolazione dei vari sistemi. Come ad esempio osservato nell'analisi delle curve di carico elettrico, nel periodo del lockdown nazionale a causa della recente pandemia (marzo e aprile 2020) i consumi non hanno subito variazioni rilevanti contrariamente a quanto ci si aspetterebbe in assenza di persone nell'edificio o comunque con un grado di occupazione dell'edificio ridotto, a dimostrazione di una scarsa ottimizzazione dei flussi energetici;
- l'impianto a fonti rinnovabili non copre una significativa quota del fabbisogno annuale (12%);
- l'impianto di illuminazione interna dell'intero edificio è responsabile di circa il **35%** dei consumi di energia elettrica per i servizi ed è costituito per la maggior parte da lampade tradizionali fluorescenti tubolari, il cui impiego ormai risulta superato con l'introduzione di sistemi con tecnologia LED; la stessa soluzione potrebbe essere impiegata a vantaggio dell'illuminazione esterna, in un progetto illuminotecnico di riqualificazione e ammodernamento generale;
- l'involucro non è performante dal punto di vista termico, considerate soprattutto l'assenza di isolamento della copertura e le ampie superfici vetrate della parte vecchia dell'edificio, che non garantiscono neppure il giusto comfort visivo, a causa delle schermature solari poco efficaci.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 7: Schema logico di sintesi delle possibilità di intervento di efficientamento energetico.



5.2. Simulazione degli interventi proposti

L'osservazione delle diverse criticità riscontrate nel corso delle analisi del comfort indoor e delle prestazioni dell'edificio ha indirizzato lo studio di diversi scenari di miglioramento, mirati a incrementare l'efficienza energetica e a garantire il benessere degli occupanti. Gli interventi proposti sono di seguito riportati (Tabella 5), per ognuno è stata eseguita la simulazione atta a valutarne l'efficacia tramite il modello di diagnosi realizzato.

Per la simulazione degli interventi si è dunque utilizzato il modello validato, operando ogni volta un confronto tra lo scenario di partenza e quello post-intervento in termini di parametri energetici, economici e di impatto ambientale. Per l'analisi costi-benefici sono stati definiti il valore dell'investimento iniziale, gli eventuali costi da sostenere nel corso della vita utile dell'intervento (manutenzione e costo di esercizio che, in prima approssimazione, sono stati mantenuti invariati per ogni intervento proposto) e la valutazione delle forme di incentivazione o detrazione disponibili. La fattibilità economica degli interventi è valutata in termini di tasso interno di rendimento (TIR), valore attuale netto (VAN) e tempo di ritorno. Nella Tabella 6 si riportano i dati ipotizzati per l'analisi economica.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 5: Proposte di intervento.

N. 0	Sostituzione dell'UTA parte vecchia
N. 1	Illuminazione LED
N. 2	Revamping e repowering impianto FV
N. 2.1	Repowering impianto FV (su nuova pensilina)
N. 3	Elettrificazione ACS e PdC con solare termico per Vetreria
N. 3.1	Elettrificazione ACS, PdC con solare termico per Vetreria e caldaie a condensazione
N. 3.2	Elettrificazione ACS, caldaie a condensazione e solare termico per Vetreria
N. 3.3	Elettrificazione ACS, caldaie a condensazione, solare termico per Vetreria, illuminazione LED, revamping e repowering impianto FV
N. 4	Elettrificazione ACS, PdC con solare termico per Vetreria, illuminazione LED, revamping e repowering impianto FV e PdC parte vecchia reversibili (riscaldamento e raffrescamento)

Tabella 6: Dati inseriti per l'analisi economica degli interventi simulati.

Costo unitario energia elettrica (IVA compresa, media anno 2021)	0,27 €/kWh
Costo unitario gas naturale (IVA compresa, media anno 2021)	0,84 €/Smc
Durata del calcolo	20 anni
Tasso di interesse di mercato	4,00 %
Tasso di inflazione	1,50 %
Tasso di crescita del costo dell'energia	2,00 %
Tasso di interesse reale generale	2,46 %
Tasso di interesse reale energia	1,96 %

Va precisato, che si tratta di una valutazione preliminare utile a indirizzare ulteriori analisi di dettaglio di fattibilità, anche in relazione ai più recenti cambiamenti intercorsi nell'economia globale e nelle strategie nazionali, che influenzano i prezzi dell'energia e delle materie prime e determinano aggiornamenti dei sistemi di incentivazione e agevolazione economica. Per tali ragioni l'inserimento dei parametri economici e la stima dei costi di investimento hanno un grande peso nell'esito di tale analisi. Per ogni soluzione ipotizzata è stato compilato il relativo prospetto di confronto pre-intervento e post-intervento, riportando il calcolo delle conseguenti variazioni nell'uso dei combustibili da intendere come risparmio (in negativo) o incremento (in positivo) a seconda del caso, valutati anche come incidenza percentuale. È inoltre fornito il dettaglio dei benefici ambientali in riferimento alla riduzione delle emissioni di CO_2. Infine è fornita la stima del risparmio economico rispetto allo stato attuale, mediante i parametri economici sopra presentati. È importante sottolineare, che il confronto sulla base dello stato di fatto attuale (*SdF*) è stato impostato per la sola ipotesi di intervento n.0, concernente la sostituzione dell'UTA a servizio del primo piano della parte vecchia dell'edificio. Tale ipotesi, imprescindibile e prioritaria, è stata poi impiegata come riferimento di partenza per la valutazione di tutti gli altri scenari di efficientamento. Pertanto è a tale situazione che si fa riferimento in ogni valore riportato alla voce "PRE" nella seguente tabella riepilogativa degli interventi (Tabella 7).

In riferimento a quanto ipotizzato, si evince che l'intervento di sostituzione dell'UTA a servizio dei laboratori consente effettivamente di raggiungere un concreto risparmio energetico, oltre a ristabilire le necessarie condizioni di comfort per gli occupanti nella stagione estiva. A fronte di un previsto aumento del fabbisogno annuale di energia elettrica per la ventilazione meccanica, anche a supporto della climatizzazione in entrambe le stagioni, si riscontra una notevole riduzione dei consumi di metano, garantita dall'installazione di un macchinario più efficiente e soprattutto dotato di sistema di

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

recupero del calore dall'aria estratta. Proprio per questo, tale intervento è stato identificato come punto di partenza per la valutazione dei restanti scenari ipotizzati.

Tabella 7: Sintesi di riepilogo delle ipotesi di intervento e relativi impatti.

N. 0 SOSTITUZIONE UTA pv			
Descrizione intervento	Sostituzione UTA esistente nel piano primo della pv con una nuova macchina avente recuperatore di calore di efficienza pari a 0,75 e regolazione della portata di immissione.		
Fabbisogno en. el. VENTILAZIONE MECC. [kWh]	SdF	39.446	
	SdP	52.665	
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	+10%	+13.134	
Variazione gas naturale [Smc]	-17%	-8.962	
Variazione costo di esercizio [€]	-5%	-3.982	
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-7%	-11.743	
N. 1 ILLUMINAZIONE LED			
Descrizione intervento	Relamping LED plug & play dell'intero impianto di illuminazione interna.		
Fabbisogno en. el. ILLUMINAZIONE [kWh]	PRE	70.408	
	POST	37.699	
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	-30%	-42.490	
Variazione gas naturale [Smc]	+10%	+4.488	
Costo intervento IVA compresa [€]	109.800		
Variazione costo di esercizio [€]	-10%	-7.703	
VAN [€]	60.545		
TIR [%]	6,36		
Tempo di ritorno [anni]	10		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 (detrazione del 40% in 5 anni, max 70.000€)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-7%	-10.639	
N. 2 Revamping e repowering impianto FV			
Descrizione intervento	Revamping (sezione 1) e repowering dell'impianto FV (per una potenza tot. di 115 kWp).		
Produzione FV ed energia el. esportata [kWh]	PRE	73.023	esportata 0
	POST	133.908	esportata 3.154
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	-41%	-73.133	
Costo intervento IVA compresa [€]	122.000		
Variazione costo di esercizio [€]	-20%	-19.746	
VAN [€]	136.969		
TIR [%]	9,31		
Tempo di ritorno [anni]	9		
Agevolazioni	Remunerazione energia elettrica esportata (0,05€/kWh)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-17%	-26.556	
N. 2.1 Repowering impianto FV (su nuova pensilina)			
Descrizione intervento	Repowering dell'impianto FV, 84,36 kWp aggiuntivi su nuova pensilina retrostante l'edificio.		
Produzione FV ed energia el. esportata [kWh]	PRE	73.023	esportata 0
	POST	179.848	esportata 11.918
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	-67%	-94.907	
Costo intervento IVA compresa [€]	227.000		
Variazione costo di esercizio [€]	-34%	-25.625	
VAN [€]	209.316		
TIR [%]	7,85		
Tempo di ritorno [anni]	10		
Agevolazioni	Remunerazione energia elettrica esportata (0,05€/kWh)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-28%	-43.657	
N. 3 ELETTRIFICAZIONE ACS - PDC CON SOLARE TERMICO PER VETRERIA			
Descrizione intervento	Installazione di n.5 boiler elettrici per l'ACS ad uso igienico-sanitario della pv e installazione di una PdC collegata ad un impianto solare termico (n. 4 pannelli a tubi evacuati) per l'ACS della vetreria.		
Produzione solare termico [kWh]	PRE	0	
	POST	8.344	
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	+10%	+14.150	
Variazione gas naturale [Smc]	-10%	-4.544	

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Costo intervento IVA compresa [€]	30.630		
Variazione costo di esercizio [€]	+0%	+4	
VAN [€]	-27.623		
TIR [%]	0		
Tempo di ritorno [anni]	>20		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 solo su solare termico (3.058€)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-2%	2.508	
N. 3.1 ELETTRIFICAZIONE ACS - PDC CON SOLARE TERMICO PER VETRERIA - CALDAIE A CONDENSAZIONE pv			
Descrizione intervento	Intervento n.3 + sostituzione delle caldaie (pv) con generatori di calore a condensazione		
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	+10%	+14.526	
Variazione gas naturale [Smc]	-26%	-11.727	
Costo intervento IVA compresa [€]	168.850		
Variazione costo di esercizio [€]	-8%	-5.928	
VAN [€]	-28.483		
TIR [%]	-2,25		
Tempo di ritorno [anni]	>20		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 (v. solare termico e caldaie a condensazione)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-11%	-16.590	
N. 3.2 ELETTRIFICAZIONE ACS - SOLARE TERMICO PER VETRERIA - CALDAIE A CONDENSAZIONE pv			
Descrizione intervento	Installazione di n.5 boiler elettrici per l'ACS ad uso igienico-sanitario (pv) e di un impianto solare termico (n. 4 pannelli a tubi evacuati) per la vetreria + sostituzione delle caldaie con generatori di calore a condensazione (pv).		
Produzione solare termico [kWh]	PRE	0	
	POST	8.321	
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	+6%	+9.217	
Variazione gas naturale [Smc]	-21%	-9.321	
Costo intervento IVA compresa [€]	156.770		
Variazione costo di esercizio [€]	-7%	-5.341	
VAN [€]	-26.052		
TIR [%]	-2,26		
Tempo di ritorno [anni]	>20		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 (v. solare termico e caldaie a condensazione)		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-9%	-14.257	
N. 3.3 ELETT. ACS - SOLARE TERMICO PER VETRERIA - CALDAIE A CONDENSAZIONE - LED - Revamping e repowering FV			
Descrizione intervento	Combinazione degli interventi n. 1 + 2 + 3.2		
Produzione FV ed energia el. esportata [kWh]	PRE	73.023	esportata 0
	POST	133.908	esportata 7.926
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	-60%	-85.168	
Variazione gas naturale [Smc]	-12%	-5.547	
Costo intervento IVA compresa [€]	388.570		
Variazione costo di esercizio [€]	-36%	-27.655	
VAN [€]	+115.486		
TIR [%]	+3,04		
Tempo di ritorno [anni]	15		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 (v. solare termico, caldaie a condensazione e LED) + remunerazione FV		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-32%	-50.185	
N. 4 ELETT. ACS - SOLARE TERMICO e PDC PER VETRERIA - LED – Revamping e repowering FV) - PdC ESISTENTI REVERSIBILI (pv)			
Descrizione intervento	Combinazione degli interventi n. 1 + 2 + installazione di n.5 boiler elettrici per l'ACS ad uso igienico-sanitario (pv) e di un impianto solare termico e PDC per la vetreria + risc. e raff con attuali PdC (pv).		
Produzione FV ed energia el. esportata [kWh]	PRE	73.023	esportata 0
	POST	133.908	esportata 5.791
Variazione en. elettrica da rete [kWh]	+71%	+100.958	
Costo intervento IVA compresa [€]	251.350		
Variazione costo di esercizio [€]	-14%	-10.653	
VAN [€]	-29.438		
TIR [%]	-1,41		
Tempo di ritorno [anni]	>20		
Agevolazioni	Conto termico 2.0 (v. solare termico e LED) + remunerazione FV		
Emissioni di CO_2 evitate [kg CO_2]	-28%	-43.126	

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Con l'ipotesi n.1 di revamping LED, si osservano ulteriori benefici ambientali ed economici diretti, in relazione all'importante decremento del fabbisogno di energia elettrica per l'illuminazione artificiale (46%), con un risparmio totale di energia elettrica prelevata da rete per i servizi del 30%.

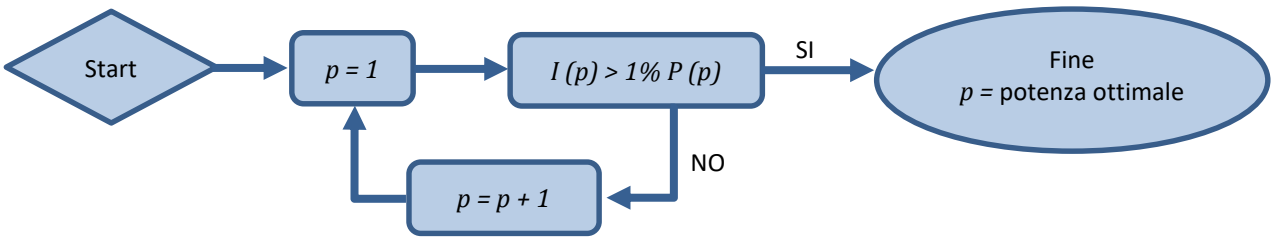
Altro intervento che si ritiene fondamentale realizzare, alla luce delle esigenze di consumo dell'utenza, è quello di aumentare la produzione dell'energia elettrica rinnovabile con un aumento della potenza fotovoltaica installata. Gli interventi n. 2 e n. 2.1 fanno riferimento al revamping e al repowering dell'impianto fotovoltaico (FV).

La prima parte dello studio sul fotovoltaico ha riguardato il dimensionamento ottimale dell'impianto in termini di potenza di picco, stimando la taglia ottimale da aggiungere a quella esistente. La potenza ottimale aggiuntiva è stata calcolata elaborando le curve di carico e la producibilità oraria di un nuovo impianto FV (tramite il tool online PVGIS del JRC) equamente distribuito tra la pensilina esistente nel parcheggio e la copertura della parte vecchia dell'edificio. Sulla pensilina è stato ipotizzato di installare pannelli piani, mentre sulla copertura (orientata a 37° SE) i pannelli sono stati ipotizzati inclinati di 20°. Sono state elaborate le produzioni orarie annue per una potenza di picco unitaria di 1 kWp dei due impianti che sono stati poi sommate per fare le elaborazioni su un unico impianto. È stato poi realizzato un algoritmo iterativo su base oraria (Figura 8) che ad ogni ciclo (annuale) aumenta la potenza di picco dell'impianto fino a quando l'energia cumulata annua immessa in rete raggiunge l'1% della produzione annua del nuovo FV. Si è scelto di minimizzare l'immissione nella rete elettrica nazionale e massimizzare dunque l'autoconsumo (*autoconsumo = produzione – immissione*) dal momento che per ogni kWh prodotto e auto consumato si ha mediamente un risparmio in bolletta di 0,27€ (sezione 5.2), mentre se lo stesso kWh venisse immesso in rete questo sarebbe pagato solamente 0,05€. È quindi evidente come l'autoconsumo sia più di cinque volte remunerativo rispetto all'immissione ed è per questo che la taglia ottimale massima è stata calcolata basandosi sul massimizzare il rapporto produzione/autoconsumo.

Dati:

- p (potenza di picco impianto in kW) [numero intero]
- i = ora dell'anno (tra 1 e 8760) [h]
- $P_i\,(p)$ = produzione oraria dell'impianto di taglia p [kWh]
- $P(p)$ = produzione annuale dell'impianto di taglia $p = \sum_i^{8760} P_i\,(p)$ [kWh]
- C_i = assorbimento orario da rete [kWh]
- C = assorbimento annuale = $\sum_i^{8760} C_i$ [kWh]
- $I_i\,(p)$ = immissione oraria nella rete elettrica nazionale = $\sum_i^{8760} C_i - P_i\,(p)$ [kWh]
- $I\,(p)$= immissione annuale nella rete elettrica nazionale = $\sum_i^{8760} I_i\,(p)$ [kWh]

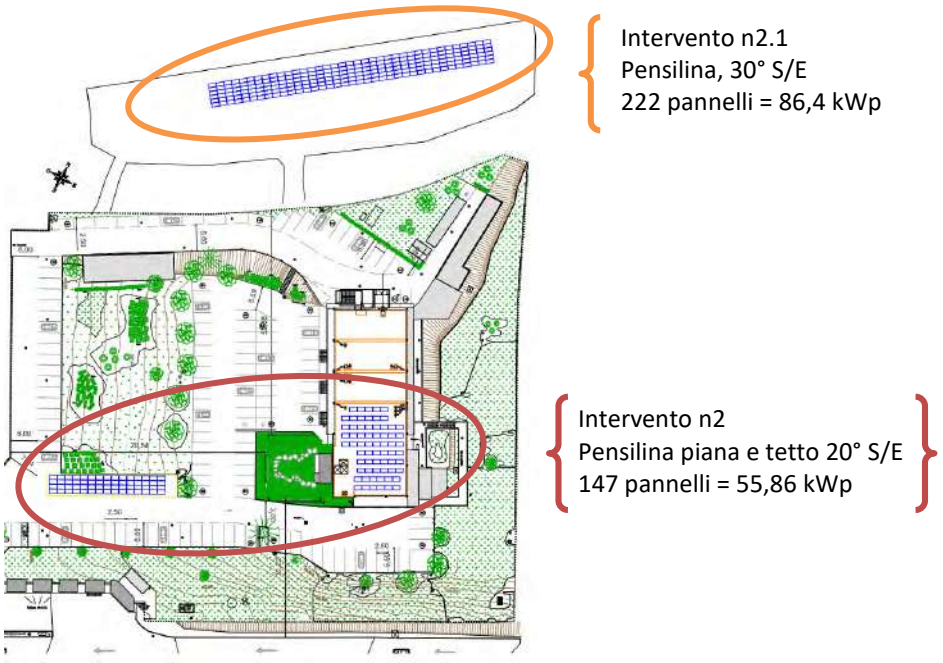
Figura 8: Algoritmo di dimensionamento



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Dai calcoli effettuati la potenza ottimale aggiuntiva *p* è di 52 kWp. Conoscendo la taglia ottimale è stato ipotizzato il primo intervento di revamping e repowering dell'impianto FV (Figura 9, Tabella 8).

Figura 9: Intervento n.2 (in basso - rosso) intervento n2.1 (in alto – arancio)



L'intervento riguarda il revamping della sezione 1 dell'impianto esistente, cioè la sostituzione dei 36 pannelli incentivati (6,44 kWp) con 17 pannelli da 380 Wp (sezione 1.1). La superficie restante della pensilina sarà coperta da ulteriori 73 pannelli per una potenza di picco di 34,20 kWp (sezione 1.2). I 90 nuovi pannelli saranno appoggiati sulla pensilina ed avranno pertanto inclinazione nulla. Saranno installati ulteriori 57 pannelli della stessa tipologia sul tetto della parte vecchia dell'edificio con un'inclinazione di 20° e un interasse tra le file di 2,00 m per una potenza complessiva di 21,66 kWp (sezione 4). La produzione stimata totale del nuovo impianto è di 136,6 MWh, con un autoconsumo pari a 134,6 MWh (98,5%) e un'immissione in rete di 2,0 MWh (1,5%)

Tabella 8: Intervento n.2, dati riepilogativi dell'impianto fotovoltaico.

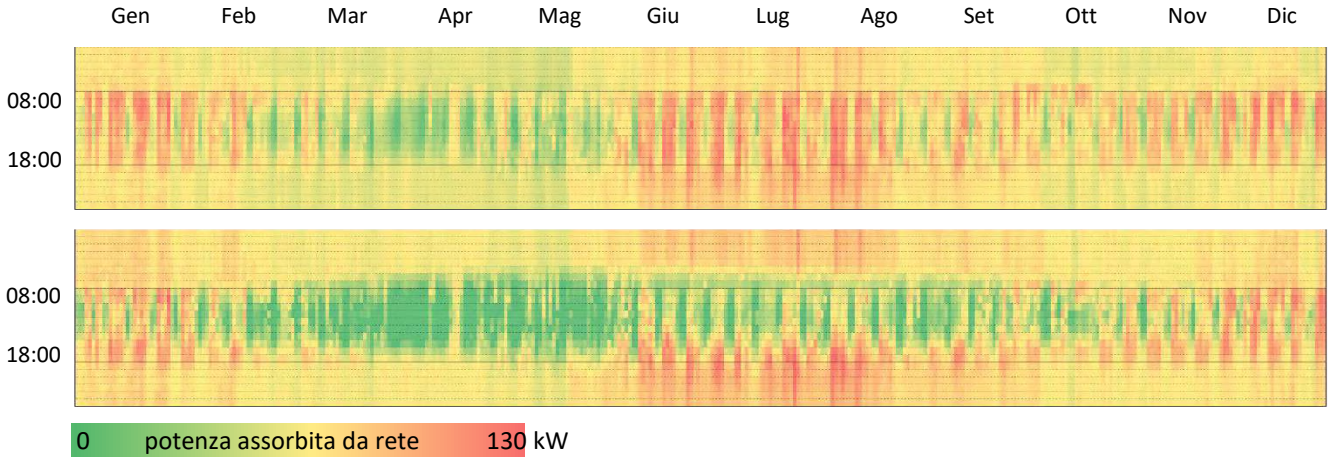
Sezione	Anno di allaccio	Ubicazione	P di picco [kW]	N. pannelli	P pannello [W]	Orientamento	Tilt
2	2015	Pensiline esterne	9,00	36	250	Sud/Est	15°
3	2018	Pensilina S/O	50,16	176	285	Sud/Ovest	15°
4	202#	Tetto	21,66	57	380	Sud/Est	20°
1.1	202#	Pensilina S/E	6,44	17	380	-	0°
1.2	202#	Pensilina S/E	27,76	73	380	-	0°
Tot			**115,02**				

Il secondo intervento (n. 2.1) non interviene invece sugli impianti fotovoltaici esistenti ma prevede l'installazione di una nuova sezione nel parcheggio sul lato Nord (in alto nella Figura 9). Il nuovo impianto sarà realizzato su pensiline FV ed è stato ipotizzato di usare gli stessi moduli dell'intervento n. 2. La pensilina, inclinata di 30° e orientata a Sud/Est, sarà ricoperta con 6 file da 37 pannelli ciascuna

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

per un totale di 222 pannelli di potenza totale di 84,36 kWp. Il netto aumento della produzione energetica ottenibile andrebbe conseguentemente a soddisfare in misura predominante il fabbisogno di energia elettrica per i servizi, in particolar modo quello per la climatizzazione estiva (Figura 10). Questo nuovo impianto, ha una produzione stimata totale di 188 MWh, con un autoconsumo pari a 178 kWh (94,5%) e un'immissione in rete di 10 MWh (5,5%).

Figura 10: Curve di carico annuali su base oraria (PRE intervento in alto - POST intervento n2.1 in basso)



Per quanto riguarda invece l'efficientamento della generazione a gas naturale sfruttata nella parte vecchia dell'edificio, dall'ipotesi di intervento n.3, integrata per step successivi con le soluzioni n.3.1 e 3.2, si può dedurre anzitutto che la separazione della produzione di ACS dalla climatizzazione invernale è necessaria per evitare di mantenere in esercizio tutto l'anno un sistema di generazione di taglia notevole; oltreché, svincolando la produzione di ACS dalla rete attuale, si scongiurerebbe anche il problema della Legionella, batterio pericoloso per la salute umana che può proliferare negli impianti idrici. Inoltre, visto il cospicuo consumo di ACS legato al lavaggio della vetreria di laboratorio, si rivela utile prevedere un'ulteriore separazione nella produzione per l'uso esclusivamente igienico sanitario e l'integrazione dell'impianto solare termico nel sistema di accumulo per l'uso lavaggio. Tuttavia, come si può osservare dall'analisi economica relativa a tali interventi, scenari di questo tipo non sono convenienti. L'intervento n. 3.3, che combina insieme i precedenti, sembra invece essere vantaggioso dal punto di vista economico (visto il VAN positivo), ma poco fattibile considerando il tempo di ritorno di 16 anni. In ultima analisi, è interessante commentare i dati stimati per l'intervento n.4 di decarbonizzazione completa dell'utenza, in quanto tale soluzione può rappresentare un utile spunto di riflessione per impostare una conduzione più sostenibile dell'edificio. L'estensione del funzionamento delle attuali pompe di calore della parte vecchia dell'edificio, anche in regime invernale, è infatti una soluzione attuabile a costo ridotto nell'immediato, che integrata con interventi di building automation sui sistemi di distribuzione, gestione e regolazione dell'impianto potrebbe certamente apportare vantaggio concretizzando l'abbandono totale delle fonti fossili, con un guadagno ambientale notevole nel lungo termine. Tale scelta si pone quindi come input a compiere una svolta verso la sostenibilità e l'ottimizzazione dei consumi energetici.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

6. Conclusioni

La sede di Arpa UMBRIA a Perugia rappresenta un caso di studio molto interessante in ambito di efficientamento energetico degli edifici, la cui trattazione può fungere da esempio per indirizzare imprese e privati cittadini verso la suddetta tematica. Il presente lavoro descrive e ripercorre infatti le fasi della diagnosi energetica dell'edificio, il quale è prevalentemente caratterizzato da strutture scarsamente performanti dal punto di vista dell'isolamento termico e da impianti termotecnici obsoleti o non più rispondenti ai moderni standard. Lo studio dello stato attuale relativamente al consumo di energia, condotto attraverso l'analisi di un ampio storico di dati e supportato da rilievi strumentali e modelli di simulazione energetica tramite software, ha permesso quindi di valutare i flussi di energia per il soddisfacimento delle esigenze dell'utenza, che si è rivelata decisamente energivora, con larga parte del fabbisogno coperto da fonti fossili e una dotazione insufficiente di impianti a fonti rinnovabili. Sulla base delle criticità riscontrate è stata così definita una pianificazione di interventi migliorativi del caso di studio, mirati al raggiungimento di un uso razionale delle risorse e di un livello adeguato del comfort indoor per gli occupanti. Le proposte prese in esame, di cui poi è stata eseguita anche una preliminare analisi tecnico-economica, hanno interessato essenzialmente l'integrazione delle fonti rinnovabili per la copertura del fabbisogno energetico, verso un graduale e definitivo abbandono delle fonti fossili e l'ottimizzazione nella gestione dei sistemi energetici.

Riferimenti

1. ENEA, Rapporto annuale di efficienza energetica - Anno 2021, 2021.
2. Zink, K.J. Designing sustainable work systems: The need for a systems approach. *Applied Ergonomics* **2014**, 45, 126-132.
3. Chen, S.; Zhang, G.; Xia, X.; Chen, Y.; Setunge, S.; Shi, L. The impacts of occupant behaviour on building energy consumption: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* **2021**, 45.
4. Proietti, M. G.; Moretti, E.; Pisello, A. L.; Nicolini, A.; Corneli, A.; Proietti, L. La consapevolezza e la sensibilizzazione degli occupanti come strumento per l'efficienza energetica, la sostenibilità ambientale e il comfort: il caso di studio ARPA UMBRIA. In *Atti del XXI Congresso Nazionale CIRIAF - Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana, 8 - 9 aprile 2021, Perugia*; Morlacchi Editore University Press ISBN 978-88-9392-279-1 (online), Perugia, Italia, 2021.
5. Himeur, Y.; Alsalemi, A.; Al-Kababji, A.; Bensaali, F.; Amira, A.; Sardianos, C.; Dimitrakopoulos, G.; Varlamis, I. A survey of recommender systems for energy efficiency in buildings: Principles, challenges and prospects. *Information Fusion* **2021**, 72, 1-21.
6. Salata, F.; Golasi, I.; di Salvatore, M.; de Lieto Vollaro, A. Energy and reliability optimization of a system that combines daylighting and artificial sources. A case study carried out in academic buildings. *Applied Energy* **2016**, 169, 250-266.
7. Ruiz, G. R.; Bandera, C. F. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies* **2017**.

Riconoscimenti

Gli autori esprimono il loro ringraziamento alla dottoressa Agnese Corneli per il suo contributo al lavoro nelle fasi di indagine sperimentale e modellazione dell'edificio.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Fermentable sugars production from cherry tree pruning: Response surface model optimization of EtOH organosolv pre-treatment

F. Spaccini[1*], T. Giannoni[1], E. Belloni[1,2], S. Mateo[3], A.J. Moya[3], C. Buratti[1,2]

[1] CIRIAF-CRB, University of Perugia, via G. Duranti n.67, 06125, Perugia (PG)

[2] Department of Engineering, University of Perugia, via G. Duranti n.93, 06125, Perugia (PG)

[3] Chemical, Environmental and Materials Department. University of Jaén. Campus Las Lagunillas, 23071 Jaén, Spain

***** E-Mail: francesco.spaccini@studenti.unipg.it

Abstract: In the agro-energy field, biofuels represent one of the most suitable solutions to the European Union's goal to increase the percentage of energy from renewable sources, for reducing dependence on producer countries and contributing to the decrease of greenhouse gas emissions. Biofuels can be easily obtained from the most important agricultural species (maize, sunflower, wheat, barley, sugar beet), but it is now well known that producing biofuels from such feedstock leads to many negative aspects linked to the increase in the prices of these commodities, the competition between the two destinations energy and food and the use of irrigation water, fertilizers, and herbicides for producing these crops. For these reasons, the research on second generation biofuels derived from agricultural, forestry, and industrial waste lingo-cellulosic biomass is promoted because these feedstocks are the most available and cheap and they are also not in competition with the "food crops". Among lignocellulosic residues, cherry tree pruning is extensively available in the South of Spain, especially in Andalusia; thus they represent an interesting raw material for the production of biofuels such as bioethanol. In the entire production process, pre-treatment is the most critical phase from a technical and economic point of view. In this paper the above mentioned biomass was submitted to organosolv pre-treatment, in order to optimize the process for obtaining a solid with the maximum content of cellulose, easy to hydrolize to glucose and so ferment it for bioethanol obtainment. In this sense, the aim of this work was to identify the best operative conditions of pretreatment in terms of temperature, reaction time, and ethanol concentration. The whole experimental procedure was designed and analyzed by Response Surface

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Methodology, a statistic multivariate model that allows to investigate the effect of different parameters on a process and define the optimum values of these variables to optimize the response. The optimal predicted conditions to perform this pre-treatment process were EtOH/H_2O concentration = 67% (v/v), temperature = 150 °C, and reaction time = 30 min, leading a solid with a cellulose percentage of 81,1%, which represents an excellent treatment since the solid obtained can be considered practically pure cellulose.

Keywords: Organosolv pre-treatment, no food derived bioethanol, biorefinery, Response Surface Methodology, cherry tree pruning

1. Introduction

Spain is the second largest producer of cherries in Europe and the seventh largest producer in the world [1], so cherry tree pruning represents one of the most diffuse residues from agricultural crops, therefore, it can be considered an interesting feedstock to be investigated for ethanol production. This reason, together with its low cost, and the scarce information in Literature were at the basis of the choice of investigation on cherry tree pruning.

The structure of lignocellulosic biomass mainly consists of lignin, cellulose, and hemicellulose, forming a complex network in which lignin creates a physical protection around the sugar part [4]. Therefore, in the entire process that leads to the production of ethanol, pre-treatment represents the most relevant step. Several pre-treatment ways are largely studied: physical, chemical, and biological methods or a combination of two or more of them [2, 3].

Organosolv is a chemical treatment which uses several organic or aqueous solvent mixtures to solubi- lize lignin and hemicellulose, yielding a cellulose-rich residue with increased accessibility to hydrolytic enzymes [4]. The most commonly used solvents in the organosolv pre-treatment are short-chain aliphatic alcohols (e.g., methanol, ethanol), polyols (e.g., glycerol, ethylene glycol (EG), triethylene glycol), organic acids, acetone, dioxane, alkylene carbonates (ACs) and γ-Valerolactone (GVL). Some of these organic solvents can be obtained from renewable sources, improving the sustainability of biofuels and biochemical production [5]. By including a small amount of acid catalyst into an organic solvent, a mild pretreatment can be carried out with low temperatures and reaction times. The organic solvent improves the acid catalytic activity, generating a porous residue with an easily accessible and low degree of polymerization cellulose [6].

Ethanol organosolv pre-treatment is a promising pretreatment to enhance the enzymatic digestibility of lignocellulosic biomass for efficient enzymatic saccharification. Use of ethanol in organosolv pre-treatment can offer benefits such as low solvent cost, lack of toxicity, environmental friendliness, full miscibility with water, and easy solvent recovery and reuse [7].

To achieve all these objectives in the most efficient manner the pretreatment optimization would be a necessary step towards the sustainability of the whole process. This was possible through the implementation of a Response Surface Method in three steps: (1) to collect data in input on the basis

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

of a statistically designed experimental plan, (2) to correlate the experimental data with a regression model, (3) to predict the values of response variables in output [8]. In the present paper, by means of a central composite experimental design, the effect of the three main operative parameters on the fermentable sugars yield are investigated: EtOH/water concentration (from 27% to 74% v/v), residence time (from 5.9 min to 34.1 min), and reaction temperature (from 143.9 °C to 186.2 °C). Pre-treatment operating parameters were used as input process variables in a Response Surface Methodology design, assessing the response in output in terms of percentage of recovered cellulose, percentage of recovered lignin, and percentage of solid fraction removed after the pretreatment.

2. Materials and methods

2.1. Feedstock

Cherry tree pruning were collected from 16 to 18 years old trees (located between 453 669-455 079 m E and 4 180 397 - 4 169 222 m N relative to UTM coordinates) after the fruit harvest in a local farm in Jaén, south of Spain; the samples were taken from fresh branches located around 1.5 m above the ground. Marvin and 4-30 are the cultivar's plants (Figure 1).

The biomass was milled using a laboratory rotary blade mill to obtain a powder with an average particle size of 0.5 mm, which was used as raw material (RM) for the experimentation.

The moisture analysis of solid samples was performed using a HB43-S Halogen Classic plus (Mettler Toledo, Columbus, OH, USA). Monosaccharide concentrations were analyzed using ultra-high performance liquid chromatography (UHPLC) with a Dionex UltiMate 3000 (Termo Scientifc, Sunnyvale, CA, USA) equipped with a Bio-Rad Aminex HPX-87H column (Biorad, CA, USA). The flow rate and the temperature were set at 0.6 mL/min and 50 °C, respectively. The refractive index detector, an ERC RefractoMax 520 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA), was set at 50 ◦C. The mobile phase was a 0.01 N H_2SO_4 water solution. Fractionation of biomass was conducted using an Ethos One Microwave-assisted extractor (Milestone srl, Sorisole (BG)-Italy) [9].

Figure 1. Cherry tree pruning

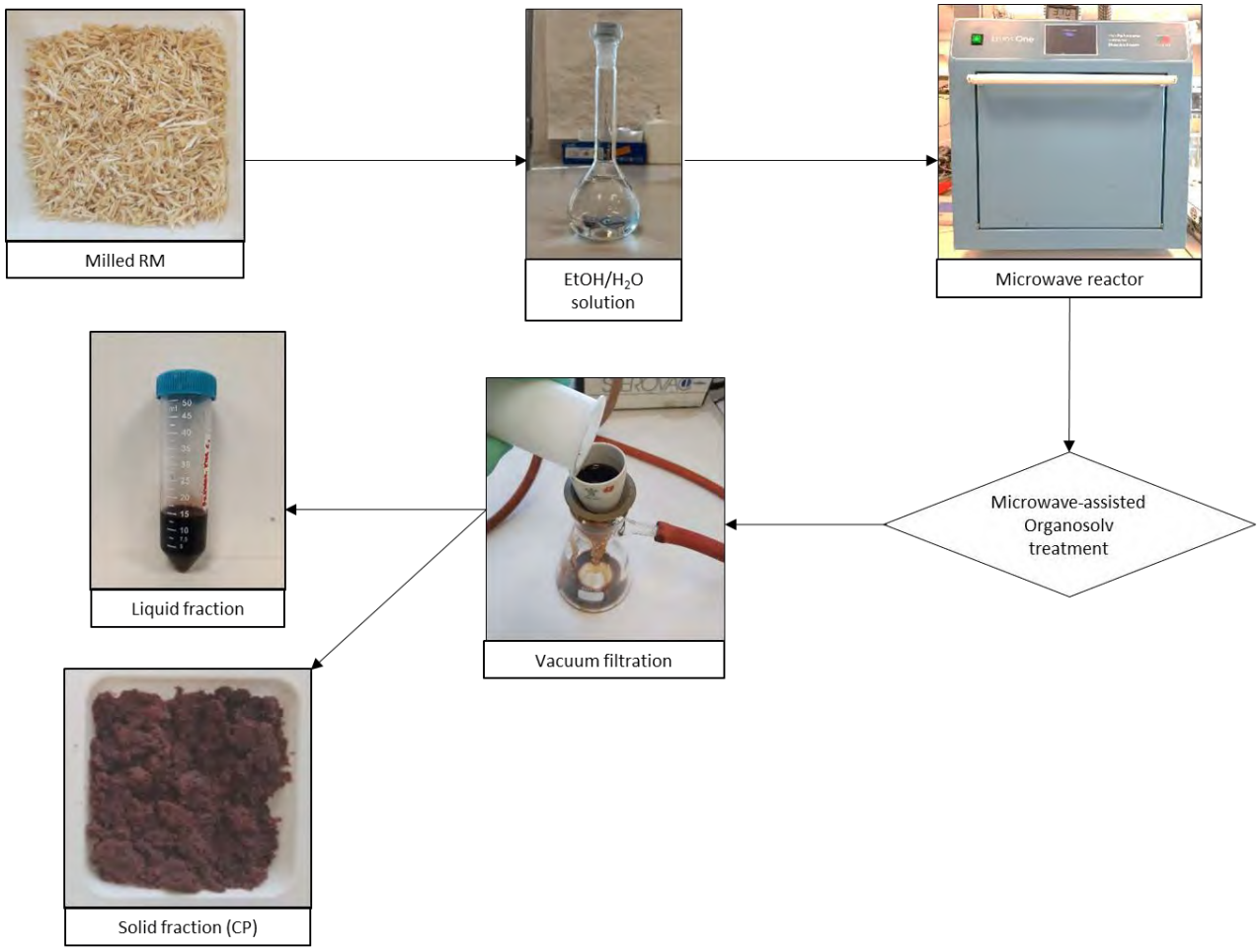


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2. Pretreatment

The milled RM (2.5 g) was added to a PTFE vessel along with an acidified EtOH/water solution, using a 1:10 solid to liquid ratio. The acidified EtOH/water solution was prepared according to the Design of Experiment (DoE) previously prepared. The acid catalyst (H_2SO_4) was directly added to the EtOH/water solution to prepare different percent by mass solutions. The RM was treated at different temperatures and times following the DoE in the microwave reactor. At the end of the reactions, the cellulose-rich pulp (CP) was separated from the acidified EtOH/water solution by vacuum filtration using a Büchner flask. The CP was then washed with an amount of deionized water necessary to remove all traces of solvent and acid, and subjected to drying and subsequent characterization by UHPLC (Figure 2).

Figure 2. Process flowchart of the various steps performed to produce CP.



2.3. Experimental Design

The chosen experimental design is a central composite circumscribed design (CCCD), which has been employed for the optimization of many physical and chemical processes and analytical procedures. It consists of three parts: a central point, a full factorial model with the points located at a cube's corners, and a star design with the points at a distance α from the center. While the distance from the center

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

of factorial points is conventionally evaluated ± 1, the length of α depends on the number of variables taken into account by the model. In this work we investigated three variables, and the star points are located in the sphere in which the cube is circumscribed so the value adopted for α was ± 1.41 [10].Input factors chosen were EtOH concentration (C), temperature (T), and reaction time of the pre-treatment process (t). A total of 17 experiments, generated by statistical software Design Expert 13 were performed in random order, including the three center replicates, in order to estimate the pure error sum of squares (Table 1).

Experimental data were analyzed by Analysis of Variance (ANOVA) to assess the contribution of each factor to the model and the correlation between them. The non-significant terms were removed from the model by backward elimination procedure.

Table 1. Experimental sequence for organosolv pre-treatment tests

Run	Type	t (min)	T (°C)	C (v/v)
1	-1,-1,-1	10	150	0,33
2	+1,-1,-1	30	150	0.33
3	-1,+1,-1	10	180	0.33
4	+1,+1,-1	30	180	0.33
5	-1,-1,+1	10	150	0.67
6	+1,-1,+1	30	150	0.67
7	-1,+1,+1	10	180	0.67
8	+1,+1,+1	30	180	0.67
9	-1.41,0,0	5.9	165	0.5
10	+1.41,0,0	34.1	165	0.5
11	0,-1.41,0	20	143.9	0.5
12	0,+1.41,0	20	186.2	0.5
13	0,0,-1,41	20	165	0.27
14	0,0,+1.41	20	165	0.74
15	0,0,0	20	165	0.5
16	0,0,0	20	165	0.5
17	0,0,0	20	165	0.5

Response Surface Methodology (RSM) was used for modelling the experimental responses in order to get the optimal result, i.e. maximizing Cellulose Recovery (CR) and minimizing Lignin Recovery (LR).

2.4. Analytical Procedure and Calculation

All the samples were characterized in triplicate, in accordance to the National Renewable Energy Laboratory (NREL, Golden, CO, USA) analytical methods for biomass, in order to identify their composition [11]. RM was characterized in terms of moisture, cellulose, hemicellulose, lignin and ash content [12]; the extractives content was not determined because, since ethanol was used in the organosolv pre-treatment, it contributes significantly to the extraction of these organic compounds. An acid hydrolysis with H_2SO_4 of each solid sample (RM and CP) was performed to obtain C5 and C6 monomers from cellulose and hemicellulose polymers, which were detected by UHPLC. The cellulose

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

and hemicellulose content as structural polymers was calculated by using an anhydrous correction factor of 0.88 (C5) and 0.90 (C6). The remaining acid-insoluble residue was used to calculate the acid-insoluble lignin, after removing the ash content, by gravimetric analysis [13]. The CR (%) was calculated as follows (1):

$$[CR = C_{CP}/C_{RM} \cdot 100] \quad (1)$$

where C_{CP} is the cellulose content (g) in the CP and C_{RM} is the cellulose content (g) in the RM.

The LR (%) was calculated as follow (2):

$$[LR = AIL_{CP}/AIL_{RM} \cdot 100] \quad (2)$$

where AIL_{CP} is the acid-insoluble lignin content (g) in the CP and AIL_{RM} is the acid-insoluble lignin content (g) in the RM.

3. Results and discussion

3.1. Characterization of Raw Material and CP

The RM presented a moisture content of 6.23% (w/w) and it was characterized in terms of cellulose, hemicellulose and lignin content. The results are shown in Table 2:

Table 2. Cherry tree pruning composition before the organosolv pre-treatment.

Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
37.6%	16.9%	22.8%

The cellulose and hemicellulose content was 37.6% and 16.6% respectively. While hemicellulose content was similar to a typical one in hardwood, cellulose content was lower (usually glucan content in hardwood is near or higher than 40%), but comparable to a crop residue. However, sugar fraction was almost 50% of dry biomass and this confirms that this material is an attractive feedstock for bio-ethanol production. Acid insoluble lignin fraction was slightly above 20%.

The CP resulting from each run was characterized to evaluate the content of cellulose, hemicellulose and lignin. It is interesting to note that most of the CP samples showed excellent enrichment in cellulose, having a cellulose content even higher than 70%, with values reaching almost 95% in run #6. This result alone is enough to underline the efficiency of the organosolv pre-treatment with EtOH/water mixture. Nevertheless, optimization is still necessary as the CR was highly variable from sample to sample, as shown in Table 3.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Table 3. Peach tree pruning: composition of solid residues after the EtOH/water pretreatment

Run	Type	Cellulose Recovery (CR)	Lignin Recovery (LR)
1	-1,-1,-1	52.66%	28.99%
2	+1,-1,-1	62.14%	35.64%
3	-1,+1,-1	59.82%	40.18%
4	+1,+1,-1	37.80%	60.53%
5	-1,-1,+1	75.25%	16.08%
6	+1,-1,+1	81.11%	13.58%
7	-1,+1,+1	85.77%	14.23%
8	+1,+1,+1	67.96%	32.18%
9	-1.41,0,0	71.63%	23.16%
10	+1.41,0,0	64.80%	35.20%
11	0,-1.41,0	69.54%	21.98%
12	0,+1.41,0	65.25%	34.28%
13	0,0,-1,41	50.46%	46.79%
14	0,0,+1.41	86.02%	13.98%
15	0,0,0	69.57%	28.55%
16	0,0,0	70.60%	29.40%
17	0,0,0	70.44%	29.12%

Table 3 shows that the cellulose concentration in the pre-treated cherry biomass ranges from a minimum of 37.8% to a maximum of 86.0% depending on the treatment used. Different pre-treatments, in function of their input factors, have different degrees of severity. In particular, it can be seen that the cellulose content in the pre-treated biomass is strongly influenced by the ethanol concentration in the solution; as it increases, so the CR does. The same can be said for the lignin content which is again strongly dependent on the concentration of the organosolv solution. Higher EtOH concentration gets lower lignin contents in the pre-treated biomass, showing that a higher organosolv solution severity improves the delignification process, allowing more cellulose to be available for the subsequent bioethanol production steps.

Regarding the time factor, this has less influence on the process than the organosolv concentration; this can be seen in experiments 9# (-1.41,0,0) and 10# (+1.41,0,0), which have the same values of temperature and concentration but different treatment times (the longest and shortest). In these two experiments, the recovery of cellulose remains almost similar, demonstrating the limited influence of this input parameter on the process.

Temperature is the last variable considered as an input factor. Considering runs 2# (1,-1,-1) and 4# (1,1,-1) which have the time and concentration but different values for the treatment temperature, lower for 2# and higher for 4#. As expected, when the temperature increases, the concentration of cellulose in the CP increases and the lignin content decreases, demonstrating that as the temperature grows, the severity and efficiency of the treatment are also improved.

Regarding hemicellulose, it is noted that in all the pre-treatments its content within the pre-treated biomass is very low, with even zero values for high severity treatments. This shows therefore the solubility of pentose sugars as the severity of the treatment increases [14].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

The results obtained from this first phase can be considered acceptable; in other results reported in literature [15, 16], the content of cellulose in the pre-treated biomass is in agreement or even higher than the one observed in the present study.

3.2 Optimization of the best pre-treatment condition using RSM

The RSM was employed for the statistical modeling and optimization of CR and LR. The experimental data obtained from the 17 runs were used to calculate the main effect of the variables (time, temperature, and EtOH/water ratio) on responses. The backward elimination method with a significance level of 0.1 was used for responses analysis, generating the following multiple linear regression Equations (4)-(5):

$$CR\ (\%) = 67.107 - 2.851 \cdot t - 2.160 \cdot T + 12.341 \cdot c - 6.896 \cdot tT \quad (4)$$

$$LR\ (\%) = 29.639 + 4.963 \cdot t + 5.860 \cdot T - 11.316 \cdot c + 4.270 \cdot tT \quad (5)$$

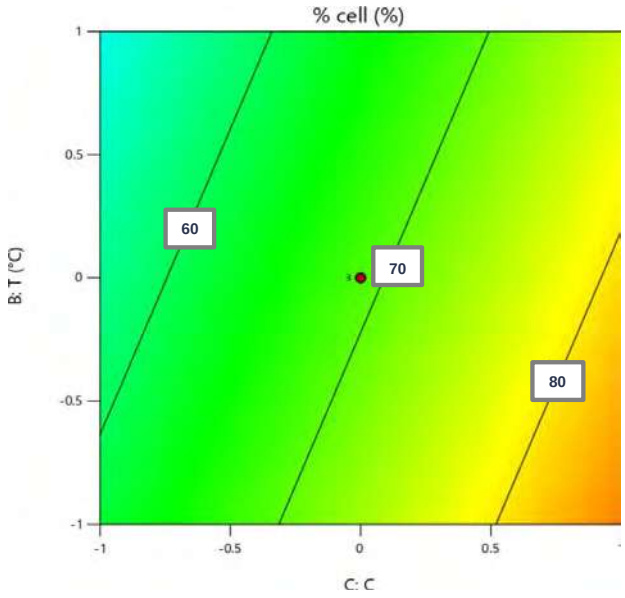
The multiple linear regression equations explained the total deviance in the responses quite well, and the results are shown in Table 4.

Table 4. Model statistics for CR, LR.

Statistics	CR	LR
R^2	95.6%	96.1%
R_{adj}	94.7%	94.9%

The model generated by the software for the cellulose content found in pre-treated cherry biomass is represented by II grade polynomial, Equation (4), where we do not have pure terms, but only an interaction between the variables time and temperature, whereas the other terms are linear. Figure 3 shows the contour plot of CR (%) as a function of temperature and EtOH/water ratio, with time maintained at the intermediate value, coded zero, as it is the most negligible parameter.

Figure 3. Contour plot of cellulose recovery (%) after organosolv pretreatment.

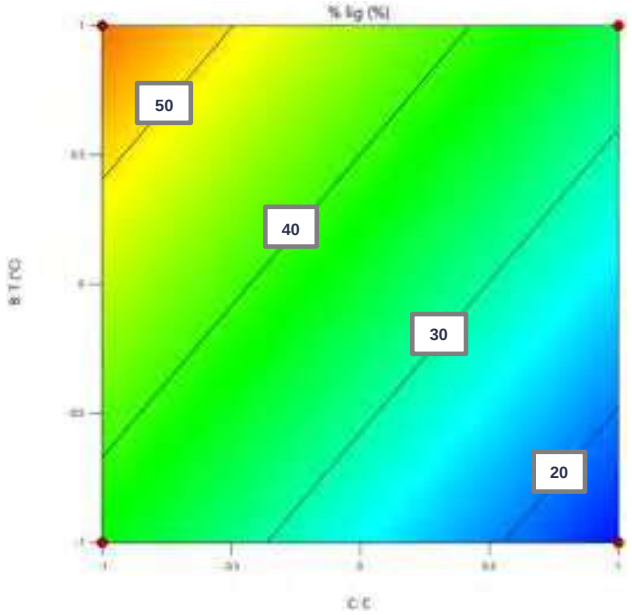


ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

From Figure 3, it is evident that the concentration of the solution has the greatest influence on the output (CR). For high values of concentration, above 0.5 coded, the cellulose content goes up to more than 80% (in correspondence of the orange area), even at low temperatures (this aspect could be very important for industrial purposes).

Equations (5) represents the model generated for the lignin content in cherry biomass after pre-treatment (LR). Figure 4 shows the lignin content percentage as a function of temperature and concentration, keeping the time constant.

Figure 4. Contour plot of lignin recovery (%) after organosolv pretreatment.



The contour lines arranged at 45° show that the two input parameters investigated have a similar dependence on lignin content at the end of pre-treatment. With high concentrations of the solution the lignin still remaining in the biomass is less than 20% (in correspondence of the blue area).

The Equations (4)-(5) were used to predict the optimal response under the range of the investigated variables. Figure 6 shows the optimization plot for the three investigated responses. The optimization plot shows how different experimental settings affect the predicted responses for a stored model. Design Expert 13 searches for variable settings with higher composite desirability, i.e., optimal solution. In this case, the optimal solution is given by simultaneously maximizing CR and minimizing LR in the pre-treated biomass. The vertical red lines on Figure 5 represent the current factor level settings (the coded values are displayed in Figure 6) of the optimal solution. The composite desirability for all the responses was equal to 0.983, which indicates that a favorable result can be obtained at the proposed factor level settings.

The best conditions suggested by the optimization process were 150 °C, for 30 minutes, with 0.67 EtOH/water ratio. The responses predicted for CR and LR were 81.1% and 13.6%, respectively.

In order to verify the validity of the models, the RM was treated using the optimal condition suggested. The EtOH-based organosolv treatment was performed in triplicate and the characterization of CP shows that it was almost entirely made up of cellulose (85.8%), and the lignin content was very

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

low (15.5%), demonstrating that the EtOH/water solution can perform efficiently both lignin and hemicellulose solubilization.

Figure 5. Optimization plot for maximizing CR, and minimizing LR and SFR

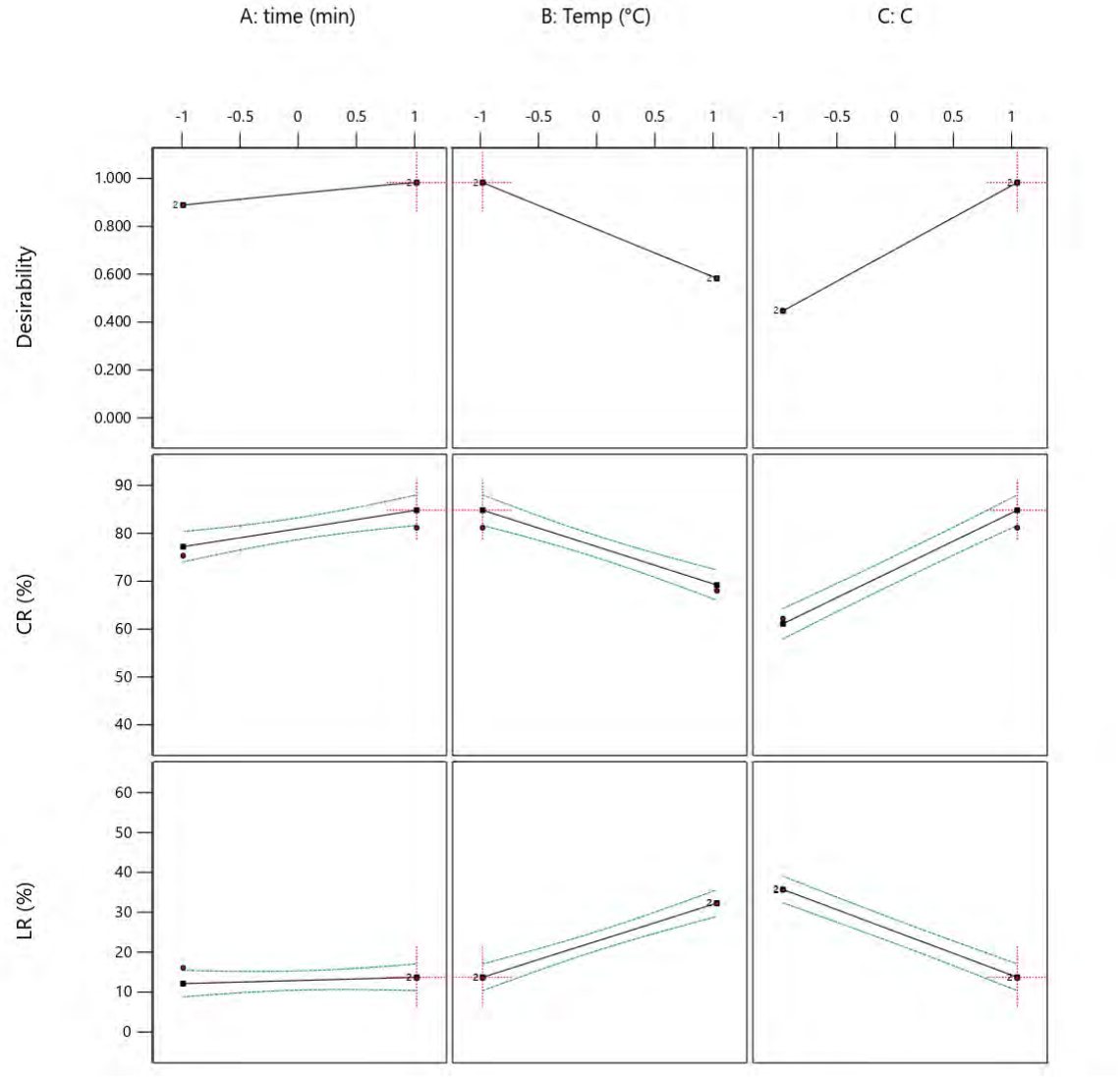


Figure 6. Optimization table for maximizing CR and minimizing LR. A maximum composite desirability of 0.983 is achieved at 30 min of time, at a temperature of 150 °C and EtOH/water ratio of 0.67.

	Number	time	Temp	C	CR	LR	Desirability	
	1	**1.000**	**-1.000**	**1.000**	**84.755**	**13.740**	**0.983**	**Selected**
	2	0.990	-1.000	1.000	84.717	13.732	0.983	
	3	0.982	-1.000	1.000	84.688	13.727	0.982	
	4	0.961	-1.000	1.000	84.608	13.710	0.982	
	5	1.000	-1.000	0.991	84.652	13.836	0.981	
	6	0.922	-1.000	1.000	84.458	13.678	0.980	
	7	0.886	-1.000	0.997	84.286	13.681	0.978	
	8	-1.000	0.958	1.000	86.020	15.461	0.978	
	9	-1.000	0.969	1.000	86.071	15.480	0.978	
	10	-1.000	0.938	1.000	85.929	15.427	0.977	

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Conclusion

In this study, an evaluation of fermentable sugars production from cherry tree pruning (biomass nowadays unknown in the Literature) for bioethanol production was performed. The three most representative variables of EtOH organosolv pre-treatment, reaction time, temperature and EtOH/water ratio, were ranged in order to optimize the pre-treatment step with RSM methodology, assuming cellulose recovery (CR) and lignin recovery (LR) as main responses of the model. Statistical analysis revealed that the concentration of the EtOH solution and the temperature mainly influence the responses. In particular, the best yields are obtained at high EtOH concentrations and low temperature, while the reaction time has less influence on the process. In the investigated experimental region, the optimal theoretical yields were obtained at 67% (v/v) EtOH/H_2O concentration, 150 °C of temperature and 30 min of reaction time that can lead to 81.1% CR, 13.6% LR. These results can be judged satisfactory in the context of forest and pruning biomass and it could be further increased by proceeding with the optimization of the following stages of the bioethanol production process as well as future scale up from laboratory to pilot scale. Another development in this research could be to recover the solvent used in the pre-treatment as efficiently as possible in order to achieve a sustainable process in a circular economy view.

References

1. Negueroles Pérez, J. *Cherry cultivation in Spain*. in *IV International Cherry Symposium 667*. 2001.
2. de Carvalho, D.M., et al., *Assessment of alkaline pretreatment for the production of bioethanol from eucalyptus, sugarcane bagasse and sugarcane straw.* 2016. **94**: p. 932-941.
3. Singh, R., et al., *A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential.* 2014. **32**: p. 713-728.
4. Grangeiro, L.C., et al., *New trends in biogas production and utilization*, in *Sustainable Bioenergy*. 2019, Elsevier. p. 199-223.
5. Zhang, Z., et al., *Organosolv pretreatment of plant biomass for enhanced enzymatic saccharification.* 2016. **18**(2): p. 360-381.
6. Zhang, H., et al., *Kinetic study on the liquefaction of wood and its three cell wall component in polyhydric alcohols.* 2014. **113**: p. 1596-1600.
7. Zhou, Z., et al., *Lignocellulosic biomass to biofuels and biochemicals: a comprehensive review with a focus on ethanol organosolv pretreatment technology.* 2018. **115**(11): p. 2683-2702.
8. Gilmour, S.G.J.B., *Response surface designs for experiments in bioprocessing.* 2006. **62**(2): p. 323-331.
9. Giannoni, T., et al., *Fractionation of Cynara cardunculus L. by Acidified Organosolv Treatment for the Extraction of Highly Digestible Cellulose and Technical Lignin.* 2021. **13**(16): p. 8714.
10. Bezerra, M.A., et al., *Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry.* 2008. **76**(5): p. 965-977.
11. Gelosia, M., et al., *Acid-Assisted Organosolv Pre-Treatment and Enzymatic Hydrolysis of Cynara cardunculus L. for Glucose Production.* 2020. **13**(16): p. 4195.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

12. Sluiter, A., et al., *Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass.* 2010(TP-510-42618).
13. Sluiter, A., et al., *Determination of sugars, byproducts, and degradation products in liquid fraction process samples.* 2006. **11**: p. 65-71.
14. Soltaninejad, A., M. Jazini, and K.J.C. Karimi, *Sustainable bioconversion of potato peel wastes into ethanol and biogas using organosolv pretreatment.* 2022. **291**: p. 133003.
15. Hrůzová, K., et al., *Organosolv fractionation of spruce bark using ethanol–water mixtures: Towards a novel bio-refinery concept.* 2021. **341**: p. 125855.
16. Tsegaye, B., C. Balomajumder, and P.J.R.E. Roy, *Organosolv pretreatments of rice straw followed by microbial hydrolysis for efficient biofuel production.* 2020. **148**: p. 923-934.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Natural extract exerting antimicrobial activity against food-borne pathogen: a 'green' strategy as processing aid treatment to ensure the hygiene and safety food industry

Rossana Roila[1,*], David Ranucci[1], Sara Primavilla[2], Caterina Altissimi[1], Domenico Pettas[3], Andrea Valiani[2], Raffaella Branciari[1]

[1] Department of Veterinary Medicine, University of Perugia, Vias S. Costanzo 2, Perugia Italy
[2] Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Umbria e delle Marche "Togo Rosati", Via Salvemini 1, Perugia, Italy
[3] STYMON Natural Products IKE, Greece

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: rossana.roila@unipg.it

Abstract: Microbial hazards represent a major concern for the food industry and following consumers' preferences towards more natural and healthier food products, there is a worldwide effort to minimize the use of chemical preservatives to limit bacterial growth. This study aims to evaluate antimicrobial activity of polyphenolic extract derived from olive oil production by-products against two different foodborne pathogenic species such as *Campilobacter jejuni* and *Staphilococcus aureus.* The minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined by means of broth microdilution method. The results show that the polyphenolic extracts exerts an antimicrobial effect on the targeted microorganisms posing the basis to a sustainable strategy of by-product reuse of agricultural chain as processing aid treatment to increase the hygiene and safety of all the steps that characterize the food industry.

Keywords: by-products; reuse; circular economy; poliphenols; natural antibacterials;

1. Introduction

Microbial contamination is a major concern in the food industry, as microbial growth can result in undesirable changes in food characteristics such as appearance, texture, flavour and odour reducing therefore food quality or cause food loss [1].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_049_pp_444

Currently, following consumers' preferences towards more natural and healthier food products, there is a worldwide effort to minimize the use of chemical preservatives as alternative methods able to limit bacterial growth during the product's shelf-life. Consequently, the scientific interest in the search for natural antimicrobial compounds like biopreservatives is growing remarkably [2]. In recent decades, the research has shown the potential exploitation of plant products as bioactive compounds source of industrial interest [3, 4]. The application of natural antimicrobial molecules in food could be useful to prevent or limit the growth of spoilage and pathogenic microorganisms [5, 6].

Different by-products derived from olive oil extraction process are rich in phenolic compounds that have already demonstrated possible applications in feed and food industry [7]. Among natural products, olive-mill by-products could be an alternative source for biologically active phenols compounds that can be exploited in the food industry. The cultivation of olive tree for olive oil manufacture is widespread on a global level, especially in the Mediterranean area. For instance, Europe produces 75% of the world's olive oil and in particular Italy accounts for the 31% being one of the largest producers in the EU [8].

Olive oil extraction generates diverse by-products and in different amounts depending on the production techniques used, which are all treated as potential pollutants [9]. Among these, liquid ones accounts for approximately 49% (w/w) of the processed olives in relation to the extraction method used. This waste product is rich in phenolic and others bioactive compounds, such as hydroxytyrosol (3,4-DHPEA), tyrosol (p-HPEA) and secoiridoids derivatives, in particular the dialdehydic form of decarboxymethyl elenolic acid linked to 3,4-DHPEA or p-HPEA (3,4-DHPEA-EDA or p-HPEA-EDA), and verbascoside. These substances are proven to inhibit or delay the rate of growth of a range of bacteria, so that they may be used as alternative food additives [9].

The aim of the study is to evaluate antimicrobial activity of polyphenolic extract derived from olive oil production liquid wastes against two different pathogenic species responsible of food contamination: *Campilobacter jejuni* and *Staphilococcus aureus*.

2. Materials and Methods

2.1 Agar well diffusion method

In order to preliminary asses the antibacterial activity of OMW phenolic extract the Agar well diffusion test was applied according to Baloiuiri et al 2016 [10]. Agar well diffusion method is largely used to evaluate the antimicrobial activity of natural extracts [11, 12]. Briefly, the agar plates surface, Müller Hinton Agar (MH) for *S.aureus* and MHA supplemented with 5% defibrinated horse blood for *C.jejuni* , were inoculated by spreading the 0.5 McFarland microbial inoculum over the entire agar surface with a sterile swab. Subsequently, a hole of 6 to 8 mm diameter is punched aseptically with a sterile tip and 50 µL of the extract solution at desired concentration are introduced into each well. The agar plates are then incubated under suitable conditions depending upon the tested microorganism, for *S.aureus 37 °C for 24* hours and for *C.jejuni 42,5 °C* for 48 hours in microaerophilic conditions.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

In this conditions the antimicrobial agent diffuses radially in the agar medium inhibiting the growth of the tested microorganism, at the end of the incubation time the diameters of growth inhibition zones are measured with a calibre.

2.2 Broth microdilution method

To quantitatively determine the antibacterial activity of phenolic extract the minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined.

The MIC concentration is recorded as the lowest concentration of antimicrobial agent that completely inhibits growth under suitable incubation condition, while the MBC is defined as the lowest concentration of antimicrobial agent needed to kill 99.9% of the inoculum after incubation for 24 h under a standardized set of condition

The MIC and MBC tests were conducted using a standard microdilution technique according to Clinical Laboratory Standards Institute slightly adapting the method as suggested by Othman et al. 2011 [13]. The bacterial suspension to be used for the assay was prepared from the 0.5 McFarland adjusting the number of bacteria to approximately $1x10^5$ CFU/mL with fresh Müller Hinton Broth (MHB). The phenolic extract solution was performed at 1 g/ml and subsequently diluted to perform the test up to reach a final concentration.

Moreover, for each bacterial microtitre plate suitable process controls were set up. These included, antibiotic control, organism control, negative control.

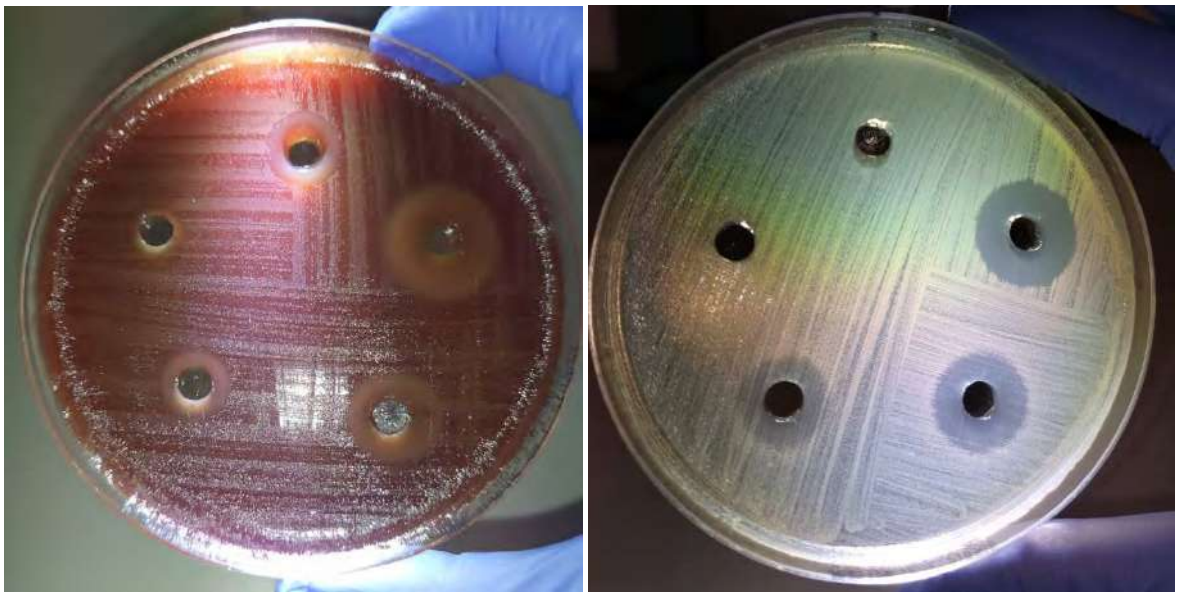
The MBC was represented as the smallest amount of PE that was capable of killing the bacterial inoculum, demonstrated by the total absence of growth.

3. Results and Discussion

Figure 1 reports shows the results of the agar well diffusion method adopted in the present study to preliminarily asses the antibacterial effect of polyphenolic extract against two different pathogenic microorganisms highly related to food borne illnesses such as *S.aureus* (a) and *C.jejuni* (b). Concerning *C.jejuni,* the outcome show that growth inhibition zones are measurable in correspondence of all the tested concentration although with different diameters. In detail the inhibition zone were from 18 to 8 mm. With regards to *S.aureus* around the wells containing 1:2 concentration of polyphenolic extracts the inhibition zones were measured from 19 to 10 mm, although the lesser dilution didn't show any effect on the targeted microrganism.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 1. Agar well diffusion results for the polyphenolic extract against *C.jejuni* (a) and *S.aureus* (b).



a b

Generally, the agar diffusion method it is a typing tool based on the resistance phenotype of the microbial strain considered when exposed to the natural compound tested. However, since the inhibition of bacterial growth does not imply the death of the microorganism, this method is unsuitable to distinguish bactericidal and bacteriostatic activities therefore, is not appropriate to determine the MIC and MBC, as it is impossible to quantify the amount of the antimicrobial agent diffused into the agar medium [10]. Nevertheless, the results of this test can provide an indication of the natural compound potency against microbial growth and in some cases an approximate MIC can be calculated for some microorganisms and molecules by comparing the inhibition zones of standardized molecules [10]. Nonetheless, the advantages of this method, mainly simplicity and low cost, have contributed to its common use for the antimicrobial screening of plant extracts, essential oils and other compounds [10].

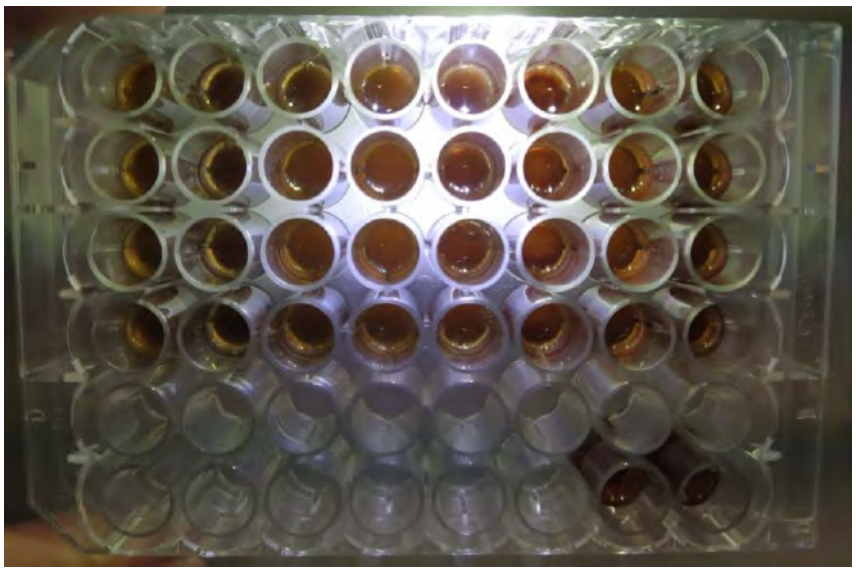
Microdilution test (Figure 2) revealed values of MIC < 0.01 g/ml and MBC < 0.1 g/ml both for *C.jejuni* and *S.aureus.*

Dilution methods are the most appropriate ones for the determination of MIC and MBC values, since they offer the possibility to estimate the concentration of the tested antimicrobial agent in the broth medium. Microdilution method can be used to quantitatively measure the *in vitro* antimicrobial activity against bacteria. MIC value recorded is defined as the lowest concentration of the assayed antimicrobial agent that inhibits the visible growth of the microorganism tested while the MBC is defined as the lowest concentration of antimicrobial agent needed to kill 99.9% of the final inoculum after incubation for 24 h under a standardized set of conditions.

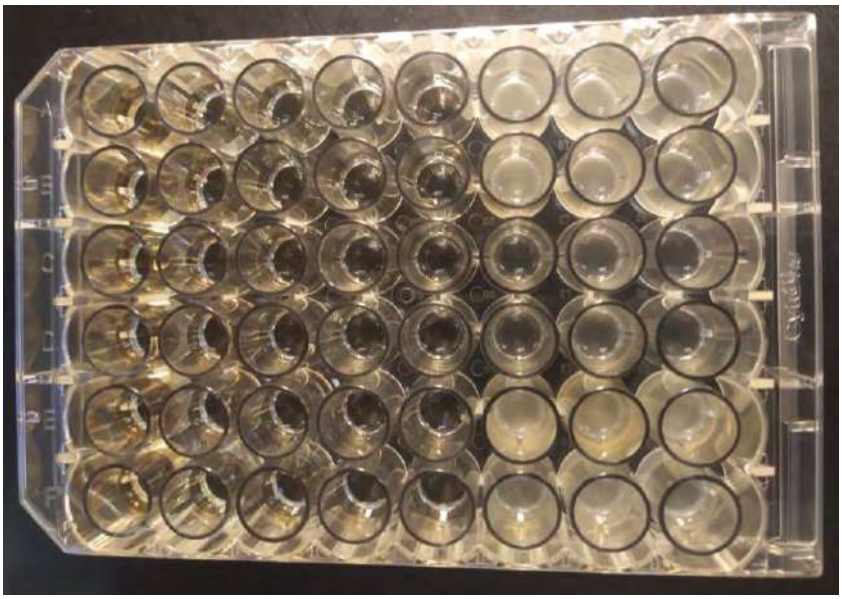
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 2. Microtitre plates for broth microdilution test of polyphenolic extract against *C.jejuni* (a) and *S.aureus* (b).

a



b



Previous studies in the literature report for similar phenolic compound tested *in vitro* against spoilage microorganisms values of MIC and MBC higher than those hereby reported [4]. Furthermore, another study tested a polyphenolic extract on several spoilers, starters and food-borne bacteria reporting MBC values ranging from 0.75 to 12 mg/ml [14], confirming the similar effect of the tested extract compared to the one of the present study.

The sensitivity of microorganisms to polyphenolic molecules depends on the targeted species and strain, as well as on the molecular structure of the phenolic compounds [15-16]. Indeed, the mechanism of action of polyphenolic compound it is related to their chemical structure albeit it is still not fully understood. It has been reported that they can cause morphological changes in bacteria, damage to the cell walls and influence biofilm aggregation[16-17].

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Polyphenols can also influence protein biosynthesis, change microbial metabolic pathways and inhibit ATP and DNA synthesis [17] .

4. Conclusions

The results presented in this study confirm that the use poliphenolic extract can represent a 'green' strategy to reuse a by-product of agricultural chain as processing aid treatment to increase the hygiene and safety of all the steps that characterize the food industry. Albeit the detailed mechanism of antibacterial activity of polyphenols needs further investigation the results of *in vitro* testing confirm that this represents a valuable approach to limit the growth of foodborne pathogenic bacteria offering an sustainable and healthier alternative to the use of chemical preservatives especially in the industry of food of animal origin.

References

1. A Sperber WH, Doyle MP, **2009**. Compendium of the microbiological spoilage of foods and beverages. Springer Science and Business Media LLC, New York, NY, USA
2. Serra AT, Matias A, Nunes A, Leitão MC, Brito D, Bronze R, Silva S, Pires A, Crespo MT, San Romão MV, Duarte CM,. In vitro evaluation of olive and grape based natural extracts as potential preservatives for food. *Inno Food Sci Emerg Technol* **2008,** 9:311-9.
3. Prado Martin JG, Porto E, de Alencar SM, da Glória EM, Corrêa CB, Ribeiro Cabral IS,. Antimicrobial activity of yerba mate (Ilex paraguariensis St. Hil.) against food pathogens. Rev Argent Microbiol **2013,** 45:93.
4. Roila, R., Branciari, R., Ranucci, D., Ortenzi, R., Urbani, S., Servili, M., & Valiani, A. Antimicrobial activity of olive mill wastewater extract against Pseudomonas fluorescens isolated from mozzarella cheese. *Italian Journal of Food Safety* **2016**, *5*(2).
5. Gammariello D, Di Giulio S, Conte A, Del Nobile MA,. Effects of natural compounds on microbial safety and sensory quality of Fior di Latte cheese, a typical Italian cheese. *Journal Dairy Science* **2008**, 91:4138-46.
6. Roila, R., Ranucci, D., Valiani, A., Galarini, R., Servili, M., & Branciari, R.. Antimicrobial and anti-biofilm activity of olive oil by-products against Campylobacter spp. isolated from chicken meat. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria* **2019**, *18* (1), 43-52.
7. Branciari, R., Ranucci, D., Miraglia, D., Urbani, S., Esposto, S., Servili, M. Effect of dietary treatment with olive oil by-product (olive cake) on physicochemical, sensory and microbial characteristics of beef during storage. *Italian Journal of Food Safety* **2015**, 4, 225–229.
8. IOOC, International Olive Oil Council. Available from: www.internationaloliveoil.org, 2022. [Accessed march 2022]
9. Pereira AJ, Pereira AP, Ferreira IC, Valentão P, Andrade PB, Seabra R, Estevinho L, Bento A,. Table olives from Portugal: phenolic compounds, antioxidant potential and antimicrobial activity. *Journal Agricoltural Chemistry* **2006**,54:8425- 31.
10. Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K.. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of pharmaceutical analysis* **2016**, 6(2), 71-79.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

11. Magaldi, S., Mata-Essayag, S., De Capriles, C. H., Pérez, C., Colella, M. T., Olaizola, C., & Ontiveros, Y. Well diffusion for antifungal susceptibility testing. International journal of infectious diseases **2004**, 8(1), 39-45.
12. C. Valgas, S.M. De Souza, E.F.A. Smânia. Screening methods to determine antibacterial activity of natural products Brazilian Journal of Microbiology **2007**, 38 , pp. 369-380.
13. Othman M, Loh HS, Wiart C, Khoo TJ, Lim KH, Ting KN. Optimal methods for evaluating antimicrobial activities from plant extracts. *Journal of Microbiological Methods* **2011**,84:161-6.
14. Fasolato, L., Cardazzo, B., Balzan, S., Carraro, L., Taticchi, A., Montemurro, F., Novelli, E.. Minimum bactericidal concentration of phenols extracted from oil vegetation water on spoilers, starters and food-borne bacteria. *Italian journal of food safety* **2015**, *4*(2).
15. Efenberger-Szmechtyk, M., Nowak, A., & Czyzowska, A.. Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products. *Critical reviews in food science and nutrition* **2021**, *61* (1), pp.149-178.
16. Konaté, K., Hilou, A., Mavoungou, J. F., Lepengué, A. N., Souza, A., Barro, N., Nacoulma, O. G..Antimicrobial activity of polyphenol-rich fractions from Sida alba L.(Malvaceae) against co-trimoxazol-resistant bacteria strains. *Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials* **2012**, *11* (1), 1-6.
17. Plumed-Ferrer, C., Väkeväinen, K., Komulainen, H., Rautiainen, M., Smeds, A., Raitanen, J. E**.,** & von Wright, A. The antimicrobial effects of wood-associated polyphenols on food pathogens and spoilage organisms. *International journal of food microbiology* **2013**, *164* (1), 99-107.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Energy Analysis of a Biomass-Based Combined Cooling, Heating, and Power System

Franco Cotana[1], Simona Di Fraia[2], Musannif Shah[2,*], Andrea Nicolini[1], Alessandro Petrozzi[1] and Laura Vanoli[2]

[1] Department of Engineering, University of Perugia, Via G.Duranti 67, 06125 Perugia, Italy

[2] Department of Engineering, University of Naples "Parthenope", Napoli, 80143, Italy

* E-Mail: musannif.shah001@studenti.uniparthenope.it

Abstract: Combined cooling, heating, and power (CCHP) systems aim at raising systems' overall efficiency by utilizing both the electrical and thermal energy output available from energy conversion processes. An even higher advantage can be obtained by using biomass as a fuel. Integrating a CCHP system with buildings to fulfill the energy demands appears to be one of the most promising applications so far. Therefore, the scope of this study is to dynamically investigate the energy system performance and operation of a biomass-based CCHP system that satisfies the energy demands of an end-user building. In this study, an Aspen Plus model is developed for the simulation of a 100 kW_e externally fired gas turbine fed by wood biomass combustion. The results from the Aspen model are used as an input to the remaining components of the CCHP system that are modeled in TRNSYS. The thermal energy recovered from the gas cycle is used to meet the user's thermal demand. A storage tank supplies direct heat to the end-user in winter and drives an absorption chiller for cooling during summer. The model is developed to fulfill the energy needs of the historical building "Sant'Apollinare" located in Perugia, Italy. A demand model, which calculates the hourly thermal load of the building is developed in TRNSYS. The transient system is designed such that it fulfills the peak load demands of the building. Subsequently, the model provides data on performance parameters of different components such as temperature, power consumption, and energy efficiency which leads to evaluating the feasibility and the overall energy performance of the CCHP system. It is expected that besides heating and cooling the building, the thermal energy recovered has the potential to provide sufficient energy for biomass drying and/or district water heating (DWH).

Keywords: biomass; ASPEN Plus; TRNSYS; energy analysis; combined cooling, heating and power.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

The modern world's rising energy demand has been one of the biggest challenges so far and its trends are increasing with time. To overcome the global energy demands and mitigate its environmental effects, many efforts are taking place in terms of policies, grants, and incentives. The European Council under "2030 Climate and Energy Framework" has set ambitious targets to reduce greenhouse gases emissions by 55%, to ensure at least 32% share of renewable energy in the total energy supply and to improve energy efficiency up to 32.5% [1]. Renewable energy, being an attractive and clean alternative to the conventional fossil fuel-based energy, comes from natural resources such as sunlight, wind energy, hydro energy, geothermal energy, and biomass. Among these, biomass is obtained from biological materials such as agricultural crops, forest residues, municipal solid wastes, and animal wastes etc. [2], [3]. Biomass can be thermochemically converted into useful energy by three different ways: combustion, pyrolysis, and gasification [4]. The combustion of biomass combined with bottoming cycle CCHP system is a widely used, mature and economically feasible option so far [5]. Biomass combustion typically occurs at elevated temperatures (e.g., 900-1000 ^{o}C), making it a viable option for high temperature heat recovery and CCHP systems [6]. It is convenient to use small and e micro scale CCHP systems at local level to reduce fuel transportation cost and to provide heat and power to end user in distribution generation context [5].

Several literature articles based on biomass-fired CCHP systems were analyzed. Pantaleo et. al. [7] studied the energy performance of a multi-fuel CCHP system for residential buildings. Results concluded that using biomass and natural gas with a ratio 1 to 1 can result in high energy conversion efficiency, lower investment and fuel costs. Han et. al. [8] used Aspen Plus simulation software to develop a detailed model of a biomass burner by minimizing the Gibbs free energy and analyzed the effect of inside temperature of burner, equivalence ratio and moisture content of biomass on the system response. Udeh et. al. [9] studied the effect of hybridization of a stand-alone Stirling engine with an organic Rankine cycle (ORC) using MATLAB and Aspen plus simulation software and concluded that the hybridization of the two cycle improves the electrical and thermal efficiency of the system to 66% and 63.4%, respectively.

It is worth mentioning that to investigate the actual behavior of a polygeneration system, dynamic simulation software can be a handy tool. Macieg et. al. [10] used the same approach to analyze the energy and economic behavior of a micro-cogeneration system using dynamic simulation software TRNSYS and compared the results to experimental prototype results, identifying a potential improvement available in electrical, heating and cooling power up to 11.7 kW_e, 34.2 kW and 10 kW, respectively. Valerai et. al [11] also used a dual software approach to simulate a 630kW_e biomass-based CCHP system. A gasification-SOFC (solid oxide fuel cell) model was developed in Aspen plus and the rest of CCHP system was modelled in TRNSYS. The proposed system was able to reduce the primary energy consumption up to 50% with 5000 tons of CO_2 annual reduction as compared to the conventional system.

The aim of this study is to analyze the energy behavior of a CCHP system based on the combustion of biomass to fulfill the energy demand of the end user building. More in detail, an externally fired gas

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

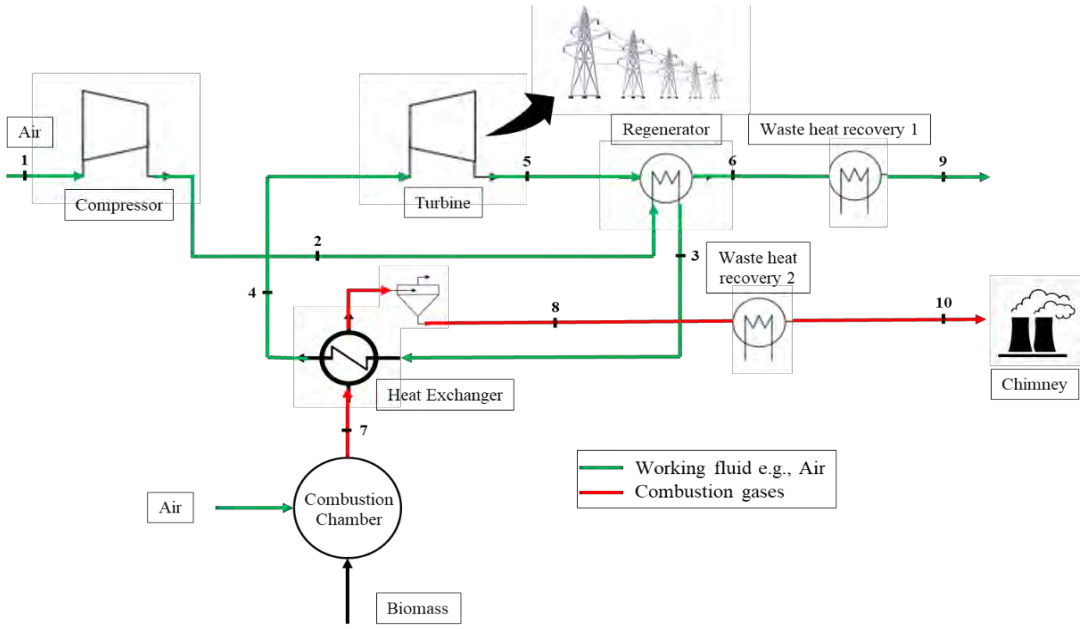
turbine, powered by a wood biomass-based combustion system, is modeled in Aspen Plus and is integrated to the remaining components of the CCHP system, which are modelled in TRNSYS simulation software [12]. The numerical model developed to carry out the energy analysis is illustrated in Section 2, whereas the case study taken into account is described in Section 3. Finally, the obtained results are discussed in Section 0 and the main conclusions as well as future developments of the work are drawn in Section **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

2. Methodology

2.1. System Description

In this work a multi fuel biomass energy source connected to an external fired gas turbine (EFGT) system is considered, as shown in Figure 1. EFGT's work on the conventional gas cycle, except that the direct combustion is replaced by an external heat exchanger which allows the heating of working fluid, mostly air. In a biomass based EFGT cycle, the combustion of biomass takes place in a combustion chamber or furnace, the combustion gases from this chamber through a heat exchanger heats compressed air which is later expanded in a turbine to produce power. In the considered layout, compressed air is pre-heated into a regenerator powered by the turbine exhaust gas. The exhaust streams (e.g., combustion gases and air) are at elevated temperatures, therefore have a potential energy available that can be used for further energy process. Two waste heat recovery heat exchangers are installed to recover heat from the exhaust gases which can be further used for heating and cooling of buildings, domestic hot water supply and biomass drying.

Figure 1. Schematic layout of the system.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

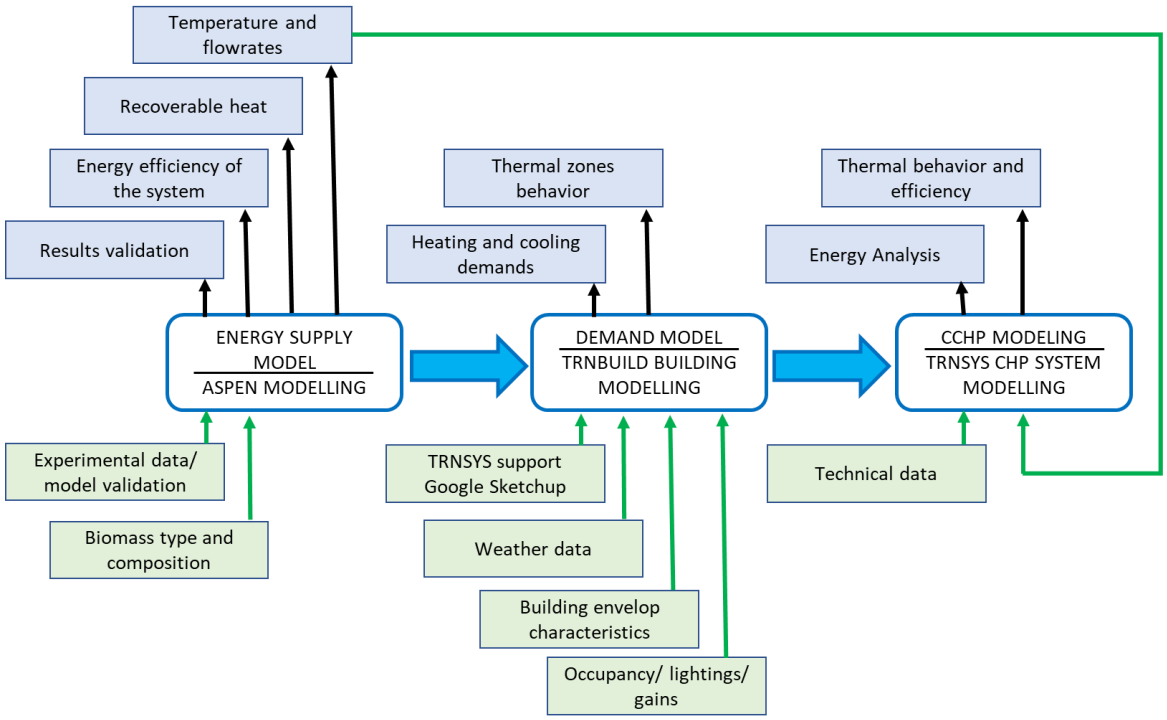
2.2. Model description

The methodology opted in this work is based on the approach proposed by various researchers [13] in retrofitting of existing buildings to achieve energy conservation and sustainability. The work is divided into three steps as shown in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**.

1) Energy supply model: in this work the energy is supplied by the EFGT powered by a wood biomass-based combustion system. To simulate such a system, Aspen Plus software is used to develop a model that is validated with experimental data.
2) Demand model: a model which calculates the energy demands (e.g., heating and cooling) of the building site. The necessary data for this model is building envelop characteristics, occupancy details and climate data. For this study the demand model is developed in the TRNBUILD extension of TRNSYS environment.
3) Modelling of the remaining CCHP components: this model refers to the system that fulfills the energy needs, estimated through the demand model, by using the outputs of the energy supply model. For this study, the remaining CCHP system is modelled in TRNSYS to compute the technical behavior of the system dynamically.

A steady state model of biomass combustion system modelled in Aspen Plus determines the exhaust gases attributes (e.g., temperature and flow rates) which are then integrated with the TRNSYS model to evaluate the energy behavior of the CCHP system. In this way, the lack of specific components in TRNSYS library for biomass combustion could be overcome. The use of TRNSYS environment has the advantage of in-depth analysis of transient behavior of complex energy systems. Indeed, it is an extensively used, dynamic energy system simulation program based on components from library. It's

Figure 2. Methodology



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

been frequently used in the energy simulation field for energy analysis of different energy systems such as conventional CCHP systems [14]–[16] and biomass-based systems [17]. TRNSYS has the flexibility to model system's components with high accuracy and various components inputs. Since the traditional systems are replaced by the CCHP systems to obtain a higher efficiency in power generation, minimize the energy losses and recover the waste heat from the energy supply source for useful applications. Indeed, this work is mainly focused to perform a detailed energy analysis of components and overall system, and to highlight the potential to exploit energy sources and waste heat. More details on the numerical models developed to achieve this aim are given in the following.

2.2.1. Energy Supply model

The energy supply source in present work is an externally fired biomass combustion-based gas cycle. Aspen Plus simulates the biomass combustion unit, heat recovery from its exhausts and the heat and power generated from the gas turbine. The combustion process is simulated considering a RGibbs block that models thermo-chemical equilibrium based on the minimization of Gibbs free energy. However, this model cannot deal with non-conventional components, such as biomass. Therefore, the woody biomass is decomposed, in a RYield block, into its constituent elements (carbon, hydrogen, nitrogen and oxygen), water and ash, based on ultimate and proximate analyses by using a Calculator block (i.e., a user subroutine written in FORTRAN). Moreover, a heat stream connects the decomposition and the combustion steps to account for the difference in enthalpy between the original stream and the decomposed one. The gas turbine is simulated by considering a compressor and a turbine whose inputs are isentropic and mechanical efficiencies and pressure ratio.

The developed model is calibrated by using the outcomes of an experimental campaign [18] carried out on a lab scale system. After calibration, it is used to derive mass flow rate of the combustion exhausts, the temperature and flow rates of the flow streams, the net available power of the turbine and the total energy efficiency of the system.

2.2.2. Demand Model

The modelling of the building is performed using TRNBUILD tool of TRNSYS environment. Building envelope characteristics are defined in TRNBUILD by specifying a definite thermal transmittance value to each surface. The model was then simulated for 1 year to calculate the peak energy demands (e.g., heating and cooling) of the building.

2.2.3. CCHP model

TRNSYS software is used to simulate the behavior of the remaining CCHP system. The outputs of Aspen Plus (e.g., temperature and flow rates of the working fluids) are used as inputs to the CCHP model. For heat recovery from the exhaust gases, two shell and tube heat exchangers are installed in series. The first heat exchanger recovers heat from the exhaust stream when heating/cooling is required by the building while the second heat exchanger recovers heat only for DWH. A buffer hot

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

water storage tank supplies heat directly to the building in winters, whereas it drives an absorption chiller in summers. The set point temperatures for the hot water storage tank are 70 °C and 95 °C for winters and summers respectively. A list of the type components used from TRNSYS library is listed in Table 1.

Table 1. TRNSYS type used in simulation.

Component	TRNSYS type
Heat exchanger	5
Absorption chiller	107
Storage tanks	4a
Pumps	3d
Load profile input	14 h
Weather data	15-3

3. Case Study

As a case study the historical building "Sant'Apollinare" located in Perugia, Italy, is modelled and retrofitted with energy supply system. It is a three story building with a total area of 1899 m^2, which is divided into 34 different thermal zones based on occupancy details. According to Italian climatic regulations [19], Perugia lies in the climatic zone "E" for which the heating period goes from 15th of October to 15th of April every year. Also, the number of operating hours allowed for the heating systems is established to be 14 hours per day.

Regarding the energy supply model, the characteristics of woody biomass used in this study are listed in Table 2, whereas Table 3 reports the experimental data used for model calibration.

Table 2. Ultimate and proximate analysis of the selected wood biomass.

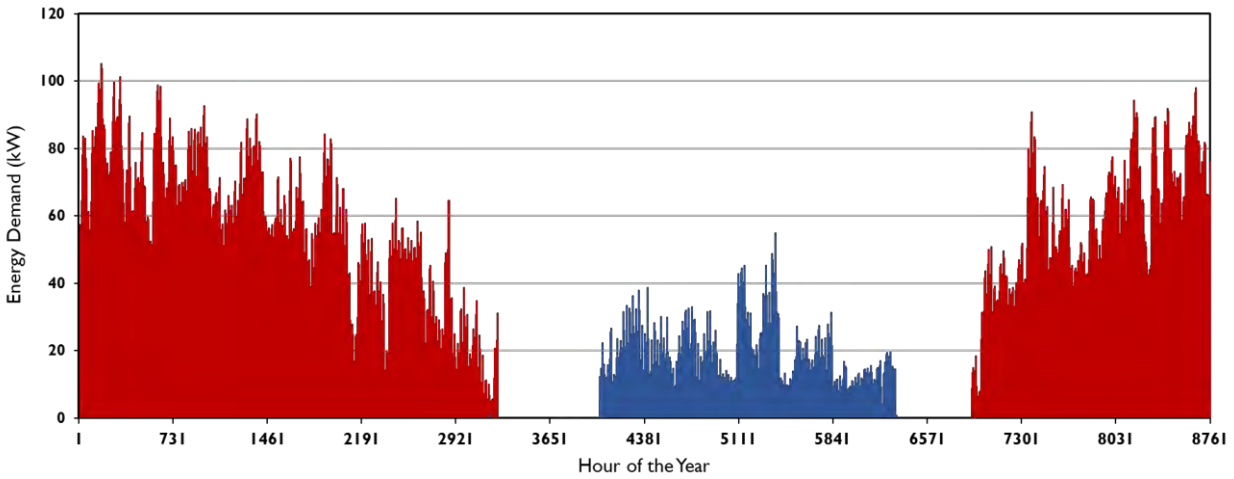
Ultimate analysis (%)			
C	H	N	O
47.1	6.1	0	44.2
Proximate analysis (%)			
Moisture	Fixed carbon	Volatile matter	Ash
7.84	22.4	75.9	0.0260

Table 3. Input data used for calibration of combustion model.

Stream	Properties (the numbering refers to Figure 1)
Biomass	Mass flow rate: 179 kg/h Temperature: 20.0°C Pressure: 1.00 bar
Air entering the combustor	Mass flow rate: 1800 kg/h Temperature: 20.0°C Pressure: 1.00 bar
Compressed air	Temperature, T_2: 224°C
Air exiting the regenerator	Temperature, T_3: 411°C
Hot combustion exhaust gas	Temperature, T_7: 1020°C
Cold combustion exhaust gas	Temperature, T_8: 414°C

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Yearly trend of the building load.



4. Results and discussion

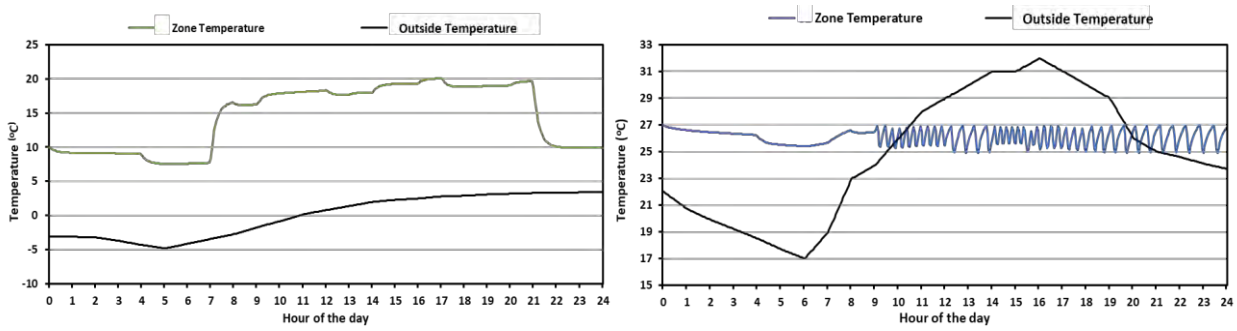
Biomass combustion model is used to determine the exhaust temperature and flow rates of working fluids (e.g., combustion gases and air). Table 4 shows the simulation results of the biomass combustion process and the experimental ones at different points of the process (see Figure 1) reported by Petrozzi et al. [18]. The comparison shows a good agreement between numerical and experimental data.

Table 4. Experimental and numerical values comparison (the numbering refers to Figure 1).

Stream	Experimental value	Numerical Value	Deviation (%)
Air entering the turbine	Temperature, T_4: 866°C	Temperature, T_4: 872°C	0.69
Air exiting the turbine	Temperature, T_5: 586°C	Temperature, T_5: 560°C	4.43
Air exiting the regenerator	Temperature, T_6: 399°C	Temperature, T_6: 378°C	5.26
Energy efficiency of the system	13.2%	12.3%	6.82

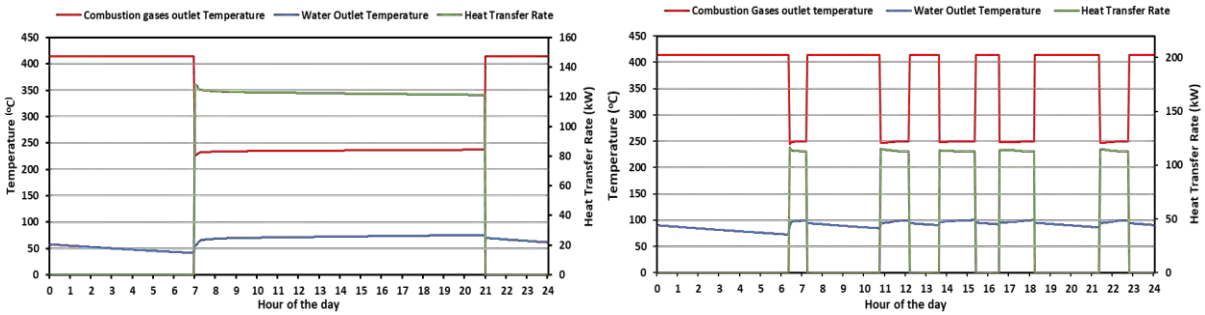
As mentioned above, the demand model is simulated for 1 year to calculate the peak energy demands (e.g., heating and cooling) of the building that are shown in figure 3. It is evident from the figure that a peak heating demand of 105 kW of the building occurs in the first week of January, whereas peak cooling demand of 55 kW occurs in the third week of August.

Figure 4. Zone temperature profiles: winter day (left) and summer day (right)



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Temperature and power profiles of heat exchanger: winter day (left) and summer day (right)



In the TRNSYS simulation model, a shell and tube heat exchanger recover heat from the combustion gases stream, whose temperature and mass flow rate are 414 °C and 1979 kg/h, respectively, to fulfill building energy requirements both in winters and summers. A second heat exchanger installed in series with the first one supplies DHW for the whole year.

Figure 4 shows the temperature profiles of a thermal zone for a typical winter and summer day having peak heating and cooling demand, respectively. It is worth noting that although the outside air temperature is very low in winter and very high in summer than the required set temperature of thermal zone, the CCHP system can satisfy the conditioning requirements of thermal zone.

Figure 5 shows the temperature and power profiles of the primary heat exchanger which recovers energy from the exhaust combustion gases for a typical winter and summer day respectively. It is evident from the figure that the heat recovery loop is active till the set point temperature of the hot water storage tank is reached (70 °C in winter and 95 °C in summer).

Table 5 shows the monthly and yearly results of the thermodynamic analysis of various components. As shown, the system is completely able of maintaining the required temperature levels in each sub system and is perfectly capable of fulfilling the thermal power required by the building, DHW system and the network losses. The thermal losses refer to the thermal energy lost from the transmission pipes and storage tanks. It is evident from the results that the energy provided from the waste heat recovery heat exchanger (E_{HX1}) to the hot water storage tank ($E_{HT,in}$) is slightly higher for the whole year because of the transmission losses occurring in the supply

Table 5. Monthly and yearly thermodynamic analysis of the system.

Thermal Energy (MWh)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	June	July	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec	Year
$E_{HT,in}$	53.9	48	49	41.1	14.4	21.9	43.6	43	26.9	21.5	47.8	74.7	464.3
$E_{HT,out}$	32.6	28.5	26.4	19.6	4.2	6.8	13.2	12.7	2.6	9.7	26.4	32.2	214.8
$E_{CT,in}$	0	0	0	0	0	3.2	6.4	5.9	0.6	0	0	0	16.1
$E_{CT,out}$	0	0	0	0	0	3.4	6.7	6.2	0.8	0	0	0	17
$E_{heat,AC}$	0	0	0	0	0	5.7	11	10.5	1.3	0	0	0	28.6
$E_{cool,AC}$	0	0	0	0	0	3.4	6.7	6.2	0.8	0	0	0	17.1
E_{HX1}	54.8	48.8	49.8	41.8	14.8	22.6	45	44.4	27.9	21.9	48.6	54.2	474.7
E_{HX2}	49.2	44.6	50.8	51.3	62.4	56.7	52.4	52.6	55.9	60.1	49.1	49.4	635.4
E_{losses}	25	22.9	26.1	25.2	13.1	14.1	32.1	32.1	27.2	12.7	25.2	24.9	280.5
$E_{available}$	149.9	135.4	149.9	145.1	149.9	145.1	149.9	149.9	145.1	149.9	145.1	149.9	1764.9
$E_{recovered}$	104	93.4	100.6	93.1	77.2	79.3	97.4	97	83.8	82	97.7	103.6	1110.1
$E_{unrecovered}$	45.89	41.99	49.29	51.96	72.69	65.76	52.49	52.89	61.26	67.89	47.36	46.29	654.78

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5. Conclusion

In this work, the integration of a biomass combustion system and CCHP system is assessed through the integration of ASPEN Plus and TRNSYS simulation software, retrofitted to a case study historical building located in Perugia, Italy. Aspen Plus simulates the externally fired gas turbine fed by wood biomass combustion to determine the exhaust streams temperature and flow rates. The results from Aspen Plus are used as an input to TRNSYS to simulate the rest of CCHP system. The results show that the system can maintain the required temperature levels in each thermal zone of the building for the whole year. The thermodynamic analysis of the system reveals a recoverable thermal output at a temperature of 120 ^{o}C of 1764.9 MWh from the combustion gases stream. A total of 1110.1 MWh of thermal energy is being recovered and utilized for fulfilling building energy demands and DHW supply requirements, leaving behind a 654.78 MWh thermal energy unrecovered. Therefore, the system efficiency can be further increased by recovering the remaining waste heat from the combustion gases and from the working fluid stream (e.g., air) for further utilization such as biomass drying or district heating.

Nomenclature

$E_{HT,in}$	Thermal energy to hot water storage tank	$E_{heat,AC}$	Thermal energy to the absorption chiller	E_{losses}	Thermal energy losses from the transmission lines including storage tanks
$E_{HT,out}$	Thermal energy from the hot water storage tank	$E_{cool,AC}$	Cooling energy of absorption chiller	$E_{available}$	Potential thermal energy available
$E_{CT,in}$	Cooling energy to the cold-water storage tank	E_{HX1}	Thermal energy recovered from the first heat exchanger	$E_{recovered}$	Thermal energy recovered
$E_{CT,out}$	Cooling energy from the cold-water storage tank	E_{HX2}	Thermal energy recovered from the second heat exchanger	$E_{unrecovered}$	Wasted thermal energy

6. References:

[1] European Commission, “Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2020.

[2] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 37–46, May 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.

[3] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,” *Bioresour. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 47–54, May 2002, doi: 10.1016/S0960-8524(01)00119-5.

[4] T. Yoshioka, S. Hirata, Y. Matsumura, and K. Sakanishi, “Woody biomass resources and conversion in Japan: The current situation and projections to 2010 and 2050,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 29, no. 5, pp. 336–346, Nov. 2005, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2004.06.016.

[5] L. Dong, H. Liu, and S. Riffat, “Development of Small-Scale and Micro-Scale Biomass-Fuelled CHP Systems-A literature review,” doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.004ï.

[6] G. Carraro, V. Bori, A. Lazzaretto, G. Toniato, and P. Danieli, “Experimental investigation of an innovative biomass-fired micro-ORC system for cogeneration applications,” *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 1226–1243, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.07.012.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[7] A. M. Pantaleo, S. M. Camporeale, C. N. Markides, G. S. Mugnozza, and N. Shah, “based dual-fuel gas-biomass trigeneration system The 8 th International Conference on Applied Energy – ICAE2016 Energy performance and thermo-economic assessment of a microturbine-based dual-fuel gas-biomass trigeneration system,” no. March 2017, 2016.

[8] J. Han *et al.*, “Modeling downdraft biomass gasification process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 153, pp. 641–648, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2017.10.030.

[9] G. T. Udeh, S. Michailos, D. Ingham, K. J. Hughes, L. Ma, and M. Pourkashanian, “A techno-enviro-economic assessment of a biomass fuelled micro-CCHP driven by a hybrid Stirling and ORC engine,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 227, p. 113601, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113601.

[10] M. Żołądek, R. Figaj, and K. Sornek, “Energy analysis of a micro-scale biomass cogeneration system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 236, p. 114079, May 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114079.

[11] V. Palomba, M. Prestipino, and A. Galvagno, “Tri-generation for industrial applications: Development of a simulation model for a gasification-SOFC based system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 46, pp. 27866–27883, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2017.06.206.

[12] “TRNSYS 17,” 2009, Accessed: Apr. 19, 2022. [Online]. Available: http://sel.me.wisc.edu/trnsys.

[13] Z. Ma, P. Cooper, D. Daly, and L. Ledo, “Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art,” *Energy Build.*, vol. 55, pp. 889–902, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2012.08.018.

[14] H. Lee, J. Bush, Y. Hwang, and R. Radermacher, “Modeling of micro-CHP (combined heat and power) unit and evaluation of system performance in building application in United States,” *Energy*, vol. 58, pp. 364–375, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.05.015.

[15] Á. Campos-Celador, E. Pérez-Iribarren, J. M. Sala, and L. A. del Portillo-Valdés, “Thermoeconomic analysis of a micro-CHP installation in a tertiary sector building through dynamic simulation,” *Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 228–236, 2012, doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.01.020.

[16] G. Pagliarini, C. Corradi, and S. Rainieri, “Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 44, pp. 150–158, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2012.04.001.

[17] M. Hartl, S. Aigenbauer, F. Helminger, A. Simetzberger, and I. Malenkovic, “Experimental and numerical investigations on a combined biomass-solar thermal system,” *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 623–632, 2012, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2012.11.072.

[18] G. Marseglia, C. M. Medaglia, A. Petrozzi, A. Nicolini, F. Cotana, and F. Sormani, “Experimental tests and modeling on a combined heat and power biomass plant,” *Energies*, vol. 12, no. 13, 2019, doi: 10.3390/en12132615.

[19] “Climatic zones: Updated Table A DPR 412/1993 - Certifico Srl.” https://www.certifico.com/impianti/documenti-impianti/337-documenti-impianti-riservati/7099-zone-climatiche-tabella-a-aggiornata-d-p-r-412-1993 (accessed Apr. 19, 2022).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile,Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Thermo-acoustic characterization and porosity evaluation of concrete composite materials based on cement and excavated earth

Carolina Santini[1,*], Claudia Fabiani[1,2], [2],Franco Cotana[1,2], Anna Laura Pisello[1,2]

[1] Department of Engineering, University of Perugia, Perugia, Italy

[2] CIRIAF - Interuniversity Research Centre, Perugia, Italy

* Author to whom correspondence should be addressed. E-Mail: carolina.santini@studenti.unipg.it

Abstract: Using waste materials, especially those of natural origins is crucial for reducing resource depletion. Excavated earth, in particular, appears one of the most widely produced waste products in construction around Europe. The following study aims to reuse this type of earth in buildings, as a component of lightweight concrete, to create an innovative and environmentally friendly material, recovering natural wastes and reducing the quantities of raw materials in the cement mix. This work analyses the thermo-acoustic and porosity performances of two concrete composite materials based on cement and excavated earth, i.e. one (shot-earth) produced by spraying the earth at high pressure on the mix of aggregates, cement, and water, the other one (smart-earth) obtained by directly mixing the earth with the dry elements. Three smart-earth samples, produced by using increasing percentages of nanotubes (0.025%, 0.05%, and 0.1%), were later compared to a reference mix design. Sprayed soil samples have a higher thermal conductivity (around 1.2W / mK), compared to the smart-earth samples, with values between 0.5 and 0.6 W / mK. About transmission loss, it is better on the smart-earth samples, which reaches values around 60 dB. Shot-earth samples have a surface porosity of 20%, while for the smart-earth samples this value oscillates between 40 and 50%.In conclusion, the use of excavated soil in cement mixtures allows for reusing natural waste material. The overall characteristics of this innovative composite allows obtaining building elements characterized by good thermo-acoustic performances, enhancing living comfort.

Keywords: excavated earth; shot-earth; smart materials; environmental sustainability; thermo-acoustic characterization; porosity test.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_051_pp_461

1. Introduction

In recent years, sustainability has become a key issue in the construction industry, whose activities cause substantial environmental impacts. Inadequate training of the staff, along with lack of knowledge of green technologies and higher costs in the initial stage of both practices and materials for green construction, are the main obstacles to sustainable construction process developments by companies, as analysed by Ayarkwa J. et al (1). To conserve the environment and natural resources and improve internal industrial dynamics, great importance should be given to the concept of circular economy, seeking to go to the recover construction waste for reuse in new construction. This concept is particularly effective when applied to materials whose production processes generate CO2 emissions, consequently environmental damage, such as concrete, the mixing of which also leads to excessive water use. One solution to these problems may be to use reclaimed water and additional cementitious materials in concrete whose LCA study, conducted by Delnavaz M. et al (2), shows reduced emission rates of global warming potential (GWP) and air pollutants. Amin M. et al studied the use of recycled coarse aggregate (RCA) to replace 50 percent of natural coarse aggregate (NCA) through two types of products, carbon nanofibers (CNF) and steel fibers (SF), the addition of which helped improve concrete properties(3).

In this logic of waste reuse, Earth emerges as it is one of the most substantial construction wastes in Europe; earth can go to implement conventional building systems through a combination of traditional techniques with technological progress. Moreover, its use involves low-energy-emitting processes. One problem related to soils is the identification of soils suitable for construction; one solution may be to analyse building stock in soils that can be considered "time-tested," and thus suitable for construction, as was done by Royal F. et al analysing more than 20 different soils collected from rammed-earth buildings in France and also classifying them according to their granularity and presence of clay(4). Other research conducted by Junior Paula A. et al sought to understand the environmental and mechanical performance of soil-based mixtures incorporating construction and demolition waste (CDW) with results highlighting the strong positive impact of incorporating soil into construction solutions both environmentally and functionally for the development of the circular economy model(5). Soils have also been analysed to be able to quantify the increase in energy efficiency they produce; several studies have been carried out on rammed earth masonry, which allows not only the construction of environmentally friendly and affordable buildings but also efficient ones, thanks to the good hygro-thermo-mechanical properties of the blocks (6). Earth construction offers good thermal performance under specific climatic and technical conditions; Hema C. et al studied the thermal design of walls based on compressed earth blocks (CEBs) to achieve optimal use of the walls (7). To overcome the problem of poor thermal resistance, Strazzeri V. has analyzed the effect of including natural fibres (Spinifex) on the thermal resistance of earthen walls(8).

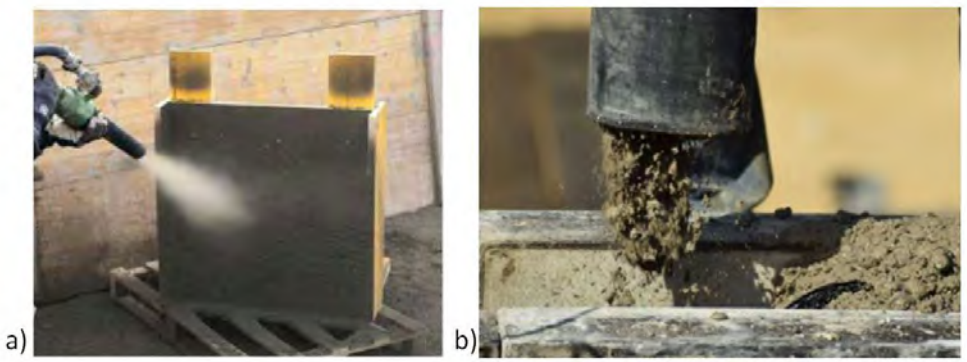
One effective solution is to use earth as a partial substitute for cement in the mix for concrete production, thus producing innovative concretes. In Zhang L. et al study, for example, the effect of bulk density and cement content on the thermal conductivity of earth blocks is examined, showing improved compressive strength and reduced thermal conductivity(9). The use of lightweight

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

concrete, in general, provides excellent performance while reducing costs, relies on good fire resistance, and saves a lot of weight on the structure. Numerous researchers, therefore, have focused on this type of concrete such as Lu J. et al who designed a new ultra-high performance lightweight concrete (L-UHPC) (10), Vinod B. et al which, by using EPS (expanded polystyrene) as waste material in solid concrete blocks, reduced costs and the impact of mining and processing operations on the environment(11). The study by Masoule Tale M. et al, on the other hand, focused on lightweight geopolymer concretes to bring out their advantages and disadvantages (12)while Vali K. et al evaluated the performance of lightweight concrete with incorporated lightweight aggregates as industrial by-products, noting both economic and environmental benefits(13). Other research has focused on the thermo-acoustic properties of lightweight concrete, as in the cases of Pongsopha P. et al, which analyzed the effect of recycled crumb rubber from end-of-life tires on the properties of structural lightweight concrete (density, compressive strength, flexural strength, compressive strength, thermal conductivity, and sound absorption coefficient)(14), and of Gomes M. et al, which evaluated an innovative system of high-performance precast concrete walls from the point of view of thermophysical properties (thermal conductivity, volumetric heat capacity, and the thermal diffusivity) that are optimized(15).

This is the starting point for the present research work, which focuses on thermo-acoustic and apparent porosity analyses of innovative lightweight concretes in which excavated soil is added to the mix. The addition of excavated soil makes it possible to decrease the amount of cement in the mix and, more importantly, allows a substantial natural waste material produced in construction work to be used directly on-site, avoiding the need to consider the impact of the transport distance from the waste treatment plant to the construction site in environmental feasibility studies. Two types of samples were analyzed, derived from different methods of producing lightened concrete with excavated soil as is shown in Figure 1: one, called Shot-Earth, in which soil is sprayed under pressure with special machinery onto the concrete mix, and the other, called Smart-Earth, where the soil is directly mixed with aggregates and cement. In addition to the earth, nano-tubes, in the percentages of 0.025, 0.05, and 0.1, are included in the latter type of concrete.

Figure 1. a) Shot-Earth(16) and b) Smart-Earth methods of production



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2. Materials and methods

The work is part of the FISR - Shot-Earth project that focuses on “projected lands for an environmentally sustainable and human-scale construction industry”. The universities that coordinate it are the University of Modena and Reggio Emilia, while those participating are the University of Perugia and the University of Parma. Specifically for Perugia, the entities involved are CIRIAF and DICA. Collaborations were also carried out with the Higher Institute of Engineering and Management of the Canton of Vaud HEIG-VD, in Switzerland, which provided, along with DICA in Perugia, the samples analyzed, lightweight concrete in which excavated soil is added.

Regardless of the method of production, the samples analyzed were made with specific geometries (Figure 2**)** conformed to the tests to be performed: cubic, about 5 cmx5 cm, for thermal and porosity tests, and cylindrical, with diameters of 10 cm and 3 cm and heights of 6 cm and 4 cm, for acoustic tests. It was analysed also pure soil.

Figure 2. a) Shot-Earth and b) Smart-Earth samples

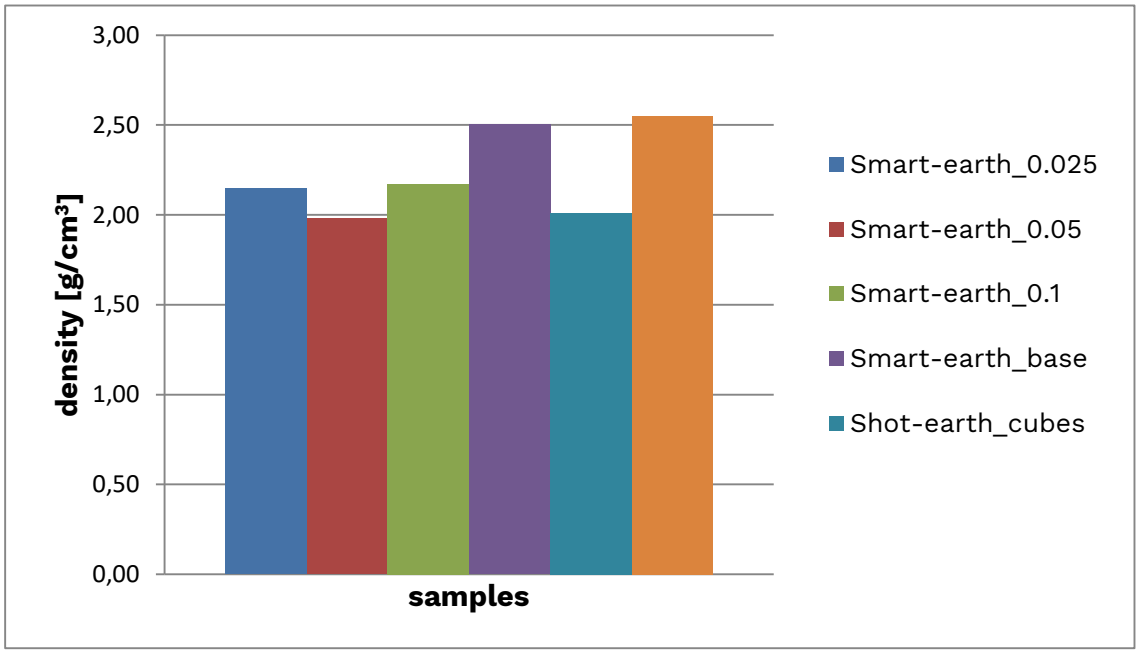


From the inventory, it was possible to obtain the density of the earth and the various compounds; in general, types of aggregates (mineral, oc, or from industrial residues) that share a low mass and a honeycomb structure are used to make lightweight concrete.

Compared to these, the excavated soil analyzed has a higher density, which is about 1.7 g/cm^3. Figure 3 shows the densities of the compounds; as a consequence of the high density of the soil,the densities of Shot-Earth samples produced with this type of excavated earth have higher values than those of standard lightweight concrete, however, little different from those of concretes produced with the Smart-Earth technique, which is slightly lower.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. The densityof the various samples.



Thermal, acoustic, and porosity analyses were carried out for all the samples, in the manner described below.

2.1 Thermal characterization

Thermal characterization was performed using the TransientPlane Source (TPS) method and involved the measurement of thermophysical properties of the specimens such as thermal conductivity [W/(mK)], thermal diffusivity [mm^2/s], and specific heat [J/(kg K)], making use of the Hot Disk 2500S instrument.

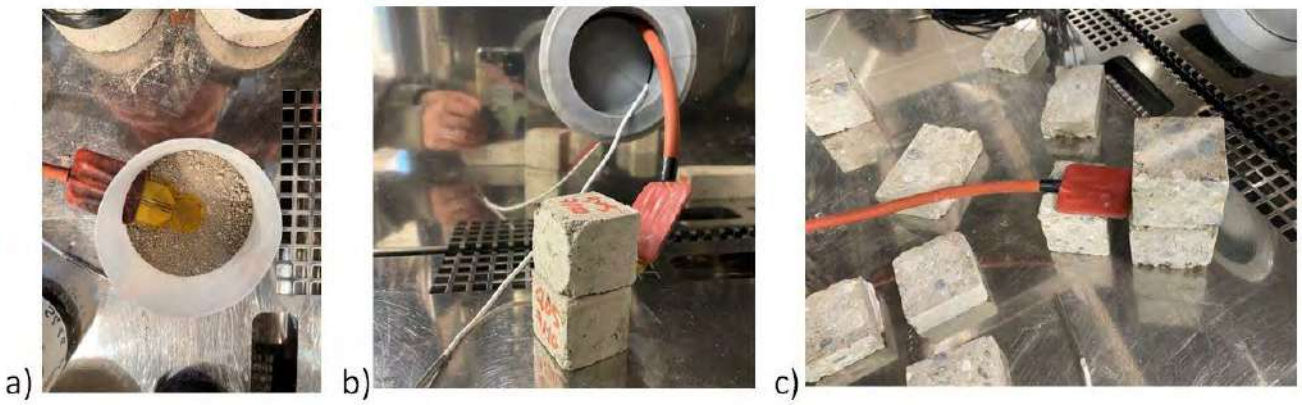
Figure 4. Hot Disk TPS 2500 S



First, thermal analyses were carried out for the earth, subsequently for both Shot-Earth and Smart-Earth samples.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 5. Thermal characterization of a) Earth b) Shot-Earth and c) Smart-Earth samples



2.2 Acoustic characterization

Acoustic characterization was carried out by two types of impedance tubes(Figure 6):

- Large tube, with a diameter of 10 cm;
- Small tube, with a diameter of 3 cm.

Accordingly, the analyzed samples were produced with cylindrical geometry, with diameters of 10 cm and 3 cm and a height of about 6 cm. By combining the results obtained with the two instrumentations, complete transmission loss and absorption values can be derived in the frequency spectrum between 100 Hz and 6500 Hz.

The tests conducted involved the analysis of transmission loss and absorption of the samples. Depending on the type of test, the tube configuration changes:

- For transmission loss, the sample is placed in an intermediate cylinder, and of the four microphones used, two are placed before the sample and two after it;
- For absorption the configuration is shorter and only two microphones are used, placed before the sample.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 6. Configuration of a) large tube for transmission loss b) small tube for absorption



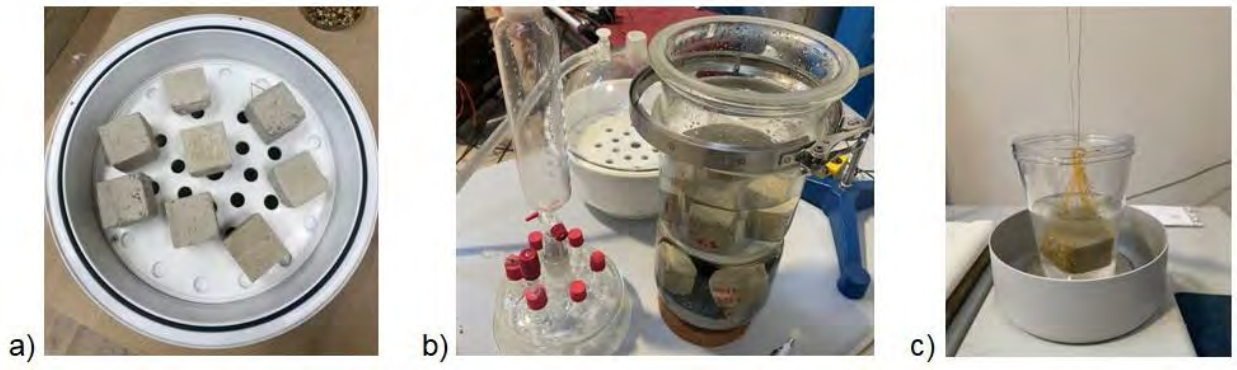
2.3 Porosity test

The reference standard for porosity testing is UNI EN 1936:2006 (Test Methods for Natural Stone) - Determination of Real and Apparent Bulk Masses and Total Open Porosity, with which it was possible to analyze open porosity ρ_o. The steps were performed as follows:

- Conditioning of the samples at 70°C in a climatic chamber;
- Vacuum drying at 20°C;
- Weighing the dry samples three times to obtain the average dry mass value;
- Placement of samples in the container kept under vacuum for at least 2 hours;
- Vacuum immersion of the samples in water in such a way that each sample is completely covered in 15 minutes;
- Maintenance of the submerged samples for at least 24 h;
- Weighing the saturated samples three times to obtain the average value of the saturated mass;
- Weighing of the water-immersed samples three times to obtain the average value of the hydrostatic mass;
- Calculation of open porosity through excel file.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 7. Some steps in the porosity calculation procedure: a) placement of samples in the desiccator b) keeping the samples immersed in water for at least 24 h c) final weighing in water



3. Results and discussion

This chapter discusses the results obtained during the experimental phase, comparing Shot-Earth with Smart-Earth samples performances.

3.1 Thermal characterization

Excavated-Earth thermal values obtained are relative only to the type of earth analyzed; in general, they may vary depending on the type of earth being recovered from the individual site.

Table 1. Thermal values of excavated-earth analyze

ʎ	**ε**
0.2053 W/(mK)	0.0002
α	**ε**
0.2082 mm²/s	0.0008
ρcp	**ε**
0.986 MJ/(m³K)	0.003

Thermal analysis of Shot-Earth samples yielded conductivity values ranging from 1.3 to 1.15 W/(mK), values that differed according to the type of geometry tested, cubic or rectangular, and thus to the more or less uniform way in which the mixture was distributed during the fabrication phase.

Table 2. Thermal values of Shot-Earth samples

Geometry	**ʎ**	**ε**
Cubes	**1.27 W/mK**	0.01
Rectangular	**1.15 W/mK**	0.06
Geometry	**α**	**ε**
Cubes	0.78 mm²/s	0.06
Rectangular	0.68 mm²/s	0.05
Geometry	**ρc_p**	**ε**
Cubes	1.7 MJ/m³K	0.5
Rectangular	1.7 MJ/m³K	0.2

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

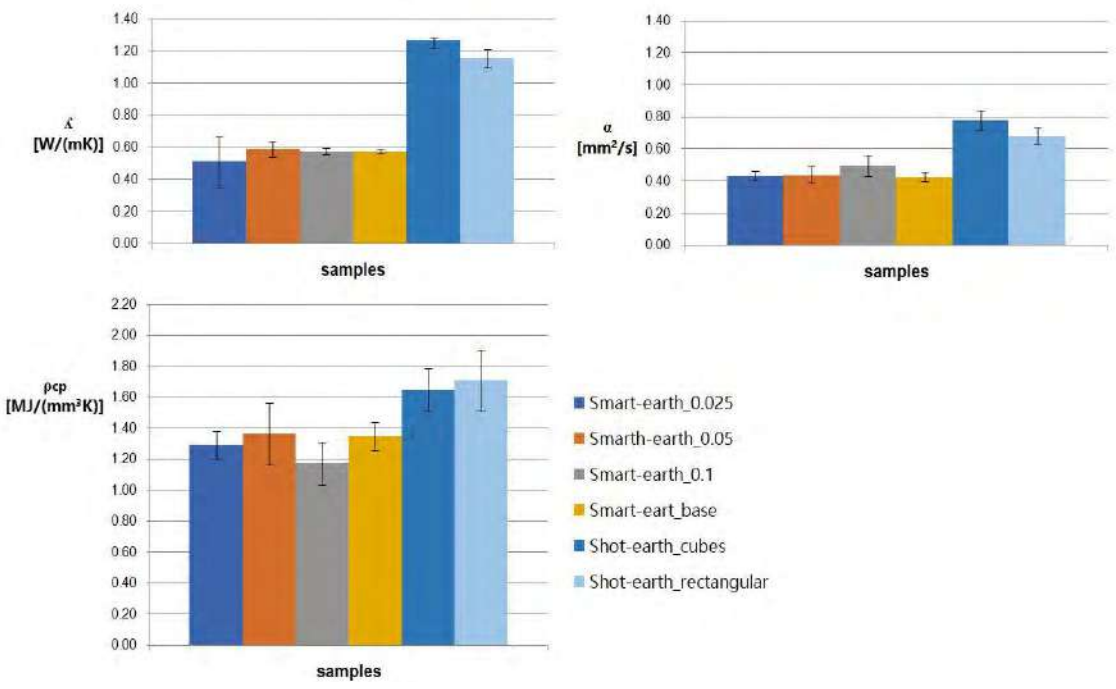
About Smart-Earth samples, with soil directly mixed with the other elements, different types were analyzed; in addition to the reference one, compounds with different percentages of nanotubes inserted within the mix design, from 0.025% to 0.05% to 0.1%, were also made and studied. The results obtained showed better thermal behaviour, consequently lower thermal conductivity, for Smart-Earth composites with a nanotube percentage of 0.025%, which reached conductivity values around 0.5 W/(mK).

Table 3. Thermal values of Smart-Earth samples

% of nanotubes	**λ**	**ε**
0.025	**0.5 W/(mK)**	0.2
0.05	0.59 W/(mK)	0.05
0.1	0.57 W/(mK)	0.02
base	0.57 W/(mK)	0.01
% of nanotubes	**α**	**ε**
0.025	0.43 mm²/s	0.03
0.05	0.44 mm²/s	0.05
0.1	0.50 mm²/s	0.06
base	0.43 mm²/s	0.03
% of nanotubes	**ρcp**	**ε**
0.025	1.29 MJ/(m³K)	0.09
0.05	1.4 MJ/(m³K)	0.2
0.1	1.2 MJ/(m³K)	0.5
base	1.35 MJ/(m³K)	0.09

A direct comparison underlines that the samples with soil directly placed in the mixture have similar conductivity values to each other but are much lower than those of the sprayed soil samples.

Figure 8. Comparison between Shot-Earth and Smart-Earth thermal properties



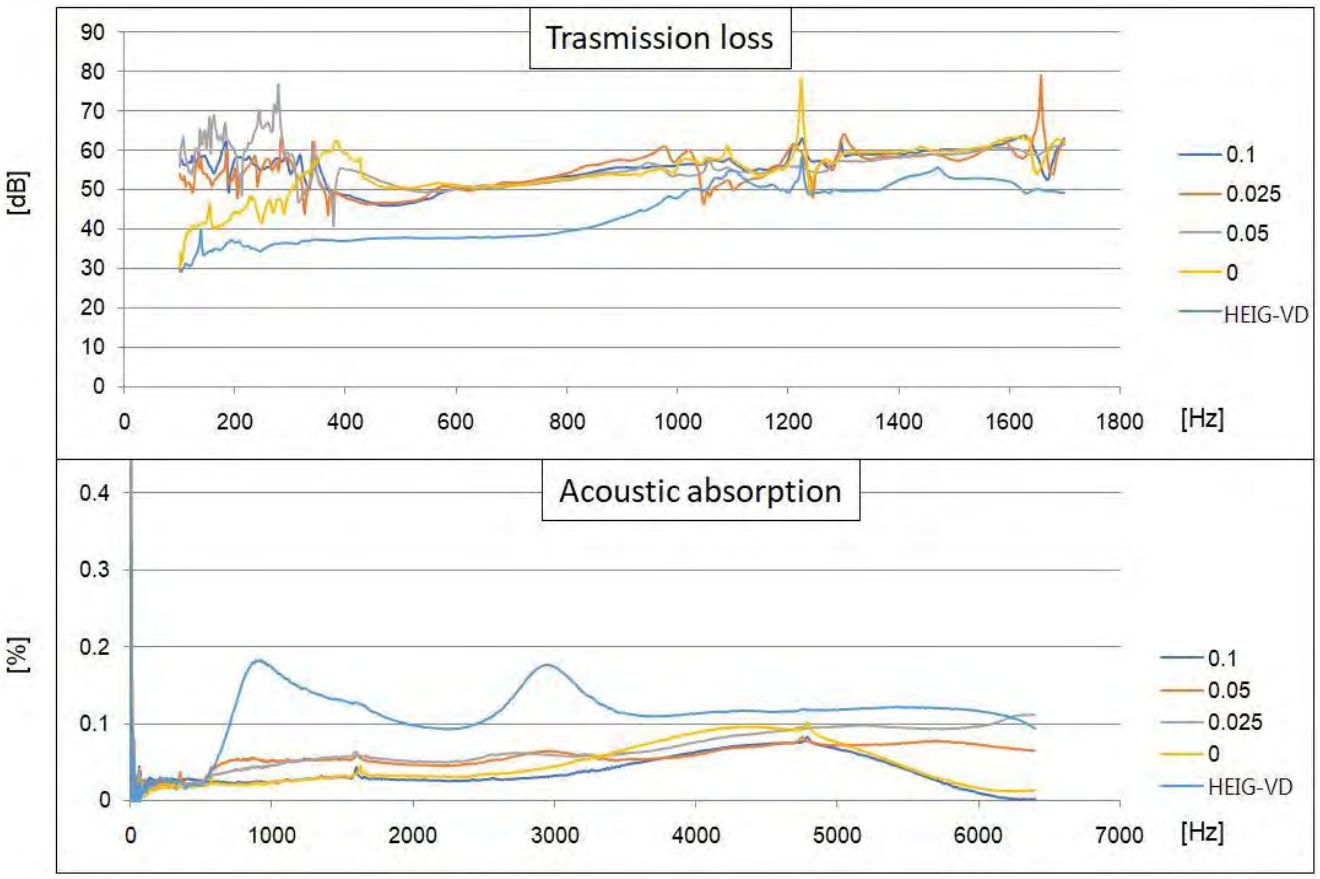
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.2 Acoustic characterization

Figure 9 the results obtained from acoustic tests; regarding transmission loss, there is a similar behaviour among the samples, which in the central spectrum reproduces the mass law, with slightly better performance of the compounds in Smart-Earth, a phenomenon due to the composition of the recipe; moreover, compared to those in Shot-Earth, the samples with directly mixed earth have higher density.

Conversely, from the point of view of absorption, which is strongly dependent on the production methodology, the samples in Shot-Earth perform better, although with very low values of about 0.2, confirming the poor aptitude of the concretes in this profile. What affects this case is the surface roughness, which is higher for the sprayed earth samples, due to the induced pressure on the concrete during the earth application procedure.

Figure 9. Comparison between Shot-Earth and Smart-Earth acoustic properties



3.3 Porosity test

By following the steps listed in paragraph2.3, the apparent and actual volume, density, and surface porosity have been calculated. Porosity is significantly lower, 20% vs. 40/50%, in the Shot-Earth samples.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 10. Comparison between Shot-Earth and Smart-Earth volumes

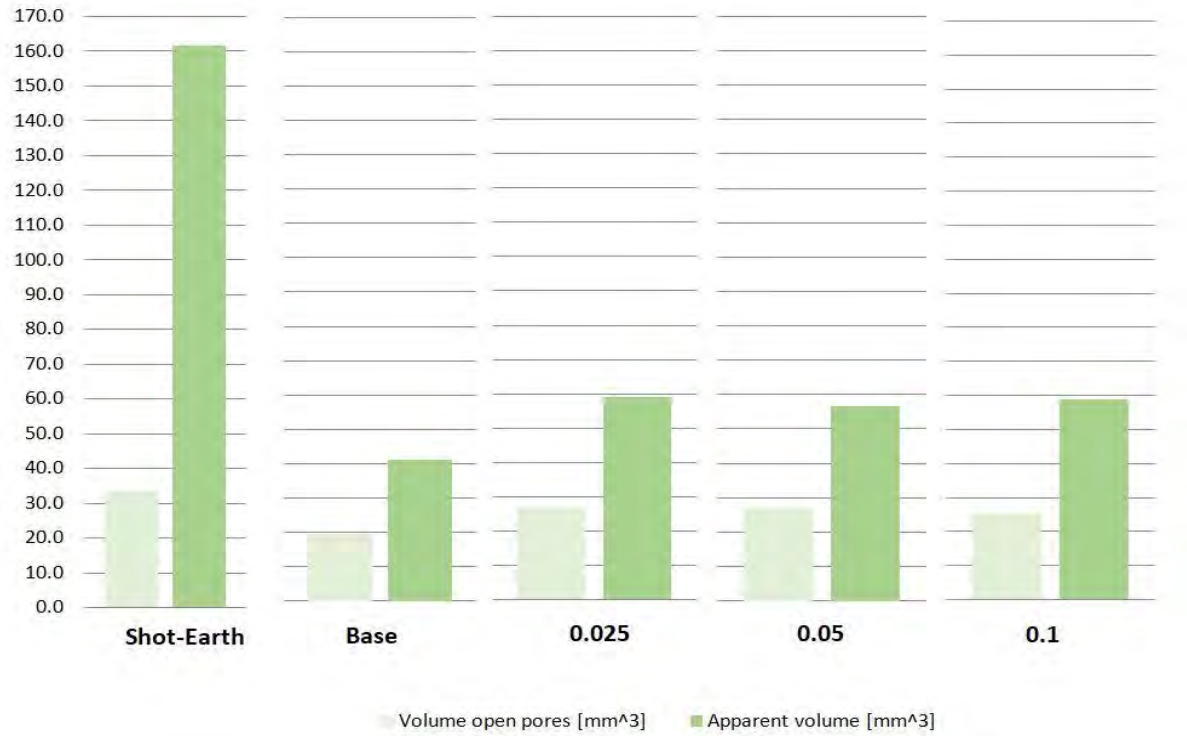
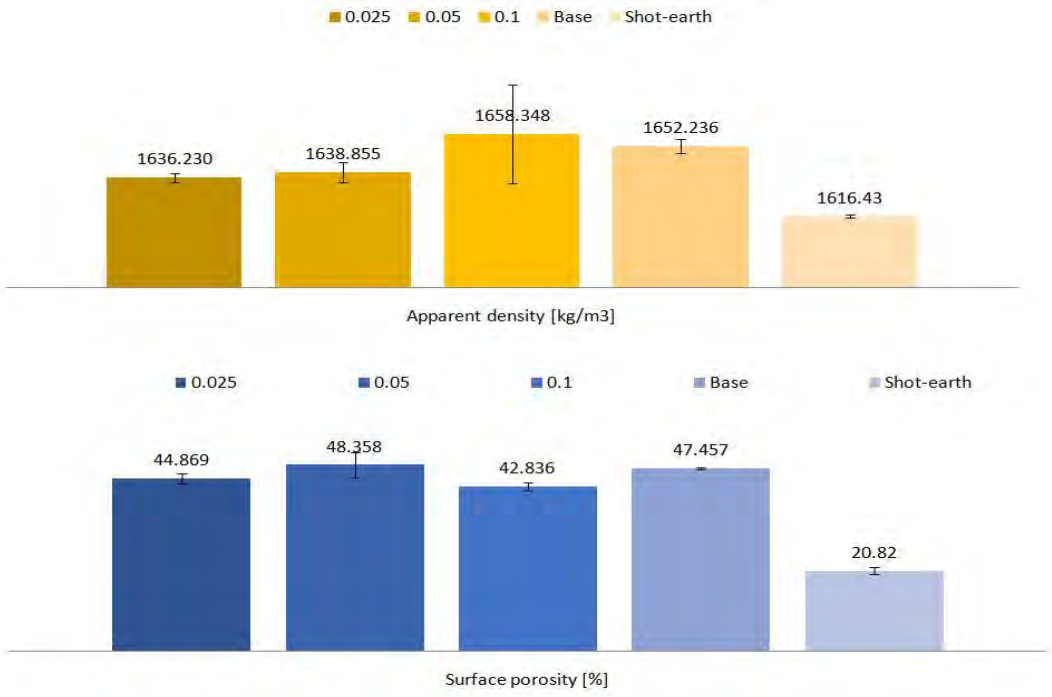


Figure 11. Comparison between Shot-Earth and Smart-Earth in terms of density and apparent porosity



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

4. Conclusion and future developments

It is possible to say that the concrete compounds with soil and cement analysed have good properties, especially concerning thermal performance, (their thermal conductivity, in the best case, reaches 0.5 W/(mK), and porosity values, ranging between 40 and 50 %. Moreover, using excavated soil in concrete allows for an innovative and environmentally friendly material both because a natural waste material is reused but also because the amounts of cement and water are decreased in the mix.

Future developments foresee a real application of both types of concretes analysed both as structural elements and as plasters and quantify the performance that is obtained; in particular, if applied as plasters, relevant could be the study of thermo-hygrometric properties to verify how they affect moisture control, having, in any case, noted a discrete surface porosity.

References

1. Ayarkwa J, Joe Opoku DG, Antwi-Afari P, Man Li RY. Sustainable building processes' challenges and strategies: The relative important index approach. Clean Eng Technol [Internet]. 2022;7:100455. Available from: https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100455
2. Delnavaz M, Sahraei A, Delnavaz A, Farokhzad R, Amiri S, Bozorgmehrnia S. Production of concrete using reclaimed water from a ready-mix concrete batching plant: Life cycle assessment (LCA), mechanical and durability properties. J Build Eng [Internet]. 2022;45(August 2021):103560. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103560
3. Amin M, Hakeem IY, Zeyad AM, Tayeh BA, Maglad AM, Agwa IS. Influence of recycled aggregates and carbon nanofibres on properties of ultra-high-performance concrete under elevated temperatures. Case Stud Constr Mater [Internet]. 2022;16(March):e01063. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01063
4. Rojat F, Hamard E, Fabbri A, Carnus B, McGregor F. Towards an easy decision tool to assess soil suitability for earth building. Constr Build Mater [Internet]. 2020;257:119544. Available from: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119544
5. Paula Junior AC, Jacinto C, Turco C, Fernandes J, Teixeira E, Mateus R. Analysis of the effect of incorporating construction and demolition waste on the environmental and mechanical performance of earth-based mixtures. Constr Build Mater. 2022;330(March):127244.
6. Charai M, Mezrhab A, Moga L. A structural wall incorporating biosourced earth for summer thermal comfort improvement: Hygrothermal characterization and building simulation using calibrated PMV-PPD model. Build Environ [Internet]. 2022;212(September 2021):108842. Available from: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108842
7. Hema C, Messan A, Lawane A, Soro D, Nshimiyimana P, van Moeseke G. Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation. J Build Eng. 2021;38(June 2020).
8. Strazzeri V, Karrech A. Energy and thermal performance of a typical rammed earth residential building in Western Australia. Energy Build [Internet]. 2022;260:111901. Available from:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111901
9. Zhang L, Gustavsen A, Jelle BP, Yang L, Gao T, Wang Y. Thermal conductivity of cement stabilized earth blocks. Constr Build Mater [Internet]. 2017;151:504–11. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.047
10. Lu JX, Shen P, Ali HA, Poon CS. Mix design and performance of lightweight ultra high-performance concrete. Mater Des [Internet]. 2022;216:110553. Available from: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110553
11. Vinod BR, Surendra HJ, Shobha R. Lightweight concrete blocks produced using expanded polystyrene and foaming agent. Mater Today Proc [Internet]. 2022;52:1666–70. Available from: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.503
12. Tale Masoule MS, Bahrami N, Karimzadeh M, Mohasanati B, Shoaei P, Ameri F, et al. Lightweight geopolymer concrete: A critical review on the feasibility, mixture design, durability properties, and microstructure. Ceram Int [Internet]. 2022;48(8):10347–71. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.298
13. Vali KS, Bala Murugan S. Performance of manufactured aggregate in the production of sustainable lightweight concrete. Mater Today Proc [Internet]. 2022;(XXXX). Available from: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.314
14. Pongsopha P, Sukontasukkul P, Zhang H, Limkatanyu S. Thermal and acoustic properties of sustainable structural lightweight aggregate rubberized concrete. Results Eng [Internet]. 2022;13(January):100333. Available from: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100333
15. Gomes MG, Rodrigues AM, Bogas JA, Freitas A. Thermophysical properties under different hygroscopic conditions of an innovative composite concrete pre-walls system. Constr Build Mater. 2021;307(July).
16. Zhu H, Balaban AT, Klein DJ, Zivkovic TP. Shot-earth for sustainable constructions. Sci Rep [Internet]. 1994;1675(June):1–26. Available from: https://doi.org/10.1038/s41598-022-07229-w

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

Due applicazioni dell'uso dell'idrogeno: un sistema per la produzione elettrolitica da fonte rinnovabile e riconversione in energia elettrica in fuel cell ed un prototipo di drone per volo in alta atmosfera alimentato a fuel cell

C. Marino[1], A. Nucara[1], M.F. Panzera[1], M. Pietrafesa[1*]

[1] Mediterranea University, DICEAM, via Graziella, loc.Feo di Vito, 89122 Reggio Calabria

***** Autore di riferimento: matilde.pietrafesa@unirc.it

Abstract: Grazie alla sua sostenibilità ambientale e alle sue prestazioni energetiche, l'idrogeno è oggi oggetto di crescente interesse: il suo uso può infatti rivolgersi a molteplici settori e applicazioni dell'energia, tra quelli stazionari, mobili e trasportabili, fornendo energia in un ampio range di potenze, dalle microfonti per piccoli dispositivi alle centrali di grossa potenza. Come esempi di sfruttamento della tecnologia dell'idrogeno nel lavoro vengono descritti due casi studio, rispettivamente un'applicazione stazionaria ed una mobile. Il primo è costituito da un impianto fotovoltaico in cui l'accumulo è realizzato utilizzando idrogeno elettrolitico, successivamente convertito in energia elettrica in celle a combustibile. Il secondo consiste in un innovativo prototipo di UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), un velivolo ad ala fissa alimentato da fuel cell a idrogeno per volo in alta quota (oltre i 3.000 m), da utilizzare per il monitoraggio delle emissioni del vulcano Etna. Il velivolo potrà avere inoltre utili applicazioni per l'osservazione, il controllo e la gestione del territorio (es. prevenzione di calamità naturali), per funzioni di primo soccorso e altro, rivolgendosi ai mercati dell'aeronautica, dei trasporti, della salute, ecc..

Keywords: idrogeno; sistemi di accumulo; fuel cell; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); fotovoltaico

1. Introduzione

In un'ottica di sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili e di centralità dell'uso di sistemi di accumulo l'uso dell'idrogeno sta avendo forte impulso, moltiplicandosi le tecniche di produzione green,

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Cod_052_pp_474

le applicazioni ed ampliandosi i range di potenza. Esso può rappresentare una delle poche soluzioni energetiche sostenibili, affiancando, sostituendo o integrando le attuali fonti energetiche. Numerosi sono i lavori di studio e approfondimento di tali sistemi, che ne investigano la produzione e le applicazioni [1], le infrastrutture [2] o le applicazioni in campo automotive [3] o residenziale [4].

Le *fuel cells* per la conversione dell'idrogeno in energia elettrica potrebbero potenzialmente produrre elettricità per soddisfare i fabbisogni futuri dell'umanità, ma innescare la transizione dall'era dei combustibili fossili a quella dell'idrogeno non sarà facile: produrlo è ancora costoso, per cui attualmente la maggior parte delle celle a combustibile sono alimentate a metano o altri combustibili fossili. Le normative che promuovono il processo di decarbonizzazione vedono l'idrogeno tra i protagonisti, come riscontrabile nel recente *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza* (*PNRR*) [5], nel quale, all'interno della Missione 2 – Componente 2, vi è un intero paragrafo dedicato alla promozione della produzione, della distribuzione e degli usi finali dell'idrogeno, in particolare nei settori dell'industria e del trasporto locale.

2. Prototipo di sistema di produzione, stoccaggio e riconversione di idrogeno in *fuel cell* del Dipartimento DICEAM dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria

Una delle tecniche più ambientalmente sostenibili per l'accumulo di energia elettrica prodotta da energia rinnovabile consiste nel suo uso come fonte primaria per la produzione di idrogeno, che viene poi riconvertito in elettricità in *fuel cells*. La produzione può avere luogo sia in grandi impianti che in piccole unità generative prossime all'utente finale e può interessare molteplici settori (produzione elettrica, trasporti, climatizzazione, ecc.).

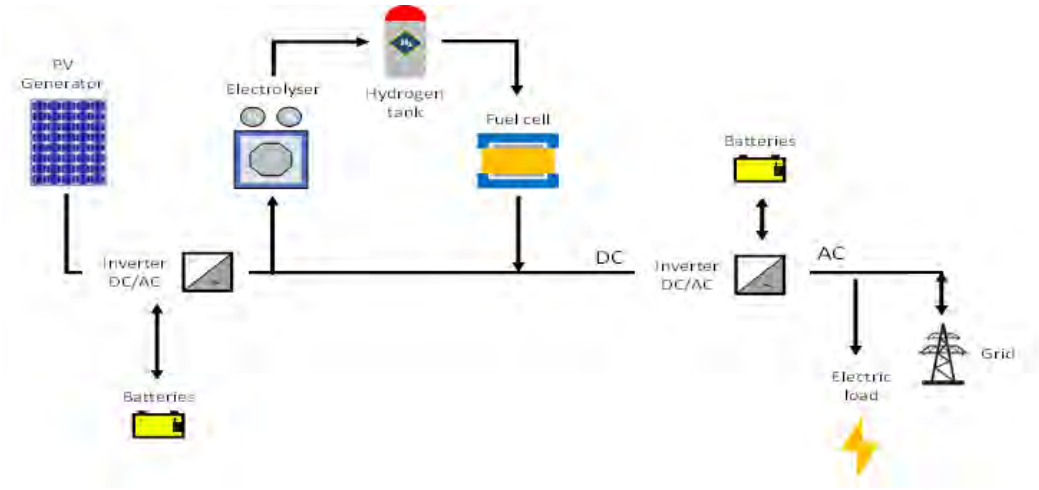
Il Laboratorio di *Energia e Ambiente* dell'**Università Mediterranea** di Reggio Calabria dispone di un impianto di produzione, stoccaggio e riconversione in *fuel cell* dell'idrogeno prodotto per elettrolisi da fonte rinnovabile (energia solare). Lo schema di funzionamento dell'impianto è riportato in Figura 1 mentre in Figura 2 sono riportati i suoi componenti, di seguito elencati:

- impianto fotovoltaico (a)
- inverter ibrido, associato ad un pacco batterie (b)
- elettrolizzatore (c)
- serbatoio di accumulo (d)
- fuel cell associata ad un pacco batterie ed un inverter (f-g)
- sistema di controllo ed acquisizione dati (h)

In Figura 3 è riportato infine lo schema dei collegamenti elettrici

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 1. Schema dell'impianto.



Il principio di funzionamento dell'impianto è il seguente:

1) a partire dalla radiazione solare incidente sui pannelli FV si produce energia elettrica (in DC) per azionare il processo di elettrolisi; il surplus è immagazzinato in un pacco batterie e convertito in AC da un inverter per l'alimentazione di un chiller e di carichi ausiliari ed infine per l'invio in rete;
2) l'elettrolizzatore, sfruttando l'energia elettrica prodotta dal FV, scinde la molecola dell'acqua producendo ossigeno e idrogeno; quest'ultimo viene compresso e stoccato in un serbatoio e successivamente viene inviato alla fuel cell;
3) la fuel cell converte l'idrogeno in energia elettrica in DC, inviandola ad un pacco batterie, a valle del quale un secondo inverter la converte in AC per l'alimentazione del carico;
4) un *Programmable Logic Controller* (PLC) gestibile in remoto monitora e controlla tutti i parametri di processo per garantirne il corretto svolgimento, assicurando la sicurezza del sistema, emette allarmi ed arresta la produzione di idrogeno se necessario.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 2. Componenti dell'impianto.



a) pannelli fotovoltaici



b) inverter e batterie di accumulo



c) elettrolizzatore



d) serbatoio di accumulo idrogeno



e) chiller e accumulo acqua tecnica



f) fuel cell



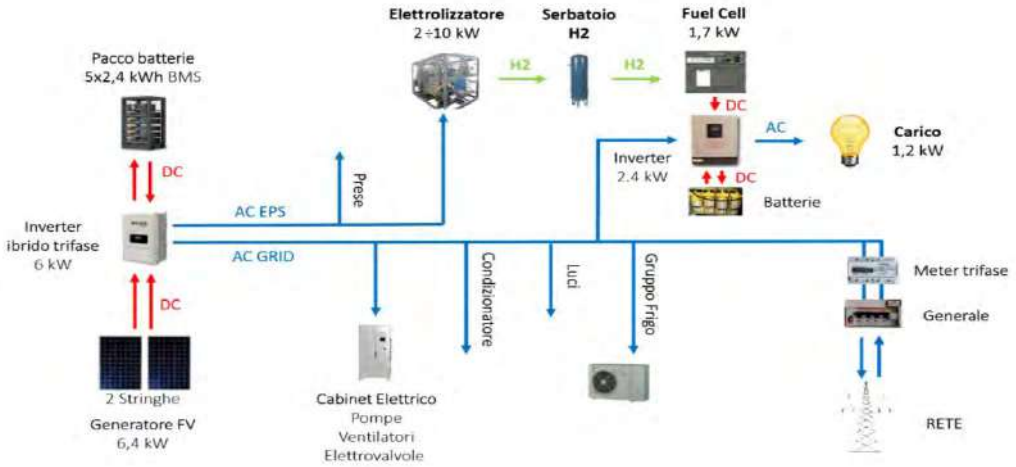
g) batterie fuel cell



h) PLC – pannello di controllo

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 3. Schema elettrico dell'impianto.



2.1 Componenti e fasi del processo

Per lavorare in condizioni di sicurezza e prevenire esplosioni, l'impianto necessita di un processo di inertizzazione all'accensione ed allo spegnimento, iniettando azoto alla pressione di 7-25 bar: questa operazione, depressurizzando il sistema, consente di eliminare l'ossigeno in fase di avvio e l'idrogeno allo spegnimento per evitare che le due molecole possano entrare in contatto durante gli step di produzione.

a) generatore fotovoltaico

Il generatore FV è formato da pannelli in silicio monocristallino, con caratteristiche tecniche riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** per una potenza totale di 6,5 kWp, inclinati di 15° con esposizione S-SE (160°N). Il sistema è formato da 2 stringhe collegate in parallelo, ognuna consistente di 9 pannelli collegati in serie: questa disposizione mantiene i valori di tensione e corrente al di sotto dei valori di soglia.

Tabella 1. Caratteristiche dei pannelli fotovoltaici.

Potenza di picco	360 W_p
Efficienza	22,1%
Coefficiente di temperatura β	-0,29%/°C
Nominal operating cell temperature NOCT	41,5°C

b) inverter ibrido

A valle dell'impianto fotovoltaico c'è un dispositivo multifunzione: *Maximum Power Point Tracker* (*MPPT*), inverter DC/DC con regolatore di carica per il primo pacco batterie ed inverter trifase DC/AC per l'alimentazione in AC degli ausiliari presenti nel cabinet dell'elettrolizzatore; la corrente DC necessaria per l'operatività dell'elettrolizzatore viene fornita da un rettificatore dedicato. L'inverter alimenta con priorità l'elettrolizzatore e solo in seguito gli altri carichi, interrompe automaticamente la generazione FV in caso di assenza prolungata di domanda dal carico e sistemi di carica completamente pieni (batterie e serbatoio di idrogeno). Le sue caratteristiche sono riportate in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**. Per l'accumulo dell'energia prodotta dal generatore fotovoltaico a

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

valle dell'inverter è presente un pacco di 5 batterie al litio, con bassa autoscarica (durata della carica fino a 6 mesi), senza effetto memoria, ognuna con voltaggio nominale di 48 V e capacità nominale di 50 Ah, per un totale di 240 V e 12 kWh.

Tabella 2. Caratteristiche tecniche dell'inverter

Potenza nominale	6.000 VA
Massima potenza di carica/scarica	6.000 W
Efficienza	97,6%
DC input	720 VDC - 11 A
AC output	400 VAC - 50 Hz - 9 A

c) elettrolizzatore

È un convertitore elettrochimico capace di spezzare la molecola dell'acqua nei suoi due componenti (idrogeno e ossigeno). A partire da acqua demineralizzata ed energia fotovoltaica si produce idrogeno durante il giorno, che viene compresso e stoccato in un serbatoio, ed inviato alla fuel cell di notte. La cella elettrolitica ha due scomparti per gli elettrodi (catodo ed anodo) nei quali si generano rispettivamente idrogeno e ossigeno, tenuti separati da un diaframma permeabile alle cariche elettriche (Figura 4). Per ottenere la produttività di idrogeno desiderata si accoppiano in serie un numero di celle con sezione assegnata in configurazione di filtro-pressa, formando uno stack. Le principali caratteristiche tecniche dell'elettrolizzatore sono riportate in Tabella 3.

Figura 4. Schema dell'elettrolizzatore.

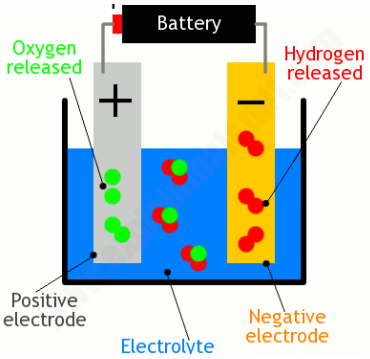


Tabella 3. Caratteristiche tecniche dell'elettrolizzatore

Capacità dello stack	2 Nm^3/h
Potenza elettrica	2 -10 kW
Pressione operative	20 bar
Temperatura operativa	80 °C
Voltaggio dell'inverter AC/DC	400 V - 3 Ph 50 Hz
Portata di acqua demineralizzata	1.9 l/h
Massima conduttività (25°C)	5 µS/cm
Residuo fisso	max 2 mg/l
Purezza dell'idrogeno in uscita	99,80 %
Purezza dell'idrogeno accumulato	99,99 %
Umidità dell'idrogeno	Saturato
Efficienza di conversione	60 %

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Un flusso di corrente continua, proveniente dal generatore fotovoltaico, attraversa le celle in serie, fornendo l'energia richiesta per alimentare il processo. In input al cabinet elettrico dell'elettrolizzatore è presente una corrente alternata trifase a 400 V proveniente dall'inverter, che viene suddivisa fra i singoli utenti monofase: luci, prese, condizionatori, chiller per la refrigerazione dell'acqua ed ausiliari (ventilatori, pompe, riscaldatori, valvole); un rettificatore/trasformatore di potenza AC/DC rende la corrente DC disponibile per il processo di elettrolisi. Il passaggio della corrente elettrica nella molecola di acqua la scinde in ioni H^+ che si dirigono verso il catodo e OH^-, che vanno verso l'anodo. Le reazioni che hanno luogo agli elettrodi sono le seguenti:

catodo: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

anodo: $2OH^- \rightarrow ½\, O_2 + H_2O + 2e^-$

$$H_2O + elettricità \rightarrow H_2 + ½\, O_2$$

Il volume dell'idrogeno prodotto è doppio di quello dell'ossigeno. Una soluzione elettrolitica assicura il trasporto elettrico in forma ionica, in aggiunta agli ioni H^+ ed OH^-: viene utilizzato un elettrolita alcalino, l'idrossido di potassio (KOH), un eccellente conduttore di elettricità con limitati problemi di stabilità e corrosione, in soluzione acquosa al 20-30%. L'idrogeno e l'ossigeno nella cella elettrolitica sono in composizione bifasica (liquido e gas) miscelati con KOH. Nei serbatoi di separazione le fasi gassose si separano da quelle liquide, che ritornano nell'elettrolizzatore.

Prima di essere rilasciato per lo stoccaggio, in una sezione dedicata l'idrogeno viene purificato da filtri per la rimozione di KOH ed ossigeno e l'assorbimento dell'acqua: il KOH viene interamente riutilizzato, l'ossigeno viene rilasciato in aria mentre l'acqua va reintegrata. L'acqua demineralizzata, richiesta dall'elettrolizzatore con le caratteristiche riportate in Tabella 3, viene contenuta in un serbatoio per la sua refrigerazione e collegata ad un chiller.

d) serbatoio

L'idrogeno, puro al 99,99%, è immagazzinato ad una pressione massima di 30 bar in un serbatoio della capacità di 0,75 m^3, protetto dalla radiazione solare diretta e collocato in ambiente fresco e ventilato.

e) chiller di refrigerazione dell'acqua

Il calore in eccesso rilasciato durante il processo di elettrolisi viene rimosso da un circuito di raffreddamento dell'acqua per mezzo di un chiller, con potenza di 7,5 kW, che scambia calore con l'elettrolita ricircolato.

f) fuel cell

È un dispositivo elettrochimico che converte l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica in DC, necessaria per l'alimentazione dei carichi, e calore. Dentro la cella sono presenti due elettrodi

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

(anodo e catodo) lambiti rispettivamente da un combustibile (idrogeno) ed un ossidante (ossigeno o aria). L'effluente è acqua pura, priva di sostanze inquinanti. Quando l'idrogeno viene introdotto nella cella, al contatto fra l'anodo e l'elettrolita si attiva la produzione di ioni (cationi di idrogeno H^+) ed elettroni:

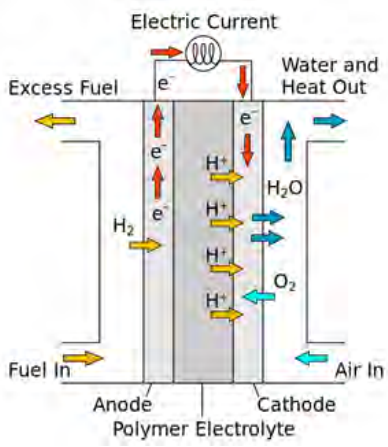
anodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Si originano due flussi, entrambi diretti al catodo: il primo consiste nel movimento degli elettroni attraverso il carico che connette gli elettrodi (utenza), il secondo è dovuto al movimento degli ioni H^+ prodotti all'anodo, che sono condotti al catodo dall'elettrolita attraverso la membrana, chiudendo il circuito elettrico. La seconda parte della reazione redox ha luogo al catodo, dove il flusso di elettroni si combina con i cationi di idrogeno H^+ e l'ossigeno O_2 producendo acqua:

catodo: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Nel complesso, le reazioni generano corrente elettrica in DC, acqua e calore. Uno schema del processo è riportato in Figura 5.

Figura 5. Principio di funzionamento della fuel cell.



Rispetto ad una batteria, nella quale gli elettrodi sono consumati durante la scarica e vanno rigenerati durante la carica, la fuel cell produce energia fintantoché viene fornito un reagente agli elettrodi, che non si consumano, ma costituiscono solo il supporto sul quale hanno luogo le reazioni chimiche. Per ottenere la potenza ed il voltaggio desiderati, più celle sono collegate in serie per mezzo di piatti bipolari, formando uno stack; più stack assemblati consentono di ottenere la potenza richiesta. Le celle più idonee per il sistema sono quelle con membrane a scambio protonico, *Proton Exchange Membranes*, *PEMs*, le cui principali caratteristiche sono riportate in Tabella 4. La cella utilizzata fornisce una Potenza di 1.676 W, con efficienza di conversione costante $\varepsilon_{EL} = 0{,}4$, ed è dotata di un controller per la gestione dell'interfaccia e la comunicazione con le altre unità (batterie ed inverter).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Tabella 4. Caratteristiche della fuel cell

Potenza fornita	1.676 W	Temperatura di accumulo	-30 - 40 °C
Voltaggio in uscita	47 ÷ 57 VDC	Temperatura ambiente	-45 - 70 °C
Massimo consumo H_2	1,37 Nm^3/h	Temperatura del cabinet	0 - 60 °C
Efficienza	40%	Pressione H_2 in ingresso	0,43 bar
Corrente in ingresso per ausiliari	220/50 VAC/Hz	Purezza H_2 in ingresso	99.95 %

g) batteria (secondo pacco)

All'uscita dalla fuel cell è presente un pacco batterie da 48 V per l'accumulo energetico, che opera come buffer per regolare la fornitura di corrente; ogni batteria ha voltaggio nominale di 12 V e capacità nominale di 92 Ah. Un dispositivo con funzioni combinate di inverter DC/AC e regolatore di carica della batteria, con caratteristiche riportate in Tabella 5, trasforma la corrente DC in uscita dalle batterie, rendendola disponibile al carico in AC. Il sistema è settato con una soglia minima di attivazione per il voltaggio: al di sotto dei 48 V lavora nella direzione:

batterie → inverter → utility

e la fuel cell è in stand-by, mentre per voltaggi superiori la fuel cell a fornisce corrente al pacco batterie fino alla procedura di spegnimento:

fuel cell→ batterie

Tabella 5. Caratteristiche dell'inverter multifunzione

Potenza nominale	3000 VA
DC input	48 VDC 50 A
AC output	230 VAC 50 Hz - 13 A
Massima potenza di carica/scarica	900 W
Efficienza	98%

h) sistema di controllo

Un sistema di controllo, *Programmable Logic Controller* (PLC), presente all'interno del cabinet, monitora e controlla tutti i parametri del processo allo scopo di garantirne la corretta esecuzione ed assicurare sicurezza ed efficienza al sistema. Se il valore di uno dei parametri non è rispettato emette allarmi e arresta la produzione di gas; in certe condizioni i gas prodotti sono rimossi automaticamente dall'iniezione di gas inerte. Il PLC consente anche operazioni in remoto, eccetto l'accensione e lo spegnimento.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

2.2 Dati tecnici dell'impianto

In Tabella 6 sono riportati i dati tecnici dell'impianto.

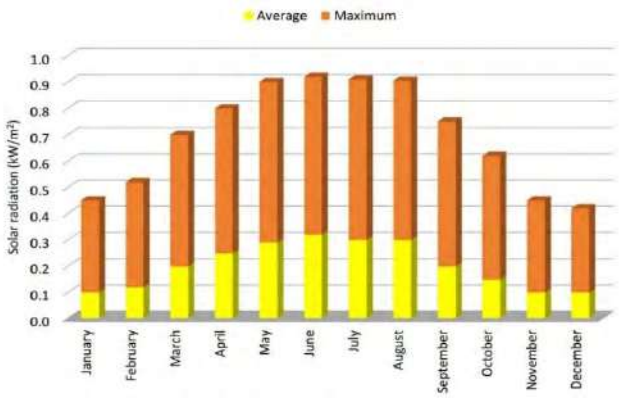
Tabella 6. Dati tecnici dell'impianto

Massima produzione oraria di idrogeno (p = 1 bar - T = 0 °C, potenza in ingresso 10 kW)	$\dot{V}_{H_2} = 2\ Nm^3/h$ $\dot{m}_{H_2} = \dot{V}_{H_2} \times \rho_{H_2} = 0{,}18\ kg/h$ $\rho_{H_2} = 0{,}0899\ kg/Nm^3$
Capacità del serbatoio	$Vs = \frac{A_{max} \times \rho_{H_2} \times R \times T}{p \times PM_{H_2}}$ con: A_{max} massima quantità di idrogeno stoccabile annualmente (kg) ρ_{H_2} densità dell'idrogeno *R* costante dei gas *T* temperatura (*273,15 K*) *p* pressione massima nel serbatoio (*250 bar)* PM_{H2} peso molecolare dell'idrogeno
Volume di idrogeno consumato dalla fuel cell	$V_{H_2} = \frac{E_{FC}}{\varepsilon_{FC} \times pci_{H_2}}$ Con: E_{FC} energia erogata dalla fuel cell ε_{FC} efficienza della fuel cell pci_{H_2} potere calorifico dell'idrogeno (3 kWh/Nm^3)
Efficienza dell'impianto	$\varepsilon = \varepsilon_{EL} \times \varepsilon_{FC} = 0{,}75 \times 0{,}4 = 0{,}3$ con: ε_{EL} efficienza dell'elettrolizzatore ε_{FC} efficienza della fuel cell

2.3 Simulazione del processo di produzione e riconversione di idrogeno

Un *piranometro* fornisce i valori istantanei della radiazione solare globale incidente. In Figura 6 sono riportati i valori massimi e medi dell'intensità di radiazione solare, in Figura 7 l'intensità oraria giornaliera media nei mesi di Giugno e Dicembre ed in Figura 8 i valori della radiazione solare mensile, unitamente ai valori orari della temperatura dell'aria, registrati da una *stazione meteorologica*.

Figura 6. Valori massimi e medi dell'intensità della radiazione solare.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 7. Intensità della radiazione solare oraria giornaliera media a Giugno e Dicembre.

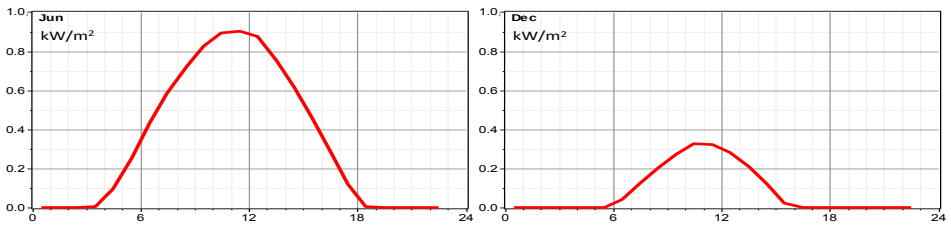
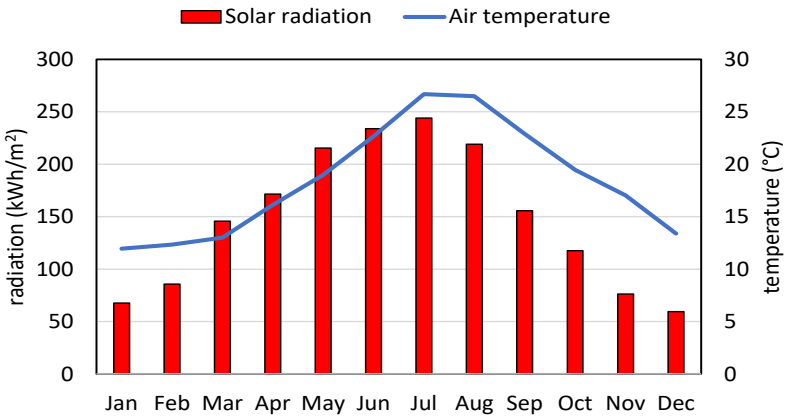


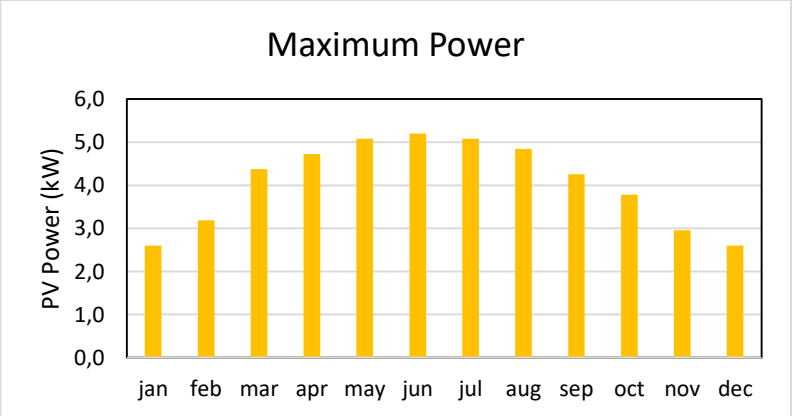
Figura 8. Radiazione solare mensile.



La potenza massima prodotta e la produzione energetica mensile dell'impianto fotovoltaico sono riportate rispettivamente nelle Figure 9 e 10; la Figura 11 riporta infine la potenza fotovoltaica oraria prodotta nei vari mesi e la corrispondente aliquota inviata all'elettrolizzatore.

La Figura 12 riporta la produzione giornaliera di idrogeno, in Nm^3/h, nei vari mesi dell'anno, la Figura 13 la massa di idrogeno stoccato giornalmente nel serbatoio, mentre la Figura 14 l'energia erogata mensilmente dalla fuel cell al carico.

Figura 9. Potenza massima prodotta dall'impianto fotovoltaico.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 10. Produzione energetica mensile del generatore fotovoltaico.

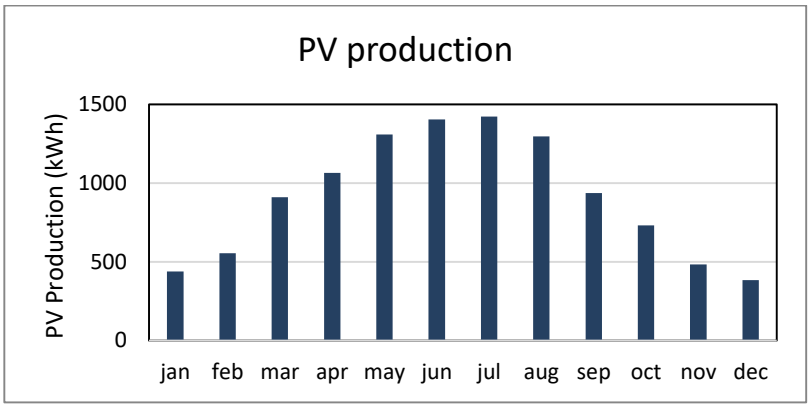


Figura 11. Potenza fotovoltaica oraria ed aliquota inviata all'elettrolizzatore.

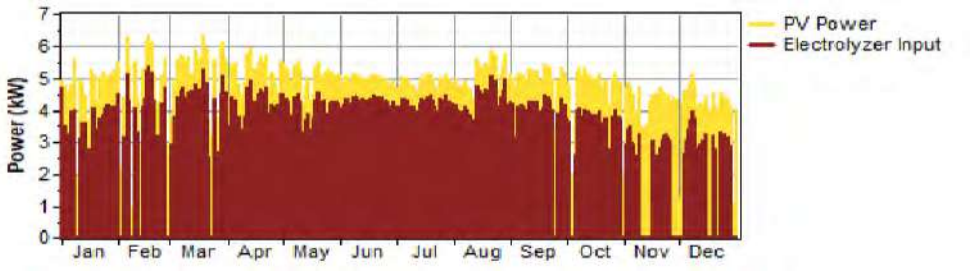


Figura 12. Produzione volumetrica giornaliera di idrogeno nei vari mesi dell'anno.

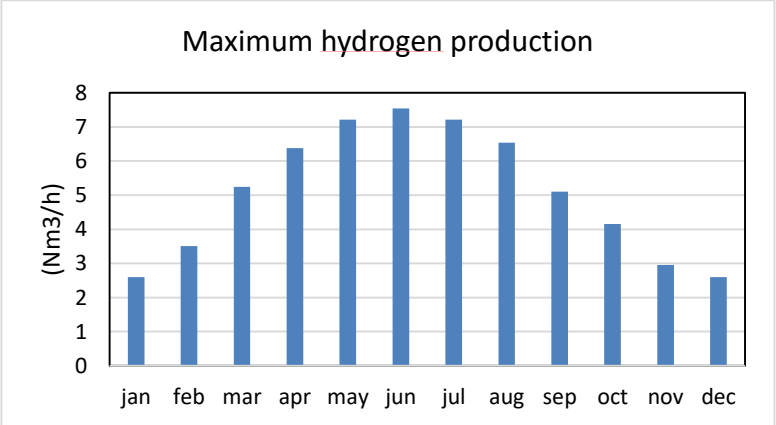
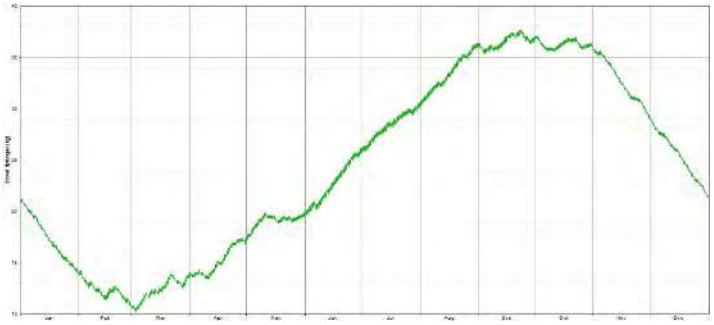
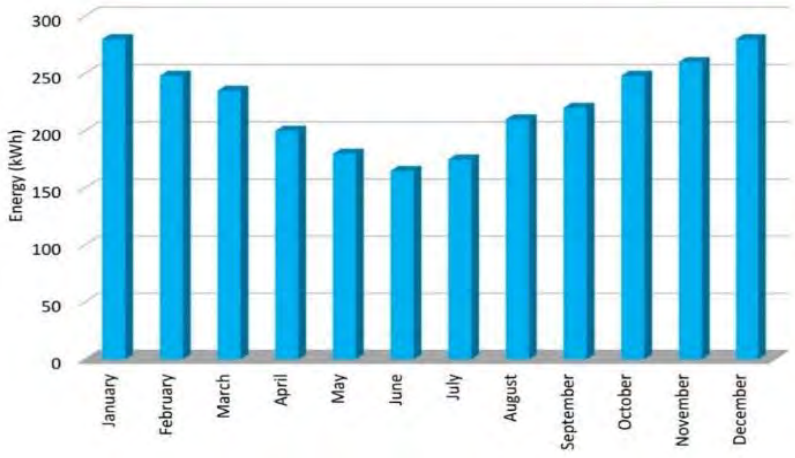


Figura 13. Massa di idrogeno stoccato nei vari mesi dell'anno.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 14. Energia erogata mensilmente dalla fuel cell.



2.4 Indicatori economici

Per valutare la convenienza dell'impianto nell'arco di vita dei componenti, è stato utilizzato il parametro *NPV* (*Net Present Value*). Esso rappresenta il valore attualizzato dei costi netti nell'arco di vita utile dell'impianto e può essere espresso come segue:

$$NPV = \sum_{j=1}^{n} \frac{C_j - B_j}{(1+r)^j} + I_0 \qquad (5.1)$$

in cui:

j anno

n anni di vita dell'impianto

I_o costo di investimento [€]

C_j costo di mantenimento e sostituzione dei componenti [€/anno]

B_j benefici [€/anno]

r tasso di interesse [%]

Il costo dell'energia ***COE*** (*cost of energy*) si ottiene, invece, dividendo i costi annuali della produzione elettrica [€/anno], sottratti dei benefici [€/anno], per l'energia elettrica prodotta [kWh/anno].

$$COE = \frac{\sum_{j=1}^{n} \frac{I_j + C_j - c \cdot E_{termica}}{(i+r)^j}}{\sum_{j=1}^{n} \frac{E_j}{(i+r)^j}} \qquad (5.2)$$

dove:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

j anno
n anni di vita dell'impianto
I_j costo di investimento [€]
C_j costo di mantenimento e sostituzione dei componenti [€/anno]
c costo dell'energia termica [€/kWh]
$E_{termica}$ energia termica prodotta annualmente [kWh/anno]
E_j energia elettrica prodotta annualmente [kWh/anno]
r tasso di interesse [%]

Questa tipologia di impianto presenta un costo di investimento particolarmente elevato, pari a € 100.000. Considerando costi di mantenimento di € 200/anno e un tasso di interesse di 0.51%, l'NPV è risultato pari a € 71.144, mentre il *COE* € 0,80/kWh (circa due volte e mezzo il costo unitario attuale dell'energia dalla rete). Affinché un sistema del genere non risulti oneroso (NPV = 0) è necessario che costi poco meno della metà (€ 30.000) del valore attuale; la convenienza economica può però aumentare sfruttando l'energia termica prodotta nell'elettrolisi a servizio di utenze termiche presenti nelle abitazioni. Questo tipo di impianti risulta tuttavia ancora difficilmente proponibile, a causa degli elevati costi di investimento, degli ingombri e della ridotta efficienza. Le nuove tecnologie si stanno sempre più indirizzando verso sistemi di tipo *residenziale*, che funzionino come cogeneratori utilizzando l'idrogeno come vettore energetico all'interno di piccoli elettrolizzatori domestici, per produrre sia energia termica che elettrica. Ulteriore utilizzo dell'idrogeno sarà come vero e proprio combustibile all'interno di caldaie dedicate, analoghe a quelle a gas attuali. Tale processo necessita però lo stoccaggio in idonee bombole o, in una visione più futuristica, l'inserimento dell'idrogeno all'interno dell'attuale rete di distribuzione del gas riducendo l'aliquota di fossile nella miscela.

3. UAV alimentato a fuel cell

I gas e le particelle litiche emesse nell'atmosfera durante l'attività esplosiva di un vulcano interessano altezze fino a diversi km (7-14 km per l'Etna) e contaminano lo spazio aereo, rappresentando uno dei maggiori rischi per il traffico aereo. È attualmente necessario migliorare la qualità del monitoraggio e della previsione della loro dispersione, fornendo alle società di gestione aeroportuale informazioni che ne accrescano l'operatività, la funzionalità e la sicurezza, unitamente a strumenti di supporto alle decisioni utili per adottare, in caso di rischio, misure di divieto temporaneo o chiusura dello scalo. Allo scopo sono adottate catene di modellizzazione integrate come *WRF-Chem* [6], comprendente un modello di previsione meteorologica, *WRF*, accoppiato con uno di dispersione e di trasporto degli inquinanti atmosferici, *Chemistry*. Esse richiedono tuttavia per la validazione a scala regionale/locale misurazioni al suolo e nel *plume* vulcanico, di difficile esecuzione a causa dell'elevata temperatura, pressione e altitudine della nube: per l'area del vulcano Etna (Italia) oggetto di studio tale quota è 7- 14 km. A tal fine, il lavoro presenta la progettazione e la costruzione di un innovativo prototipo di UAV ad ala fissa alimentato da celle a combustibile a idrogeno [7-8], dotato di sensori per il rilevamento di gas e ceneri, che sarà pilotato oltre la linea di vista visiva del pilota (*BVLOS*) per

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

effettuare misurazioni all'interno del pennacchio non eruttivo del vulcano, tra i crateri a 3,2 e 4-5 km di altezza. La fuel cell ha appropriato rapporto peso/potenza, occupazione e densità energetica [9-11]: rispetto ad una batteria di pari peso l'autonomia è 3-4 volte superiore. Inoltre l'idrogeno ha sostenibilità ambientale ed elevate prestazioni energetiche: 1 kg fornisce 33,3 kWh al lordo delle perdite, con occupazione minima se compresso [12-16]. Le *fuel cells* attraversano al momento una fase di crescente sviluppo, rivolgendosi a molteplici settori e applicazioni dell'energia sia negli impianti stazionari [17], che nei trasporti [18] e nei sistemi portatili, con range di potenze che vanno dalle micro [19] alle grandi centrali elettriche.

L'UAV progettato potrà avere applicazioni nel campo dell'osservazione, controllo e gestione del territorio (prevenzione delle calamità naturali), per il primo soccorso e altro, indirizzandosi ai mercati dell'aeronautica, dei trasporti, della sanità, ecc.

3. Il progetto

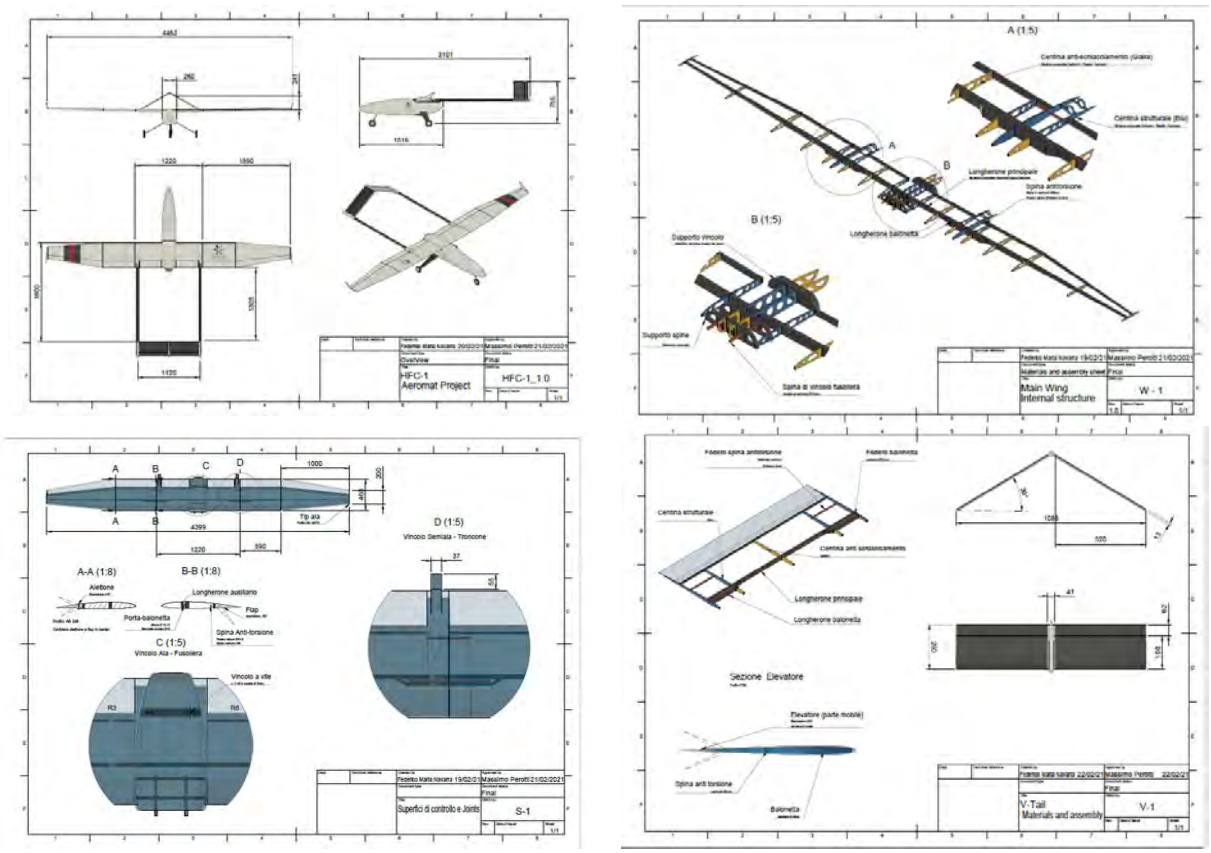
3.1 Struttura e materiali

Il prototipo di UAV è costituito da un modello monomotore con elica a passo variabile. Per realizzare il progetto in primo luogo sono state stimate la massa in ordine di volo e la superficie alare necessaria al sostentamento, definendo il *concept* più appropriato, per il quale sono state valutate le velocità operative/minime e la potenza richiesta. Utilizzando il software CFD sono stati effettuati confronti tra vari profili aerodinamici e diverse configurazioni della *main wing*, determinando le geometrie, le configurazioni aerodinamiche ottimali e le dimensioni della fusoliera in relazione al carico (sensori e alimentazione). I profili alari identificati hanno mostrato un'eccellente efficienza alle altitudini interessate. La progettazione è stata quindi eseguita tramite software CAD/CAM 3D (Figura 15). Le parti strutturali sono state realizzate in materiali compositi: fibre di carbonio, kevlar e vetro, sottoposti a trattamento termico per ottimizzarne le caratteristiche meccaniche. Ali, superfici di controllo e fusoliera sono realizzati in sandwich di fibra/schiuma/fibra, mentre nei longheroni, nelle nervature e nei telai il *core* in schiuma è sostituito con il legno. Le ali sono rivestite con una pellicola in materiale resistente all'abrasione per ridurre al minimo i danni causati da micropolveri prismatiche taglienti e attrito idrodinamico.

E’ stato quindi caratterizzato il sistema di propulsione, realizzato in materiale resistente all'abrasione, i carrelli di atterraggio, i telai, l'elettronica di bordo, il pilotaggio ed il telecomando, i sistemi di tracciabilità, sicurezza, trasmissione dati, compresa la *ground station* per la telemetria e la comunicazione dei comandi di volo e gestione della pianificazione del volo. Il sistema è stato dotato di sistemi e stroboscopi ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance - Broadcast*).

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 15. Overview e componenti dell'UAV progettato



3.1 Sistema di alimentazione

Il sistema di alimentazione elettrica si basa su due tecnologie integrate, fuel cell e batterie, rispettivamente per la fase di crociera e di decollo: poiché i consumi sono molto maggiori al decollo e ai picchi, è infatti preferibile utilizzare una batteria *LiPo* ad alta potenza per i brevi tempi di decollo (meno di 1 min.) e di picco (2 min.). Inoltre, poiché la fuel cell eroga potenza con tempo di risposta di decine di secondi, la batteria è necessaria anche per l'avviamento; a sua volta essa verrà caricata dalla stessa fuel cell. Le celle a combustibile utilizzano idrogeno e necessitano di ossigeno o aria. L'uso dell'ossigeno puro accresce la densità di potenza e l'efficienza, che aumenta del 20% [20], ma ossida le parti metalliche, per cui è da preferirsi l'aria, eventualmente miscelata con ossigeno in percentuale massima del 30%. Alle quote considerate l'aria è molto rarefatta, ma la cella selezionata è in grado di funzionare senza ossigeno aggiuntivo, compensando la perdita di efficienza dovuta alla mancanza di ossigeno con il sovradimensionamento della potenza. La Tabella 1 mostra le caratteristiche tecniche del fuel cell package (fuel cell, regolatore di idrogeno e serbatoio), mostrato in Figura 16. La cella ha un fattore di forma adeguato, peso ridotto e integrabilità per la telemetria e il controllo remoto; un convertitore CC/CA adatta la tensione al carico. La Figura 17 mostra l'andamento della potenza del sistema di alimentazione (cella a combustibile + batteria) e la riduzione della potenza delle celle sopra i 3.000 m. Per ottenere la potenza di progetto di 1.600 W sono state utilizzate due celle a combustibile da 800 W collegate tramite un *power path module*, raffreddate ad aria. Il loro consumo è dato da:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

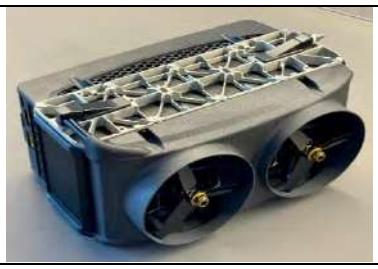
$$\text{consumo della FC} = \frac{\text{potenza (W)}}{\text{contenuto energetico dell'idrogeno}\left(\frac{\text{Wh}}{\text{g}}\right)\text{x efficienza}} = \frac{1600\ W}{33{,}3\ \frac{\text{Wh}}{\text{g}}\text{x } 0{,}56} = 85{,}8\frac{\text{g}}{\text{h}}$$

dove il contenuto energetico dell'idrogeno è 33,3 Wh/g e l'efficienza della cella a combustibile 0,56.

Tabella 1. Caratteristiche tecniche del fuel cell package

Massima potenza continua		800 W
Massima potenza di picco		1400 W
Voltaggio in uscita		19.6 V – 25.2 V
Fuel cell	Dimensioni	196 x 100 x 140 mm
	Massa	930 g
Regolatore di idrogeno	Peso	250 g
	Pressione massima del regolatore	350 bar
	Pressione in uscita	0.5 – 0.25 bar
	Peso della bombola	10 kg
Batteria ibrida	Dimensioni	125 x 30 x 40 mm
	Massa	300 g
	Capacità	1800 mAh
	Tempo di volo di emergenza	2 minuti
Condizioni operative ambientali	Temperatura operativa	5°C-35°C
	Altezza massima	3,000 m
	Temperatura di stoccaggio	-10°C-70°C
	Tempo di vita del sistema in assenza di decadimento	1000 ore
Trasmissione dati	Immagazzinamento dati	SD Card
	Porta di comunicazione alla fuel cell	UART
	Connettore elettrico in uscita	XT-60

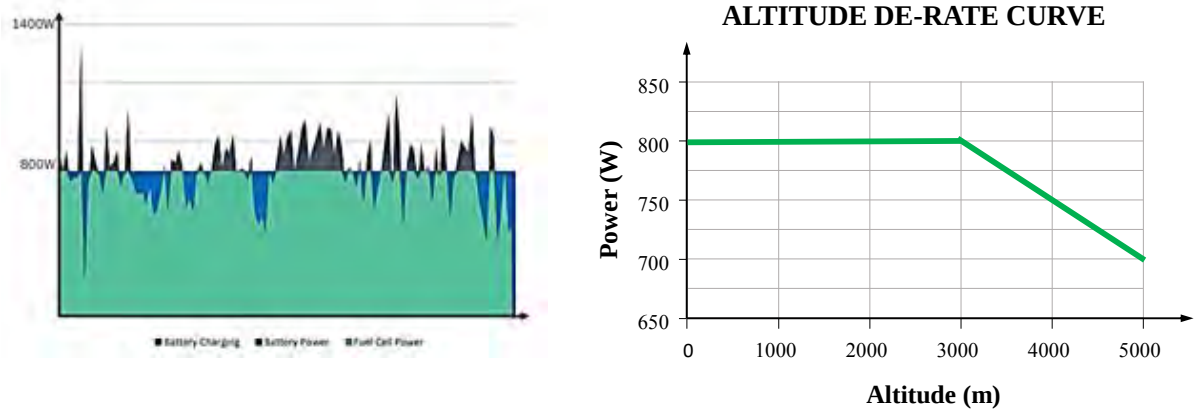
Figura 16. Fuel cell package (fuel cell, regolatore di idrogeno e serbatoio).





ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figura 17. Andamento della potenza del sistema di alimentazione (fuel cell + batteria) e riduzione della potenza della fuel cell con l'altezza



Il serbatoio dell'idrogeno da 9 l consente un'elevata autonomia, 6-12 h in base alla quota: maggiore in basso, con notevole decremento con l'altezza. Alle quote interessate la temperatura è estremamente bassa (ogni 100 m di aumento di quota si riduce di 1°C) e poiché le fuel cell operano in un range di temperatura > 0°C per la presenza di membrane umide e dell'acqua prodotta nella reazione chimica, vanno termicamente isolate per mantenere il calore generato. Inoltre, essendo la fibra di carbonio molto elettrostatica e potendo reagire con l'idrogeno, sia i serbatoi che le celle a combustibile sono isolati elettrostaticamente attraverso una gabbia di Faraday di materiale conduttivo (Cu, Al).

3.2 Accumulo dell'idrogeno

È stato effettuato un confronto tra stoccaggio solido e gassoso (idruri metallici e idrogeno compresso) in termini di peso, densità energetica e costo. L'idruro metallico è un composto solido che si forma quando l'idrogeno sotto pressione (25-100 bar) si diffonde occupando lo spazio interionico nel reticolo cristallino di un metallo alcalino (Na o Li) o alcalino terroso (Ca). Sono stati analizzati in particolare sistemi a base di idruri di sodio (NaH), sfruttando la loro reazione con l'acqua, che è fortemente esotermica e procede rapidamente: per controllarla, l'idrogeno viene immagazzinato sotto forma di pellet, incapsulato in contenitori di plastica tagliati a fettine sottili che, una volta immerse in acqua, reagiscono liberando idrogeno e idrossido metallico (NaOH) come sottoprodotto, che può essere riciclato riformando l'idrogeno. L'intervallo di temperatura di esercizio è -40°C - +60°C. Le densità di energia sono maggiori di quelle ottenibili con l'idrogeno compresso e paragonabili a quelle riferite a quello liquido. Ulteriori vantaggi sono il costo, l'ingombro ridotto, la stabilità e la sicurezza grazie alle basse pressioni, nonché il peso ridotto [21]. Tuttavia, a causa delle criticità del processo (lo smaltimento del calore e delle cartucce tramite metano, non realizzabili in sito) si è optato per lo stoccaggio gassoso.

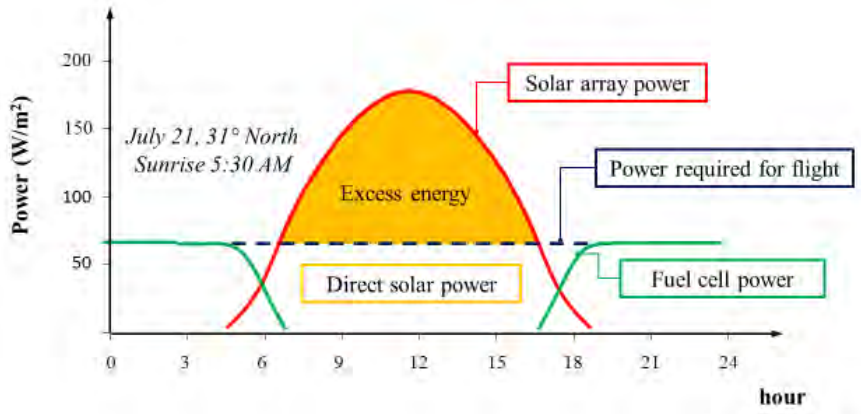
ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

3.3 Alimentazione ibrida fuel cell-fotovoltaico

Per aumentare l'autonomia un UAV deve avere un peso contenuto: in particolare il suo componente più pesante, la batteria, incide drasticamente sul tempo di volo. Per velivoli di piccole dimensioni, dove lo spazio è il fattore chiave, è interessante adottare un sistema ibrido fuel cell/fotovoltaico: i pannelli fotovoltaici offrono infatti un favorevole rapporto potenza/superficie (350 W/m2) [22], consentendo tempi di volo 8 -10 volte maggiori rispetto alle batterie [23]. Integrandoli nelle ali il peso dell'UAV aumenterebbe solo dell'1-2% e lo spessore di 1-2 mm: in tal modo durante il giorno, in pieno sole, i pannelli produrrebbero energia per garantire il volo o l'alimentazione degli accessori e la carica della batteria [24-27] (Figura 18). Le celle Tandem a doppia giunzione [28] in film sottile in Arsenuro di Gallio (Ga-As) [29] sfruttano al meglio lo spettro di assorbimento della luce e offrono efficienze elevate (32%). Esse hanno una massa di soli 240 g/m2, sono integrabili in fibra di carbonio o di vetro e si prestano ad un rivestimento trasparente, garantendo la protezione dagli eventi atmosferici. Un'ulteriore possibilità sarebbe l'alimentazione solare di un elettrolizzatore, per fornire idrogeno alle fuel cells, cosicchè l'UAV funzionerebbe indefinitamente.

Lo sfruttamento dei sistemi fotovoltaici sarà considerato come sviluppo futuro del progetto.

Figura 18. Fonti delle aliquote di potenza



4. Il modello in scala

Preliminarmente alla costruzione del prototipo dell'UAV è stato realizzato un modello in scala, con apertura alare di 299 cm (70% del prototipo reale) per effettuare prove di configurazione e test finalizzati a verificare le soluzioni progettuali aerodinamiche fornite dalle simulazioni (Figura 19). Il modello ha consentito di apportare variazioni funzionali e di identificare e correggere errori di squilibrio/deviazione delle ali.

Fatta eccezione per la fuel cell, che viene sostituita da una batteria agli ioni di litio, il modello è dotato della stessa elettronica e avionica del modello reale e integra un sistema *open source* per la gestione del volo. Il sistema di telemetria raggiunge una distanza di 40 km in linea retta. L'UAV può svolgere missioni in completa autonomia in tutte le fasi (decollo, volo, atterraggio) ed è dotato di un sistema di atterraggio con paracadute, è completamente smontabile e trasportabile. Sono state condotte prove di abrasione sulle ali poiché la simulazione ha mostrato che l'ala vuota, colpita dalle microparticelle del pennacchio vulcanico, risuonava a frequenze molto basse (800 Hz) e le vibrazioni

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

generate potevano causare una crisi nel computer che controlla la posizione. Per evitare ciò, le ali sono state riempite con materiale che assorbe le vibrazioni, in modo che la parte centrale del velivolo, contenente sia il centro di controllo delle comunicazioni che i sensori di misurazione, rimanga sospesa e isolata dalle vibrazioni.

Sono stati eseguiti quindi test statici e di qualità del telaio; a tal fine è stata realizzata una prima versione del modello, con apertura alare di 286 cm (65% del prototipo finale), materiali e tecniche costruttive aeromodellistiche. Le prove al banco hanno verificato la funzionalità e l'efficienza di tutti i sistemi (eliche, motore, ruota anteriore, carico statico, collegamento a terra). Sono seguite 6 prove di configurazione dinamica, eseguite con diverse impostazioni di decollo (centro di gravità, peso, assetto dell'elevatore, flap, modalità di volo) e condizioni meteorologiche (copertura, base nuvolosa, visibilità, vento), anche in assenza di segnale o generazione di un evento failsafe. Sono state testate la stabilità, la messa a punto del pilota automatico, l'impostazione del controller di volo, forzando anche condizioni di volo critiche ed eseguendo missioni di volo automatiche. Lo spazio necessario per il decollo/atterraggio è di 20 m. Il prototipo è decollato ed è atterrato senza complicazioni. Altri 2 voli di prova sono stati effettuati su una versione finale del modello, con apertura alare di 299 cm (70% del modello a scala reale), diversa dal primo per tecniche costruttive e materiali di pregio utilizzati, confermando i risultati.

Figura 19. Componenti e prototipo del modello in scala



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

5. Il modello in scala reale

Per realizzare il modello in scala reale il progetto è stato adattato in conseguenza dei risultati ottenuti dalle prove sul modello in scala. La Tabella 2 ne mostra le caratteristiche: avendo dimensioni > 3 m esso appartiene alla classe certificata. E' dotato di sensori di gas e particelle, rispettivamente un analizzatore di gas con presa d'aria a flusso costante per misure di SO_2 e un contatore di particelle con sensore ottico. Sull'UAV saranno condotte prove statiche e di carico al banco mentre il collaudo dinamico ad alta quota (3.000-6.000 m), con pilotaggio in modalità BVLOS (oltre la visuale del pilota), sarà effettuato anche mediante la forzatura di condizioni di volo critiche e l'esecuzione di missioni di volo automatiche, verificando il funzionamento in condizioni atmosferiche non ottimali. Lo spazio necessario per il decollo e l'atterraggio è di 70 m. La telemetria raggiunge i 200 km in linea retta.

Tabella 2. Caratteristiche di progetto dell'UAV

Quota di volo	Massima quota di tangenza		6,000 m
Caratteristiche geometriche	Apertura alare Lunghezza Sezione massima Corda massima		4,400 mm 2,400 mm 1,450 mm 500 mm
Peso	Massimo al decollo		15 kg
Payload	Minimo		2 kg
Materiali			compositi (fibra di carbonio, kevlar e vetro)
Propulsione	Motore		brushless con elica a passo variabile
Sistema di alimentazione	ibrida		batterie Li-Po (al decollo) fuel cell a idrogeno (in crociera)
	potenza	fuel cell batteria (picco)	1,600 W 1,650 W
	Fase di crociera Salita Decollo		375 W 750 W 1,500 W
Serbatoio	Idrogeno ad alta pressione		9 l
Velocità	Di crociera	A livello del mare A quota operativa	61 km/h 93 km/h
	Al decollo in stallo In salita		50 km/h 43 km/h 18 m/s
Tempo	Decollo Di salita a quota operativa		30 s – 1 min 20 min
Autonomia	A quota operativa		fino a 12 h

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

6. Conclusioni

Come esempi di sfruttamento della tecnologia dell'idrogeno, nel lavoro vengono descritti due casi studio, riferiti rispettivamente ad un'applicazione stazionaria e ad una mobile. Il primo è costituito da un impianto fotovoltaico in cui l'accumulo è realizzato utilizzando idrogeno elettrolitico, successivamente convertito in energia elettrica in celle a combustibile, il secondo è un prototipo di UAV alimentato da celle a combustibile a idrogeno per volo in alta quota, da pilotare in modalità BVLOS (*Beyond pilot's visual line of Sight*). Del primo sistema vengono descritti il principio di funzionamento ed i componenti, fornendo dati tecnici ed una simulazione del processo di produzione e riconversione di idrogeno , oltre ad una stima degli indicatori economici. L'analisi evidenzia come questo tipo di impianti risulti ancora difficilmente proponibile sul mercato a causa degli elevati costi di investimento, che dovrebbero ridursi a poco meno della metà (€ 30.000) del valore attuale, degli ingombri e della ridotta efficienza; la convenienza economica può tuttavia aumentare sfruttando l'energia termica prodotta nell'elettrolisi.

Il secondo sistema è un velivolo innovativo dotato di sensori per il rilevamento di gas e ceneri vulcaniche, che sarà utilizzato per effettuare misurazioni delle sostanze emesse dal vulcano Etna. Tali misure sono necessarie per la validazione su scala regionale di un modello previsionale della qualità dell'aria, di dispersione e trasporto di inquinanti atmosferici. Il modello è volto a migliorare la qualità delle previsioni, incrementando la sicurezza del volo, la funzionalità e l'operatività aeroportuale ed a fungere da strumento di supporto all'adozione di misure per la chiusura temporanea dello scalo. Una volta validato, sarà sottoposto all'*Ente Nazionale per l'Aviazione Civile* (*ENAC*) per ottenere la certificazione aeronautica e l'eventuale introduzione nella procedura internazionale.

L'UAV progettato potrebbe comunque essere utilizzato in un ambito più ampio, che comprende l'osservazione, il controllo e la gestione del territorio (prevenzione delle calamità naturali), rivolgendosi ai mercati dei settori dell'aeronautica, dei trasporti, del primo soccorso, ecc.

Bibliografia

[1] Sunita Sharmaa S., Krishna G. - Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 43, pp. 1151-1158, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.093

[2] Moreno-Benito M., Agnolucci P., Papageorgiou L.G. - Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development. *Computers and chemical engineering*, Vol. 102, pp. 110-127, 2017. DOI: 0.1016/j.compchemeng.2016.08.005

[3] Sinigaglia T., Lewiski F., Martins M.E.S., Siluk J.C.M. - Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. *International Journal of Hydrogen Energy,* Vol.42, Issue 39, pp. 24597-24611, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.08.063

[4] Arsalis A., Alexandrou A. N., Georghiou G. E. - Thermoeconomic modelling of a completely

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

autonomous, zero-emission photovoltaic system with hydrogen storage for residential applications. *Renewable Energy*, Vol. 126, pp. 354-369, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.060

[5] Presidenza del Consiglio dei Ministri, Piano Nazionale di ripresa e resilienza, 5 maggio 2021, https://www.governo.it/it/articolo/piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza/16782

[6] Grell, G.A., Peckahm, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B. 2005 Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, pp. 6957–6975, doi: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027.

[7] Sujit P.B., Saripalli S., Sousa J.B. 2014 Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles, *IEEE Control Systems*, vol. 34, Issue 1, pp. 42-59, doi: 10.1109/MCS.2013.2287568.

[8] Bang S., Kim H., Kim H., 2017 UAV-based automatic generation of high-resolution panorama at a construction site with a focus on preprocessing for image stitching, *Automation in construction*. vol. 84 pp. 70-80 doi: 10.1016/j.autcon.2017.08.031

[9] González-Espasandín O., Leo T.J., Navarro-Arévalo E., Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion, vol. 2014 |Article ID 497642 doi: 10.1155/2014/497642

[10] Lapeña-Rey N., Blanco J.A., Ferreyra E., Lemus J.L., Pereira S., Serrot S. 2017 A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions, S., *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42 n.10, pp. 6926-6940, 10.1016/j.ijhydene.2017.01.137

[11] Lei T., 2021 Energy management system and strategy for a fuel cell/battery hybrid power, in: *Unmanned Aerial Systems: theoretical foundations and application*, pp. 289-313 Academic Press.

[12] Momirlana M. and Veziroglu T.N. 2005 The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30 Issue 7 pp.795-802 doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.10.011

[13] Marchenko O.V. Solomin S.V., 2015 The future energy: Hydrogen versus electricity *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 40 IsSUE 10 pp 3801-3805 doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.01.132

[14] Ball M.,Weeda M., 2015 The hydrogen economy – Vision or reality?, *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 4, Issue 25 pp. 7903-7919 doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.032

[15] Dincer I., Rosen M.A. 2011Sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems, *Energy for sustainable development*, vol. 15, Issue 2, pp. 137-146 doi: 10.1016/j.esd.2011.03.006

[16] Hoffmann P. 2001 Tomorrow's Energy: Hydrogen, Fuel Cells and the Prospects for a Cleaner Planet. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press doi: 10.1017/S1466046602251261

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[17] Marino C., Nucara A., Pietrafesa M. 2015 Electrolytic hydrogen production from renewable source, storage and reconversion in fuel cells: the system of the Mediterranea University of Reggio Calabria, *Energy Procedia*. Vol. 78, pp. 818-823. Elsevier Science ISSN: 1876-6102. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.001

[18] Mori D., Hirose K. 2009 Recent challenges of hydrogen storage technologies for fuel cell vehicles, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34 issue 10 pp. 4569-4574, Elsevier doi:10.1016/j.ijhydene.2008.07.115

[19] Carbone R., Marino C., Nucara A., Pietrafesa M., Varano V., 2019 Electric Load Influence on Performances of a Composite Plant for Hydrogen Production from RES and its Conversion in Electricity, *Sustainability*, Vol. 11, Issue 22, MDPI Publishing. doi: 10.3390/su11226362

[20] Büchi F.N., Freunberger S.A., Reum M., Delfino A.,2005 On the efficiency of H2/O2 automotive pem fuel cell systems *Proceedings of 3rd European PEFC* For. File B091 www.researchgate.net/publication/239552634

[21] Ouyang L.Z., Qin F.X., Zhu M. 2004 The hydrogen storage behavior of Mg3La and Mg3LaNi0.1, *Scripta Materialia*, Vol. 55, issue 12, 1055-1078, Elsevier doi: 10.1016/j.scriptamat.2006.0

[22] Sharma S., Jain K. and Sharma A., 2015 Solar Cells In Research and Applications. A Review, *Materials Sciences and Applications,* vol. 6 n. 12 pp. 1145-1155 doi: 10.4236/msa.2015.612113.

[23] Gadalla M., Zafar S. 2016 Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 41 Issue 15 pp. 6422-6432 doi:10.1016/j.ijhydene.2016.02.129.

[24] Townsend, A., Jiya, I. N., Martinson, C., Bessarabov, D., & Gouws, R., A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements, *Heliyon*, vol. 6, issue 11, 2020, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05285

[25] Chu Y., Ho C., Lee Y., Li B. 2021 Development of a Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle for Extended Flight Endurance, *Drones* Vol. 5, n. 44 doi: 10.3390/drones5020044

[26] Nazek El-Atab N., Rishabh B., Alshanbari M.R., Hussain M.M. 2021 Solar Powered Small Unmanned Aerial Vehicles: A Review, *Energy technology* doi: 10.1002/ente.202100587

[27] Rajendran P., Smith H. 2018 Development of Design Methodology for a Small Solar-Powered Unmanned Aerial Vehicle, *Int. Jour. of Aer. Eng*., Article ID 2820717 doi: 10.1155/2018/2820717

[28] Liu N,. Wang L., Xu F., Wu J., Song T. and Chen Q. 2020 Recent Progress in Developing Monolithic Perovskite/Si Tandem Solar Cells, *Frontiers in Chemistry*, 8:60337 doi:

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

10.3389/fchem.2020.603375

[29] Ma C., Park N.G. 2020 A Realistic Methodology for 30% Efficient Perovskite Solar Cells, *Chem*, Vol. 6 Issue 6 pp. 1254-1264, ISSN 2451-9294 doi: 10.1016/j.chempr.2020.04.013.

Ringraziamenti

Il lavoro è stato finanziato nell'ambito del Progetto "Uso di tecnologie, materiali e modelli innovativi in aeronautica (AEROMAT)", Programma Operativo Nazionale Ricerca e Sviluppo 2014-2020.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Perugia, 7/8 aprile 2022, Università degli Studi di Perugia

XXII Congresso Nazionale CIRIAF

Sviluppo Sostenibile, Tutela dell'Ambiente e della Salute Umana

i-REXFO LIFE: an innovative business model to reduce food waste

P. Bartocci, G. Bidini, S. Massoli, M. Zampilli, K. Slopiecka, S. Garlatti, G. Buia, F. Fantozzi

Biomass Research Centre, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italy
Department of Industrial Engineering, University of Perugia, Via G. Duranti 67, 06125 Perugia, Italy

* Francesco Fantozzi. E-Mail: Francesco.fantozzi@unipg.it

Abstract: Every year the food produced and wasted consumes a volume of water equal to 250 km3, requires around 30% of the world agricultural land, and it is responsible for the emission of 3,3 billion tons of greenhouse gases. The direct economic consequences of food waste are ranging around 750 billion dollars per year (FAO source). i-REXFO designed and demontrated an innovative business model to reduce significantly the amount of landfilled food waste. The actions are economically sustained by public incentives, tax reductions and private revenues from energy valorization of residual food waste. Uptaking the good practices from other EU countries (Denmark) the project developed a tool to design the integrated model, optimize it from a technical, economic and environmental point of view and transfer it to other EU regions. i-REXFO increased consumer awareness on food waste reduction in retail malls and HORECA while facilitating the sale and donation to charities and food banks of close to expiration and aesthetically not adequate food; it also prompted out the barriers that hamper the use of food residues in biogas plants. The actions are economically sustained from energy valorisation of food waste in biogas plant that use the digestate as fertilizer, closing the cycle. i-REXFO achieved an overall reduction of 9.900 tons/year of food waste landfilled during the project duration corresponding to an overall reduction of 13.900 tons of CO2 equivalent emissions while producing 3.400 MWh of renewable energy and 6.000 MWh energy savings.

Keywords: European project; expired food; biogas

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

1. Introduction

1.1. Food waste: causes and impact

According to a FAO survey, around one third of the food produced for human consumption, roughly 1,3 billions tons [1], of which 80% still consumable, is lost or wasted. Every year the food produced and wasted consumes a volume of water equal to 250 km^3, requires 1,4 billion ha of land, around 30% of the world agricultural land, and it is responsible for the emission of 3,3 billion tons of greenhouse gases [2]. If food waste were a country it would be the third emitting one.

While in developing countries over 40% of losses occur during the harvest or processing phase, food waste in industrialized countries is caused by a combination of supply chains inefficiencies and consumer behaviour [3]. The supply and distribution chains are not always able to provide excess food at low cost to consumers or for donation while reading correctly the expiration label may be difficult for consumers resulting on edible food that goes to waste.

Moreover, consumers are responsible of poor management of leftovers and poor planning of shopping, buying more groceries than they can consume, often ignoring not aesthetically sound fruits and vegetables that remain unsold at the counter or even go to waste at the farm [3].

In the Hotel Restaurant Catering (Ho.Re.Ca) food waste is caused by the offering of ever larger portions while doggy bags for leftovers or last minute meals at the end of day are still options that are not adequately considered [4].

Minimizing excess food production and making it available for human consumption before its expiration date is the first action to reduce food waste[4]. This requires incentives to increase donation to charities and pre-expiration sales and also to raise consumer awareness on how to reduce food waste.

1.2. i-REXFO business model

Energy from organic waste through biogas production [5][6] and use of the resulting digestate as a fertilizer [7], yields great environmental benefits, in terms of CO_2 and water avoided emission and consumption respectively. It also generates cash that can cover partially or totally the cost for incentives for donations and consumer awareness.

This is the basic concept of the i-REXFO business model in the circular economy that we demonstrated in Italy, precisely in Umbria Region.

i-REXFO reduces significantly the amount of food waste landfilled through an innovative approach that sustains actions to reduce food waste by promoting energy production from organic residues.

Focus is on food waste produced by farms and food industries, by retailers and Ho.Re.Ca and by consumers.

i-REXFO business model promotes biogas production from food waste in substitution of energy crops, resulting in an environmental benefit deriving from the reduction in the use of fertilizers, irrigation, etc. and from the avoided landfilling of the organic waste.

Moreover, the lower cost of the fuel contributes to the economic sustainability of the i-REXFO

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

business model together with the carbon credits that partners can claim for the environmental benefits produced.

These revenues cover the additional costs for food waste transportation and selection and provide finances for waste reduction actions:

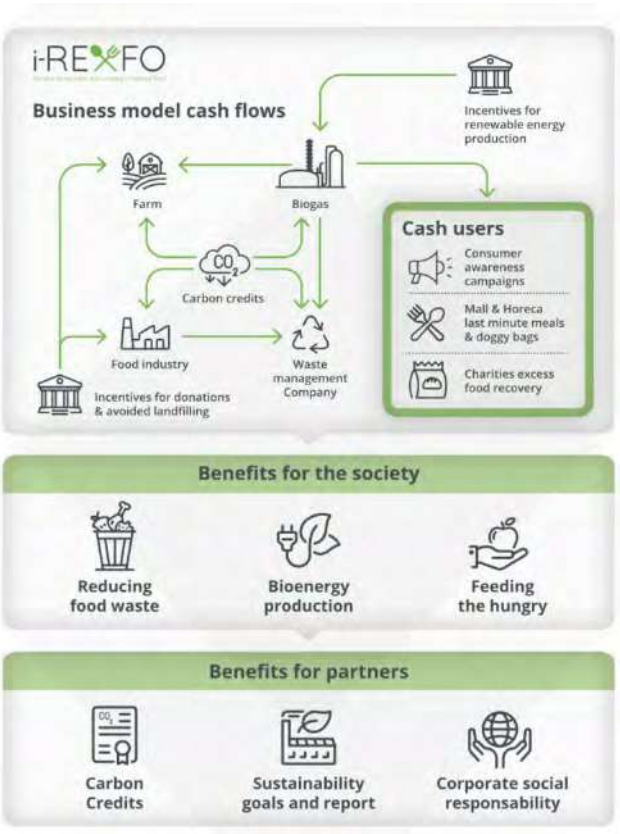
- to charities in their recovery and donation of excess food
- to Ho.Re.Ca for the acquisition and distribution of doggy bags and the promotion of last minute meals
- to retailers for the design of low cost areas for pre-expiration sales
- to consumer oriented awareness raising campaigns on food waste reduction

Benefits for the community are evident namely in: providing food to people in need, in reducing food waste and the related environmental impact, carbon footprint and energy-water consumption.

Benefits for partners are also evident namely in the increased cash flow, thanks to claimable carbon credits, and in an increase in the company social and environmental sustainability business performance, that can be disclosed in the corporate sustainability reporting ,according to the 2014 | 95 | EU Non-Financial Reporting Directive (NFRD).

i-REXFO business model is in line with the classification of sustainable activities foreseen in the Regulation (EU) 2020 | 852 on Taxonomy that establishes a framework to facilitate sustainable investments.

Figure 1. i-REXFO business model cash flows.



ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

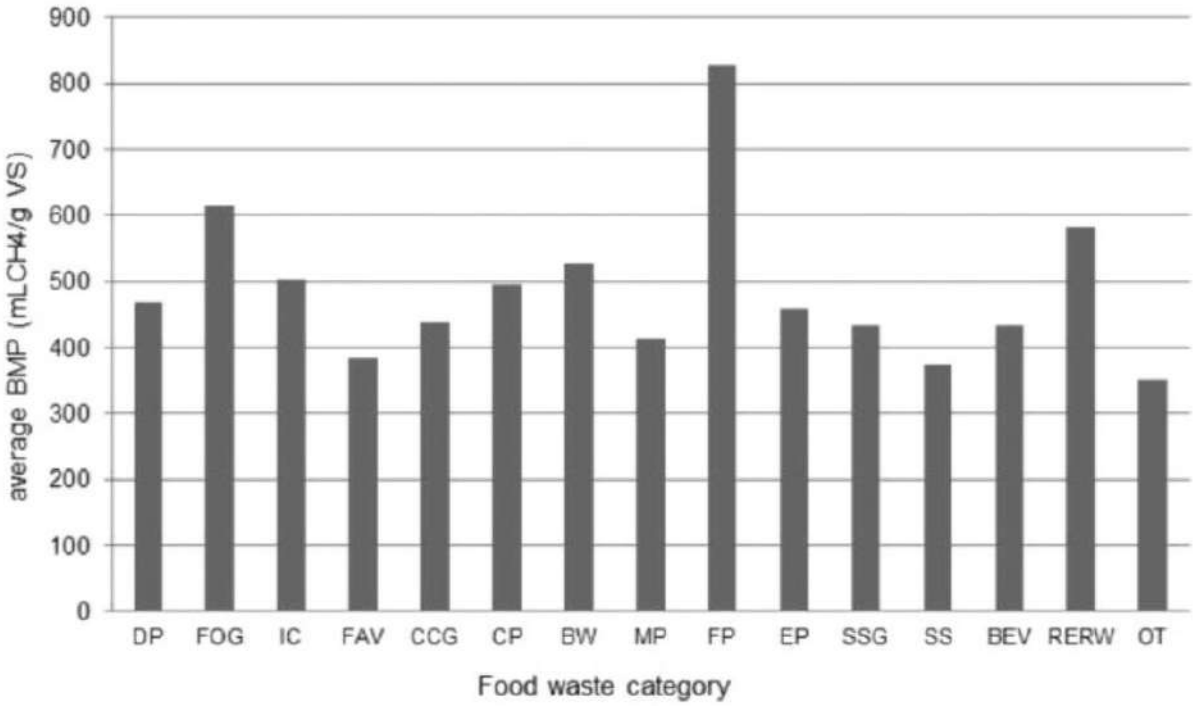
2. Materials and methods

2.1. Design tool

Starting from September 2017, i-REXFO designed and built the solidarity and sustainable business model with a software especially developed and available for free in open source format on the project website (www.irexfo.eu)[8]. The user identifies the batches of food waste available on EU territory, and the software evaluates the distance from the biogas plant and the methane production potential, thanks to a database created by SESLAB (Sustainable Energy Systems LABoratory) at the Department of Engineering of the University of Perugia, Italy [9].

To obtain this result, SESLAB has analysed 100 types of food waste to determine their chemical-physical characteristics and above all the Bio-Methanation Potential (BMP), in bespoken mini reactors especially designed. The database itself is an important contribution to the state of the art and was therefore published in Golden Open Access format [9].

Figure 2. BMP range in each food category: DP (dairy product), FOG (fats, oil and grease), IC (ice cream), FAV (fruit and vegetable), CCG (confectionary), CP (cereals product), BW (bakery wares), MP (meat products), FP (fish products), EP (egg products), SSG (sweeteners and sweet good), SS (spices, soups), BEV (beverages), RERW (ready to eat food or restaurant waste), OT (other).



Through an optimization algorithm the software selects the quantities and location of waste food to maximize the economic profit and the avoided emissions of CO2, also considering transportation [6]. The resulting economic benefits are then shared among partners and for the activities related to minimization of food waste in retail and Ho.Re.Ca, consumer awareness campaigns and for the recovery and donation of surplus to charities.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 3. Details of the software available on www.irexfo.eu.



The software can be used in any EU country and has been used to design similar supply chains in Puglia and Piemonte in Italy and Észak Alföld Közép Dunántúl in Hungary, thanks to the Food Bank of Budapest and the biogas company Biogaz, both strategic project partners.

2.2. Partners

In the last 18 months of the project i-REXFO has demonstrated in Umbria the economic and environmental feasibility of the solidarity and sustainable supply chain. The marketing partner company A+ created and distributed to the Ho.Re.Ca of the provinces of Perugia and Terni, 100,000 design containers for the recovery of leftovers (doggy bags) and information material with practical advice for sustainable shopping, leftovers management and for reading correctly the expiration labels.

Also 4 showcases for pre-expiration food sales were equipped with video installations in large supermarkets in Umbria (Coop, Conad and Emi), to provide useful information on how to reduce food waste and the environmental consequences.

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

Figure 4. doggy bags, depliants, showcases and plexiglass containers developed by A+.



CARITAS charities in Perugia and Terni took care of the recovery of food surplus which was eventually distributed in the canteens and solidarity emporiums they manage. Surplus food was recovered mainly from food industries and supermarkets but also through the installation of plexiglass containers for the recovery of household packaged surplus food in schools and parishes during awareness raising activities. In the demonstration phase, these activities were financed by the resources made available by the partners of the energy supply chain.

Ecopartner srl collects waste from the food industry, separates the recoverable raw materials (paper, glass, iron) and treats organic matter to produce a fuel for biogas plants.

Iraci Borgia farm transforms agricultural crops and organic residues into biogas and fertilizer used in his own fields in a circular economy approach [10].

Figure 5. Iraci Borgia biogas plant.



The possibility of using the fuel produced by Ecopartner was approved by Umbria Region, project partner also for the redaction of administrative guidelines, as an experimental protocol (DGR 164 / 21) however, the use of the resulting digestate as a fertilizer was carried out in another biogas plant

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

property of Rapolano Green Energy srl in nearby Tuscany.

3. Results

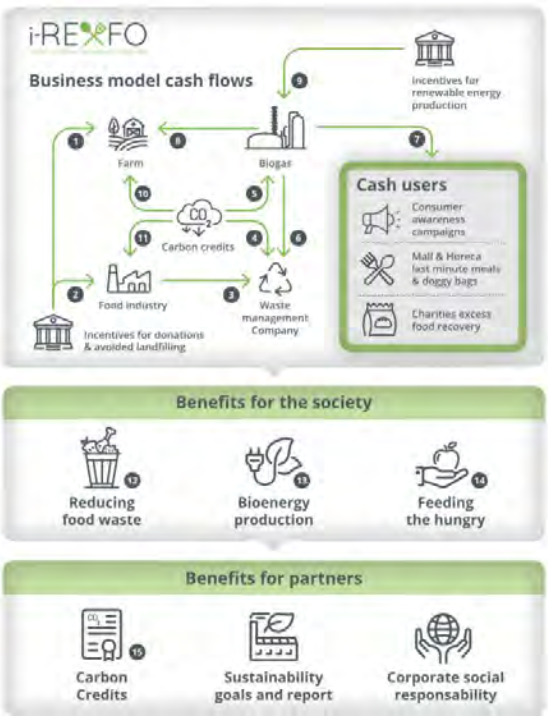
3.1. Impact transferability in different scenarios

The i-REXFO software tool was used to design different scenarios in geographical areas characterized by different sensitivity towards food waste, different legislation regarding the use of food waste in biogas plants and of digestate on fields and different incentives for renewable energy production. Different cash flows resulted from varying bio-methanation potential of residues also considering possible oscillation in carbon credits market value.

i-REXFO demonstrated that in the best case scenario, in which food waste with high bio-methanation potential is recovered (e.g. oil & fats, chocolate, cereals, etc.) and carbon credits are valued at 96 €/ton (February 2022 value), the business model is self-sustaining without the need for additional incentives besides those available for renewable energy production.

In the worst-case scenario, in which food waste with low bio-methanation potential is recovered (e.g. fruit & vegetables, juices, beverages, etc.) and carbon credits are valued at 20 €/ton (May 2020 value), the business model requires support in the form of an additional public incentive provided to food waste suppliers as a reward for sustainable disposal.

Figure 6. different scenarios obtained at varying carbon credits market value and BMP.



	Carbon credits @ 96 €/ton		Carbon credits @ 20 €/ton	
	High CH4 yield Food Waste	Low CH4 yield Food Waste	High CH4 yield Food Waste	Low CH4 yield Food Waste
1	€ 0	€ 0	€ 0	€ 16.940
2	€ 0	€ 0	€ 45.614	€ 0
3	€ 112.500	€ 0	€ 112.500	€ 0
4	€ 0	€ 0	€ 0	€ 0
5	€ 140.346	€ 97.931	€ 29.239	€ 20.402
6	€ 198.563	€ 0	€ 198.563	€ 0
7	€ 191.396	€ 148.442	€ 29.239	€ 20.402
8	€ 0	€ 53.438	€ 0	€ 53.438
9	€ 315.053	€ 84.788	€ 315.053	€ 84.788
10	€ 0	€ 20.000	€ 0	€ 20.000
11	€ 50.000	€ 0	€ 50.000	€ 0
12	2921 tons	2794 tons	2588 tons	2561 tons
13	1575 MWh	424 MWh	1575 MWh	424 MWh
14	421 tons	294 tons	88 tons	61 tons
15	2515 t CO_2eq	1755 t CO_2eq	1681 t CO_2eq	1173 t CO_2eq

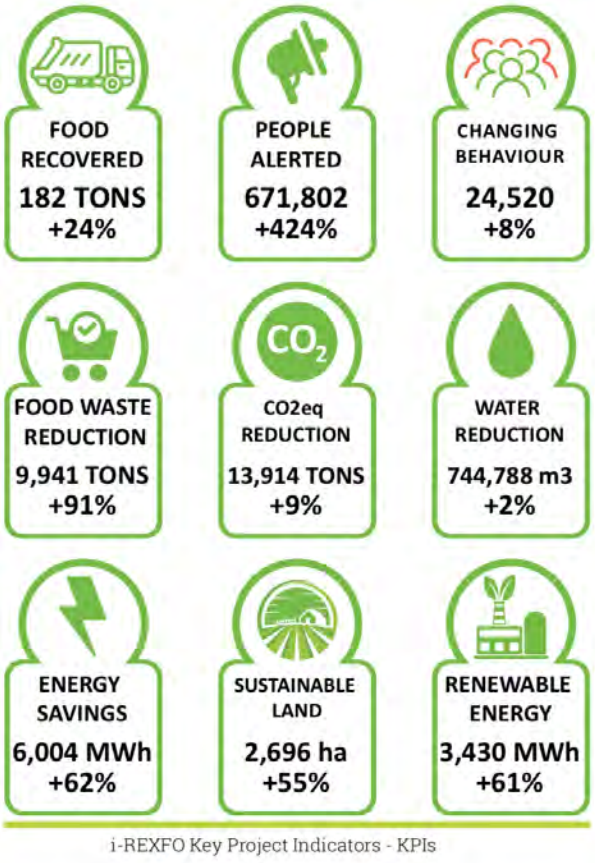
3.2. *Key Performance Indicators of the project*

i-REXFO has demonstrated in Umbria the possibility of avoiding the landfilling of over 2500

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

tons/year of food waste that instead contributed to the production of over 2200 MWh/year of renewable energy and the donation of over 120 tons/year for surpluses. The integrated system has avoided the production of over 9200 tons/year of CO_2 equivalent and the consumption of over 496,000 m^3 of water, i-REXFO KPI were measured also considering a 5% engagement of people alerted.

Figure 7. i-REXFO Key Performance Indicators (KPI) and EU recommendations for policy measures.



BARRIERS TO iREXFO APPLICATION	EU RECOMMENDATION FOR POLICY MEASURES	SPECIFIC DG RECIPIENT
Multiple operators are needed	Establishment of legal COnsortia of operators of circular business models to Reduce Food Waste (CORFOWA).	JUST
Subsidies to food waste fuelled biogas plants	Encourage EU incentives for renewable energy/fuel production from food waste prioritizing biogas plants in CORFOWAs.	ENER-ENV
Facilitate reuse of digestate in fields	- Encourage member states to roll out EoW criteria (2008/98/EC) for food waste derived biogas fuels. - Promote the direct use of digestate (no composting) as a fertilizer and the uptake of Regulation (EU) 2019/1009. - Allow reduced authorization procedures for CORFOWAs.	ENV-SANTE
Promote recognition of carbon credits for all operators	- Facilitate and promote the access to the ETS market (Directive 2003/87/EC) to voluntary and third parties Verified Emission Reduction (VER). - Consider CORFOWA a sustainable activity according to Taxonomy Regulation (EU) 2020/852 and include as a listed activity in a specific delegated act. - Extend PEF procedures and PEFCR methodologies to biogas, surplus food donation and food waste prevention measures and awareness campaigns.	ENV CLIMA

i-REXFO EU Recommendations

3.3. *Social community*

The i-REXFO community comprises also Danish partners Primetime communication company and Ragnsells waste management company, responsible for good practices and EU networking, and NOESIS for financial managing.

During the course of the project, partners shared experiences, organized and participated in events and conferences, produced and distributed informative and consumer awareness material presenting the i-REXFO model to the civil and scientific community with numerous papers published in specialized journals and conference proceedings.

When the pandemic hit Europe, Italy was on the front line, paying a very high price in victims and imposing one of the strictest lockdowns. i-REXFO then had to restructure and reprogram and again modify the calendar of events and their methodology, to cope with events and assist people in need.

The social channels of i-REXFO have proved to be an irreplaceable resource to reach the initially targeted audience as well as the organization of online conferences and networking events, especially

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

with successful outcomes on the event on May 2021 and DAKOFA webinar and final conference in February 2022 which took place in Copenhagen and were organized by RagnSells.

We also met Dr. Muhammad Yunus, inventor of micro-credit and Nobel Peace Prize winner 2006, in Assisi, in 2019, on the occasion of his Lectio Magistralis entitled “Circular economy and micro credit”. Yunus argues the importance of encouraging young people to become social entrepreneurs, not just to earn, because "earning is not fun, helping to change the world is much more fun".

This is why when he talks about microcredit he says that: “it is not charity but a business with a social objective: to help people get out of poverty”.

He confirmed with a smile that i-REXFO is moving in the right direction.

Figure 8. Professor Francesco Fantozzi and Muhammad Yunus at the Lectio Magistralis in Assisi.



4. Conclusion

The i-REXFO project demonstrated in Umbria the feasibility of an innovative business model for food waste reduction where actions to recover excess food for donation, promote awareness in consumer and consumption of close to expiration food leftovers are financed by biogas production from unavoidable food waste [11][10].

An open source optimization software to design the business model was built and used to optimize the integrated system in Umbria Region, Italy. The toll was used to design different scenarios in geographical areas characterized by different sensitivity towards food waste, different legislation regarding the use of food waste in biogas plants and of digestate on fields and different incentives for renewable energy production. Different cash flows resulted from varying bio-methanation potential of residues also considering possible oscillation in carbon credits market value. i-REXFO demonstrated that in the best case scenario the business model is self-sustaining without the need for additional incentives besides those available for renewable energy production, while in the worst-case scenario

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

the business model requires public incentive provided to food waste suppliers as a reward for sustainable disposal [11].

i-REXFO has demonstrated in Umbria the possibility of avoiding the landfilling of over 2500 tons/year of food waste that instead contributed to the production of over 2200 MWh/year of renewable energy and the donation of over 120 tons/year for surpluses. The integrated system has avoided the production of over 9200 tons/year of CO2 equivalent and the consumption of over 496,000 m3 of water [12].

5. Aknowledgments

This research was founded by the EU LIFE 16 program. The activities were carried out by partenrs of i-REXFO LIFE 16 ENV/IT/000574 project.

6. References

[1] FAO. Food losses and waste in the context of sustainable food systems. A report by the High Level panel of Expert on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security (HLPE). Rome, June 2014.

[2] Monier, Veronique, Escalon Victoire, O'Connor Clementine. Final Report: Preparatory study on food waste across EU 27. European Commission [DG ENV – Directorate C], BIO Intelligence Service, Paris 2010, ISBN : 978-92-79-22138-5 doi : 10.2779/85947.

[3] Lanfranchi M., Giannetto C., De Pascale A. ANALYSIS AND MODELS FOR THE REDUCTION OF FOOD WASTE IN ORGANIZED LARGE-SCALE RETAIL DISTRIBUTION IN EASTERN SICILY. American Journal of Applied Sciences, Volume 11 No. 10, 2014, 1860-1874 DOI: https://doi.org/10.3844/ajassp.2014.1860.1874

[4] Sulis F., Agostinho F., Almeida C. M.V.B., Giannetti B. F. Recognizing the wealth of non-marketable food in distribution centres: The environmental benefits of donation. Journal of Cleaner Production, Volume 318, 10 October 2021, 128482 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128482

[5] Bartocci P., Zampilli M., Liberti F., Pistolesi V., Massoli S., Bidini G., Fantozzi F. LCA analysis of food waste co-digestion. Science of The Total Environment, Volume 709, 2020, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136187

[6] Liberti F., Pistolesi V., Mouftahi M., Hidouri N., Bartocci P., Massoli S., Zampilli M., Fantozzi F. An incubation system to enhance biogas and methane production: A case study of an existing biogas plant in Umbria, Italy (2019). Processes, 7 (12), art. no. 925, DOI: 10.3390/PR7120925

[7] M. Donner, R. Gohier, H. De Vries. A new circular business model typology for creating value from agro-waste. Sci. Total Environ., 716 (2020), 10.1016/j.scitotenv.2020.137065.

[8] Celli I., Brunori E., Eugeni M., Cristinariu C. A., Zampilli M., Massoli S., Bartocci P., Caldarelli V., Saetta S., Bidini G., Fantozzi F. Development of a tool to optimize economic and environmental feasibility of food waste chains. (2022) Biomass Conversion and Biorefinery, DOI: 10.1007/s13399-021-02107-3

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.

[9] Slopiecka K., Liberti F., Massoli S., Bartocci P., Fantozzi F. Chemical and physical characterization of food waste to improve its use in anaerobic digestion plants. Energy Nexus, volume 5, 100049. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100049.

[10] Huiru, Z., Yunjun, Y., Liberti, F., Bartocci, P., Fantozzi, F. Technical and economic feasibility analysis of an anaerobic digestion plant fed with canteen food waste, (2019) Energy Conversion and Management, pp. 938-948. doi=10.1016/j.enconman.2018.11.045

[11] Bartocci P., Zampilli M., Massoli S., Fantozzi F. (2020). Food waste anaerobic digestion in Umbria region (Italy): Scenario analysis on the use of digestate through LCA. E3S WEB OF CONFERENCES, vol. 197, ISSN: 2267-1242, doi: 10.1051/e3sconf/202019708011

[12] Bartocci, P., Yang, Q., Zhou, H., Chen, B., Fantozzi, F. Waste food reduction as a way to reduce resources and energy consumption in the Italian industrial sector: An IO-LCA analysis. (2021) E3S Web of Conferences, 238, art. no. 07002, DOI: 10.1051/e3sconf/202123807002

ISBN (online PDF) 978-88-9392-375-0 - © 2022 Morlacchi Editore University Press, CC BY 4.0 International.
Published by Morlacchi Editore University Press.