POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Enhancing Public ‘Awaiting Reuse’ Architectural Heritage through RECs: the Former Ammunition Depot in Sangano

Original
Enhancing Public ‘Awaiting Reuse’ Architectural Heritage through RECs: the Former Ammunition Depot in Sangano / Malavasi, G.. - In: VALORI E VALUTAZIONI. - ISSN 2036-2404. - ELETTRONICO. - 39:(2026), pp. 45-67. [10.48264/vvsiev-20263904]

Availability:
This version is available at: 11583/3007228 since: 2026-02-03T08:58:28Z

Publisher:
SIEV - DEI Tipografia del Genio Civile

Published
DOI:10.48264/vvsiev-20263904

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)

31 October 2026

valori
e valutazioni
teorie ed esperienze

Società Italiana di Estimo e Valutazione

Enhancing Public 'Awaiting Reuse' Architectural Heritage through RECs: The Former Ammunition Depot in Sangano

Giorgia Malavasi[1,]

[1] Department of Architecture and Design – DAD, Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli, 39, 10125 Torino, Italia; giorgia.malavasi@polito.it

* corresponding author

Keywords

Architectural heritage, economic evaluation, life cycle cost analysis, public lighting scenarios, renewable energy communities

Abstract

The research investigates the potential of economic evaluation as a strategic lever for enhancing architectural and landscape heritage in fragile contexts, adopting a life-cycle perspective and integrating it into sustainable regeneration processes promoted by Renewable Energy Communities (RECs). It is assumed that the energy transition can represent an opportunity for local administrations to initiate collaborative governance processes aimed at territorial revitalization, particularly in marginal areas. This study proposes a methodological approach to economically evaluate energy empowerment interventions on underutilized historic buildings and cultural sites awaiting reactivation. At the core of the approach lies Life Cycle Cost Analysis (LCCA), employed as a decision-support tool to guide long-term economically sustainable public policies. The methodology has been applied to the Former Ammunition Depot of Sangano (Turin), a decommissioned military site under municipal ownership, lacking specific heritage protection and located within a fragile territorial context with limited resources. Particular attention was devoted to the reuse of public spaces and the design of lighting scenarios, conceived both for the functional and symbolic renovation and enhancement of the site.

The economic evaluation, conducted through LCCA, simulated the integration of the complex into a local REC to verify the capacity of energy-sharing models to offset the costs of adaptive reuse, with a specific focus on public space lighting. The direct involvement of the Municipality demonstrated how analytical tools such as LCCA can support multi-level decision-making and foster the transformation of dormant heritage assets into strategic resources for local development.

1. Introduction

The economic evaluation of heritage-based energy empowerment represents a crucial dimension in advancing the sustainable management and reuse of cultural heritage assets. Within this perspective, Life-Cycle Cost Analysis (LCCA), as applied in this study, offers a structured and rigorous framework for assessing the long-term financial sustainability of energy-related interventions in cultural heritage sites. At the same time, such an approach should ultimately be reconsidered within the broader logic of adaptive reuse and heritage enhancement projects. However, its role must be understood as part of a broader evaluative and design process. As

underscored by (Mazzanti, 2003), heritage valuation must go beyond quantitative financial indicators to incorporate cultural, social, and territorial dimensions of value. Therefore, while the present LCCA-based analysis is a necessary foundation, its insights must be integrated into a holistic vision that aligns technical, economic, and cultural objectives (Dalla Costa, 2000) to support the full reactivation and sustainable reuse of abandoned public assets (Della Spina et al., 2022; Fregonara et al., 2022) .

Traditional models of intervention, frequently reliant on public funding and static conservation increasingly inadequate in addressing the multidimensional nature of such heritage (Battisti, 2016). Consequently, there is a growing need for integrated and cross-disciplinary approaches that combine heritage conservation with environmental, economic, and social innovation (Choay, 1992). Within this context, Renewable Energy Communities (RECs) represent an innovative and increasingly relevant governance model (Bielig et al., 2022; Ubelmesser et al., 2022). Promoted by European directives and implemented through national regulatory frameworks, RECs enable groups of citizens, local authorities, and small enterprises to collectively produce, manage, and consume renewable energy at the local level (Bovera & Lo Schiavo, 2022; Cirrincione et al., 2020). Their cooperative and place-based nature aligns with the principles of cultural heritage valorisation, opening up new perspectives for long-term sustainability, economic resilience, and civic participation (EU Directive 2018/2001).

In the present research[1], the concept of «heritage energy empowerment» (Malavasi, 2025) has emerged as a response to the interdisciplinary convergence aimed at economically enhancing heritage assets while preserving their cultural value and conservation. It proposes the integration of renewable energy systems and energy efficiency measures within the reuse strategies of heritage sites, not only as a means to reduce environmental impact, but also to promote new social uses and community-oriented governance models (Baggio et al., 2017; Gremmelspacher et al., 2021).

Despite the growing interest in RECs as a tool for promoting sustainability and citizen participation, there remains a critical lack of integrated frameworks that address the economic evaluation of energy empowerment interventions in heritage contexts. Key challenges include the absence of life cycle-based evaluation methods, insufficient guidelines for assessing economic feasibility within RECs (Malavasi et al., 2025), and limited methodological support for Public Administrations tasked with managing such initiatives. This gap is particularly evident in fragile or underutilised heritage settings where decision-support tools are needed to balance conservation priorities with energy and economic objectives.

This research aims to develop and test a methodological approach for the economic evaluation of energy empowerment interventions on architectural and landscape heritage within the framework of RECs' development. The goal is to support Public Administrations in identifying sustainable and culturally respectful scenarios using LCCA and explicitly considering incentives associated with REC participation. Through application to a real-world case, the research seeks to demonstrate how REC-based interventions can drive both architectural enhancement and territorial revitalisation. This study seeks to address the following key research questions, arising from current methodological gaps in the integration of architectural heritage with RECs:

- What tools and methods can effectively support the economic evaluation of energy empowerment interventions on architectural and landscape heritage, particularly from a life cycle perspective?
- How do energy empowerment interventions within the REC framework impact the economic, social, cultural, and environmental dimensions of architectural and landscape heritage?

[1] This article originates from the doctoral thesis *La Valorizzazione Economica del Patrimonio Architettonico attraverso le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER): Opportunità, Scenari e Strumenti di Valutazione (Economic Enhancement of Architectural Heritage through Renewable Energy Communities (RECs): Opportunities, Scenarios and Evaluation Tools),* authored by Giorgia Malavasi (2025) under the scientific supervision of Profs. Elena Fregonara, Diana Rolando, and Anna Pellegrino, within the PhD Program in Architectural and Landscape Heritage at the Department of Architecture and Design (DAD), Politecnico di Torino.

- To what extent, and in what ways, can RECs contribute to the economic enhancement and sustainable regeneration of historical sites, while ensuring the preservation of their cultural and architectural value?

Beyond the economic evaluation, the research addresses the potential of RECs not only as energy instruments, but as drivers of socio-cultural innovation and governance in heritage practices, in line with current European objectives for inclusive, resilient, and sustainable urban and territorial development.

This paper contributes to this emergent field of research by exploring the role of RECs in the regeneration of abandoned cultural heritage through a case study analysis of the Former Ammunition Depot of Sangano, located in the Piedmont Region in the North of Italy. The site, a former military area spanning over 46 hectares and characterised by a complex set of environmental, regulatory, and historical constraints, represents a paradigmatic example of a latent architectural heritage asset awaiting a new use. Once state-owned property, it was transferred to the Municipality in 2000 and has since remained closed to the public. The site presents significant challenges due to the large scale of the intervention and the loss of its original historical function, which has left it without a clear contemporary use or identity.

The present research originates from the convergence of two recent initiatives promoted by the Municipality of Sangano: on the one hand, the proposal to transform the disused powder magazine into an «ethical park»; on the other, the establishment of a REC within the municipal urban area. The integration of these two experiences provides the starting point for a methodological reflection on the role of RECs in the sustainable enhancement of architectural and landscape heritage, with particular attention to public participation and strategic planning. In this regard, the economic evaluation presented in this article is based on the uses identified by the Municipality of Sangano and outlined in the proposed reuse project for the area. At this stage, the project does not assess the individual buildings within the site; rather, it serves as a preliminary framework for exploring alternative economic scenarios concerning public spaces, with a specific focus on lighting systems.

The case exemplifies a broader issue faced by many small municipalities across Europe: how to reintegrate disused heritage into contemporary development agendas without compromising its cultural integrity. Within this context, the integration of the site into a REC offers a novel framework for sustainable reuse, one that links energy self-sufficiency, economic viability, and heritage conservation.

Specifically, the case study aimed to assess from a life cycle perspective the economic sustainability of restoring public lighting infrastructure within the site's open and green spaces, a critical component for enabling future public use and accessibility. This evaluation process was developed in direct collaboration with the local Public Administration, adopting a public-sector perspective to identify financially and operationally feasible solutions. The study thus investigated whether and how REC membership can catalyse unlocking the site's potential, transforming a burdened asset into resilient public infrastructure with community-wide benefits.

Following the background and theoretical framework (Section 2), the methodology section outlines the proposed evaluative approach (Section 3), with particular focus on the application of LCCA for the evaluation of energy empowerment interventions on architectural and landscape heritage in the context of RECs' development. The subsequent section presents the case study of the Former Ammunition Depot of Sangano (Section 4), illustrating the spatial, regulatory, and operational context. Three base scenarios and three enhancement scenarios (Section 5) are subsequently analysed and compared through LCCA to assess their economic sustainability, particularly to the integration of RECs and the associated incentive mechanisms that support long-term project viability. Finally, the discussion (Section 6) highlights the implications of the results for local governance, policy alignment, and replicability in other heritage sites, while the conclusion (Section 7) reflects on the broader relevance of economic evaluation tools in supporting decision-making processes in fragile territories.

2. Scientific Background and Context

In response to the increasing urgency of climate change, energy transition, and the need for

more sustainable and inclusive territorial governance, this research explores the intersection between cultural heritage enhancement and renewable energy innovation (Barbaro & Napoli, 2024). The inclusion of the following two sections, "Cultural Heritage Reuse and Energy Empowerment" (Section 2.1) and "Renewable Energy Communities as Public-Private Partnerships" (Section 2.2), stems from the necessity to contextualise and frame the dual pillars that form the methodological foundation and context of this work.

On one hand, the adaptive reuse of cultural heritage, especially from an energy perspective, has emerged as a crucial strategy for reactivating abandoned or abandoned assets in line with sustainable development goals. On the other hand, RECs represent an emerging governance model capable of integrating diverse stakeholders (public authorities, private actors, and local communities) into cooperative frameworks that promote energy self-sufficiency, local resilience, and inclusive participation. In this regard, RECs can be interpreted as a contemporary evolution of Public-Private Partnerships (PPPs) defined as «collaborative agreements between public authorities and private entities aimed at financing, designing, implementing, and operating projects or services that are traditionally delivered by the public sector. Through PPPs, the public sector can leverage private resources, expertise, and efficiency, while the private partner assumes part of the risks and responsibilities in exchange for potential return» (Calabrò et al., 2021), enhanced by another pillar: the active role of citizens and communities. This collaboration structure (Della Spina et al., 2022; Gabrielli et al., 2024) transforms RECs into Public-Private-Community Partnerships (PPCPs), enabling more flexible, democratic, and territorially embedded approaches to managing the energy transition and enhancing the built environment; PPCPs are cooperative frameworks that involve public authorities, private entities, and local communities in the joint planning, financing, and management of projects or services. Unlike traditional PPPs, PPCPs explicitly integrate the active participation of communities, recognizing their role as both stakeholders and beneficiaries, to ensure greater inclusiveness, social legitimacy, and long-term sustainability (Della Spina et al., 2022; Gabrielli et al., 2024). Within this framework, RECs offer significant potential for activating and repurposing heritage assets through shared governance, long-term sustainability, and collective benefit redistribution.

The two domains, although historically treated separately, are increasingly converging in contemporary research and practice, especially in European policy agendas (Directorate-General for Energy (European Commission), 2019) and funding instruments. Their integration offers a new interpretative and operational framework for valorising heritage through energy transition, while simultaneously enabling RECs to anchor themselves in meaningful, place-based narratives that enhance cultural identity and community engagement.

2.1 Cultural Heritage Reuse and Energy Empowerment

In recent years, the management of cultural heritage has progressively shifted from traditional models centred on static conservation toward more dynamic and functional approaches, focused on adaptive reuse and sustainability (Battista et al., 2022). This paradigm shift aligns with the growing awareness of the environmental, social, and economic dimensions of heritage, particularly with the challenges posed by climate change and energy transition. In this context, heritage assets, especially those in a state of disuse or degradation, are increasingly interpreted as potential nodes for experimentation in circular regeneration, combining conservation objectives with low-carbon strategies (Ciulla et al., 2016; Galatioto et al., 2017; Napoli et al., 2020).

The "Guidelines for Improving Energy Efficiency in the Cultural Heritage - Architecture, historical and urban centres and cores" (Ministry of Cultural Heritage, 2015) provide directions for evaluating and improving the energy performance of protected and listed cultural heritage, concerning Italian regulations on energy savings and building efficiency. The main aim is to offer operational guidance to both professionals and staff of the Ministry of Culture; moreover, these guidelines provide local administrations and bodies responsible for safeguarding cultural heritage with criteria and methods for critically assessing protected buildings or buildings that could potentially be protected (Battisti, 2016).

In this regard, the implementation of renewable energy systems must be carefully considered to ensure a harmonious coexistence (Pane, 2008) between sustainable new interventions and the preservation of architectural heritage by adopting innovative and tailored design and engineering solutions (Baggio et al., 2017; Gremmelspacher et al., 2021).

Architectural heritage, particularly in the case of abandoned or underfunded sites, represents a significant opportunity for integration within RECs. These buildings, often neglected due to insufficient public funding, can be repurposed as energy hubs, community spaces, or renewable energy infrastructure, enabling both their preservation and functional reinvention. This integration not only supports the ecological transition but also strengthens local identity and community engagement. In this sense, RECs act as catalysts for cultural continuity, aligning closely with the concept of "heritage communities" as defined by the Faro Convention (2015), groups of individuals who value and seek to preserve cultural heritage through collective, public-oriented action. Both RECs and heritage communities share a bottom-up, participatory approach, making RECs a powerful tool for combining sustainability with cultural valorisation.

2.2 Renewable Energy Communities as Public-Private Partnerships

RECs have emerged as innovative instruments for local energy governance, enabling collective production, management, and consumption of energy from renewable sources. Rooted in the principles of environmental justice, decentralisation, and active citizenship, RECs are regulated at the European level by Directive (EU) 2018/2001 and further transposed into national legislation in Italy through Legislative Decree 199/2021.

These entities are composed of individuals, small enterprises, and public authorities working together to share energy benefits within a defined geographical area, thereby reducing dependency on external supply and fostering local development. The European Commission acknowledged the role of RECs and their importance through the revised Energy Performance of Buildings Directive (EU/2024/1275) as "they can empower and engage consumers and enable certain groups of household customers, including in rural and remote areas, to participate in energy efficiency projects and interventions that can combine actions with investment in renewable energy" (EU/2024/1275).

On this regard, the RECs are offering significant opportunities to enhance energy efficiency, sustainability, and the aesthetic quality of public and private spaces.

In addition to their technical and economic functions, RECs hold significant potential as enablers of innovative public-private-community partnerships (PPCPs) and, further, could be studied in relation to the Sustainable Public Procurement debate (Fregonara et al., 2022). Their cooperative structure enables flexible configurations of stakeholders and the redistribution of energy-related benefits across various actors, including municipalities, heritage custodians, and residents.

In heritage contexts, RECs offer an unprecedented opportunity to transform underutilised sites into energy-active infrastructures, while ensuring inclusive participation. Furthermore, in the Italian context, national incentive programs, such as those under the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), provide substantial financial support for REC development in small municipalities, thus enhancing their feasibility and replicability.

Through this lens, RECs represent a promising pathway for aligning cultural heritage management with the broader goals of ecological transition and cooperative territorial governance (Gabrielli et al., 2024).

Today, RECs are recognised as drivers of social inclusion, democracy, and well-being (Bielig et al., 2022; Gjorgievski et al., 2021; Pitt & Nolden, 2020). Local community centres can offset their energy use through RECs, encouraging environmental stewardship within the community. Cities could invest in RECs to ensure that the energy consumed for park lighting and facilities comes from renewable sources, promoting an eco-friendly image ((Banchiero et al., 2020; Blečić et al., 2023). (Mazzarella, 2015).

In this way, RECs contribute not only to energy resilience by promoting decentralised and renewable energy production, but also to the valorisation of local identity and heritage (Cengiz &

Yanmaz, 2019; Gabrielli & Ruggeri, 2023). By activating underused assets, encouraging community participation in heritage preservation, and fostering inclusive governance, they reinforce the cultural and territorial fabric of the areas in which they operate (Gjorgievski et al., 2021).

Their cooperative, future-oriented model supports not only environmental sustainability but also social cohesion and cultural continuity, offering a holistic approach to regeneration that integrates energy innovation with place-based values. As such, RECs hold the potential to become strategic instruments in rethinking the role of local communities in the ecological transition, particularly in rural (Stankulova et al., 2023) and heritage-rich contexts where development opportunities are often limited.

3. Methodological approach

3.1 Economic Evaluation of Energy Empowerment interventions on architectural and landscape heritage

This research proposes a methodological approach developed to support Public Administrations in decision-making processes to identify and evaluate energy empowerment interventions on architectural and landscape heritage within the framework of Renewable Energy Communities (RECs). (Malavasi, 2025).

The economic evaluation of heritage energy empowerment is based on Life-cycle Cost Analysis (LCCA) as a decision-support tool to compare alternative intervention scenarios in a life cycle perspective, accounting for long-term operational, maintenance, and end-of-life implications of energy retrofitting solutions.

The decision-making process is based on a structured involvement of Public Administrations (Aulisio et al., 2024; Rolando et al., 2024), actively engaged in all evaluation phases to ensure institutional feasibility and shared outcomes.

To achieve the aim, the methodological approach is articulated into seven phases and is designed to support pre-feasibility analyses of heritage energy empowerment interventions. It focuses on the early stages of the project life cycle (defined by ISO 15686-5:2008), namely Briefing, Planning, and Design, and integrates governance aspects, asset durability over time, and financial sustainability(Fregonara, 2015). The subsequent phases of the life cycle (Construction, Operation and Maintenance, and End-of-Life/Disposal) are excluded from the scope of the current methodological approach, as the aim is to support Public Administrations during pre-feasibility assessments and strategic decision-making before implementation.

In this context, the adoption of LCCA enables the quantification of short and long-term costs associated with alternative design options, offering a comprehensive perspective for informed decision-making by Public Administrations (Fregonara et al., 2022).

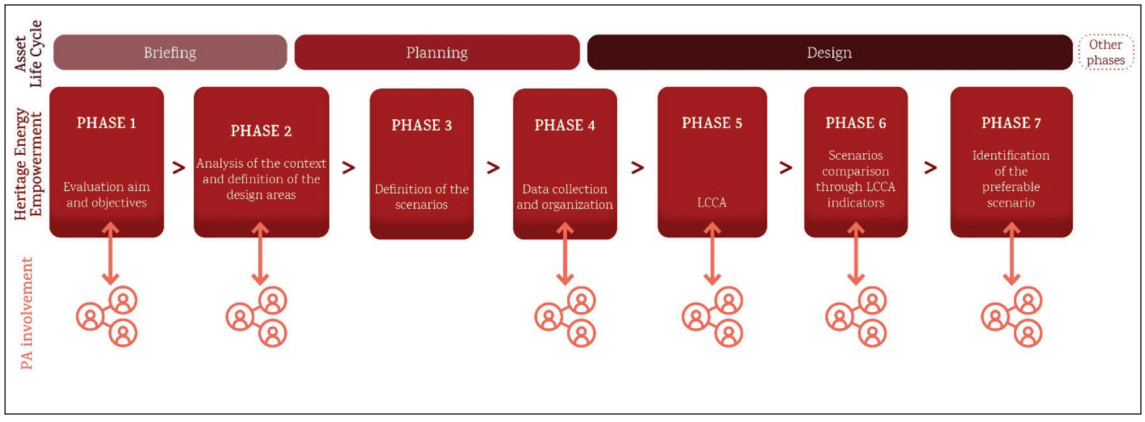


Figure 1. Methodological workflow in the present research. (Adapted from Malavasi, 2025).

The workflow in Figure 1 starts with the definition of the aim and objective of the evaluation of the energy empowerment interventions in the context of RECs' development (PHASE 1), which must be shared with local public administrations who are the owners of the areas of intervention, to meet the needs of the local communities.

The second phase includes the analysis of the territorial context of the asset and the definition of the design areas and possible heritage energy empowerment interventions. In PHASE 3 different scenarios are defined for drawing a comprehensive array of alternative interventions and allow the following data collection and pre-processing operations. The definition of alternative scenarios could involve different features (such as assets, public spaces, renewable sources and more) to draw a consistent number of alternative options that match the objectives of the evaluation.

The following PHASE 4 consists of the data collection, organisation and harmonisation, which is a crucial passage to provide a reliable set of data (related to economic and energy domains) that gathers different data sources; this phase includes the gathering of economic data, such as investment costs, operation and maintenance costs, energy tariffs, and available incentives, and energy-related data, including energy demand profiles, current consumption levels, energy performance indicators of buildings, and potential renewable energy production (e.g., solar irradiance, PV system yields) (Par. 3.2.1). These data are sourced from technical reports, municipal databases, energy audits, public incentive schemes, and on-site surveys, and they have to be harmonised to ensure coherence across different temporal, spatial, and disciplinary scales.

Once all necessary data are collected and organized, the LCCA allows the assessment of the alternative scenarios (PHASE 5) to consider and estimate the asset total costs over a period of analysis. After the construction and application of the LCCA, it is possible to apply specific measures for the economic evaluation assessment by comparing the scenarios of the project through LCCA indicators (PHASE 6). The final phase (PHASE 7) consists in the identification of the preferable scenario that must consider the results derived from the comparison of LCCA indicators and the point of view of the public administrations.

3.2 Life Cycle Cost Analysis (LCCA)

The methodological approach adopted in this research is grounded in LCC following ISO 15686-5:2008 and its updated version ISO 15686-5:2017, a comparative evaluation technique designed to support decision-making by assessing alternative project scenarios based on their total cost over time. The methodology follows the principles defined by ISO 15686-5:2017 («Buildings and constructed assets» – «Service life planning» – «Part 5: Life-Cycle Costing»), which formalises the structure and application of LCCA in the built environment. The standard guides on identifying and calculating the full range of cost categories, such as capital expenditure (CAPEX), operational and maintenance costs (OPEX), replacements, and end-of-life costs, over a defined service life, allowing for consistent comparison of economically sustainable design options.

The core aim of LCCA is to provide a rational basis for selecting among design or intervention alternatives, particularly where long-term operational, maintenance, and replacement costs are expected to differ, by estimating the global cost of each scenario throughout the full life cycle of the asset. This comparative aspect is particularly relevant in the context of this study, which analyses alternative strategies for energy empowerment and lighting of a disused heritage site under different REC configurations and design assumptions. Historically rooted in procurement practices of the U.S. Department of Defense during the 1960s and 70s, LCCA gained broader relevance in Europe, particularly in France and the United Kingdom, following the 1973 oil crisis (Goh & Sun, 2015). Its integration into heritage and energy planning contexts has become increasingly significant due to growing demands for cost transparency and long-term sustainability.

It is a tool of growing importance for evaluating energy empowerment interventions and sustainable development strategies. The current standard of LCCA includes all cost components such as planning, acquisition, operation, maintenance, and end-of-life disposal, while also accounting for the residual value of components (Department of Energy, 2014; Langdon, 2007).

In conducting the LCCA, only relevant cost items are included, those that vary across scenarios, while constant expenditures are excluded to maintain analytical clarity.

The calculation of Global Cost (CG) is explained in the EN 15459:2007 (Energy performance of buildings – Economic evaluation procedure for energy systems in buildings), which was later revised and updated in EN 15459-1:2017. It presents the calculation of the C_G over the life cycle of a system or building project (Eq. 1):

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_{i=1}^{\tau} \left((C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) \right) - V_{f,\tau}(j) \quad (1)$$

where $C_G(\tau)$ = global cost (referred to starting year τ_0); C_I = initial investment costs; ($C_{a,i}(j)$ = annual cost during year i of component j, which includes annual running costs (energy costs, operational costs, maintenance costs) and periodic replacement costs; $R_d(i)$ = discount rate during year i; $V_{(f,\tau)}(j)$ = residual value of the component j at the end of the calculation period, referred to the starting year.

In the case of building intervention or real estate development, the calculation of the global cost can be expressed by the formula (Eq. 2) (Fregonara, Lo Verso, et al., 2018):

$$LCC = C_i + \sum_{t=0}^{N} \frac{C_g + C_m}{(1+r)^t} \pm V_r \left(\frac{1}{(1+r)^N} \right) \quad (2)$$

where the Life Cycle Cost (LCC) is composed by the investment costs (C_i), the management costs (C_g) and the maintenance costs (C_m); r the discount rate and N is the number of the years related to the considered period; lastly, V_r is the residual value of the building: if $V_r$the value is positive, the building has a residual value; in case of the residual value is negative, the building must be disposed.

LCCA is defined as a systematic method for assessing the total cost of ownership over the life of an asset, allowing for detailed comparison between different design or intervention alternatives. In this study, LCCA serve to support decision-making for energy empowerment scenarios, particularly in the context of RECs by providing a structured estimate of initial investments, operational expenditures, and residual values associated with lighting systems, photovoltaic (PV) installations, and related infrastructure.

3.2.1 Relevant costs for RECs

The data collection phase is aligned with the guidance provided by ISO 15686-5:2017, which highlights the importance of identifying reliable inputs for LCC, including capital costs, operational expenditures, replacement cycles, discount rates, and any residual values or incentives (Langdon, 2007). This step is essential to ensure consistency and comparability across alternative project scenarios. Regarding RECs, the LCCA integrates economic incentives from REC participation, including incentives from the *Gestore dei Servizi Energetici* (GSE) and revenues from self-consumption and energy sale.

RECs' revenues are treated as "negative costs" within the LCCA framework, reducing the global cost of the intervention. In other words, all financial inflows, whether derived from energy savings due to self-consumption or from incentives tied to surplus energy fed into the grid, are considered with a negative sign, as they directly offset operational expenditures or contribute to revenue generation. This inclusive treatment of both costs and benefits ensures a more accurate estimation of the total economic burden over the life span of the system and supports the identification of strategies that deliver long-term value for the public administration.

The LCCA lead to cost estimation across six distinct cost categories:

- Non-Construction – involving energy contract activation and REC's associated taxes.
- Construction – encompassing construction costs for designated areas, including photovoltaic (PV) panels and battery systems.
- Operating – considering energy consumption offset by PV panel production.
- Incentives – incorporating REC's benefits, such as dedicated withdrawal from the grid, refunds for unutilized costs, and incentives from governmental bodies.

- Maintenance – covering both ordinary and extraordinary maintenance activities.
- End of Life – addressing dismantling and disposal of PV panels and batteries.

The methodological process includes a structured sequence: the preparation of input datasets (energy, cost, spatial), the formulation of a cost breakdown structure, and the definition of analytical parameters such as time horizon and discount rates. For public sector projects related with energy, discount rates between 3% and 5% are commonly recommended, balancing fiscal prudence with intergenerational equity (Fregonara & Ferrando, 2024; Maselli & Nesticò, n.d.; Nesticò et al., 2024). In this study, a 3% rate has been adopted, reflecting the lower bound of this range to account for the long-term horizon and the public nature of the investment, where the societal benefits of energy efficiency and heritage valorization extend across generations. This choice also aligns with the precautionary principle, aiming to avoid undervaluation of future savings and benefits in contexts characterized by both cultural significance and sustainability objectives.

Financial discounting is applied to all future cost items, except for acquisition costs incurred at time zero, to capture the time value of money and reflect inflationary dynamics.

Additionally, particular attention is given to operation and maintenance costs, especially for PV systems, as the sensitivity analysis (Section 5.4) demonstrated their disproportionate impact on Net Present Value (NPV) outcomes. As such, accurate estimation of these values is essential to identifying the preferable scenario.

4. Case study: The Former Ammunition Depot in Sangano

The Former Ammunition Depot of Sangano, located near Mount Pietraborga between the municipalities of Sangano (in the north of Italy) is a disused military asset extending over approximately 462,000 m² (Figure 2). Originally selected by the Italian Army for its strategic, elevated, and secluded position, the site is now publicly owned and features 42 buildings, including ammunition storage facilities, guardhouses, and utility structures.

The area also features a dense network of internal public roads and green spaces, including the "Soldier's Ring," an external path once used by sentries, which remains a poignant reminder for residents. Currently, the site is largely overgrown and inaccessible, though its connective infrastructure remains largely intact. The Depot is protected under multiple regulatory frameworks and it is designated as a statutorily protected natural area in the Piedmont Landscape Plan due to its extensive forest cover. Additionally, it is subject to hydrogeological and geomorphological constraints that limit development. Furthermore, it falls under preliminary cultural heritage protection, requiring formal verification by the Soprintendenza. Urban plans define the area for public use and green infrastructure, though its regulatory fragmentation and environmental sensitivities pose challenges for future redevelopment. Nonetheless, the site holds strong potential for transformation into a space of public value within its natural and historical context.

The current state of the Former Ammunition Depot in Sangano reflects over two decades of abandonment, during which nature has gradually reclaimed much of the area. The connective tissue of the site, comprising roads and green spaces, is heavily overgrown with brambles and bushes, rendering some northern and peripheral areas inaccessible and obscuring the condition of several buildings. While the image of nature reclaiming the space may appear romantic, it masks the ecological issues that emerge in such contexts: the spontaneous ecosystems that form are often dominated by aggressive pioneer species, leading to reduced biodiversity. The 42 buildings, called *riservette*, scattered across the site show varying degrees of deterioration. Many have sustained extensive damage to external finishes, while structural decay, especially in reinforced concrete structures, has been exacerbated by water infiltration due to collapsed roofs. Masonry buildings fare slightly better but are still at risk due to high humidity and ongoing environmental exposure. The dense vegetation has introduced additional risks, including root infiltration, biological colonisation, debris accumulation, and the presence of pests. Without timely intervention, the deterioration will continue to accelerate. Therefore, any future restoration must prioritise roof repairs, structural consolidation, and targeted actions to control vegetation and prevent further degradation.

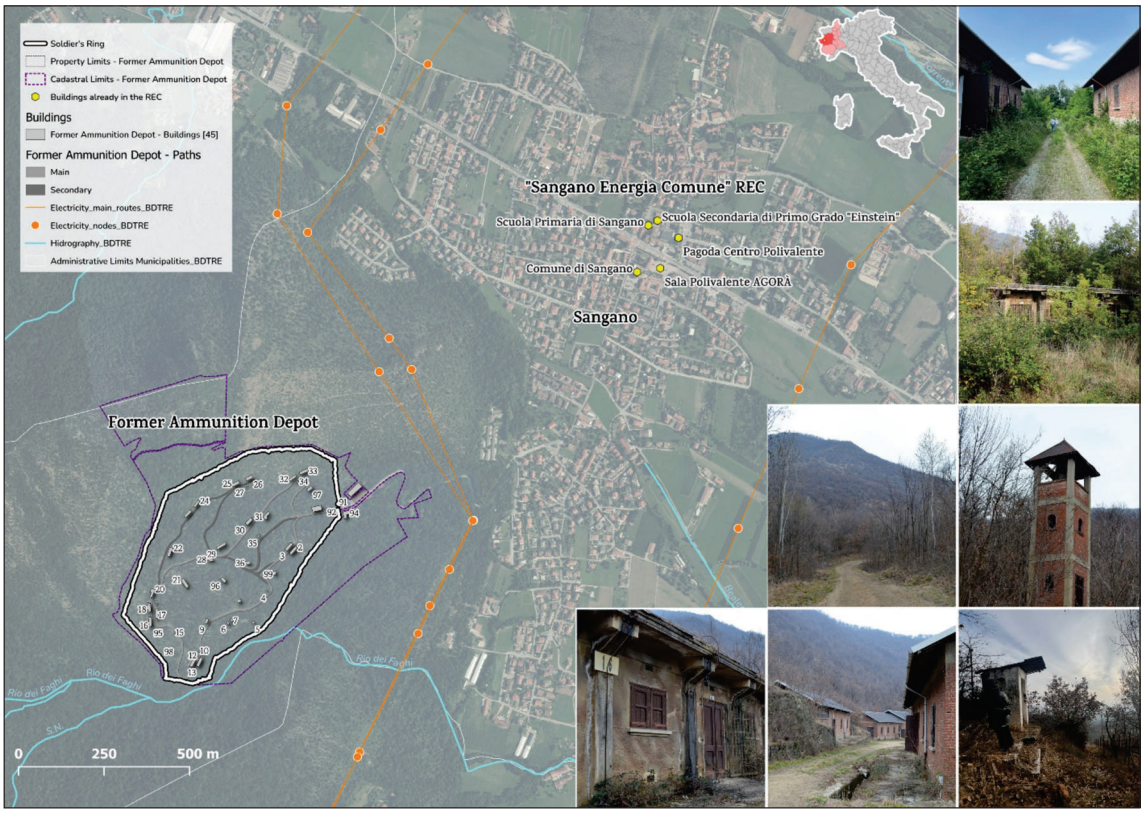


Figure 2. The Former Ammunition Depot: territorial framework and overview (Author's elaboration).

4.1 Public Spaces

The redevelopment of the former Ammunition Depot of Sangano includes a series of interventions on public spaces, aimed at identifying new public uses. These interventions are initiated through a feasibility study in 2022, supported by participatory processes and targeted funding.

- The public spaces can be related to five main areas (Figure 3):
- Main paths (vehicular and pedestrian circulation),
- Secondary paths (narrow, pedestrian/cycling routes),
- Parking area (near the entrance, current surface only),
- Amphitheatre (for performances and events),
- Playground area (for daytime recreation and evening usability).

A key component of the intervention is the Soldier's Ring, a historic circular pathway originally used for surveillance, now redesigned for public use with secure parapets, scenic overlooks, and discreet landscape lighting compliant with regulations on light pollution and biodiversity protection.

These areas were jointly selected with the Municipality of Sangano to prioritise accessibility, safety, energy efficiency, and identity enhancement of the site. A lighting design was developed not only as a functional infrastructure (based on the specific framework of requirement developed during the research (Malavasi, 2025) but also as input for economic evaluation through LCC (Section 5), aligning with the broader Municipality's objective of transforming the site into an «ethical park» (*Parco ETICAmente*) centred on sustainability, culture, and community engagement.



Figure 3. Design areas (public spaces) in the Former Ammunition Depot (Author's elaboration).

5. Results

The proposed methodological approach (Section 3) was applied to the Former Ammunition Depot of Sangano to evaluate the feasibility of energy empowerment interventions of public lighting as a strategy for reactivating the abandoned military site, now publicly owned and lacking sufficient municipal resources for comprehensive redevelopment.

The analysis focused on economic evaluation through LCCA that was applied to different scenarios within the development of the local REC in Sangano over a 30-year timespan. The cost data were derived from a bill of quantities of the interventions required for the retrofitting of the public lighting system (including fixtures, electrical network, and electrical nodes), as well as from all expenditures related to the activation of the REC, such as contract setup, procurement and installation of photovoltaic panels, and storage batteries. As sources for parametric prices, the DEI Price List Urbanization, Infrastructure, Environment (2023) and the DEI Price List Restoration, Renovation, Maintenance (2023) were used. It was necessary to rely on parametric prices since the detailed design of the spaces has not yet been developed. This attempt represents a preliminary estimate.

In the following sections, the analysis is articulated into sequential steps, beginning with the definition of the scenarios (Section 5.1) and continuing with the economic evaluation of Base Scenarios (Section 5.2) and Enhancement Scenarios (Section 5.3), before concluding with a sensitivity analysis (Section 5.4) aimed at assessing the robustness of the proposed model under variable economic and technical conditions.

5.1 Scenarios definition

The LCCA was structured in two phases (Figure 4): the first (Base Scenarios) evaluated the viability of using REC-generated energy for basic lighting infrastructure; the second (Enhancement

Scenarios) compared lighting design alternatives to identify the most preferable solution for reactivating the site's public spaces.

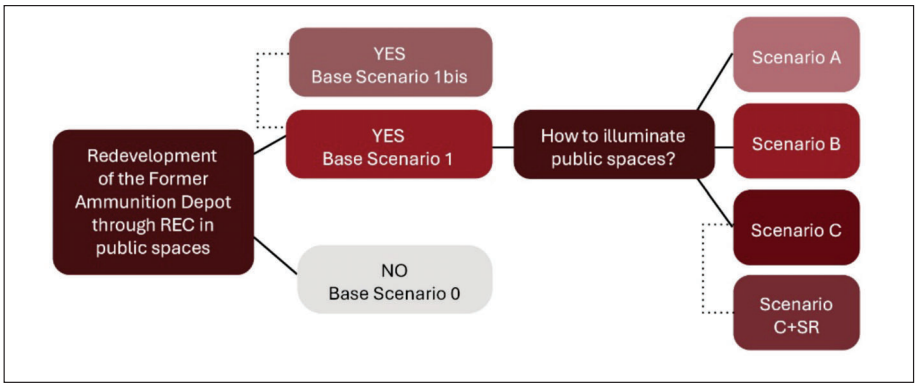


Figure 4. LCCA scenarios workflow in the present research. (Adapted from Malavasi, 2025).

Redevelopment of the Former Ammunition Depot through REC in public spaces

Scenario 0 represents the baseline condition in which the lighting refurbishment is carried out without leveraging the Sangano REC. It includes all cost components, contract activation, grid construction, appliance installation, annual energy consumption, maintenance, and end-of-life disposal, based on a conventional energy supply. Scenario 1 introduces the Sangano REC into the evaluation framework, applying the same technical assumptions as Scenario 0 but incorporating the economic benefits of local energy production and self-consumption. In this case, cost reductions are achieved through REC' shared energy use, lower operational expenditures, and the sale of energy surpluses to the grid under the Italian "Ritiro Dedicato" (Dedicated Withdrawal) scheme. Additionally, this scenario includes the installation of photovoltaic (PV) panels and battery storage, with specific cost categories for construction, ordinary and extraordinary maintenance, and incentive mechanisms, particularly the national capital contribution available under Italy's PNRR program, which offsets up to 40% of the renewable plant's investment.

Scenario 1bis replicates Scenario 1 but excludes the PNRR financial incentives, thereby allowing a more realistic projection of the system's long-term sustainability once transitional funding expires. This distinction makes Scenario 1bis critical for assessing future viability under standard economic conditions.

The comparative evaluation of the three scenarios (Scenario 0 no REC, Scenario 1 REC + PNRR bonus, and Scenario 1bis REC without PNRR bonus) enables a nuanced understanding of how different configurations of energy empowerment, incentive structures, and ownership models affect overall economic performance and policy alignment in the adaptive reuse of historic sites.

How to illuminate public spaces?

On the other hand, 3 enhancement scenarios (Scenarios A, B, and C) represent progressively ambitious lighting design strategies developed by combining spatial analysis, regulatory compliance, sustainability objectives, and stakeholder needs. Each scenario incrementally responds to differing degrees of conservation, usability, and innovation, supporting a comprehensive decision-making framework for the site's redevelopment.

Scenario A – *Business as Usual* prioritizes regulatory adherence and immediate usability, aiming to deliver a minimal intervention that ensures safety and accessibility in key areas such as parking, primary pathways, playgrounds, and the amphitheatre.

Scenario B – *Architectural Nightscape* builds on Scenario A with a greater emphasis on cultural valorization and historical memory. It introduces architectural lighting for the *riservette*

and reactivates the Soldier's Ring through motion-activated fixtures, enhancing the narrative and spatial legibility of the site. It is the most extensive in terms of illuminated surface, making it the most expressive, though moderately higher in energy consumption.

Scenario C – *Biodiversity Protection* adopts a radically sustainability-driven design, prioritizing ecological preservation through minimized and highly controlled lighting interventions. With a focus on circadian-friendly temperatures and advanced automation systems, this scenario limits lighting to only essential areas, employing precision optics and context-sensitive controls. Scenario C is the most technically sophisticated, offering the greatest alignment with biodiversity protection goals and optimal energy performance.

Lastly, a final scenario (*Scenario C+SR*) merges the low-impact, biodiversity-sensitive lighting principles of Scenario C with the symbolic reactivation of the Soldier's Ring, preserving both ecological integrity and cultural memory. Scenario C+SR reflects a balanced vision: minimising environmental disturbance, optimising energy use through REC integration, and enhancing the site's identity as a public space. It thus represents a replicable model of circular regeneration, where energy transition and heritage valorisation converge to support inclusive, resilient territorial development.

5.2 Base Scenarios: assumptions and results comparison

Table 1 illustrates the total annual cost distribution for the three base scenarios in the first year, highlighting key differences in cost structure. Construction costs dominate across all scenarios, especially in Scenario 1 and 1bis, due to the integration of renewable energy infrastructure. While Scenario 1 benefits from public incentives (PNRR), their limited scale leads to only marginal cost reduction.

Table 1. Total annual (1 year) costs categories in the life cycle - Scenarios 0, 1, 1 bis (values) (Author's elaboration)

Cost categories	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 1 bis
Non construction	1,500.00 €	1,500.00 €	1,500.00 €
Construction	529,198.57 €	882,479.19 €	882,479.19 €
Operating	4,646.22 €	4,646.22 €	4,646.22 €
Maintenance	47,627.87 €	88,930.31 €	88,930.31 €
Savings	-	148,336.37 €	38,736.13 €
End of Life	10,575.18 €	18,777.57 €	18,777.57 €
	593,547.84 €	1,144,669.66 €	1,035,069.42 €

In Figure 5, maintenance costs nearly double in REC scenarios (1 and 1bis) compared to Scenario 0, reflecting the additional burden introduced by photovoltaic and lighting systems. However, these scenarios also generate energy-related savings, absent in Scenario 0, which contribute to lowering the net financial impact over time. Scenario 1 shows the highest savings (13%), while Scenario 1bis still achieves 3.7%, confirming the long-term value of REC participation even without PNRR incentives.

Overall, the data support the importance of life-cycle analysis in public decision-making: although REC options increase upfront and maintenance costs, they enable ongoing returns, making them more sustainable in the long term.

Comparing (Table 2) the LCCA indicators it is possible to see that the Scenario 1 presents a net saving (NS) equal to € 211,483, considering the production of energy as a way to produce revenues to compensate the initial cost; similarly, the Scenario 1 without PNRR bonus highlights a lower but positive NS. In this regard, the discounted payback period for the Scenario 0 is much longer than

the period of analysis and, for this reason, cannot be calculated; on the other hand, the discounted payback period for the Scenario 1 is equal to almost 6 years.

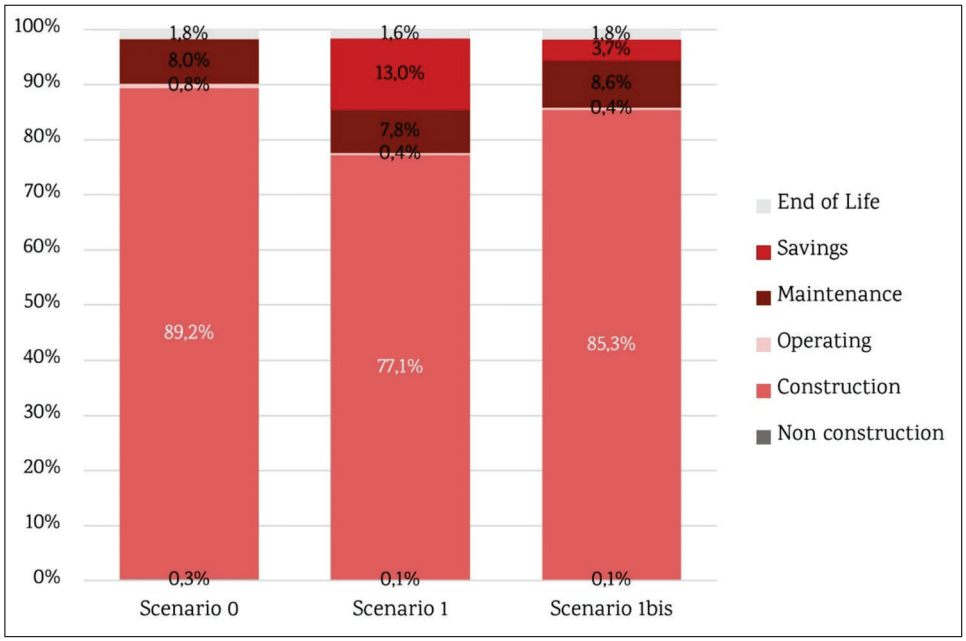


Figure 5. Total costs categories in the life cycle - Scenarios 0, 1, 1 bis (percentage). (Author's elaboration).

Table 2. Indicators comparison for Base Scenarios. (Author's elaboration)

Indicator	Scenario 0	Scenario 1 (with the REC, PNRR)	Scenario 1bis (with the REC, NO PNRR)
DISCOUNT RATE		3.00%	
NPV	1,507,668.00 €	1,296,185.00 €	1,402,593.00 €
PBP	∞	5.95 years	12.7 years
(A)IRR	-	4.00%	4.00%
NS (from Scenario 0)	-	211,483.00 €	105,075.00 €
SIR	-	1.31	1.31

This data can be interpreted as a confirmation of the overall feasibility and benefit of the operation, particularly when factoring in the presence of photovoltaic panels, whose payback period is expected to be under 7 years. For Scenario 1 without the PNRR bonus, the payback period increases significantly compared to Scenario 1 (12,7 years). A comparison of this indicator clearly shows that RECs require the presence of a financial incentive (like PNRR bonus) to be developed, as the initial construction costs of renewable energy plants are too high to ensure economic sustainability on their own.

It is noteworthy to mention that this analysis does not provide the whole benefits derived from the REC: the inclusion of savings and incentives in the LCC analysis can be considered as a starting point to demonstrate the economic sustainability of the energy empowerment in the context of Sangano REC's development, despite the huge installation costs for the renewable plants (Napoli et al., 2022; Elomari et al., 2024, Wuebben and Peters, 2022, Mutani et al., 2021, Chaudry et al., 2022, Bosone et al., 2023).

The adjusted internal rate of return (AIRR) allows for measuring the annual project return relative to a given reference period, taking into account intermediate reinvestments and allows for identifying projects with the highest internal returns. In this specific case, the AIRR of Scenario 1 is equal to 4% that is acceptable considering the discount rate of the analysis equal to the 3%. The last indicator is the savings to invest ratio (SIR) that represent the cost-effectiveness of the initial investment in relation with the savings produced in the life span period. In this case, the SIR of the Scenario 1 results is acceptable (SIR>1) revealing a positive ratio between the construction costs for PV panels and batteries and the produced operational savings.

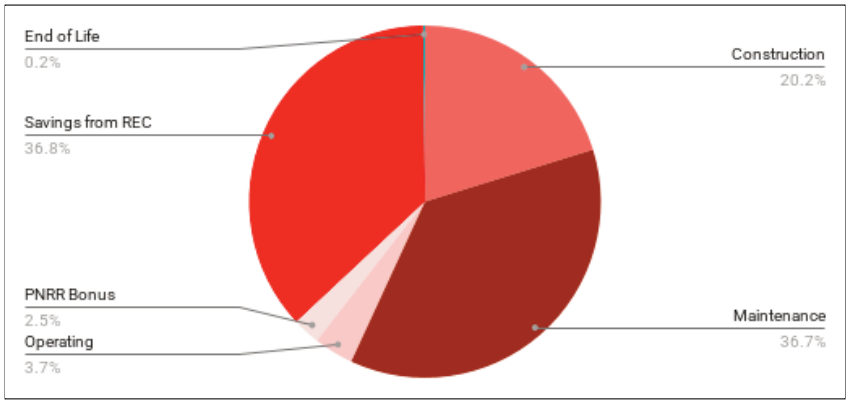


Figure 6. Total costs in the life cycle (30 years) - Scenario 1. (Author's elaboration).

The limited variation in NPV between Scenario 1 and Scenario 1bis is both expected and methodologically coherent. This outcome is primarily attributable to the modest scale of the public funding provided under the PNRR framework (Figure 6), which covers barely 10% of the initial construction costs. As such, its influence on the overall economic performance of the project is marginal. Moreover, when assessed across the full life cycle of the intervention, the total cost of maintenance for both the lighting fixtures and photovoltaic systems is approximately 14.5 times greater than the initial public contribution. This substantial imbalance demonstrates that long-term operational costs decisively outweigh upfront capital support, thereby diluting the financial weight of the funding in the overall investment appraisal.

It is important to clarify that, according to the traditional logic of LCC (Langdon, 2007), this type of incentive would typically not be used as the basis for constructing separate investment scenarios. In our case, however, the exercise of modelling different configurations, even in response to relatively small variations in initial funding, was considered meaningful, particularly from the perspective of public investment planning. Indeed, even marginal contributions can carry decision-making relevance when evaluated within long time horizons typical of public-sector projects, where long-term benefits are valued more than short-term returns and investment periodicity is less critical.

The small financial differential observed between Scenarios 1 and 1bis underscores this point: while economically limited in absolute terms, it remains analytically relevant within a framework that aims to support public administrations in assessing the incremental utility of funding opportunities. From this viewpoint, the methodology presented should be interpreted not as a strict LCC-based investment analysis, but rather as a flexible evaluative exercise that illustrates how even modest public contributions can be contextualised within broader reuse and enhancement strategies, especially when embedded in long-term visions of sustainability and territorial regeneration.

5.3 Enhancement Scenarios: assumptions and results comparison

The LCCA of Scenarios A, B, and C highlighted significant differences in long-term sustainability and economic impact (Figure 7).

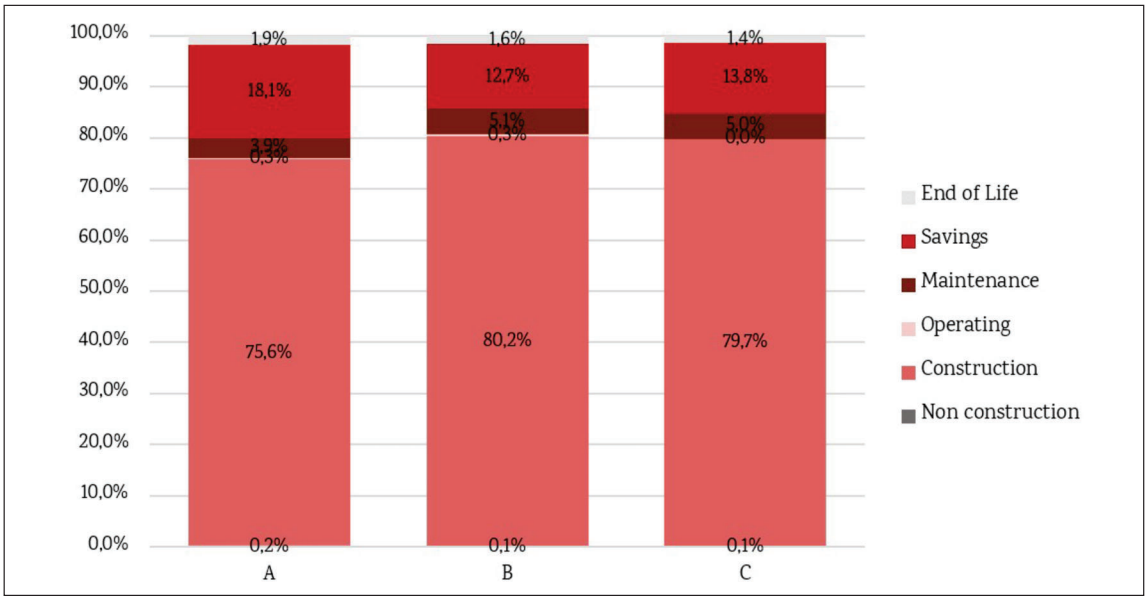


Figure 7. Total costs categories in the life cycle - Scenarios A, B, C. (Author's elaboration).

Scenario A, the most essential and cost-contained option, shows a total cost of €246,118.82 over the analysis period, with limited lighting infrastructure restricted to basic functional areas. While efficient in energy terms, it lacks environmental and cultural enhancements. Scenario B, focused on architectural enhancement and the reactivation of historical memory, incurs the highest total cost at €428,240.69, due to broader lighting coverage,including the riservette and Soldier's Ring,and increased maintenance needs. Scenario C, despite having a higher initial investment (€265,620.43), demonstrates superior performance over time thanks to its low energy demand and advanced automation systems designed to protect biodiversity. Its optimized operational strategy leads to the lowest long-term annual costs.

Therefore, Scenario C presents the most balanced solution, combining ecological sustainability with financial efficiency, and was ultimately selected as the foundation for the final Scenario C+SR by the Municipality of Sangano.

Table 3 shows the comparison between the LCCA indicators calculated for each scenario. In terms of cost-effectiveness, Scenario A is the most acceptable one due to the presence of the lower NPV (€ 617,454). This result can be explained due to the presence of a smaller number of areas and basic technical solutions in scenario A. By comparing it with scenario C, which involves the same area, it is possible to see how the advanced technical solutions for environmental protection impact the cost flows.

Table 3. Indicators comparison for Enhancement Scenarios. (Author's elaboration).

Indicator	Scenario 0 Base REC	A Business as usual	B Architectural nightscape	C Biodiversity protection	C+SR Final Scenario
DISCOUNT RATE			3%		
NPV	€ 1,296,185	€ 617,454	€ 1,486,540	€ 1,294,835	€ 1,198,829.85
DPB	5.95 years	4.18 years	6.32 years	5.79 years	2.33 years
(A)IRR	4%	4%	2.9%	3.2%	4.5%
NS (BASE - A/B/C)	-	€ 678.731	-€ 190.356	€ 1.349	€ 96,000
SIR	-	1.31	0.91	1.04	1.55

As a result of this evaluation, the Scenario C+SR was identified by the Municipality of Sangano as the most coherent and strategic option. Crucially, Scenario C+SR is also the only proposal to fully operationalise the potential of the Sangano REC, transforming the Depot into a strategic hub for clean energy generation and storage.

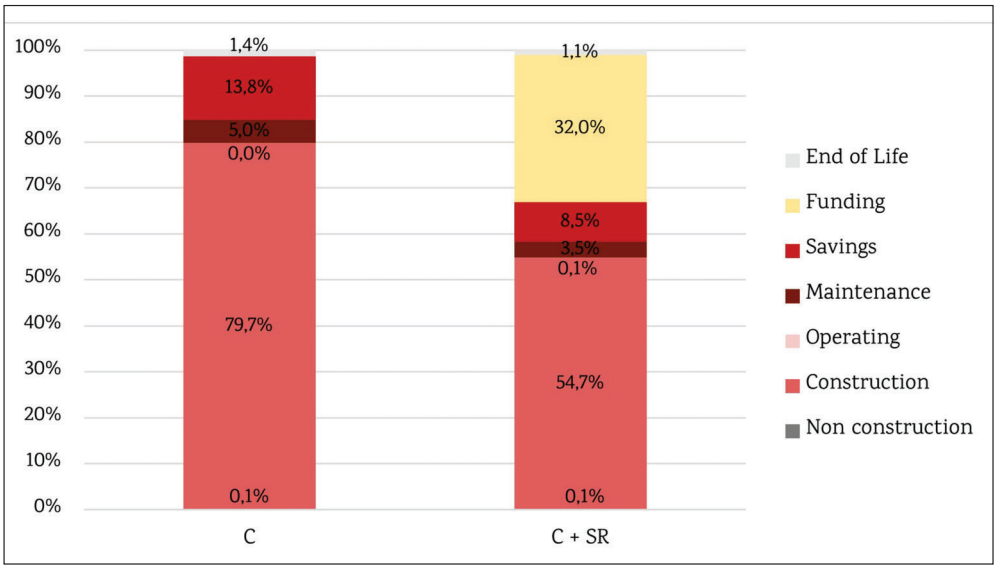


Figure 8. Construction costs comparison - Scenario C and Scenario C with Soldier's Ring. (Author's elaboration).

In financial terms, Scenario C+SR shows an NPV of €1,198,830, which is €96,006 lower than Scenario C, likely due to the influence of upfront financing (Figure 8). Despite this, Scenario C+SR offers improved financial performance, with an (A)IRR of 4.5%, 1.5 percentage points above the discount rate, and a favourable SIR of 1.55. The scenario's economic attractiveness would likely increase further if environmental and social benefits, such as biodiversity preservation and the symbolic restoration of the Soldier's Ring, were monetized. These positive externalities, especially meaningful for the Sangano community, contribute to the broader value of reactivating this historic path.

By integrating photovoltaic systems and leveraging national incentives (when applicable), the scenario achieves long-term cost reductions as shown in the LCCA, while promoting community-driven energy use. The selection of Scenario C+SR therefore signals a shift from traditional, top-down valorisation toward a systemic, participatory vision rooted in sustainability, memory, and shared governance. It demonstrates how small municipalities can act as laboratories for integrated heritage-energy planning, offering pathways that are not only technically and economically viable, but culturally transformative.

5.4 Sensitivity analysis

Introducing flexibility into the models allows for the internalisation of uncertainty within the analyses, resulting in a sensitivity analysis that assesses the impact of input variations on output values (Curto & Fregonara, 1999). This approach is fundamental to the LCCA, which relies on such sensitivity assessments to enhance the robustness of its outcomes. The LCCA analysis of the Base Scenarios (Section 5.2) also emphasises the model's sensitivity to PV panel maintenance and construction costs,factors that can notably alter scenario outcomes. Maintenance of PV systems in Scenario 1 represents the largest annual cost component (€88,930.31). Figure 9 presents the results of a sensitivity analysis conducted on the NPV of REC development, focusing on two key cost variables: the construction costs of photovoltaic (PV) panels and their ordinary maintenance

expenses. The analysis models percentage variations ranging from –15% to +15% for each parameter to assess their relative impact on long-term financial sustainability.

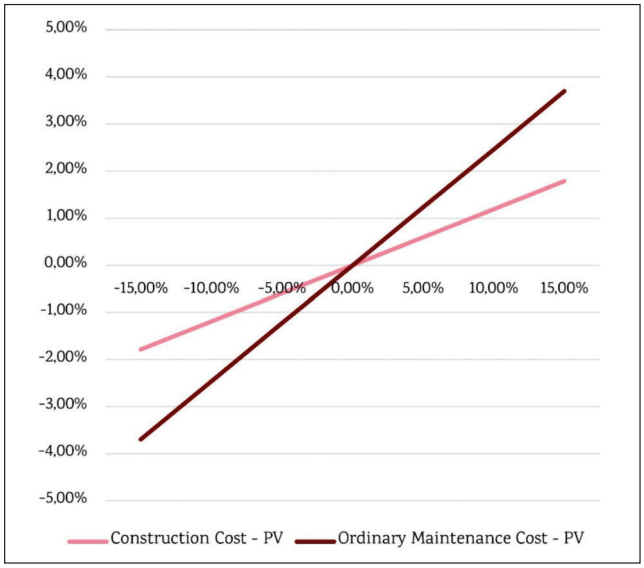


Figure 9. Construction costs comparison - Scenario C and Scenario C with Soldier's Ring. (Author's elaboration).

The light red curve, representing construction costs, shows a relatively moderate slope, indicating that fluctuations in installation costs have a limited effect on the overall NPV of the energy empowerment intervention. In contrast, the burgundy curve, related to ordinary maintenance costs, reveals a much steeper gradient. This suggests a higher sensitivity of the economic outcome to changes in maintenance expenditures: increases in these costs lead to significant reductions in NPV, while reductions result in considerable improvements. This comparison underscores the critical importance of maintenance strategies in REC-based heritage reuse projects. While initial investment remains a relevant factor, optimising operational and maintenance costs has a disproportionately stronger influence on financial performance over time. The findings advocate for policy shifts that not only support the creation of RECs but also ensure funding mechanisms for their long-term functionality and upkeep(Cirone et al., 2022; D'Alpaos & Andreolli, 2021; Dóci & Gotchev, 2016; Spasova & Braungardt, 2022). In the current Italian context, funding is mainly available for the establishment of RECs, but long-term maintenance often depends on partnerships with private companies offering leasing solutions that include technical support. This gap highlights the need for more comprehensive financial instruments dedicated to preserving system efficiency over time.

6. Discussion

The analyses conducted in this study highlights some limitations and methodological considerations that should be addressed to improve the accuracy, comprehensiveness, and realism of future analyses. A first limitation lies in the absence of time-of-use energy tariff modeling. This omission is due to the unavailability of a finalised project with clearly defined operational functions and energy usage patterns, which makes it impossible to determine real consumption scenarios. Without such data, energy exchange and financial return projections remain theoretical and may not reflect future conditions accurately.

Future developments should focus on the discount rate quantification, as recommended in recent literature (Maselli & Nesticò, 2020; Nestico' et al., 2020). These projects are exposed to a wide range of influencing factors, including the volatility of energy markets, the evolving composition and behaviour of prosumers, and broader regulatory or technological shifts.

In addition, maintenance and replacement costs should be addressed more thoroughly in future research. While technological innovation, such as the spread of half-cut cell modules, PERC panels, and thin-film technologies like CIGS, is reducing installation costs and improving performance, these improvements also influence future maintenance profiles. According to market trends (Solar Power Europe, 2024), such advancements have enhanced efficiency and accessibility, while reducing costs through economies of scale. This highlights the importance of modelling technological improvements and associated cost trends over time in a life-cycle perspective.

Studies by Fregonara, Ferrando, et al., (2018) demonstrated how uncertainty in durability and service life can be addressed through the Factor Method (FM), especially when combined with stochastic modelling. Their findings confirm that improved maintenance practices can extend the useful life of components, thereby increasing their residual value and reducing life-cycle costs. Introducing a fluctuating discount rate into LCC calculations would better reflect these expected improvements and their long-term economic effects.

Furthermore, the current evaluation monetised only the direct incentives related to REC energy production, while social and environmental benefits were not included, though they are essential to a holistic assessment. The transformation of the abandoned Ammunition Depot into a functional public park, for instance, would produce significant intangible benefits: improved community engagement, greater public accessibility, and enhanced social cohesion. On the environmental side, the use of renewable energy sources over fossil fuels would reduce emissions and minimise embodied carbon, benefits that could be economically quantified to support investment decisions (Saiu & Blečić, 2022).

Overall, this study shows that embedding economic analysis in a broader participatory and strategic planning framework enables a more integrated and realistic vision for heritage-led energy empowerment. However, it is important to emphasise that the application of LCCA in this study addresses only one portion of a broader and more complex goal. It provides insight into the technical and economic sustainability of the intervention, primarily focusing on energy and cost efficiency over time. Yet, this is only one component of a much wider framework that includes functional, managerial, and financial dynamics, particularly relevant when new uses and functions are introduced. These bring additional variables such as revenue generation, operational complexity, and community engagement, which fall outside the scope of LCC analysis.

As such, the evaluation should be understood as one step within the larger process of restoration (Dalla Costa, 2000), reuse, and enhancement, where multiple dimensions, cultural, environmental, social, and economic, must be integrated. Embedding economic analysis within the broader project vision allows for a more realistic and holistic interpretation of heritage valorisation. In this perspective, LCC becomes a decision-support tool that must be complemented by other forms of assessment to fully reflect the transformative potential of heritage-based projects.

7. Conclusion

This article investigated the intersection of architectural and landscape heritage enhancement and energy transition through the lens of RECs, drawing upon the doctoral research titled «Economic Enhancement of Architectural Heritage through RECs: Opportunities, Scenarios and Evaluation Tools»(Malavasi, 2025). Grounded in the case study of the former Ammunition Depot of Sangano, the research aimed to assess whether REC integration could catalyse the adaptive reuse of abandoned public architectural heritage, ensuring long-term economic, environmental, and social sustainability.

By applying a structured methodological approach, combining spatial analysis, stakeholder engagement, and LCCA, the study compared a set of seven alternative scenarios for public lighting retrofits within the framework of REC development. The initial comparison between Base Scenarios demonstrated that REC participation substantially improves financial viability, particularly when aligned with national incentives under the PNRR. However, it must be noted that PNRR incentives only partially address the financial challenges, as their scale is limited in relation to the total lifecycle costs of the intervention. In this case, the public contribution covered by the PNRR accounts

for less than 10% of construction costs, and is over 14 times lower than the cumulative maintenance costs associated with the lighting and photovoltaic systems over the project's lifespan. As such, while the incentive improves short-term feasibility, its overall impact on long-term economic sustainability remains marginal, reinforcing the importance of adopting a lifecycle perspective in public investment evaluations.

The second set of Enhancement Scenarios (A, B, and C) highlighted the added value of designing public lighting alternatives by adopting different energy and ecological strategies. Scenario C, focused on biodiversity protection through adaptive lighting and minimal landscape intrusion, proved the most balanced solution in terms of sustainability and operational performance. The Municipality of Sangano's final selection of the integrated Scenario C + Soldier's Ring reflects a strategic and symbolic decision, one that merges ecological transition with the reactivation of historical memory, reaffirming the dual identity of the site as both natural and cultural heritage. This decision underscores the capacity of abandoned heritage to serve not merely as a legacy to be preserved, but as an engine of public space regeneration, community engagement, and functional reintegration. In this sense, the Sangano case offers a replicable and scalable model for heritage-led energy empowerment that is particularly relevant for small municipalities and peripheral territories.

Crucially, the study demonstrates that economic assessment tools such as LCCA, when embedded in collaborative and participatory frameworks, can unlock the latent potential of abandoned assets. Through PPPs (Calabrò et al., 2021; Della Spina et al., 2022; Gabrielli et al., 2024) and cooperative governance models like RECs, municipalities can activate multi-actor networks, attract investment, reduce operational costs, and reinvest returns into community-oriented services. In doing so, architectural heritage is redefined, not as a static liability, but as a dynamic infrastructure capable of supporting ecological transition, promoting energy democracy, and reinforcing local identity.

In conclusion, this research highlights the value of integrating energy innovation with heritage management, showcasing a viable path forward for the regeneration of underutilised public assets (Manganelli & Tajani, 2014). The proposed methodological approach, combining economic analysis, participatory design, and context-sensitive energy strategies, offers a pragmatic and inclusive tool for decision-makers in heritage-rich but resource-limited areas.

Acknowledgements

The author gratefully acknowledges the in-kind contribution of the Municipality of Sangano, whose support was essential for the development of this research.

Bibliography

Aulisio A., Barbero S., Barreca A., Malavasi G. & Rolando D. (2024). From Data Collection to a Cross-Cutting Analysis Visualisation: Territorial Complexity Overview to Foster Responsible Tourism in Rural Areas. *LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, *14819*, 33–50. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65282-0_3

Baggio M., Tinterri C., Mora T.D., Righi A., Peron T. & Romagnoni P. (2017). Sustainability of a Historical Building Renovation Design through the Application of LEED® Rating System. *Energy Procedia*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.017

Banchiero T., Blečić I., Saiu, V. & Trunfio G.A. (2020). Neighbourhood park vitality potential: From Jane Jacobs's theory to evaluation model. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/su12155881

Barbaro S. & Napoli G. (2024). Towards a participatory energy transition. Critical issues and potentials of regulatory and financial instruments for Renewable Energy Communities (RECs) in Italy. *Valori e Valutazioni*, *35*, 69–95. https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20243506

Battista G., de Lieto Vollaro E., Ocłoń P. & de Lieto Vollaro R. (2022). Retrofit Analysis of a Historical Building in an Architectural Constrained Area: A Case Study in Rome, Italy. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(23). https://doi.org/10.3390/app122312305

Battisti A. (2016). Linee guida di indirizzo per l'efficienza energetica nel patrimonio culturale. *TECHNE*, *12*, 65–73. https://doi.org/10.13128/TECHNE-19336

Bielig M., Kacperski C., Kutzner T. & Klingert S. (2022). Evidence behind the narrative: Critically reviewing the social impact of energy communities in Europe. *Energy Research and Social Science*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102859

Blečić I., Carrus A.S., Muroni E., Saiu, V. & Saliu M.C. (2023). Engagement and Inclusion Experiences for Energy Communities. An Ongoing Case Study in Cagliari, Italy. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *14109 LNCS*, 513–528. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37120-2_33

Bovera T. & Lo Schiavo L. (2022). From energy communities to sector coupling:a taxonomy for regulatory experimentation in the age of the European Green Deal. *Energy Policy*, *171*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113299

Calabrò T., Della Spina L. & Randò B. (2021). New Public Management and Economic Feasibility Assessment of PPP Projects. A Case Study in Calabria. *Green Energy and Technology*, 57–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4_5

Cengiz A.E. & Yanmaz K. (2019). Preserving The Spatial Memory In Historic Buildings And Spaces And Its Contribution To The Urban Identity: A Case Study Of Çanakkale Urban Site. *Journal of Scientific Perspectives*, *3*(4). https://doi.org/10.26900/jsp.3.034

Choay T. (1992). L'allégorie du patrimoine. *La Couleur Des Idées*, 272 p.

Cirone D., Bruno R., Bevilacqua P., Perrella S. & Arcuri N. (2022). Techno-Economic Analysis of an Energy Community Based on PV and Electric Storage Systems in a Small Mountain Locality of South Italy: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(21). https://doi.org/10.3390/su142113877

Cirrincione L., Gennusa M., La Peri G., Rizzo G. & Scaccianoce G. (2020). Towards nearly zero energy and environmentally sustainable agritourisms: The effectiveness of the application of the European ecolabel brand. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(17). https://doi.org/10.3390/APP10175741

Ciulla G., Galatioto A. & Ricciu R. (2016). Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, *128*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.044

Curto R.A. & Fregonara E. (1999). Decision Tools for Investments in the Real Estate Sector with Risk and Uncertainty Elements. *Jahrbuch Fuer Regionalwissenschaft*.

Dalla Costa Mario. (2000). *Il progetto di restauro per la conservazione del costruito* (Celid, Ed.). CELID. https://www.hoepli.it/libro/il-progetto-di-restauro-per-la-conservazione-del-costruito/9788876613975.html

D'Alpaos C. & Andreolli T. (2021). Renewable energy communities: The challenge for new policy and regulatory frameworks design. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, *178 SIST*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_47

Della Spina L., Carbonara S. & Stefano D. (2022). The Financial Sustainability a Cultural Heritage Adaptive Reuse Project in Public-Private Partnership. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *482 LNNS*, 1262–1272. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_122

Department of Energy. (2014). *Life cycle cost handbook guidance for life cycle cost estimate and life cycle cost analysis.*

Directorate-General for Energy (European Commission). (2019). Clean energy for all Europeans. *Euroheat and Power*, *14*(2).

Dóci G. & Gotchev B. (2016). When energy policy meets community: Rethinking risk perceptions of renewable energy in Germany and the Netherlands. *Energy Research and Social Science*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.019

Fregonara E. (2015). *Valutazione sostenibilità progetto. Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali*. (Franco Angeli, Ed.; Franco Angeli). ITA. https://iris.polito.it/handle/11583/2625562

Fregonara E. & Ferrando D.G. (2024). Building upcycling vs. building reconstruction investment decisions: A focus on the discount rate. *Procedia Structural Integrity*, *64*, 1767–1773. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.182

Fregonara E., Ferrando D.G. & Pattono S. (2018). Economic-environmental sustainability in building

projects: Introducing risk and uncertainty in LCCE and LCCA. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/su10061901

Fregonara E., Ferrando D.G. & Tulliani J.M. (2022). Sustainable Public Procurement in the Building Construction Sector. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(18). https://doi.org/10.3390/su141811616

Fregonara E., Lo Verso V.R.M., Lisa M. & Callegari G. (2018). Retrofit scenarios and economic sustainability. A case-study in the Italian context. *ENERGY PROCEDIA*, *111C*, 245–255. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.026

Gabrielli L., Manente C., Milan M. & Ruggeri A.G. (2024). Ethical Public-Private Partnerships: A Forward-Thinking Approach to Enhancing Public Assets. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *1186 LNNS*, 501–511. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74679-6_49

Gabrielli L. & Ruggeri A.G. (2023). Sustainability and Energy Efficiency in Twentieth-Century Italian Built Heritage. *ADVANCES IN SCIENCE, TECHNOLOGY & INNOVATION*, 7–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00808-5_2

Galatioto A., Ciulla G. & Ricciu R. (2017). An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings. *Energy*, *137*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.103

Gjorgievski V.Z., Cundeva S. & Georghiou G.E. (2021). Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. In *Renewable Energy* (Vol. 169). https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078

Gremmelspacher J.M., Campamà Pizarro R., van Jaarsveld M., Davidsson H. & Johansson D. (2021). Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden. *Solar Energy*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.067

Langdon D. (2007). *Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology Final Report LCC as a contribution to sustainable construction-Final Report*. http://europa.eu.int/comm/enterprise/construction/compcom/compcom.htm

Malavasi G. (2025). *Economic Enhancement of Architectural Heritage through Renewable Energy Communities (RECs): Opportunities, Scenarios and Evaluation Tools.* [PhD Thesis, Politecnico di Torino]. https://doi.org/https://hdl.handle.net/11583/2999922

Malavasi G., Barreca A., Fregonara E. & Rolando D. (2025). Economic evaluation methodologies for Renewable Energy Communities and the architectural heritage. A literature review. *Valori e Valutazioni*, *2025*(37), 61–85. https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20253705

Manganelli B. & Tajani T. (2014). Optimised management for the development of extraordinary public properties. *Journal of Property Investment and Finance*, *32*(2), 187–201. https://doi.org/10.1108/JPIF-05-2013-0034/FULL/PDF

Maselli G. & Nesticò A. (2020). A probabilistic model for the estimation of Declining Discount Rate. Valori e valutazioni, No. 24, 181-208.

Mazzanti Massimiliano. (2003). *Metodi e strumenti di analisi per la valutazione economica del patrimonio culturale*. 245. https://books.google.com/books/about/Metodi_e_strumenti_di_analisi_per_la_val.html?hl=it&id=eUa8_CZ2LHYC

Napoli G., Bottero M., Ciulla G., Dell'Anna T., Figueira J.R. & Greco S. (2020). Supporting public decision process in buildings energy retrofitting operations: The application of a Multiple Criteria Decision Aiding model to a case study in Southern Italy. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102214. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102214

Nesticò A., D'Ambrosio G., Ghisellini P., Maselli G. & Ulgiati S. (2024). Environmental reclamation of limestone mining sites in Italy: Financial evaluation, challenges and proposals for sustainable development. *Resources Policy*, *89*. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104534

Nestico' A., Macchiaroli M. & Maselli G. (2020). An innovative risk assessment approach in projects for the enhancement of small towns. *Valori e Valutazioni*, *25*, 91–98.

Pane A. (2008). L'inserzione del nuovo nel vecchio. *Brandi e l'Architettura*, 307–325.

Pitt J. & Nolden C. (2020). Post-subsidy solar PV business models to tackle fuel poverty in multi-occupancy social housing. *Energies*, *13*(18). https://doi.org/10.3390/en13184852

Rolando D., Barreca A., Malavasi G. & Rebaudengo M. (2024, July). The Enhancement of the Alta Valsesia Territorial Potential: A Collaboration-Based Approach Between Academia and Local

Actors. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops*.

Saiu V. & Blečić I. (2022). Sustainable Development Goals (SDGs) Evaluation for Neighbourhood Planning and Design. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *482 LNNS*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_93

Solar Power Europe. (2024). *EU Market Outlook for Solar Power 2024-2028*.

Spasova D. & Braungardt S. (2022). The EU policy framework for energy communities. In *Energy Communities: Customer-Centered, Market-Driven, Welfare-Enhancing?* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91135-1.00022-5

Stankulova A., Barreca A., Rebaudengo M. & Rolando D. (2023). Emerging Trends in the Territorial and Rural Vulnerability-Vibrancy Evaluation. A Bibliometric Analysis. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *14106 LNCS*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37111-0_20

Ubelmesser L., Klingert S. & Becker C. (2022). Modelling the Success of Renewable Energy Communities. *2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and Other Affiliated Events, PerCom Workshops 2022*. https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767245

Wuebben D. & Peters, J. F. (2022). Communicating the Values and Benefits of Home Solar Prosumerism. Energies, 15(2), 596. https://doi.org/10.3390/en15020596

valori
e valutazioni
teorie ed esperienze

Società Italiana di Estimo e Valutazione

La valorizzazione del patrimonio architettonico pubblico “in attesa di riuso” attraverso le CER: l’ex Polveriera Militare di Sangano

Giorgia Malavasi[1,]

[1] Dipartimento di Architettura e Design - DAD, Politecnico di Torino, Viale Pier Andrea Mattioli, 39, 10125 Torino, Italia; giorgia.malavasi@polito.it

* autore corrispondente

Parole chiave

Patrimonio architettonico, valutazione economica, analisi del costo del ciclo di vita, scenari di illuminazione pubblica, comunità energetiche rinnovabili

Abstract

La ricerca esplora il potenziale della valutazione economica quale leva strategica per la valorizzazione del patrimonio architettonico e paesaggistico in contesti fragili, adottando una prospettiva di ciclo di vita e integrandola nei processi di rigenerazione sostenibile promossi dalle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER). Si assume che la transizione energetica rappresenti per le amministrazioni locali un’opportunità per avviare processi di governance collaborativa volti alla rivitalizzazione territoriale, in particolare nelle aree marginali.

Questo studio propone un approccio metodologico per valutare interventi di efficientamento energetico su edifici storici sottoutilizzati e siti culturali in attesa di riattivazione. Strumento centrale è la *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), impiegata come supporto decisionale per orientare politiche pubbliche economicamente sostenibili. L’approccio è stato applicato al Deposito Munizioni (ex Polveriera) di Sangano (Torino), ex sito militare di proprietà comunale e privo di tutela specifica, inserito in un contesto di fragilità territoriale e risorse limitate. Particolare attenzione è stata dedicata al riuso degli spazi pubblici e alla progettazione di scenari di illuminazione, funzionali e simbolici per la riattivazione del sito. La valutazione economica ha simulato attraverso la LCCA l’inserimento del complesso in una CER locale per verificare la capacità dei modelli di condivisione energetica di compensare i costi di un riuso adattivo, in particolare per l’illuminazione degli spazi pubblici. Il coinvolgimento diretto del Comune ha dimostrato come strumenti di analisi quali la LCCA possano sostenere decisioni multilivello e favorire la trasformazione di patrimoni in attesa in risorse strategiche per lo sviluppo locale.

1. Introduzione

La valutazione economica degli interventi di potenziamento energetico del patrimonio rappresenta una dimensione cruciale nell’avanzamento della gestione sostenibile e del riuso del patrimonio culturale. In questa prospettiva, la *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), come applicata nel presente studio, offre un quadro strutturato e rigoroso per stimare la sostenibilità finanziaria di lungo periodo degli interventi energetici nei siti di interesse culturale. Tale approccio deve tuttavia essere ricondotto entro la più ampia logica del riuso adattivo e dei progetti di valorizzazione del patrimonio, e il suo ruolo va inteso come parte integrante di un processo valutativo e progettuale complessivo.

Come sottolineato da Mazzanti (2003), la valutazione del patrimonio non può limitarsi a indicatori economico-finanziari quantitativi, ma deve includere dimensioni culturali, sociali e territoriali del valore. Pertanto, sebbene l'analisi basata su LCCA costituisca un fondamento necessario, i suoi risultati devono essere integrati in una visione olistica, capace di coniugare obiettivi tecnici, economici e culturali (Dalla Costa, 2000), per supportare la piena riattivazione e il riuso sostenibile dei beni pubblici dismessi (Della Spina et al., 2022; Fregonara et al., 2022).

I modelli tradizionali di intervento, spesso basati su finanziamenti pubblici e su logiche di conservazione statica, si rivelano sempre più inadeguati nel rispondere alla natura multidimensionale di tali patrimoni (Battisti, 2016). Ne deriva l'urgenza di approcci integrati e interdisciplinari che combinino la conservazione con innovazioni ambientali, economiche e sociali (Choay, 1992). In questo quadro, le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) si configurano come un modello di governance innovativo e sempre più rilevante (Bielig et al., 2022; Ubelmesser et al., 2022). Promosse da direttive europee e attuate mediante quadri normativi nazionali, le CER consentono a cittadini, amministrazioni locali e piccole imprese di produrre, gestire e consumare collettivamente energia rinnovabile a livello locale (Bovera & Lo Schiavo, 2022; Cirrincione et al., 2020). La loro natura cooperativa e radicata nei territori è pienamente coerente con i principi della valorizzazione del patrimonio culturale, aprendo nuove prospettive di sostenibilità di lungo periodo, resilienza economica e partecipazione civica (Direttiva UE 2018/2001).

Nel presente lavoro, il concetto di *«potenziamento energetico del patrimonio»* ossia potenziamento energetico del patrimonio[1] (Malavasi, 2025) emerge quale risposta alla convergenza interdisciplinare volta a valorizzare economicamente i beni culturali, preservandone al contempo il valore storico e la conservazione. Esso propone l'integrazione di sistemi a energia rinnovabile e misure di efficienza energetica nelle strategie di riuso dei siti patrimoniali, non solo per ridurne l'impatto ambientale, ma anche per promuovere nuovi usi sociali e modelli di governance comunitaria (Baggio et al., 2017; Gremmelspacher et al., 2021).

Nonostante il crescente interesse verso le CER come strumenti di sostenibilità e partecipazione, manca tuttora un quadro integrato per la valutazione economica degli interventi di energy empowerment nei contesti patrimoniali. Le criticità principali riguardano: l'assenza di metodologie basate sul ciclo di vita, linee guida insufficienti per valutare la fattibilità economica delle CER (Malavasi et al., 2025), e il limitato supporto metodologico alle Pubbliche Amministrazioni incaricate di gestire tali iniziative. Questo vuoto risulta particolarmente evidente nei contesti fragili o sottoutilizzati, nei quali sono necessari strumenti di supporto alle decisioni capaci di bilanciare le priorità conservative con obiettivi energetici ed economici.

L'obiettivo di questa ricerca è sviluppare e testare un approccio metodologico per la valutazione economica degli interventi di energy empowerment sul patrimonio architettonico e paesaggistico, nell'ambito dello sviluppo delle CER. Lo scopo è supportare le Pubbliche Amministrazioni nell'individuazione di scenari sostenibili e culturalmente rispettosi, mediante l'impiego della LCCA e considerando in maniera esplicita gli incentivi derivanti dalla partecipazione alle CER.

Attraverso l'applicazione a un caso reale, la ricerca intende dimostrare come gli interventi basati sulle CER possano promuovere, allo stesso tempo, la valorizzazione architettonica e la rivitalizzazione territoriale. In particolare, lo studio affronta tre domande di ricerca, che scaturiscono dalle attuali lacune metodologiche sull'integrazione tra patrimonio architettonico e CER:

- Quali strumenti e metodi possono efficacemente supportare la valutazione economica degli interventi di *energy empowerment* sul patrimonio architettonico e paesaggistico, in un'ottica di ciclo di vita?

[1] Il presente articolo trae origine dalla tesi di dottorato La Valorizzazione Economica del Patrimonio Architettonico attraverso le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER): Opportunità, Scenari e Strumenti di Valutazione (*Economic Enhancement of Architectural Heritage through Renewable Energy Communities (RECs): Opportunities, Scenarios and Evaluation Tools*), redatta da Giorgia Malavasi (2025) sotto la supervisione scientifica delle Prof.sse Elena Fregonara, Diana Rolando e Anna Pellegrino, nell'ambito del Dottorato in Beni Architettonici e Paesaggistici presso il Dipartimento di Architettura e Design (DAD) del Politecnico di Torino.

- In che modo gli interventi di *energy empowerment* all'interno del quadro delle CER incidono sulle dimensioni economiche, sociali, culturali e ambientali del patrimonio architettonico e paesaggistico?
- In quale misura, e attraverso quali modalità, le CER possono contribuire alla valorizzazione economica e alla rigenerazione sostenibile dei siti storici, garantendo al contempo la preservazione del loro valore culturale e architettonico?
- Oltre alla valutazione economica, la ricerca indaga il potenziale delle CER non solo come strumenti energetici, ma anche come motori di innovazione socio-culturale e di governance del patrimonio, in linea con gli obiettivi europei di sviluppo urbano e territoriale inclusivo, resiliente e sostenibile.

Il contributo si colloca in questo filone emergente, esplorando il ruolo delle CER nella rigenerazione del patrimonio culturale abbandonato attraverso l'analisi di un caso studio: l'ex Polveriera Militare di Sangano, situata in Piemonte. Si tratta di un'area militare dismessa di oltre 46 ettari, caratterizzata da vincoli ambientali, normativi e storici complessi, che costituisce un esempio paradigmatico di patrimonio architettonico latente "in attesa" di nuova funzione. Passata da proprietà statale a comunale nel 2000, è rimasta da allora chiusa al pubblico. L'area presenta sfide rilevanti dovute sia all'ampiezza dell'intervento sia alla perdita della sua funzione originaria, che l'ha privata di un'identità contemporanea chiara.

La ricerca prende le mosse dall'integrazione di due iniziative recenti promosse dal Comune di Sangano: da un lato, la proposta di trasformare la polveriera dismessa in un "parco etico"; dall'altro, la costituzione di una CER nell'area urbana comunale. L'intersezione tra queste due esperienze fornisce il punto di partenza per una riflessione metodologica sul ruolo delle CER nella valorizzazione sostenibile del patrimonio architettonico e paesaggistico, con particolare attenzione alla partecipazione pubblica e alla pianificazione strategica.

In questo quadro, la valutazione economica presentata nell'articolo si fonda sugli usi individuati dal Comune di Sangano e descritti nel progetto preliminare di riuso dell'area. In questa fase, l'analisi non riguarda i singoli edifici, ma costituisce un quadro esplorativo sugli scenari economici alternativi legati agli spazi pubblici, con un focus specifico sui sistemi di illuminazione.

Il caso studio riflette una problematica diffusa tra i piccoli comuni europei: come reintegrare il patrimonio dismesso nelle agende di sviluppo contemporanee senza comprometterne l'integrità culturale. In tale prospettiva, l'integrazione del sito in una CER rappresenta un quadro innovativo di riuso sostenibile, capace di collegare autosufficienza energetica, sostenibilità economica e conservazione del patrimonio.

In particolare, lo studio si propone di valutare, in ottica di ciclo di vita, la sostenibilità economica della riqualificazione dell'illuminazione pubblica negli spazi aperti e verdi del sito, componente fondamentale per consentirne l'accessibilità e l'uso pubblico futuri. Il processo valutativo è stato sviluppato in stretta collaborazione con l'Amministrazione comunale, adottando la prospettiva del settore pubblico per individuare soluzioni economicamente e operativamente fattibili. Lo studio ha quindi indagato se, e in che modo, l'adesione a una CER possa fungere da catalizzatore per sbloccare il potenziale del sito, trasformando un bene oneroso in infrastruttura pubblica resiliente, con benefici diffusi per la comunità.

2. Contesto scientifico e teorico

In risposta alla crescente urgenza dei cambiamenti climatici, della transizione energetica e della necessità di modelli di governance territoriale più sostenibili e inclusivi, la presente ricerca esplora l'intersezione tra valorizzazione del patrimonio culturale e innovazione energetica da fonti rinnovabili (Barbaro & Napoli, 2024). L'inclusione delle due sezioni seguenti – "Riuso del patrimonio culturale e potenziamento energetico" (Sezione 2.1) e "Comunità Energetiche Rinnovabili come partenariati pubblico-privati" (Sezione 2.2) – nasce dall'esigenza di contestualizzare e inquadrare i due pilastri che costituiscono il fondamento metodologico e concettuale di questo lavoro.

Da un lato, il riuso adattivo del patrimonio culturale, soprattutto nella prospettiva energetica,

è emerso come strategia cruciale per la riattivazione di beni abbandonati, in coerenza con gli obiettivi di sviluppo sostenibile. Dall'altro, le Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) rappresentano un modello emergente di governance, capace di integrare una pluralità di attori (autorità pubbliche, soggetti privati e comunità locali) in quadri cooperativi che promuovono autosufficienza energetica, resilienza locale e partecipazione inclusiva.

In questo senso, le CER possono essere interpretate come un'evoluzione contemporanea dei Partenariati Pubblico-Privati (PPP), definiti come "accordi collaborativi tra autorità pubbliche e soggetti privati finalizzati al finanziamento, progettazione, realizzazione e gestione di progetti o servizi tradizionalmente forniti dal settore pubblico. Attraverso i PPP, il settore pubblico può beneficiare di risorse, competenze ed efficienza del privato, mentre quest'ultimo assume parte dei rischi e delle responsabilità in cambio di un potenziale ritorno" (Calabrò et al., 2021).

Tale struttura collaborativa, arricchita da un ulteriore pilastro – il ruolo attivo dei cittadini e delle comunità – trasforma le CER in Partenariati Pubblico-Privato-Comunitari (PPCP), configurazioni cooperative che coinvolgono enti pubblici, attori privati e comunità locali nella pianificazione, finanziamento e gestione congiunta di progetti o servizi. Diversamente dai PPP tradizionali, i PPCP integrano esplicitamente la partecipazione attiva delle comunità, riconoscendole come portatrici di interesse e beneficiarie, con l'obiettivo di garantire inclusività, legittimazione sociale e sostenibilità di lungo periodo (Della Spina et al., 2022; Gabrielli et al., 2024).

In questo quadro, le CER offrono un potenziale significativo per l'attivazione e la rifunzionalizzazione del patrimonio, grazie a processi di governance condivisa, sostenibilità di lungo periodo e redistribuzione collettiva dei benefici.

I due domini – riuso del patrimonio e comunità energetiche – sebbene storicamente trattati separatamente, stanno convergendo nella ricerca e nella pratica contemporanea, soprattutto nelle agende politiche europee (Directorate-General for Energy, European Commission, 2019) e negli strumenti di finanziamento comunitari. La loro integrazione consente di elaborare un nuovo quadro interpretativo e operativo per valorizzare il patrimonio attraverso la transizione energetica, e al tempo stesso permette alle CER di radicarsi in narrazioni territoriali significative, rafforzando identità culturale e coesione comunitaria.

2.1 Riuso del patrimonio culturale e potenziamento energetico

Negli ultimi anni, la gestione del patrimonio culturale si è progressivamente spostata da modelli tradizionali, centrati sulla conservazione statica, verso approcci più dinamici e funzionali, fondati sul riuso adattivo e sulla sostenibilità (Battista et al., 2022). Questo cambiamento paradigmatico si allinea con la crescente consapevolezza delle dimensioni ambientali, sociali ed economiche del patrimonio, in particolare rispetto alle sfide poste dai cambiamenti climatici e dalla transizione energetica.

In tale contesto, i beni culturali – soprattutto quelli in stato di abbandono o degrado – vengono sempre più interpretati come nodi potenziali di sperimentazione nella rigenerazione circolare, in grado di combinare obiettivi conservativi con strategie a basse emissioni di carbonio (Ciulla et al., 2016; Galatioto et al., 2017; Napoli et al., 2020).

Le "Linee guida per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale – Architettura, centri e nuclei storici" (MiBACT, 2015) forniscono indicazioni per valutare e migliorare le prestazioni energetiche del patrimonio culturale vincolato o tutelato, in relazione alle normative italiane sul risparmio energetico e sull'efficienza edilizia. L'obiettivo principale è offrire strumenti operativi sia ai professionisti che al personale del Ministero, oltre a criteri e metodi per amministrazioni locali e organismi responsabili della tutela del patrimonio.

In questo senso, l'implementazione di sistemi a energia rinnovabile deve essere attentamente valutata per garantire una convivenza armonica (Pane, 2008) tra interventi sostenibili e conservazione del patrimonio architettonico, adottando soluzioni progettuali e ingegneristiche innovative e mirate (Baggio et al., 2017; Gremmelspacher et al., 2021).

Il patrimonio architettonico – in particolare i siti abbandonati o sottofinanziati – rappresenta

un'opportunità rilevante per l'integrazione nelle CER. Tali edifici, spesso trascurati a causa di carenze di risorse pubbliche, possono essere rifunzionalizzati come hub energetici, spazi comunitari o infrastrutture per la produzione di energia rinnovabile, consentendone al contempo la conservazione e la reinvenzione funzionale.

Questa integrazione non solo sostiene la transizione ecologica, ma rafforza anche l'identità locale e la partecipazione comunitaria. In questo senso, le CER agiscono come catalizzatori di continuità culturale, in stretta coerenza con il concetto di "comunità patrimoniali" definito dalla Convenzione di Faro (2015): gruppi di individui che attribuiscono valore al patrimonio culturale e si impegnano a preservarlo attraverso azioni collettive di interesse pubblico.

Sia le CER sia le comunità patrimoniali condividono un approccio dal basso e partecipativo, che rende le CER uno strumento potente per coniugare sostenibilità e valorizzazione culturale.

2.2 Comunità Energetiche Rinnovabili come partenariati pubblico-privati

Le CER si sono affermate come strumenti innovativi di governance energetica locale, in grado di consentire la produzione, la gestione e il consumo collettivo di energia da fonti rinnovabili. Radicate nei principi di giustizia ambientale, decentralizzazione e cittadinanza attiva, le CER sono regolate a livello europeo dalla Direttiva (UE) 2018/2001 e recepite in Italia attraverso il Decreto Legislativo 199/2021.

Queste entità sono costituite da cittadini, piccole imprese e autorità pubbliche che cooperano per condividere i benefici energetici all'interno di un'area geografica definita, riducendo così la dipendenza dall'approvvigionamento esterno e favorendo lo sviluppo locale. La Commissione Europea ha riconosciuto il ruolo delle CER attraverso la revisione della Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici (Direttiva UE 2024/1275), sottolineando come esse possano "responsabilizzare e coinvolgere i consumatori e permettere a determinati gruppi di utenti domestici, inclusi quelli in aree rurali e remote, di partecipare a progetti di efficienza energetica e ad interventi che possano combinare azioni con investimenti nelle energie rinnovabili" (UE/2024/1275).

In questa prospettiva, le CER offrono opportunità significative per migliorare l'efficienza energetica, la sostenibilità e la qualità estetica degli spazi pubblici e privati.

Oltre alle funzioni tecniche ed economiche, le CER si configurano come abilitatori di partenariati pubblico-privato-comunitari (PPCP) e possono inoltre essere studiate in relazione al dibattito sugli Appalti Pubblici Sostenibili (*Sustainable Public Procurement*) (Fregonara et al., 2022). La loro struttura cooperativa consente configurazioni flessibili di attori e la redistribuzione dei benefici energetici tra diversi soggetti, incluse amministrazioni comunali, enti di tutela del patrimonio e residenti.

In contesti patrimoniali, le CER offrono un'opportunità inedita per trasformare siti sottoutilizzati in infrastrutture energetiche attive, garantendo al tempo stesso la partecipazione inclusiva. Inoltre, in Italia, programmi nazionali di incentivazione – come quelli previsti dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) – mettono a disposizione risorse significative per lo sviluppo delle CER nei piccoli comuni, rafforzandone la fattibilità e la replicabilità.

In questa prospettiva, le CER rappresentano un percorso promettente per allineare la gestione del patrimonio culturale agli obiettivi più ampi di transizione ecologica e governance territoriale cooperativa (Gabrielli et al., 2024).

Oggi, le CER sono riconosciute come motori di inclusione sociale, democrazia e benessere (Bielig et al., 2022; Gjorgievski et al., 2021; Pitt & Nolden, 2020). I centri comunitari locali possono compensare i propri consumi energetici attraverso le CER, promuovendo la responsabilità ambientale nella collettività. Le città possono investire nelle CER per garantire che l'energia destinata all'illuminazione e ai servizi dei parchi provenga da fonti rinnovabili, rafforzando un'immagine ecologica (Banchiero et al., 2020; Blečić et al., 2023; Mazzarella, 2015).

In questo modo, le CER contribuiscono non solo alla resilienza energetica – promuovendo la produzione decentrata e rinnovabile – ma anche alla valorizzazione dell'identità locale e del patrimonio (Cengiz & Yanmaz, 2019; Gabrielli & Ruggeri, 2023). Attivando beni sottoutilizzati, favorendo

la partecipazione delle comunità alla conservazione del patrimonio e incentivando forme di governance inclusiva, esse rafforzano il tessuto culturale e territoriale delle aree in cui operano (Gjorgievski et al., 2021).

Il loro modello cooperativo e orientato al futuro sostiene non solo la sostenibilità ambientale, ma anche la coesione sociale e la continuità culturale, offrendo un approccio olistico alla rigenerazione che integra innovazione energetica e valori locali. In questo senso, le CER hanno il potenziale di divenire strumenti strategici per ripensare il ruolo delle comunità locali nella transizione ecologica, in particolare nei contesti rurali (Stankulova et al., 2023) e ricchi di patrimonio, dove le opportunità di sviluppo risultano spesso limitate.

3. Approccio metodologico

3.1 Valutazione economica degli interventi di potenziamento energetico sul patrimonio architettonico e paesaggistico

La presente ricerca propone un approccio metodologico sviluppato per supportare le Pubbliche Amministrazioni nei processi decisionali, al fine di individuare e valutare interventi di energy empowerment sul patrimonio architettonico e paesaggistico nell'ambito delle Comunità Energetiche Rinnovabili (CER) (Malavasi, 2025).

La valutazione economica del potenziamento energetico del patrimonio si fonda sulla *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA), utilizzata come strumento di supporto alle decisioni per confrontare scenari alternativi di intervento in una prospettiva di ciclo di vita. Questo consente di considerare le implicazioni economiche di lungo periodo relative alla gestione, alla manutenzione e alla fase di dismissione delle soluzioni di efficientamento energetico.

Il processo decisionale è basato su un coinvolgimento strutturato delle Pubbliche Amministrazioni (Aulisio et al., 2024; Rolando et al., 2024), attivamente impegnate in tutte le fasi valutative, così da garantire la fattibilità istituzionale e la condivisione dei risultati.

Per raggiungere tale obiettivo, l'approccio metodologico è articolato in sette fasi, progettate per supportare analisi di prefattibilità degli interventi di potenziamento energetico del patrimonio. Esso si concentra sulle fasi iniziali del ciclo di vita di un progetto (definite dalla norma ISO 15686-5:2008), ovvero Briefing, Planning e Design, integrando aspetti di governance, durabilità degli asset nel tempo e sostenibilità finanziaria (Fregonara, 2015). Le fasi successive (*Construction, Operation and Maintenance, End-of-Life/Disposal*) sono escluse dall'attuale quadro metodologico, poiché l'obiettivo è offrire alle Pubbliche Amministrazioni strumenti di valutazione preliminare e di decisione strategica prima della fase attuativa.

In questo contesto, l'adozione della LCCA consente di quantificare i costi di breve e lungo periodo associati a opzioni progettuali alternative, fornendo una prospettiva complessiva per decisioni pubbliche più informate (Fregonara et al., 2022).

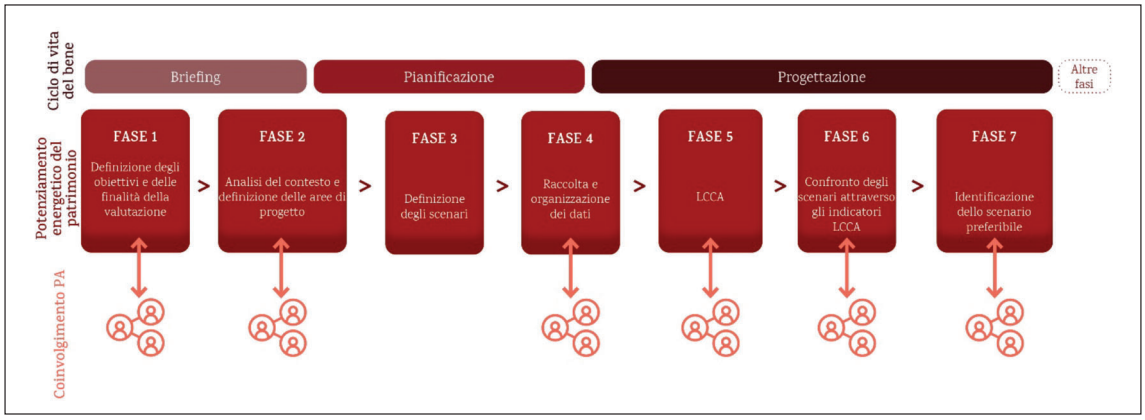


Figura 1. Approccio metodologico della ricerca. (Adattato da Malavasi, 2025).

Il flusso metodologico (Figura 1) prende avvio con la definizione dello scopo e degli obiettivi della valutazione degli interventi di energy empowerment nel contesto dello sviluppo delle CER (Fase 1), da condividere con le amministrazioni locali, proprietarie delle aree di intervento, così da rispondere ai bisogni delle comunità.

La seconda fase prevede l'analisi del contesto territoriale del bene, la definizione delle aree progettuali e delle possibili tipologie di intervento.

Nella Fase 3 vengono definiti scenari alternativi, così da disporre di un ventaglio completo di opzioni e consentire le operazioni successive di raccolta ed elaborazione dei dati. Tali scenari possono differire per caratteristiche (es. beni, spazi pubblici, fonti rinnovabili) al fine di costruire un set coerente di alternative.

La Fase 4 riguarda la raccolta, l'organizzazione e l'armonizzazione dei dati, passaggio cruciale per disporre di un insieme affidabile di informazioni economiche ed energetiche, provenienti da fonti eterogenee. Questa fase include:

- dati economici (costi di investimento, gestione e manutenzione, tariffe energetiche, incentivi disponibili);
- dati energetici (profili di domanda, consumi attuali, indicatori di prestazione energetica, potenziale di produzione da rinnovabili come irraggiamento solare e rendimento di impianti fotovoltaici).

Le fonti di tali dati comprendono relazioni tecniche, banche dati comunali, audit energetici, programmi di incentivazione e rilievi in sito, successivamente armonizzati per garantire coerenza tra scale temporali, spaziali e disciplinari.

Una volta raccolti i dati, la Fase 5 consiste nell'applicazione della LCCA per la stima dei costi totali lungo il periodo di analisi, confrontando scenari progettuali differenti.

La Fase 6 prevede il confronto dei risultati attraverso indicatori LCCA, mentre la Fase 7 si conclude con l'individuazione dello scenario preferibile, considerando sia gli esiti quantitativi sia la prospettiva delle amministrazioni pubbliche.

3.2 *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA)

L'approccio metodologico adottato si fonda sulla metodologia LCC delineata dalla norma ISO 15686-5:2008 e dalla sua versione aggiornata ISO 15686-5:2017, una tecnica comparativa concepita per supportare le decisioni progettuali mediante la valutazione dei costi totali lungo l'intero ciclo di vita.

Questa norma, relativa alla pianificazione della vita utile di edifici e infrastrutture costruite, formalizza la struttura e l'applicazione della LCCA nel settore delle costruzioni. Essa guida l'identificazione e il calcolo di tutte le categorie di costo (CAPEX, OPEX, sostituzioni, fine vita), permettendo un confronto coerente tra opzioni progettuali sostenibili dal punto di vista economico.

L'obiettivo centrale della LCCA è fornire una base razionale per selezionare tra alternative progettuali o di intervento, soprattutto quando i costi di gestione, manutenzione e sostituzione differiscono in maniera significativa. In questo studio, la LCCA è stata applicata per analizzare strategie alternative di energy empowerment e illuminazione di un sito patrimoniale dismesso, nel quadro di differenti configurazioni di CER e ipotesi progettuali.

Storicamente radicata nelle pratiche di procurement del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti negli anni Sessanta e Settanta, la LCCA ha acquisito rilevanza in Europa – in particolare in Francia e nel Regno Unito – a seguito della crisi petrolifera del 1973 (Goh & Sun, 2015). La sua applicazione nei contesti di pianificazione energetica e patrimoniale è oggi sempre più significativa, in risposta alla domanda crescente di trasparenza dei costi e sostenibilità di lungo periodo.

La LCCA viene oggi riconosciuta come uno strumento di primaria importanza per la valutazione degli interventi di energy empowerment e delle strategie di sviluppo sostenibile. Essa include tutte le componenti di costo (pianificazione, acquisizione, gestione, manutenzione, dismissione), considerando anche il valore residuo degli elementi (Department of Energy, 2014; Langdon, 2007; Fregonara, 2015).

Per mantenere chiarezza analitica, vengono inclusi soltanto i costi rilevanti che differiscono tra scenari, escludendo le spese costanti.

Il calcolo del Costo Globale (CG) è definito dalla norma EN 15459:2007 (poi aggiornata in EN 15459-1:2017), che stabilisce le modalità di valutazione economica dei sistemi energetici negli edifici, esprimendo il C_G come somma dei costi iniziali di investimento, dei costi annui (gestione, energia, manutenzione, sostituzioni), dei tassi di sconto e del valore residuo alla fine del periodo di calcolo.

Tale calcolo può essere sintetizzato come (Eq. 1):

$$C_G(\tau) = C_I + \sum_{i=1}^{\tau} \left((C_{a,i}(j) \cdot R_d(i) \right) - V_{f,\tau}(j) \quad (1)$$

dove $C_G(\tau)$ è il costo globale (riferito all'anno iniziale τ_0); C_I rappresenta i costi iniziali di investimento; ($C_{a,i}(j)$ indica il costo annuo, sostenuto nell'anno i per il componente j, comprensivo dei costi di esercizio annui (costi energetici, operativi e di manutenzione) e dei costi periodici di sostituzione; $R_d(i)$ è il tasso di sconto applicato nell'anno i; $V_{(f,\tau)}(j)$ corrisponde infine al valore residuo del componente j alla conclusione del periodo di calcolo, riportato all'anno iniziale.

La LCCA è quindi definita come un metodo sistematico per stimare il costo totale di possesso di un bene lungo la sua vita utile, consentendo un confronto dettagliato tra alternative progettuali o di intervento.

In ambito edilizio, tale calcolo può essere sintetizzato come (Eq. 2) (Fregonara, Lo Verso, et al., 2018):

$$LCC = C_i + \sum_{t=0}^{N} \frac{C_g + C_m}{(1+r)^t} \pm V_r \left(\frac{1}{(1+r)^N} \right) \quad (1)$$

In cui il *Life Cycle Cost* (*LCC*) è costituito dai costi di investimento (C_i), dai costi di gestione (C_g) e dai costi di manutenzione (C_m); r rappresenta il tasso di sconto e N il numero di anni considerati nel periodo di analisi; infine, V_r indica il valore residuo dell'edificio: se V_r è positivo, l'edificio mantiene un valore residuo, mentre, se è negativo, esso deve essere dismesso.

La LCCA è definita come un metodo sistematico per stimare il costo totale di possesso lungo l'intero ciclo di vita di un bene, consentendo un confronto dettagliato tra differenti alternative progettuali o di intervento. In questo studio, la LCCA è impiegata per supportare i processi decisionali relativi agli scenari di *energy empowerment*, in particolare nel contesto delle CER, fornendo una stima strutturata degli investimenti iniziali, delle spese operative e dei valori residui associati ai sistemi di illuminazione, agli impianti fotovoltaici e alle infrastrutture correlate.

3.2.1 Relevant costs for RECs

La fase di raccolta dei dati è allineata con le indicazioni fornite dalla norma ISO 15686-5:2017, che sottolinea l'importanza di individuare input affidabili per l'LCC, inclusi i costi in conto capitale, le spese operative, i cicli di sostituzione, i tassi di sconto e gli eventuali valori residui o incentivi (Langdon, 2007). Questo passaggio è essenziale per garantire coerenza e comparabilità tra scenari progettuali alternativi.

Con riferimento alle CER, la LCCA integra gli incentivi economici derivanti dalla partecipazione alla comunità, inclusi gli incentivi del Gestore dei Servizi Energetici (GSE) e i ricavi da autoconsumo e vendita di energia. I ricavi delle CER sono trattati come "costi negativi" all'interno del quadro della LCCA, riducendo così il costo globale dell'intervento. In altre parole, tutti i flussi finanziari in entrata, siano essi derivanti dal risparmio energetico prodotto dall'autoconsumo, sia dagli incentivi legati all'immissione in rete dell'energia in eccesso, sono considerati con segno negativo, poiché compensano direttamente le spese operative o contribuiscono alla generazione di ricavi. Questo trattamento inclusivo di costi e benefici assicura una stima più accurata dell'onere economico complessivo lungo l'intero ciclo di vita del sistema e supporta l'individuazione di strategie capaci di generare valore di lungo periodo per la Pubblica Amministrazione.

La LCCA porta a una stima dei costi distribuita in sei distinte categorie:

- Non-costruzione/*Non-Construction* – comprendente l'attivazione dei contratti energetici e le imposte associate alla CER.

- Costruzione/*Construction* – comprendente i costi di costruzione per le aree designate, inclusi pannelli fotovoltaici (PV) e sistemi di accumulo a batteria.
- Operativi/*Operating* – riguardante i consumi energetici compensati dalla produzione dei pannelli fotovoltaici.
- Incentivi/*Incentives* – comprendente i benefici della CER, quali il ritiro dedicato dalla rete, i rimborsi per i costi non utilizzati e gli incentivi provenienti da enti governativi.
- Manutenzione/*Maintenance* – comprendente le attività di manutenzione ordinaria e straordinaria.
- Fine vita/*End of Life* – comprendente lo smantellamento e lo smaltimento dei pannelli fotovoltaici e delle batterie.

Il processo metodologico prevede una sequenza strutturata: la preparazione dei dataset di input (energetici, economici, spaziali), la formulazione di una struttura di scomposizione dei costi (*cost breakdown structure*), e la definizione dei parametri analitici, quali l'orizzonte temporale e i tassi di sconto. Per i progetti del settore pubblico relativi all'energia, sono comunemente raccomandati tassi di sconto compresi tra il 3% e il 5%, al fine di bilanciare prudenza fiscale ed equità intergenerazionale (Fregonara & Ferrando, 2024; Maselli & Nesticò N.d.; Nesticò et al., 2024). In questo studio è stato adottato un tasso del 3%, corrispondente al limite inferiore di tale intervallo, per tenere conto dell'orizzonte di lungo periodo e della natura pubblica dell'investimento, in cui i benefici sociali legati all'efficienza energetica e alla valorizzazione del patrimonio si estendono attraverso le generazioni. Tale scelta è inoltre coerente con il principio di precauzione, poiché mira a evitare una sottovalutazione dei risparmi e dei benefici futuri in contesti caratterizzati al contempo da rilevanza culturale e da obiettivi di sostenibilità.

Il tasso di sconto finanziario viene applicato a tutte le voci di costo future, ad eccezione dei costi di acquisizione sostenuti al tempo zero, al fine di catturare il valore temporale del denaro e riflettere le dinamiche inflattive.

Inoltre, particolare attenzione è rivolta ai costi di esercizio e manutenzione, in particolare per i sistemi fotovoltaici, poiché l'analisi di sensitività (Sezione 5.4) ha dimostrato il loro impatto sproporzionato sugli esiti in termini di Valore Attuale Netto (*Net Present Value*, NPV). Ne consegue che una stima accurata di tali valori risulta essenziale per l'individuazione dello scenario preferibile.

4. Caso Studio: l'ex Polveriera Militare di Sangano

L'ex Polveriera Militare di Sangano, situata nei pressi del Monte Pietraborga tra i comuni di Sangano (nel Nord Italia), è un bene militare dismesso che si estende per circa 462.000 m² (Figura 2). Originariamente scelto dall'Esercito Italiano per la sua posizione strategica, elevata e isolata, il sito è oggi di proprietà pubblica e comprende 42 edifici, tra cui depositi di munizioni, garitte e strutture di servizio.

L'area è inoltre caratterizzata da una fitta rete di strade pubbliche interne e spazi verdi, tra cui l'"Anello del Soldato", un percorso perimetrale un tempo utilizzato dalle sentinelle, che rimane un segno tangibile nella memoria della comunità locale.

Attualmente il sito è in gran parte ricoperto da vegetazione spontanea e inaccessibile, sebbene la sua infrastruttura connettiva risulti in larga misura integra. La Polveriera è sottoposta a molteplici regimi di tutela normativa ed è designata come area naturale protetta nel Piano Paesaggistico del Piemonte a causa della sua estesa copertura forestale. Inoltre, è soggetta a vincoli idrogeologici e geomorfologici che limitano le possibilità di sviluppo. Rientra anche in una forma preliminare di tutela culturale, richiedendo una verifica formale da parte della Soprintendenza. I piani urbanistici la destinano a usi pubblici e a infrastrutture verdi, sebbene la frammentazione normativa e le sensibilità ambientali costituiscano fattori di complessità per una futura rigenerazione. Nonostante ciò, il sito presenta un forte potenziale di trasformazione in uno spazio di valore pubblico nel suo contesto naturale e storico.

L'attuale stato dell'ex Polveriera Militare di Sangano riflette oltre vent'anni di abbandono, durante i quali la natura ha progressivamente riconquistato gran parte dell'area. Il tessuto connettivo

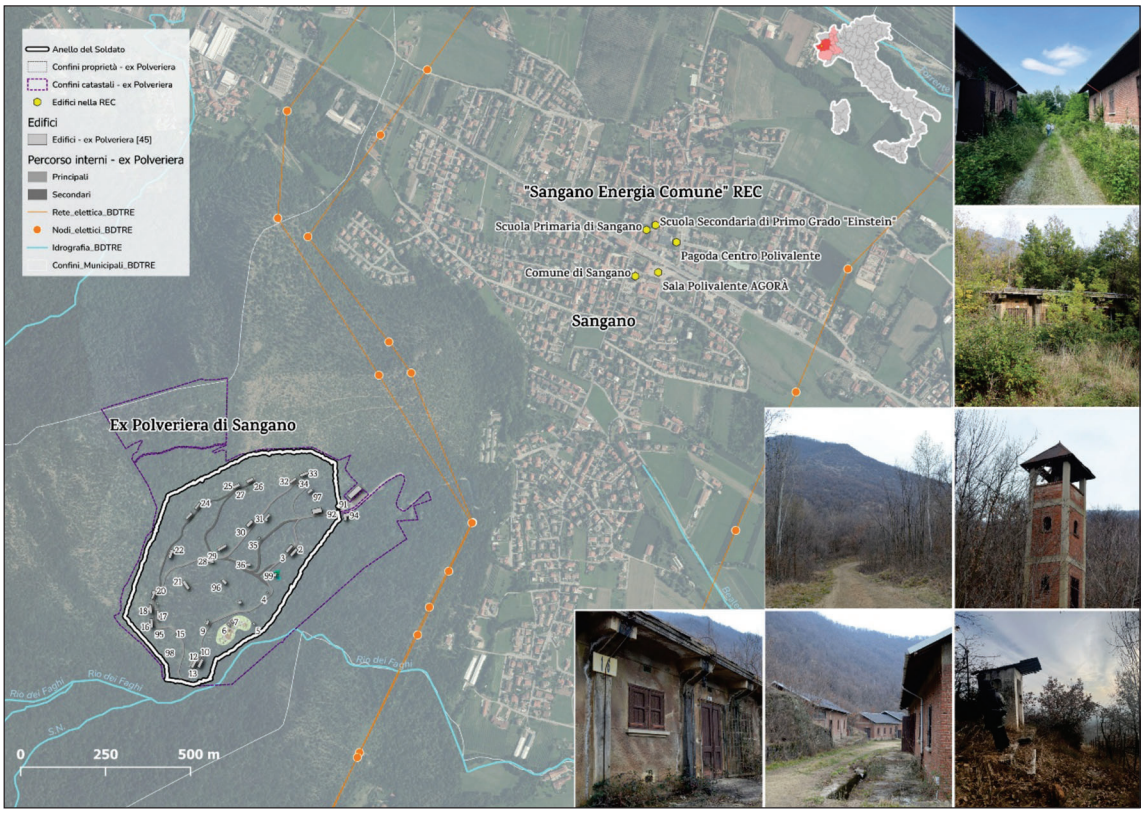


Figura 2. L'ex Polveriera Militare, inquadramento territoriale (Elaborazione dell'autrice).

del sito, costituito da strade e spazi verdi, è oggi ricoperto da rovi e arbusti, rendendo inaccessibili alcune aree settentrionali e periferiche e celando lo stato di diversi edifici. Sebbene l'immagine di una natura che riprende possesso dello spazio possa apparire suggestiva, essa nasconde problematiche ecologiche tipiche di questi contesti: gli ecosistemi spontanei che si formano sono infatti spesso dominati da specie pioniere invasive, con conseguente riduzione della biodiversità.

I 42 edifici, detti «riservette», disseminati nell'area mostrano diversi livelli di degrado. Molti presentano danni significativi alle finiture esterne, mentre il deterioramento strutturale – soprattutto nelle strutture in cemento armato – è stato aggravato dalle infiltrazioni d'acqua dovute al crollo delle coperture. Gli edifici in muratura si trovano in condizioni leggermente migliori, ma restano comunque a rischio per via dell'elevata umidità e della costante esposizione ambientale. La vegetazione densa ha introdotto ulteriori criticità, tra cui infiltrazioni radicali, colonizzazione biologica, accumulo di detriti e presenza di infestanti. Senza un intervento tempestivo, il degrado è destinato ad accelerare. Pertanto, qualsiasi futura operazione di restauro dovrà prioritariamente concentrarsi sul ripristino delle coperture, sul consolidamento strutturale e su azioni mirate di controllo della vegetazione, volte a prevenire un ulteriore deterioramento.

4.1 Spazi pubblici

La riqualificazione dell'ex Polveriera Militare di Sangano prevede una serie di interventi sugli spazi pubblici, finalizzati a identificarne nuovi usi collettivi. Questi interventi hanno avuto avvio con uno studio di fattibilità nel 2022, sostenuto da processi partecipativi e da specifici finanziamenti.

Gli spazi pubblici sono stati organizzati in cinque aree principali (Figura 3):

- percorsi principali (circolazione veicolare e pedonale),
- percorsi secondari (itinerari pedonali e ciclabili),

- area parcheggio (in prossimità dell’ingresso, su superficie esistente),
- anfiteatro (per spettacoli ed eventi),
- area giochi (per attività diurne e fruibilità serale).



Figura 3. Aree di progetto (spazi pubblici) nell'ex Polveriera Militare (Elaborazione dell'autrice).

Un elemento chiave dell’intervento è rappresentato dall’Anello del Soldato, un percorso circolare storico, originariamente destinato alla sorveglianza, oggi riprogettato per l’uso pubblico con parapetti sicuri, punti panoramici e un’illuminazione paesaggistica discreta, conforme alle normative sull’inquinamento luminoso e sulla tutela della biodiversità.

Queste aree sono state selezionate congiuntamente al Comune di Sangano, con l’obiettivo di garantire accessibilità, sicurezza, efficienza energetica e valorizzazione identitaria del sito. È stato quindi sviluppato un progetto di illuminazione inteso non solo come infrastruttura funzionale (sulla base del quadro di requisiti elaborato durante la ricerca, Malavasi, 2025), ma anche come input per la valutazione economica tramite LCC (Sezione 5), in coerenza con l’obiettivo più ampio del Comune di trasformare l’area in un “Parco ETICAmente”, centrato sulla sostenibilità, la cultura e il coinvolgimento dei cittadini.

5. Risultati

L’approccio metodologico proposto (Sezione 3) è stato applicato all’ex Polveriera Militare di Sangano per valutare la fattibilità di interventi di energy empowerment dell’illuminazione pubblica, intesi come strategia per la riattivazione del sito militare dismesso, oggi di proprietà pubblica e privo di risorse comunali sufficienti per una riqualificazione complessiva.

L’analisi si è concentrata sulla valutazione economica tramite LCCA, applicata a differenti scenari nell’ambito dello sviluppo della CER locale di Sangano, su un arco temporale di 30 anni. I dati di costo sono stati ricavati da un computo metrico estimativo degli interventi necessari per la ri-

qualificazione dell'impianto di illuminazione pubblica (inclusi corpi illuminanti, rete elettrica e nodi elettrici), nonché da tutte le spese connesse all'attivazione della CER, quali la stipula dei contratti, l'approvvigionamento e l'installazione di pannelli fotovoltaici e batterie di accumulo.

Come fonti per i prezzi parametrici sono stati utilizzati il Prezzario DEI Urbanizzazione, Infrastrutture, Ambiente (2023) e il Prezzario DEI Restauro, Risanamento, Manutenzione (2023). È stato necessario ricorrere a prezzi parametrici poiché la progettazione esecutiva degli spazi non è ancora stata sviluppata. Questa operazione rappresenta dunque una stima preliminare.

Nelle sezioni seguenti, l'analisi è articolata in passaggi sequenziali: si parte dalla definizione degli scenari (Sezione 5.1), per poi proseguire con la valutazione economica degli Scenari Base (Sezione 5.2) e degli Scenari di Valorizzazione (Sezione 5.3), fino a concludere con un'analisi di sensitività (Sezione 5.4), volta a verificare la robustezza del modello proposto in condizioni economiche e tecniche variabili.

5.1 Definizione degli scenari

La LCCA è stata articolata in due fasi (Figura 4): la prima (Scenari Base) ha valutato la fattibilità dell'impiego dell'energia prodotta dalla CER per l'infrastruttura di illuminazione di base; la seconda (Scenari di Valorizzazione) ha confrontato differenti alternative di progettazione illuminotecnica al fine di individuare la soluzione più idonea per la riattivazione degli spazi pubblici del sito.

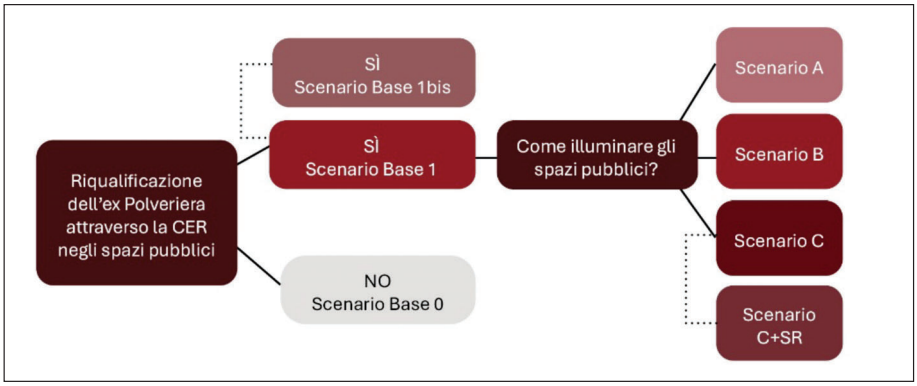


Figura 4. Scenari della LCCA nella presente ricerca (Adattato da Malavasi,2025).

Riqualificazione dell'ex Polveriera Militare di Sangano attraverso la CER negli spazi

Lo Scenario 0 rappresenta la condizione di riferimento, in cui l'ammodernamento dell'illuminazione viene realizzato senza ricorrere alla CER di Sangano. Include tutte le componenti di costo: attivazione dei contratti, costruzione della rete, installazione degli apparecchi, consumo annuo di energia, manutenzione e dismissione a fine vita, basati su un approvvigionamento energetico convenzionale.

Lo Scenario 1 introduce la CER di Sangano nel quadro valutativo, applicando le stesse ipotesi tecniche dello Scenario 0, ma integrando i benefici economici derivanti dalla produzione locale di energia e dall'autoconsumo. In questo caso, le riduzioni di costo sono ottenute attraverso l'uso condiviso dell'energia nella CER, minori spese operative e la vendita delle eccedenze energetiche in rete secondo il regime nazionale del "Ritiro Dedicato". Inoltre, questo scenario comprende l'installazione di pannelli fotovoltaici (PV) e di sistemi di accumulo a batteria, con specifiche categorie di costo per costruzione, manutenzione ordinaria e straordinaria, e incentivi, in particolare il contributo in conto capitale previsto dal PNRR, che compensa fino al 40% dell'investimento sull'impianto rinnovabile.

Lo Scenario 1bis replica lo Scenario 1, ma esclude gli incentivi finanziari del PNRR, consentendo così una proiezione più realistica della sostenibilità di lungo termine del sistema una volta esauriti i finanziamenti transitori. Questa distinzione rende lo Scenario 1bis cruciale per la valutazione della fattibilità futura in condizioni economiche standard.

La valutazione comparativa dei tre scenari (Scenario 0 senza CER; Scenario 1 con CER e bonus PNRR; Scenario 1bis con CER ma senza bonus PNRR) permette di comprendere in modo sfumato come differenti configurazioni di *energy empowerment*, strutture di incentivazione e modelli di proprietà incidano sulla performance economica complessiva e sul grado di allineamento alle politiche nel riuso adattivo dei siti storici.

Come illuminare gli spazi pubblici?

Sono stati inoltre sviluppati tre Scenari di Valorizzazione (Scenari A, B e C), rappresentativi di strategie illuminotecniche progressivamente più ambiziose, frutto della combinazione di analisi spaziale, conformità normativa, obiettivi di sostenibilità e istanze degli stakeholder. Ogni scenario risponde in misura crescente a esigenze di conservazione, fruibilità e innovazione, fornendo un quadro decisionale integrato per la riqualificazione del sito.

Scenario A – *Business as Usual*: privilegia la conformità normativa e l’usabilità immediata, con interventi minimi volti a garantire sicurezza e accessibilità nelle aree chiave quali parcheggi, percorsi principali, aree giochi e anfiteatro.

Scenario B – Paesaggio Notturno: si fonda sullo Scenario A, con maggiore attenzione alla valorizzazione culturale e alla memoria storica. Introduce illuminazione architettonica delle riservette e riattiva l’Anello del Soldato mediante apparecchi a rilevamento di movimento, accrescendo la leggibilità narrativa e spaziale del sito. È lo scenario più esteso in termini di superficie illuminata e quindi il più espressivo, sebbene comporti un consumo energetico moderatamente superiore.

Scenario C – Protezione della biodiversità: adotta un approccio radicalmente orientato alla sostenibilità, con priorità alla salvaguardia ecologica tramite interventi di illuminazione ridotti e strettamente controllati. Prevede l’impiego di temperature circadiane compatibili e sistemi avanzati di automazione, limitando la luce alle sole aree essenziali e utilizzando ottiche di precisione e controlli contestuali. È lo scenario più sofisticato dal punto di vista tecnico, garantendo il massimo allineamento con gli obiettivi di protezione della biodiversità e le migliori prestazioni energetiche.

Infine, lo Scenario C+SR combina i principi a basso impatto e attenti alla biodiversità dello Scenario C con la riattivazione simbolica dell’Anello del Soldato, preservando al contempo integrità ecologica e memoria culturale. Lo Scenario C+SR riflette una visione equilibrata: riduce al minimo le interferenze ambientali, ottimizza l’uso dell’energia tramite l’integrazione con la CER ed esalta l’identità del sito come spazio pubblico. Rappresenta pertanto un modello replicabile di rigenerazione circolare, in cui transizione energetica e valorizzazione del patrimonio convergono a sostegno di uno sviluppo territoriale inclusivo e resiliente.

5.2 Scenari Base: assunzioni e confronto dei risultati

La Tabella 1 illustra la distribuzione dei costi annuali totali per i tre scenari base nel primo anno, evidenziando le principali differenze nella struttura dei costi. I costi di costruzione risultano prevalenti in tutti gli scenari, in particolare negli Scenari 1 e 1bis, a causa dell’integrazione di infrastrutture per le energie rinnovabili. Sebbene lo Scenario 1 benefici degli incentivi pubblici (PNRR), la loro entità limitata si traduce in una riduzione dei costi solo marginale.

Tabella 1. Costo totale (Anno 1) per categoria di costo - Scenari 0, 1, 1 bis (valori) (Elaborazione dell’autrice)

Categorie di costo	Scenario 0	Scenario 1	Scenario 1 bis
Non construction	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €
Construction	529.198,57 €	882.479,19 €	882.479,19 €
Operating	4.646,22 €	4.646,22 €	4.646,22 €
Maintenance	47.627,87 €	88.930,31 €	88.930,31 €
Savings		148.336,37 €	38.736,13 €
End of Life	10.575,18 €	18.777,57 €	18.777,57 €
	593.547,84 €	1.144.669,66 €	1.035.069,42 €

I costi di manutenzione risultano pressoché raddoppiati negli scenari con CER (1 e 1bis) rispetto allo Scenario 0 (Figura 5), riflettendo l'onere aggiuntivo introdotto dagli impianti fotovoltaici e dai sistemi di illuminazione. Tuttavia, questi scenari generano anche risparmi energetici, assenti nello Scenario 0, che contribuiscono a ridurre l'impatto finanziario netto nel tempo. Lo Scenario 1 mostra i risparmi più elevati (13%), mentre lo Scenario 1bis raggiunge comunque il 3,7%, confermando il valore di lungo termine della partecipazione a una CER anche in assenza di incentivi PNRR.

Nel complesso, i dati confermano l'importanza dell'analisi del ciclo di vita nei processi decisionali pubblici: sebbene le opzioni basate sulle CER comportino costi iniziali e di manutenzione più elevati, esse generano ritorni continui, rendendole più sostenibili nel lungo periodo.

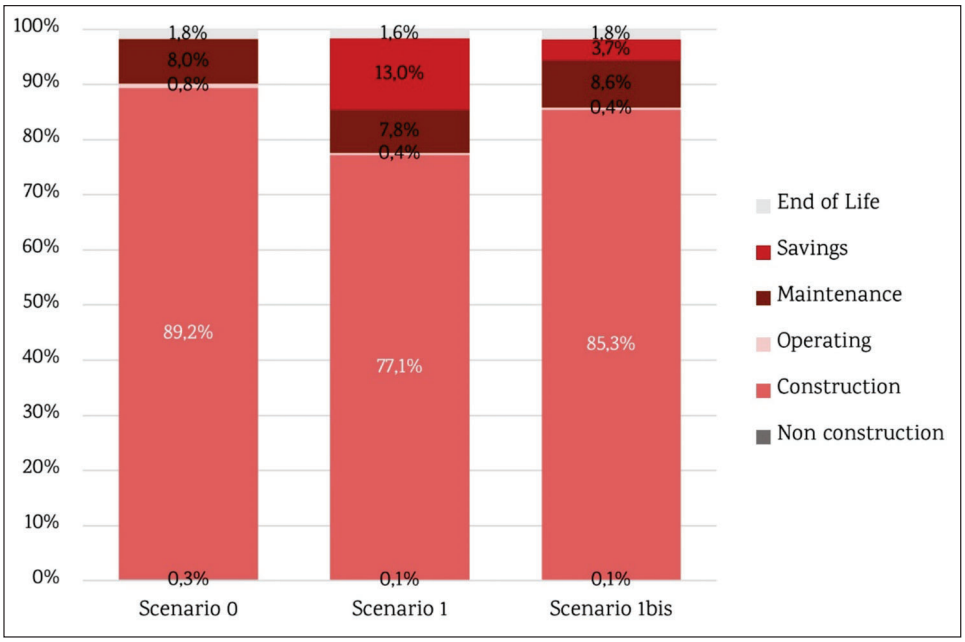


Figura 5. Costo totale (Anno 1) per categoria di costo - Scenari 0, 1, 1 bis (percentuali) (Elaborazione dell'autrice).

Il confronto degli indicatori LCCA (Tabella 2) evidenzia che lo Scenario 1 presenta un risparmio netto (NS) pari a € 211.483, considerando la produzione di energia come fonte di ricavo per compensare il costo iniziale; analogamente, lo Scenario 1bis senza bonus PNRR mostra un NS inferiore ma positivo. Il periodo di ritorno attualizzato (PBP) per lo Scenario 0 risulta superiore al periodo di analisi e dunque non calcolabile; per contro, lo Scenario 1 registra un PBP pari a circa 6 anni.

Tabella 2. Confronto degli indicatori per gli scenari di base. (Elaborazione dell'autrice).

Indicatore	Scenario 0	Scenario 1 (con la CER, PNRR)	Scenario 1bis (con la CER, NO PNRR)
TASSO DI SCONTO		3,00%	
NPV	1.507.668,00 €	1.296.185,00 €	1.402.593,00 €
PBP	∞	5,95 years	12,7 years
(A)IRR	-	4,00%	4,00%
NS (from Scenario 0)	-	211.483,00 €	105.075,00 €
SIR	-	1,31	1,31

I risultati confermano la fattibilità e i benefici complessivi dell'operazione, in particolare considerando la presenza di impianti fotovoltaici, il cui periodo di ritorno è stimato al di sotto dei 7 anni. Per lo Scenario 1 senza bonus PNRR, il PBP cresce significativamente (12,7 anni). Ciò dimostra che lo sviluppo delle CER richiede la presenza di incentivi finanziari (come il bonus PNRR), poiché i

costi iniziali di costruzione degli impianti rinnovabili sono troppo elevati per garantirne da soli la sostenibilità economica.

La AIRR (*Adjusted Internal Rate of Return*) dello Scenario 1 è pari al 4%, valore accettabile se rapportato al tasso di sconto del 3%. L'ultimo indicatore, il SIR (*Savings to Investment Ratio*), rappresenta l'efficacia dell'investimento iniziale in relazione ai risparmi prodotti lungo il ciclo di vita: per lo Scenario 1 il SIR risulta >1 (1,31), indicando un rapporto positivo tra i costi di costruzione per pannelli PV e batterie e i risparmi operativi generati.

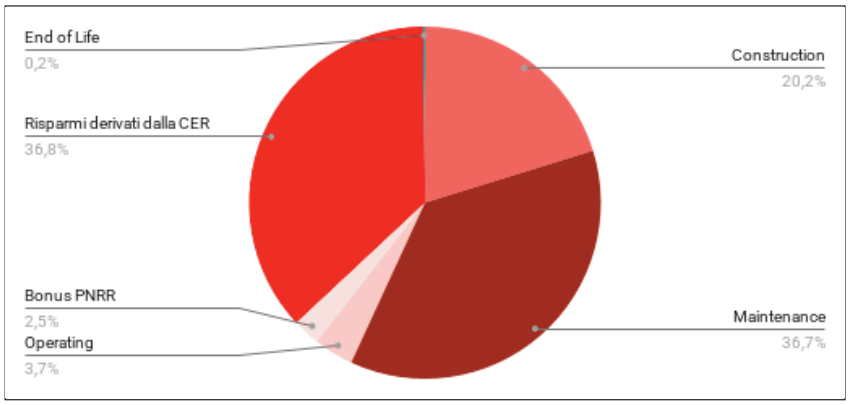


Figura 6. Costo totale nel ciclo di vita per categoria di costo (30 anni) - Scenario 1. (Elaborazione dell'autrice).

La variazione limitata di NPV tra lo Scenario 1 e lo Scenario 1bis risulta al tempo stesso attesa e metodologicamente coerente. Tale esito è principalmente attribuibile all'esiguità del finanziamento pubblico previsto dal quadro del PNRR (Figura 6), che copre appena il 10% dei costi iniziali di costruzione. Di conseguenza, la sua incidenza sulla performance economica complessiva del progetto è marginale. Inoltre, considerando l'intero ciclo di vita dell'intervento, il costo totale di manutenzione sia degli apparecchi di illuminazione sia degli impianti fotovoltaici risulta circa 14,5 volte superiore al contributo pubblico iniziale. Questo marcato squilibrio dimostra come i costi operativi di lungo periodo prevalgano in maniera decisiva rispetto al sostegno in conto capitale, attenuando così il peso finanziario del contributo nel bilancio complessivo dell'investimento.

È importante chiarire che, secondo la logica tradizionale dell'LCC (Langdon, 2007), un incentivo di questo tipo non costituirebbe normalmente la base per la costruzione di scenari di investimento distinti. Nel nostro caso, tuttavia, l'esercizio di modellare diverse configurazioni, anche in risposta a variazioni relativamente contenute del finanziamento iniziale, è stato ritenuto significativo, in particolare nella prospettiva della pianificazione degli investimenti pubblici. Infatti, anche contributi marginali possono assumere rilevanza decisionale se valutati su orizzonti temporali estesi, tipici dei progetti del settore pubblico, nei quali i benefici di lungo termine vengono valorizzati più dei ritorni immediati e la periodicità dell'investimento è meno determinante.

Il ridotto differenziale finanziario osservato tra lo Scenario 1 e lo Scenario 1bis conferma tale considerazione: sebbene economicamente limitato in termini assoluti, esso mantiene un valore analitico significativo all'interno di un quadro volto a supportare le Pubbliche Amministrazioni nella valutazione dell'utilità incrementale delle opportunità di finanziamento. Da questa prospettiva, la metodologia proposta va interpretata non come un'analisi di investimento rigidamente fondata sull'LCC, bensì come un esercizio valutativo flessibile, capace di illustrare come anche modesti contributi pubblici possano essere contestualizzati all'interno di strategie più ampie di riuso e valorizzazione, soprattutto se inseriti in visioni di lungo periodo orientate alla sostenibilità e alla rigenerazione territoriale.

5.3 Scenari di Valorizzazione: assunzioni e confronto dei risultati

La LCCA degli Scenari A, B e C ha evidenziato differenze significative in termini di sostenibilità di lungo periodo e impatto economico (Figura 7).

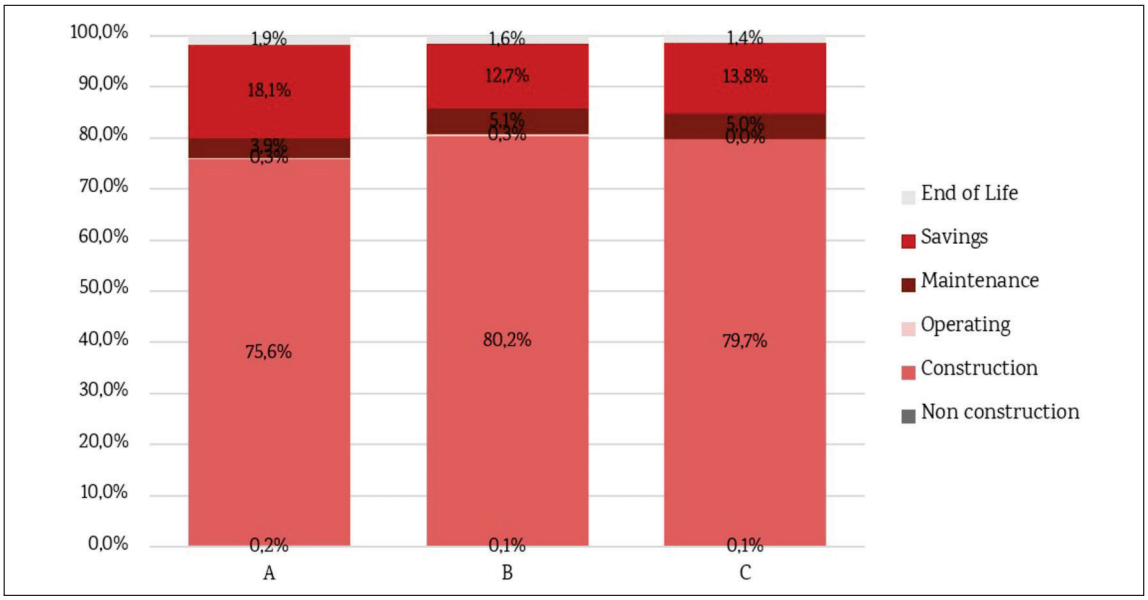


Figura 7. Categorie di costo totale nel ciclo di vita – Scenari A, B, C. (Elaborazione dell'autrice).

Lo Scenario A, l'opzione più essenziale e a costi contenuti, presenta un costo totale pari a € 246.118,82 sull'intero periodo di analisi, con un'infrastruttura illuminotecnica limitata alle sole aree funzionali di base. Pur risultando efficiente dal punto di vista energetico, non introduce elementi di valorizzazione ambientale e culturale.

Lo Scenario B, incentrato sulla valorizzazione architettonica e sulla riattivazione della memoria storica, comporta il costo totale più elevato (€ 428.240,69), dovuto all'ampliamento della copertura illuminotecnica – che include le riservette e l'Anello del Soldato – e al conseguente aumento degli oneri manutentivi.

Lo Scenario C, pur prevedendo un investimento iniziale più alto (€ 265.620,43), dimostra prestazioni superiori nel lungo periodo grazie al ridotto fabbisogno energetico e all'impiego di sistemi avanzati di automazione progettati per la tutela della biodiversità. La strategia operativa ottimizzata conduce ai costi annui più bassi sul lungo periodo.

Pertanto, lo Scenario C rappresenta la soluzione più equilibrata, in grado di coniugare sostenibilità ecologica ed efficienza finanziaria, e per questo è stato individuato dal Comune di Sangano come base per la definizione dello Scenario finale C+SR.

La Tabella 3 mostra il confronto degli indicatori LCCA calcolati per ciascuno scenario. In termini di convenienza economica, lo Scenario A risulta il più favorevole, grazie al valore di NPV più contenuto (€ 617.454). Questo risultato è spiegabile con il numero ridotto di aree interessate e con soluzioni tecniche di base. Il confronto con lo Scenario C, riferito alla medesima area, mette in evidenza come le soluzioni tecnologiche avanzate per la protezione ambientale incidano in modo significativo sui flussi di costo.

Tabella 3. Confronto degli indicatori per gli scenari di valorizzazione. (Elaborazione dell'autrice).

Indicatore	Scenario 0 Base CER	A Business as usual	B Paesaggio Notturno	C Protezione Biodiversità	C+SR Scenario Finale
TASSO DI SCONTO			3%		
NPV	€ 1.296.185	€ 617.454	€ 1.486.540	€ 1.294.835	€ 1.198.829,85
DPB	5,95 years	4,18 years	6,32 years	5,79 years	2,33 years
(A)IRR	4%	4%	2,9%	3,2%	4,5%
NS (BASE - A/B/C)	-	€ 678,731	-€ 190,356	€ 1,349	€ 96.000
SIR	-	1,31	0,91	1,04	1,55

Come esito di questa valutazione, lo Scenario C+SR è stato identificato dal Comune di Sangano come l'opzione più coerente e strategica. Fondamentale è osservare come lo Scenario C+SR costituisca l'unica proposta in grado di sfruttare pienamente il potenziale della CER di Sangano, trasformando la Polveriera in un hub strategico per la produzione e l'accumulo di energia rinnovabile.

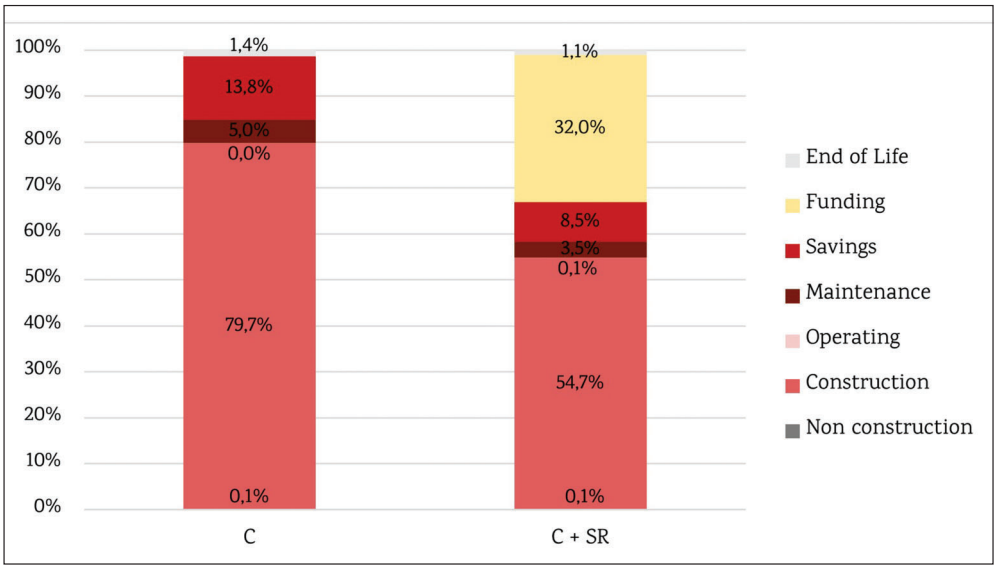


Figura 8. Comparazione dei costi - Scenario C e Scenario C con l'Anello del Soldato. (Elaborazione dell'autrice).

Dal punto di vista finanziario, lo Scenario C+SR mostra un NPV di € 1.198.830, inferiore di € 96.006 rispetto allo Scenario C, verosimilmente per effetto dei meccanismi di finanziamento iniziale (Figura 8). Nonostante ciò, lo Scenario C+SR evidenzia prestazioni economiche migliorative, con un (A)IRR del 4,5% – ossia 1,5 punti percentuali sopra il tasso di sconto – e un SIR pari a 1,55. L'attrattività economica di questo scenario potrebbe ulteriormente aumentare qualora venissero monetizzati i benefici ambientali e sociali, come la salvaguardia della biodiversità e la riattivazione simbolica dell'Anello del Soldato. Queste esternalità positive, di particolare rilevanza per la comunità di Sangano, contribuiscono ad accrescere il valore complessivo della riattivazione di questo percorso storico.

Integrando sistemi fotovoltaici e sfruttando incentivi nazionali (ove applicabili), lo scenario consente di ottenere riduzioni di costo di lungo termine, promuovendo al contempo un utilizzo comunitario dell'energia. La scelta dello Scenario C+SR segna dunque un passaggio da una logica tradizionale di valorizzazione top-down a una visione sistemica e partecipata, fondata sulla sostenibilità, sulla memoria e sulla governance condivisa. Essa dimostra come i piccoli comuni possano fungere da laboratori di pianificazione integrata patrimonio-energia, offrendo percorsi non solo tecnicamente ed economicamente sostenibili, ma anche culturalmente trasformativi.

5.4 Analisi di sensitività

L'introduzione di elementi di flessibilità nei modelli consente di internalizzare l'incertezza all'interno delle analisi, dando luogo a un'analisi di sensitività volta a valutare l'impatto delle variazioni degli input sui valori di output (Curto & Fregonara, 1999). Questo approccio è fondamentale per la LCCA, che si fonda proprio su tali verifiche di sensitività al fine di rafforzare la robustezza dei risultati.

L'analisi LCCA degli Scenari Base (Sezione 5.2) ha inoltre messo in evidenza la particolare sensibilità del modello ai costi di manutenzione e di costruzione dei pannelli fotovoltaici, fattori in grado di modificare in modo significativo gli esiti degli scenari. La manutenzione dei sistemi fotovoltaici nello Scenario 1 costituisce infatti la principale voce di costo annuale (€ 88.930,31).

La Figura 9 presenta i risultati di un'analisi di sensitività condotta sull'NPV dello sviluppo della CER, con particolare attenzione a due variabili chiave di costo: i costi di costruzione dei pannelli fotovoltaici (PV) e le spese di manutenzione ordinaria degli stessi. L'analisi ha modellato variazioni percentuali comprese tra –15% e +15% per ciascun parametro, al fine di valutarne l'impatto relativo sulla sostenibilità finanziaria di lungo periodo.

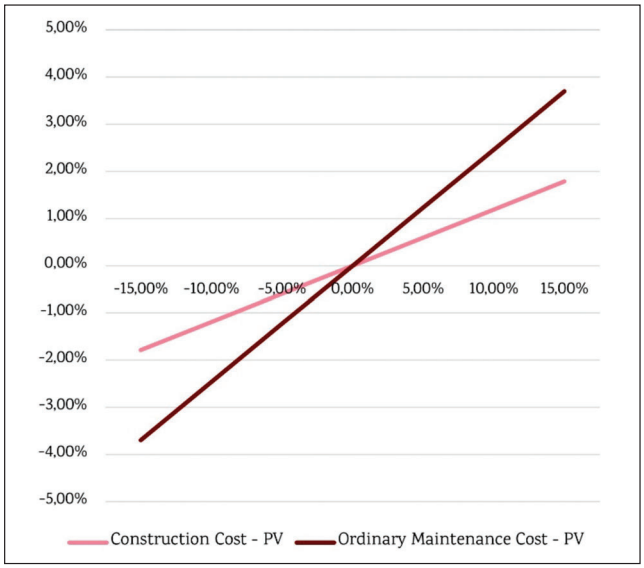


Figura 9. Analisi di sensitività - confronto tra costi di costruzione e manutenzione. (Elaborazione dell'autrice).

La curva in rosso chiaro, che rappresenta i costi di costruzione, mostra una pendenza relativamente moderata, indicando che le oscillazioni dei costi di installazione hanno un effetto limitato sull'NPV complessivo dell'intervento di energy empowerment. Al contrario, la curva borgogna, relativa ai costi di manutenzione ordinaria, evidenzia un'inclinazione molto più accentuata. Ciò suggerisce una sensibilità maggiore degli esiti economici alle variazioni delle spese di manutenzione: un incremento di tali costi comporta riduzioni significative dell'NPV, mentre una loro diminuzione si traduce in considerevoli miglioramenti.

Questo confronto sottolinea la rilevanza cruciale delle strategie manutentive nei progetti di riuso del patrimonio basati sulle CER. Pur restando l'investimento iniziale un fattore rilevante, l'ottimizzazione dei costi di esercizio e manutenzione esercita un'influenza sproporzionatamente più incisiva sulla performance finanziaria nel lungo periodo.

I risultati sollecitano un cambio di prospettiva nelle politiche, non solo a sostegno della creazione delle CER, ma anche mirato a garantire meccanismi di finanziamento per la loro funzionalità e manutenzione nel tempo (Cirone et al., 2022; D'Alpaos & Andreolli, 2021; Dóci & Gotchev, 2016; Spasova & Braungardt, 2022). Nell'attuale contesto italiano, i finanziamenti sono prevalentemente disponibili per la costituzione delle CER, mentre la manutenzione di lungo periodo dipende spesso da partenariati con imprese private che offrono soluzioni in leasing comprensive di supporto tecnico. Questo divario mette in evidenza la necessità di strumenti finanziari più completi, dedicati alla conservazione dell'efficienza dei sistemi nel tempo.

6. Discussione

Le analisi condotte in questo studio mettono in evidenza alcune limitazioni e considerazioni metodologiche che dovrebbero essere affrontate per migliorare l'accuratezza, la completezza e il realismo delle analisi future. Una prima limitazione risiede nell'assenza della modellazione delle tariffe energetiche basate sull'orario di utilizzo (*time-of-use*). Tale omissione è dovuta alla mancanza di un progetto definitivo con funzioni operative e profili di consumo energetico chiaramente definiti,

che rende impossibile determinare scenari di consumo realistici. In assenza di questi dati, le proiezioni sugli scambi energetici e sui ritorni finanziari restano teoriche e potrebbero non rispecchiare accuratamente le condizioni future.

Gli sviluppi futuri dovrebbero concentrarsi sulla quantificazione del tasso di sconto, come raccomandato dalla letteratura più recente (Maselli & Nesticò, 2020; Nesticò et al., 2020). Questi progetti sono infatti esposti a una vasta gamma di fattori influenti, tra cui la volatilità dei mercati energetici, l'evoluzione della composizione e del comportamento dei prosumer, nonché i mutamenti normativi e tecnologici.

Inoltre, i costi di manutenzione e sostituzione dovrebbero essere trattati in modo più approfondito nelle ricerche future. Se da un lato l'innovazione tecnologica – come la diffusione dei moduli a mezza cella, dei pannelli PERC e delle tecnologie a film sottile quali CIGS – sta riducendo i costi di installazione e migliorando le prestazioni, dall'altro queste innovazioni incidono anche sui profili manutentivi futuri. Secondo le tendenze di mercato (Solar Power Europe, 2024), tali progressi hanno migliorato l'efficienza e l'accessibilità, riducendo al contempo i costi grazie alle economie di scala. Ciò evidenzia l'importanza di modellare, in un'ottica di ciclo di vita, sia i miglioramenti tecnologici sia le dinamiche dei costi associati nel tempo.

Gli studi di Fregonara, Ferrando et al. (2018) hanno dimostrato come l'incertezza sulla durabilità e sulla vita utile possa essere affrontata attraverso il *Factor Method* (FM), soprattutto se combinato con la modellazione stocastica. I loro risultati confermano che pratiche manutentive migliorative possono estendere la vita utile dei componenti, aumentando così il loro valore residuo e riducendo i costi lungo il ciclo di vita. L'introduzione di un tasso di sconto variabile nei calcoli LCC consentirebbe di riflettere meglio tali miglioramenti attesi e i relativi effetti economici di lungo periodo.

Un'ulteriore limitazione dell'attuale valutazione è che sono stati monetizzati esclusivamente gli incentivi diretti legati alla produzione energetica della CER, mentre i benefici sociali e ambientali non sono stati inclusi, pur essendo essenziali per una valutazione olistica. La trasformazione dell'ex Polveriera Militare in un parco pubblico funzionale, ad esempio, produrrebbe benefici intangibili rilevanti: maggiore partecipazione comunitaria, migliore accessibilità pubblica e rafforzata coesione sociale. Sul versante ambientale, l'utilizzo di fonti rinnovabili al posto dei combustibili fossili ridurrebbe le emissioni e il carbonio incorporato, benefici che potrebbero essere quantificati economicamente a supporto delle decisioni di investimento (Saiu & Blečić, 2022).

Nel complesso, questo studio dimostra che l'integrazione dell'analisi economica all'interno di un quadro più ampio di pianificazione partecipata e strategica consente di elaborare una visione più integrata e realistica per progetti di *energy empowerment* orientati al patrimonio. È tuttavia importante sottolineare che l'applicazione della LCCA in questo studio riguarda soltanto una parte di un obiettivo più ampio e complesso. Essa fornisce infatti indicazioni sulla sostenibilità tecnica ed economica dell'intervento, con particolare riferimento all'efficienza energetica e ai costi nel tempo, ma rappresenta solo una componente di un quadro più esteso che include dinamiche funzionali, gestionali e finanziarie, rilevanti soprattutto quando vengono introdotti nuovi usi e funzioni. Questi ultimi portano in gioco ulteriori variabili – quali la generazione di ricavi, la complessità operativa e il coinvolgimento comunitario – che esulano dall'ambito specifico dell'analisi LCC.

Pertanto, la valutazione deve essere intesa come una fase all'interno di un processo più ampio di restauro (Dalla Costa, 2000), riuso e valorizzazione, in cui dimensioni multiple – culturali, ambientali, sociali ed economiche – devono essere integrate. L'inserimento dell'analisi economica nella visione complessiva del progetto consente infatti una lettura più realistica e olistica della valorizzazione del patrimonio. In questa prospettiva, la LCC diventa uno strumento di supporto alle decisioni che deve essere affiancato da altre forme di valutazione per riflettere appieno il potenziale trasformativo dei progetti incentrati sul patrimonio.

7. Conclusioni

Questo articolo ha indagato l'intersezione tra valorizzazione del patrimonio architettonico e paesaggistico e transizione energetica attraverso la prospettiva delle CER, prendendo le mosse dalla ricerca di dottorato intitolata "*Economic Enhancement of Architectural Heritage through RECs: Op-*

portunities, Scenarios and Evaluation Tools" (Malavasi, 2025). A partire dal caso studio dell'ex Polveriera Militare di Sangano, la ricerca ha inteso valutare se l'integrazione delle CER potesse fungere da catalizzatore per il riuso adattivo del patrimonio architettonico pubblico abbandonato, garantendone la sostenibilità economica, ambientale e sociale di lungo periodo.

Attraverso l'applicazione di un approccio metodologico strutturato, che combina analisi spaziale, coinvolgimento degli stakeholder e LCCA, lo studio ha confrontato un insieme di sette scenari alternativi di riqualificazione dell'illuminazione pubblica nel quadro dello sviluppo della CER. Il confronto iniziale tra gli Scenari Base ha dimostrato che la partecipazione a una CER migliora sensibilmente la sostenibilità economica, soprattutto se integrata con gli incentivi nazionali del PNRR. Va tuttavia rilevato che tali incentivi affrontano solo parzialmente le sfide finanziarie, poiché la loro entità è limitata rispetto ai costi complessivi di ciclo di vita dell'intervento: il contributo pubblico previsto dal PNRR copre meno del 10% dei costi di costruzione ed è oltre 14 volte inferiore ai costi cumulativi di manutenzione degli impianti di illuminazione e fotovoltaici lungo l'intera durata del progetto. Ne consegue che, pur migliorando la fattibilità nel breve periodo, l'impatto degli incentivi sulla sostenibilità economica di lungo termine resta marginale, confermando l'importanza di adottare una prospettiva di ciclo di vita nelle valutazioni degli investimenti pubblici.

Il secondo gruppo di Scenari di Valorizzazione (A, B e C) ha evidenziato il valore aggiunto di progettare alternative di illuminazione pubblica basate su differenti strategie energetiche ed ecologiche. Lo Scenario C, incentrato sulla protezione della biodiversità mediante illuminazione adattiva e ridotta intrusione paesaggistica, si è rivelato la soluzione più equilibrata in termini di sostenibilità e prestazioni operative. La scelta finale del Comune di Sangano di adottare lo Scenario integrato C + Anello del Soldato riflette una decisione strategica e simbolica, che fonde la transizione ecologica con la riattivazione della memoria storica, riaffermando la duplice identità del sito come patrimonio naturale e culturale. Tale scelta dimostra come il patrimonio abbandonato possa essere interpretato non soltanto come una testimonianza da conservare, ma come un motore di rigenerazione degli spazi pubblici, di coinvolgimento comunitario e di reintegrazione funzionale. In questo senso, il caso di Sangano offre un modello replicabile e scalabile di heritage-led energy empowerment, particolarmente rilevante per i piccoli comuni e i territori periferici.

Inoltre, lo studio ha dimostrato che strumenti di valutazione economica come la LCCA, se inseriti in quadri collaborativi e partecipativi, possono liberare il potenziale latente dei beni abbandonati. Attraverso partenariati pubblico-privati (PPP) (Calabrò et al., 2021; Della Spina et al., 2022; Gabrielli et al., 2024) e modelli di governance cooperativa come le CER, i comuni possono attivare reti multi-attore, attrarre investimenti, ridurre i costi operativi e reinvestire i ritorni in servizi orientati alla comunità. In questo modo, il patrimonio architettonico viene ridefinito non più come passività statica, ma come infrastruttura dinamica capace di sostenere la transizione ecologica, promuovere la democrazia energetica e rafforzare l'identità locale.

In conclusione, questa ricerca mette in luce il valore dell'integrazione tra innovazione energetica e gestione del patrimonio, delineando un percorso praticabile per la rigenerazione di beni pubblici sottoutilizzati (Manganelli & Tajani, 2014). L'approccio metodologico proposto, che combina analisi economica, progettazione partecipata e strategie energetiche sensibili al contesto, offre uno strumento pragmatico e inclusivo per i decisori in territori caratterizzati da ricchezza patrimoniale ma limitate risorse.

Riconoscimenti

L'autore desidera esprimere sincera gratitudine al Comune di Sangano, il cui supporto è stato essenziale per lo sviluppo della presente ricerca.

Bibliografia

Aulisio A., Barbero S., Barreca A., Malavasi G. & Rolando D. (2024). From Data Collection to a Cross-Cutting Analysis Visualisation: Territorial Complexity Overview to Foster Responsible Tourism in Rural Areas. *LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, *14819*, 33–50. https://doi.org/10.1007/978-

3-031-65282-0_3

Baggio M., Tinterri C., Mora T.D., Righi A., Peron T. & Romagnoni P. (2017). Sustainability of a Historical Building Renovation Design through the Application of LEED® Rating System. *Energy Procedia*, *113*. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.017

Banchiero T., Blečić I., Saiu, V. & Trunfio G.A. (2020). Neighbourhood park vitality potential: From Jane Jacobs’s theory to evaluation model. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(15). https://doi.org/10.3390/su12155881

Barbaro S. & Napoli G. (2024). Towards a participatory energy transition. Critical issues and potentials of regulatory and financial instruments for Renewable Energy Communities (RECs) in Italy. *Valori e Valutazioni*, *35*, 69–95. https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20243506

Battista G., de Lieto Vollaro E., Ocłoń P. & de Lieto Vollaro R. (2022). Retrofit Analysis of a Historical Building in an Architectural Constrained Area: A Case Study in Rome, Italy. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(23). https://doi.org/10.3390/app122312305

Battisti A. (2016). Linee guida di indirizzo per l’efficienza energetica nel patrimonio culturale. *TECHNE*, *12*, 65–73. https://doi.org/10.13128/TECHNE-19336

Bielig M., Kacperski C., Kutzner T. & Klingert S. (2022). Evidence behind the narrative: Critically reviewing the social impact of energy communities in Europe. *Energy Research and Social Science*, *94*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102859

Blečić I., Carrus A.S., Muroni E., Saiu, V. & Saliu M.C. (2023). Engagement and Inclusion Experiences for Energy Communities. An Ongoing Case Study in Cagliari, Italy. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *14109 LNCS*, 513–528. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37120-2_33

Bovera T. & Lo Schiavo L. (2022). From energy communities to sector coupling:a taxonomy for regulatory experimentation in the age of the European Green Deal. *Energy Policy*, *171*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113299

Calabrò T., Della Spina L. & Randò B. (2021). New Public Management and Economic Feasibility Assessment of PPP Projects. A Case Study in Calabria. *Green Energy and Technology*, 57–78. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49579-4_5

Cengiz A.E. & Yanmaz K. (2019). Preserving The Spatial Memory In Historic Buildings And Spaces And Its Contribution To The Urban Identity: A Case Study Of Çanakkale Urban Site. *Journal of Scientific Perspectives*, *3*(4). https://doi.org/10.26900/jsp.3.034

Choay T. (1992). L’allégorie du patrimoine. *La Couleur Des Idées*, 272 p.

Cirone D., Bruno R., Bevilacqua P., Perrella S. & Arcuri N. (2022). Techno-Economic Analysis of an Energy Community Based on PV and Electric Storage Systems in a Small Mountain Locality of South Italy: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(21). https://doi.org/10.3390/su142113877

Cirrincione L., Gennusa M., La Peri G., Rizzo G. & Scaccianoce G. (2020). Towards nearly zero energy and environmentally sustainable agritourisms: The effectiveness of the application of the European ecolabel brand. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(17). https://doi.org/10.3390/APP10175741

Ciulla G., Galatioto A. & Ricciu R. (2016). Energy and economic analysis and feasibility of retrofit actions in Italian residential historical buildings. *Energy and Buildings*, *128*. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.044

Curto R.A. & Fregonara E. (1999). Decision Tools for Investments in the Real Estate Sector with Risk and Uncertainty Elements. *Jahrbuch Fuer Regionalwissenschaft*.

Dalla Costa Mario. (2000). *Il progetto di restauro per la conservazione del costruito* (Celid, Ed.). CELID. https://www.hoepli.it/libro/il-progetto-di-restauro-per-la-conservazione-del-costruito/9788876613975.html

D’Alpaos C. & Andreolli T. (2021). Renewable energy communities: The challenge for new policy and regulatory frameworks design. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, *178 SIST*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48279-4_47

Della Spina L., Carbonara S. & Stefano D. (2022). The Financial Sustainability a Cultural Heritage Adaptive Reuse Project in Public-Private Partnership. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *482 LNNS*, 1262–1272. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_122

Department of Energy. (2014). *Life cycle cost handbook guidance for life cycle cost estimate and life cycle cost analysis*.

Directorate-General for Energy (European Commission). (2019). Clean energy for all Europeans. *Euroheat and Power*, *14*(2).

Dóci G. & Gotchev B. (2016). When energy policy meets community: Rethinking risk perceptions of renewable energy in Germany and the Netherlands. *Energy Research and Social Science*, *22*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.08.019

Fregonara E. (2015). *Valutazione sostenibilità progetto. Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali.* (Franco Angeli, Ed.; Franco Angeli). ITA. https://iris.polito.it/handle/11583/2625562

Fregonara E. & Ferrando D.G. (2024). Building upcycling vs. building reconstruction investment decisions: A focus on the discount rate. *Procedia Structural Integrity*, *64*, 1767–1773. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.182

Fregonara E., Ferrando D.G. & Pattono S. (2018). Economic-environmental sustainability in building projects: Introducing risk and uncertainty in LCCE and LCCA. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(6). https://doi.org/10.3390/su10061901

Fregonara E., Ferrando D.G. & Tulliani J.M. (2022). Sustainable Public Procurement in the Building Construction Sector. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(18). https://doi.org/10.3390/su141811616

Fregonara E., Lo Verso V.R.M., Lisa M. & Callegari G. (2018). Retrofit scenarios and economic sustainability. A case-study in the Italian context. *ENERGY PROCEDIA*, *111C*, 245–255. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.03.026

Gabrielli L., Manente C., Milan M. & Ruggeri A.G. (2024). Ethical Public-Private Partnerships: A Forward-Thinking Approach to Enhancing Public Assets. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *1186 LNNS*, 501–511. https://doi.org/10.1007/978-3-031-74679-6_49

Gabrielli L. & Ruggeri A.G. (2023). Sustainability and Energy Efficiency in Twentieth-Century Italian Built Heritage. *ADVANCES IN SCIENCE, TECHNOLOGY & INNOVATION*, 7–9. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00808-5_2

Galatioto A., Ciulla G. & Ricciu R. (2017). An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings. *Energy*, *137*. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.12.103

Gjorgievski V.Z., Cundeva S. & Georghiou G.E. (2021). Social arrangements, technical designs and impacts of energy communities: A review. In *Renewable Energy* (Vol. 169). https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.078

Gremmelspacher J.M., Campamà Pizarro R., van Jaarsveld M., Davidsson H. & Johansson D. (2021). Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden. *Solar Energy*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.067

Langdon D. (2007). *Life cycle costing (LCC) as a contribution to sustainable construction: a common methodology Final Report LCC as a contribution to sustainable construction-Final Report*. http://europa.eu.int/comm/enterprise/construction/compcom/compcom.htm

Malavasi G. (2025). *Economic Enhancement of Architectural Heritage through Renewable Energy Communities (RECs): Opportunities, Scenarios and Evaluation Tools.* [PhD Thesis, Politecnico di Torino]. https://doi.org/https://hdl.handle.net/11583/2999922

Malavasi G., Barreca A., Fregonara E. & Rolando D. (2025). Economic evaluation methodologies for Renewable Energy Communities and the architectural heritage. A literature review. *Valori e Valutazioni*, *2025*(37), 61–85. https://doi.org/10.48264/VVSIEV-20253705

Manganelli B. & Tajani T. (2014). Optimised management for the development of extraordinary public properties. *Journal of Property Investment and Finance*, *32*(2), 187–201. https://doi.org/10.1108/JPIF-05-2013-0034/FULL/PDF

Maselli G. & Nesticò A. (2020). A probabilistic model for the estimation of Declining Discount Rate. Valori e valutazioni, No. 24, 181-208.

Mazzanti Massimiliano. (2003). *Metodi e strumenti di analisi per la valutazione economica del patrimonio culturale*. 245. https://books.google.com/books/about/Metodi_e_strumenti_di_analisi_per_la_val.html?hl=it&id=eUa8_CZ2LHYC

Napoli G., Bottero M., Ciulla G., Dell'Anna T., Figueira J.R. & Greco S. (2020). Supporting public decision

process in buildings energy retrofitting operations: The application of a Multiple Criteria Decision Aiding model to a case study in Southern Italy. *Sustainable Cities and Society*, *60*, 102214. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102214

Nesticò A., D’Ambrosio G., Ghisellini P., Maselli G. & Ulgiati S. (2024). Environmental reclamation of limestone mining sites in Italy: Financial evaluation, challenges and proposals for sustainable development. *Resources Policy*, *89*. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104534

Nestico’ A., Macchiaroli M. & Maselli G. (2020). An innovative risk assessment approach in projects for the enhancement of small towns. *Valori e Valutazioni*, *25*, 91–98.

Pane A. (2008). L’inserzione del nuovo nel vecchio. *Brandi e l’Architettura*, 307–325.

Pitt J. & Nolden C. (2020). Post-subsidy solar PV business models to tackle fuel poverty in multi-occupancy social housing. *Energies*, *13*(18). https://doi.org/10.3390/en13184852

Rolando D., Barreca A., Malavasi G. & Rebaudengo M. (2024, July). The Enhancement of the Alta Valsesia Territorial Potential: A Collaboration-Based Approach Between Academia and Local Actors. *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops*.

Saiu V. & Blečić I. (2022). Sustainable Development Goals (SDGs) Evaluation for Neighbourhood Planning and Design. *Lecture Notes in Networks and Systems*, *482 LNNS*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06825-6_93

Solar Power Europe. (2024). *EU Market Outlook for Solar Power 2024-2028*.

Spasova D. & Braungardt S. (2022). The EU policy framework for energy communities. In *Energy Communities: Customer-Centered, Market-Driven, Welfare-Enhancing?* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91135-1.00022-5

Stankulova A., Barreca A., Rebaudengo M. & Rolando D. (2023). Emerging Trends in the Territorial and Rural Vulnerability-Vibrancy Evaluation. A Bibliometric Analysis. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, *14106 LNCS*. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37111-0_20

Ubelmesser L., Klingert S. & Becker C. (2022). Modelling the Success of Renewable Energy Communities. *2022 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and Other Affiliated Events, PerCom Workshops 2022*. https://doi.org/10.1109/PerComWorkshops53856.2022.9767245

Wuebben D. & Peters, J. F. (2022). Communicating the Values and Benefits of Home Solar Prosumerism. Energies, 15(2), 596. https://doi.org/10.3390/en15020596