

Relazione sulla sostenibilità ambientale del progetto esecutivo dell'edificio scolastico Scuola Media "L. Orsini" di Imola (BO)

Original

Relazione sulla sostenibilità ambientale del progetto esecutivo dell'edificio scolastico Scuola Media "L. Orsini" di Imola (BO) / Grosso, M., Simonetti, M., Raimondo, L.. - ELETTRONICO. - (2006).

Availability:

This version is available at: 11583/2578538 since:

Publisher:

Published

DOI:

Terms of use:

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

Publisher copyright

(Article begins on next page)

CITTÀ DI IMOLA
Provincia di Bologna

**Progetto esecutivo
per la costruzione dell'edificio**

Scuola Media "L. Orsini"

***RELAZIONE SULLA
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE DEL
PROGETTO***

CONSULENTE: Prof. Arch. Mario Grosso

COLLABORATORI: Arch. Luca Raimondo
(analisi e simulazioni termiche)
Ing. Marco Simonetti
(analisi e simulazioni CFD)

Torino, 17 luglio 2006

INDICE

_Toc403411432	
1. Premessa	4
2. Dati di contesto e caratterizzazione del clima locale	4
3. Uso razionale delle risorse climatiche ed energetiche	5
3.1. Efficienza energetico-ambientale del progetto	5
3.2. Strategie di climatizzazione e produzione energetica	5
Strategie di climatizzazione	6
Strategia di produzione elettrica	7
3.3. Tecnologie per l'aumento dell'efficienza energetico-ambientale	7
Riscaldamento ambienti e acqua igienico-sanitaria	7
Ventilazione	7
Raffrescamento passivo	8
Illuminazione naturale	9
Elemento a soffitto a prestazioni integrate	9
4. Analisi del comportamento termico dell'edificio	9
4.1. Bilancio energetico, emissioni di gas serra e fattore d'efficienza energetico-ambientale	9
5. Uso razionale delle risorse idriche	13
5.1. Tecnologie per il contenimento del consumo di acqua potabile	13
5.2. Dimensionamento dei serbatoi d'accumulo dell'acqua piovana	13
6. Uso razionale delle risorse derivanti da scarti e rifiuti	14
6.1. Rifiuti da demolizione e costruzione	14
6.2. Impiego di tecnologie costruttive a secco	14
7. Benessere, igiene e salute dell'utente	14
7.1. Benessere degli spazi esterni	14
7.2. Benessere degli spazi interni	14
7.3. Assenza di emissioni nocive negli spazi interni	15
8. Gestione e monitoraggio dei sistemi di controllo climatico	15
8.1. Gestione del controllo climatico dell'edificio	16
Ottimizzazione del funzionamento degli impianti	16
Regolazione del sistema di ventilazione naturale controllata	16
Controllo solare	18
9. Monitoraggio	18
Misure microclimatiche esterne	18
Monitoraggio sperimentale del raffrescamento ventilativo strutturale	18
Monitoraggio dello scambiatore geotermico	19

ALLEGATO A: Dati climatici

1. Parametri climatici e dati medi mensili e annuali.....	21
2. Anno tipo.....	21

ALLEGATO B: Analisi del comportamento termico dell'edificio

1. Obiettivi, strumenti e struttura del modello di simulazione	27
1.1 Obiettivi e strumenti di simulazione	27
1.2 Struttura del modello	27
2. Oggetto della simulazione.....	29
2.1. Descrizione generale	29
2.2. Suddivisione delle zone termiche	29
3. Definizione dei parametri di calcolo (input)	31
3.1. Caratterizzazione termofisica dei componenti di involucro opaco	31
3.2. Caratterizzazione termofisica dei componenti dell'involucro trasparente	35
3.3. Caratterizzazione del sistema di controllo della radiazione solare	35

4. Profili di occupazione	36
5. Definizione dei guadagni termici interni	37
6. Definizione delle infiltrazioni d'aria in regime di ventilazione naturale.....	38
6.1. Tipologia dei flussi d'aria	39
6.2. Definizione della ventilazione degli ambienti in regime forzato	39
7. Definizione del sistema climatizzazione.....	40
8. Caratteristiche dimensionali e di controllo climatico delle zone.....	41
9. Simulazione dinamica	47
9.1. Modalità di calcolo	47
9.2. Analisi dei risultati della simulazione (Output)	48
9.2.1. Fabbisogno di riscaldamento	48
9.2.2. Comportamento termico annuale	53
Comportamento dell'edificio in assenza dell'impianto di riscaldamento	53
Comportamento dell'edificio in presenza dell'impianto di riscaldamento	56

ALLEGATO C: Analisi comparata dei sistemi di climatizzazione

1. Obiettivi e strumenti dell'analisi.....	59
2. Modalità di analisi	59
2.1. Condizioni di riferimento	59
2.2. Confronto tra i subsistemi di controllo climatico	60

ALLEGATO D: Analisi termo-fluidodinamica

1. Modelli CFD di <i>night cooling</i>	80
1.1. Modello della singola aula	80
1.2. Descrizione del modello	80
1.3. Risultati	80
2. Modello a 3 piani con atrio	84
2.1. Descrizione del modello	84
2.2. Risultati della simulazione	84
2.2.1. Risultati della simulazione di base	84
Risultati della simulazione con bilanciamento dei flussi	88
Coefficienti di scambio termico medi sui solai	92

ALLEGATO E: Scambiatore geotermico ad aria a condotti orizzontali

1. Introduzione	94
2. Descrizione del sistema	95
3. Caratteristiche dimensionali e funzionali.....	96
4. Caratteristiche fisiche e di posa in opera	100
Materiali	100
Filtraggio e drenaggio	100
Posa in opera	100
5. Prestazione energetica dello scambiatore	101
Dati di input	101
Dati di output	102
Prestazione energetica complessiva del sistema geotermico	102

1. Premessa

L'obiettivo principale del progetto esecutivo della Scuola Media "L. Orsini" di Imola – per volontà congiunta della committenza, degli utenti e dei progettisti – è quello di realizzare un edificio che, oltre a garantire in modo ottimale l'esercizio delle funzioni caratteristiche della destinazione d'uso, rappresenti un modello di sostenibilità ambientale e di qualità di fruizione.

Ciò si è realizzato seguendo i criteri fondanti l'approccio di qualità e ambientale alla progettazione, a partire dalla fase preliminare del progetto, e sviluppando, nella fase di progettazione esecutiva, un processo interattivo che ha portato alla verifica di qualità prestazionale e compatibilità ambientale per ogni scelta, di carattere sia architettonico, sia tecnologico-impiantistico, e di livello sia generale, sia di dettaglio.

Tale processo è, al di là delle enunciazioni teoriche, piuttosto raro a esperirsi, nella realtà professionale quotidiana. Si può, quindi, affermare che sia esso stesso, al di là dei risultati prestazionali relativi all'edificio – comunque notevoli – ottenuti, uno degli esiti più significativi di tale esperienza.

Per ragioni espositive, si descrivono di seguito le tematiche affrontate, dividendole in categorie *esigenziali*, e *d'impatto*, pur evidenziando che le scelte operate, e le relative verifiche prestazionali, sono, generalmente, complesse e, quindi, non riconducibili in toto all'ambito tematico trattato, in quanto relazionate a effetti multi-fenomenici e, spesso, sinergici.

Gli ambiti generali affrontati sono i seguenti:

- a) dati di contesto e caratterizzazione del clima locale;
- b) uso razionale delle risorse climatiche ed energetiche;
- c) uso razionale delle risorse idriche;
- d) uso razionale delle risorse derivanti da scarti e rifiuti;
- e) benessere, igiene e salute dell'utente.

2. Dati di contesto e caratterizzazione del clima locale

L'edificio in progetto è situato in un'area pianeggiante del Comune di Imola, come indicato nella planimetria generale. I dati climatico-territoriali caratteristici del Comune di Imola sono: latitudine 44° 21', longitudine 11° 43', zona climatica E, gradi giorno 2292 ⁽¹⁾; regione di vento B, zona di vento 1 (media annuale della velocità giornaliera del vento 1,6 m/s, direzione prevalente SW), temperatura e ampiezza massime estive, rispettivamente, di 33 e 12 °C ⁽²⁾.

Altri dati disponibili sono contenuti nello studio dell'Istituto Statale Tecnico Agrario "G. Sarcinelli" e Professionale Agr. Amb. Chimico e Biologico "L. Ghini", svolto per il Comune di Imola e consegnato il 13/02/20032 prot. 156 c/11.

Né questi dati, né i valori di riferimento normativi, tuttavia, sono stati sufficienti per il livello di dettaglio richiesto dal tipo di simulazione energetica effettuata, utilizzando il programma TRNSYS, versione 16. Tale programma, infatti, utilizza valori orari delle variabili climatiche, riferiti all'anno tipo. Si è, quindi, utilizzato l'anno tipo, per i valori di temperatura dell'aria, riferiti al comune di Imola, fornito dall'ARPA di Bologna, mentre per le altre variabili, si è utilizzato l'anno tipo sviluppato dal programma Meteonorm, per il comune di Bologna, già incluso nel data-base di TRNSYS (vedi Allegato A).

⁽¹⁾ Fonte: Petrarca S., Spinelli F., Cogliani E., Mancini M., *Profilo climatico dell'Italia, Volume 2 – Lombardia, Emilia Romagna*, ENEA, Dipartimento Energia, Roma, 1999.

⁽²⁾ Fonte: UNI 10349: 1994/CE. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici. I dati indicati sono quelli del capoluogo di provincia (Bologna).

3. Uso razionale delle risorse climatiche ed energetiche

3.1. Efficienza energetico-ambientale del progetto

Uno degli indicatori più importanti per la valutazione di sostenibilità ambientale di un progetto è il *fattore d'efficienza energetico-ambientale*, incluso nel metodo elaborato dal Gruppo GL10 della CPE dell'UNI ⁽³⁾. Esso è dato dal rapporto tra il fabbisogno annuo d'energia primaria effettivo dell'edificio in progetto, e quello del medesimo edificio in condizioni "di riferimento" (mero rispetto della normativa o prassi corrente nel territorio in cui l'edificio è localizzato). Il fabbisogno d'energia *primaria* si ottiene moltiplicando, per i diversi sistemi di utilizzo – riscaldamento ambienti, riscaldamento acqua igienico-sanitaria, ventilazione, raffrescamento e illuminazione/usi elettrici – un fabbisogno d'energia *finale* (energia consegnata o *lorda*, pari al fabbisogno netto diviso per il rendimento complessivo dell'impianto) per coefficienti di conversione relativi alle fonti energetiche utilizzate, normalizzate ai combustibili fossili non gassosi (coefficiente = 1). Tali coefficienti rappresentano l'impatto ambientale del consumo previsto, tenendo conto delle inefficienze di trasporto d'energia e del mix energetico nazionale. Essi variano da valori vicini allo 0 per le fonti rinnovabili e assimilate, a 0,75 per il metano, a 2,67 per l'energia elettrica.

Il fattore d'efficienza energetico-ambientale è tanto maggiore quanto maggiore è la riduzione del fabbisogno di riferimento – ottenuto per effetto di misure di conservazione o di sostituzione di fonti fossili con fonti rinnovabili. Esso varia da 0 – fabbisogno effettivo pari al fabbisogno di riferimento – a 1 (fabbisogno di energia da combustibili fossili azzerato). Valori negativi indicano un fabbisogno effettivo superiore a quello di riferimento, mentre valori superiori a 1 corrispondono a produzione di energia da fonti rinnovabili superiore al fabbisogno.

Nel metodo di valutazione d'ecocompatibilità dell'UNI, al valore del Fattore d'efficienza energetico-ambientale corrisponde un punteggio, attribuito, come per tutti gli altri indicatori, secondo 5 classi, di merito crescente. Queste sono:

CLASSI DI VALUTAZIONE	EDIFICI RESIDENZIALI	EDIFICI DEL TERZIARIO
	0	$f_{eea} \leq 0$
1	$0,00 < f_{eea} \leq 0,22$	1 $0,00 < f_{eea} \leq 0,19$
2	$0,22 < f_{eea} \leq 0,52$	2 $0,19 < f_{eea} \leq 0,53$
3	$0,52 < f_{eea} \leq 0,68$	3 $0,53 < f_{eea} \leq 0,67$
4	$0,68 < f_{eea} \leq 0,78$	4 $0,67 < f_{eea} \leq 0,80$
5	$0,78 < f_{eea}$	5 $0,80 < f_{eea}$

L'edificio della Scuola Media "L. Orsini", sulla base del progetto esecutivo, realizza un fattore d'efficienza energetico-ambientale di classe 4 (vedi § 3.5), utilizzando le strategie e tecnologie di seguito illustrate, in relazione ai vari sistemi di utilizzo.

3.2. Strategie di climatizzazione e produzione energetica

L'efficienza energetico-ambientale ottimale di un edificio non è, necessariamente, la massima teoricamente ottenibile. Essa dipende dal bilanciamento tra diverse esigenze, spesso conflittuali, correlate al contenimento dei consumi energetici nell'arco dell'intero anno, al benessere psico-fisico dell'utente, alla disponibilità e ai costi delle tecnologie avanzate, che consentono il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità ambientale (*tecnologie eco-compatibili*), nonché alla qualità di produzione, installazione, uso e manutenzione, delle tecnologie stesse. Il processo che guida le scelte progettuali, al fine del raggiungimento di un'efficienza energetico-ambientale ottimale, è di tipo iterativo/interattivo, caratterizzato da un approccio induttivo, dal generale al particolare, e viceversa. Dalle scelte strategiche generali,

⁽³⁾ Si veda: Grosso, M., "L'efficienza energetica nella valutazione d'ecocompatibilità dei progetti edilizi", Il Progetto Sostenibile, Anno III, N. 6, pp. 66-67, EDICOM Edizioni, Monfalcone (GO).

correlate ai profili d'utenza annuali e alla configurazione architettonico-funzionale generale dell'edificio, si passa a verifiche prestazionali progressivamente più di dettaglio, sui singoli sistemi tecnologici e d'utilizzo. Tale sviluppo connota, in realtà, le scelte relative ai sistemi di climatizzazione, che coinvolgono in modo complesso l'intera struttura costruttiva dell'edificio, mentre per quelli di produzione dell'energia elettrica, si è proceduto in modo più lineare, a partire dalla disponibilità di risorse rinnovabili del sito (si è escluso il vento e l'idroelettrico e si considera la radiazione solare), per giungere alla scelta di fornire con sistemi solari fotovoltaici collegati alla rete la quantità d'energia massima, commisurata sia con la disponibilità dimensionale e economica, sia con i limiti normativi, connessi con la legislazione del conto energia.

Strategie di climatizzazione

Per guidare le scelte progettuali, al fine di raggiungere un'efficienza energetico-ambientale ottimale per la climatizzazione dell'edificio – bilanciando il contenimento dei consumi energetici sia invernali, sia estivi, con livelli soddisfacenti di benessere termoigrometrico – si è proceduto alla verifica del comportamento termico annuale, in regime transitorio, di alcune configurazioni base dell'edificio, composti da moduli a diversa destinazione d'uso, associati tra di loro, e con l'ambiente esterno.

Tale verifica è stata effettuata tramite il programma di simulazione termica TRNSYS, versione 16, sulla base di una prima definizione progettuale relativa a:

- a) dimensionamento e distribuzione degli spazi, primari e secondari;
- b) funzioni e profili d'uso mensili dei singoli spazi;
- c) configurazione delle stratigrafie d'involucro, con target prestazionali del coefficiente di trasmissione termica medio ponderato di 0,4 e 1,4 W/m²K, rispettivamente, per le chiusure opache e per quelle trasparenti ⁽⁴⁾;
- d) determinazione, in termini di massa aerea, delle chiusure e partizioni interne;
- e) determinazione delle portate d'aria minime, in funzione sia della ventilazione per la qualità dell'aria, sia delle necessità di raffrescamento.

Dai risultati di tale analisi e dal confronto con le tecnologie di climatizzazione ecocompatibili, applicabili in loco – tenendo conto della presenza di una rete di teleriscaldamento, potenzialmente trasformabile anche in rete di teleraffrescamento – sono state effettuate le scelte strategiche di seguito sintetizzate.

1. Riduzione del fabbisogno annuale d'energia: per riscaldamento, tramite incremento dell'isolamento e recupero del calore in uscita; per raffrescamento, tramite controllo solare delle chiusure trasparenti (fattore solare del vetro e schermature, compatibilmente con le prestazioni di luminosità naturale) e inerzia termica (massa esposta nei solai e partizioni interne verticali).
2. Riscaldamento con: terminali radianti a bassa temperatura, da fonte teleriscaldamento e solare termico ad acqua; pre-riscaldamento solare, o geotermico indiretto, dell'aria di ventilazione.
3. Ventilazione: meccanica controllata, negli spazi primari e servizi igienici; ibrida (con estrazione naturale) nella zona atrio.
4. Raffrescamento tramite ventilazione naturale notturna della massa e ventilazione geotermica diurna indiretta (condotti interrati), con predisposizione dell'allacciamento del sistema radiante a pavimento alla ipotizzata rete di teleraffrescamento, per i carichi di punta.
5. Sistemi di regolazione e controllo dei flussi, basati sulle condizioni micro-ambientali interne, a comportamento pre-programmato, con minimo intervento manuale dell'utenza.

⁽⁴⁾ Il risultato finale si è attestato su valori pari, rispettivamente, a 0,3 e 1,57 W/Km².

Strategia di produzione elettrica

Come già menzionato, sulla base della fonte rinnovabile più disponibile in sito, si è ipotizzato l'utilizzo di un sistema solare fotovoltaico, collegato alla rete, con moduli collocati in copertura. Verificata la disponibilità di superficie non ombreggiabile, per la posa dei moduli, la scelta dimensionale è stata dettata dai limiti di legge per l'accesso diretto al contributo in conto energia (50 kWe).

3.3. Tecnologie per l'aumento dell'efficienza energetico-ambientale

Riscaldamento ambienti e acqua igienico-sanitaria

Un aumento dell'efficienza energetico-ambientale è realizzata, in tale ambito, con le caratteristiche di progetto e le tecnologie di seguito descritte.

- a) **Coefficiente di dispersione termica** medio ponderato dell'involucro intorno ai valori definiti come target (v. § 3.2.1.c), come indicato, per le diverse stratigrafie utilizzate, nell'Allegato B.
- b) **Sistema solare termico attivo ad aria (Solarwall®)**, per il pre-riscaldamento dell'aria di ventilazione delle aule, composto da 8 moduli verticali (lamiera microforata, intercapedine, isolante, struttura portante leggera), collocati sulla facciata S-SE, connessi alle U.T.A. dell'impianto di ventilazione. Dimensioni e schema di funzionamento del sistema *Solarwall®*, integrato con l'impianto di ventilazione, sono descritti nella relazione del progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione e ventilazione meccanica.
- c) **Sistema solare termico attivo ad acqua**, composto da collettori solari sottovuoto (396 m²), collocati in copertura; l'impianto – del tipo a circolazione forzata, con bollitori integrati negli accumulatori tampone – è dimensionato per il soddisfacimento del fabbisogno annuale d'acqua calda igienico-sanitaria (vicino al 90%) e per fornire un contributo all'impianto di riscaldamento radiante a pavimento. Dimensioni e schema di funzionamento del sistema solare termico ad acqua e della connessione del medesimo con l'impianto di distribuzione a pannelli radianti, è descritto nella relazione del progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione e ventilazione meccanica.
- d) **Sistema di teleriscaldamento** per fornire l'energia termica di base all'impianto a pannelli radianti.
- e) **Sistema di recupero del calore** in uscita dall'impianto di ventilazione, per il preriscaldamento dell'aria in ingresso ad integrazione del contributo solare.
- f) **Sistema geotermico indiretto** (scambio con il terreno tramite ventilazione attraverso condotti interrati), per il preriscaldamento dell'aria di ventilazione, in sostituzione del contributo solare ad aria, quando quest'ultimo è inferiore a quello dei condotti interrati stessi.
- g) **Sistema di distribuzione del calore** in ambiente composto da: *terminali radianti a bassa temperatura*, in tubi di polietilene irrigidito, collocati nel sottofondo della pavimentazione; condotti di mandata e diffusori dell'impianto di ventilazione a tutt'aria. Lo schema distributivo e le caratteristiche tecniche dei pannelli radianti, sono descritti nella relazione del progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione e ventilazione meccanica.

Ventilazione

Il sistema di ventilazione è di tipo meccanico controllato, integrato con modalità di funzionamento "naturale", in periodi e per scopi specifici. Le caratteristiche principali sono di seguito elencate.

- a) La ventilazione primaria diurna (in periodo di occupazione) delle aule e dei vari locali di servizio – ad eccezione dell'atrio – è realizzata da un sistema meccanico, a portata controllata (ON/OFF), in relazione alle esigenze di ricambio spaziali e temporali delle diverse zone; schema, caratteristiche tecniche e modalità di funzionamento dell'impianto

sono descritti dettagliatamente nella relazione sul progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione e ventilazione.

- b) L'impianto di ventilazione meccanica – che integra, d'inverno, recuperatori di calore – è connesso, tramite le U.T.A., al sistema *Solarwall*® (pre-riscaldamento) e geotermico indiretto (pre-riscaldamento e pre-raffrescamento).
- c) La ventilazione primaria diurna dell'atrio è meccanica, d'inverno – al fine di non incrementare le perdite di calore per dispersione – e di tipo ibrido, d'estate. In quest'ultima modalità si potranno avere, in relazione alle condizioni di temperatura esterna e interna:
 - immissione e ripresa meccanica ai vari piani;
 - immissione naturale da aperture collocate nelle chiusure poste al piano terreno, sulle pareti O-NO e E-SE, e estrazione naturale attraverso aperture collocate nella chiusura superiore opaca dell'atrio stesso.

Raffrescamento passivo

Non è previsto un impianto di condizionamento dell'aria, bensì i seguenti sistemi integrati di raffrescamento passivo, con predisposizione per l'allacciamento all'impianto di teleraffreddamento urbano, connesso al sistema di pannelli radianti a pavimento.

- a) **Controllo solare** delle chiusure trasparenti orientate a sud, est, ovest e orizzontali, tramite *schermature* e selezione di vetri a bassa trasmissione termica solare (fattore solare pari a 0,2, per le chiusure verticali e 0,4, per quelle orizzontali); particolare attenzione è stata posta al progetto della schermatura delle vetrate sud, collocate tra gli sporti verticali dei "contrafforti" con *Solarwall*®, al fine di ottimizzare il bilancio energetico annuale, senza compromettere le prestazioni d'illuminamento naturale.
- b) **Sistema di raffrescamento naturale strutturale** tramite ventilazione naturale notturna dei solai in cls, interpiano e di copertura, dalla parte dell'intradosso e delle altre strutture massive esposte (pavimenti, setti laterali) – nei periodi in cui la temperatura interna diurna dell'aria è superiore, e la temperatura notturna dell'aria esterna inferiore, alla temperatura dell'aria massima di comfort. L'immissione dell'aria avviene attraverso aperture a ribalta, verso l'esterno, collocate nella parte bassa delle chiusure vetrate delle pareti a sud e a nord (ad eccezione del piano terreno corpo nord, in cui le aperture sono nei sopraluce dei portali della mensa e della biblioteca), comandate elettricamente con attuatori connessi a sensori di temperatura (sia dell'aria esterna, sia della superficie esposta del solaio); l'estrazione dell'aria avviene da aperture variabili a doghe, collocate su pareti verticali di strutture elevate poste sulle coperture opache dell'atrio, controllate da attuatori connessi a sensori di temperatura dell'aria esterna e interna (nelle aule e in atrio). Il flusso avviene per effetto camino generato dal gradiente termico tra esterno e interno e dalla stratificazione delle temperature nell'atrio. Le caratteristiche termo-fluido-dinamiche di tale flusso sono state analizzate tramite simulazioni CFD (Programma *FLUENT*), di cui si riportano i risultati principali nell'Allegato D.
- c) **Sistema di raffrescamento geotermico indiretto** tramite ventilazione attraverso condotti interrati, integrata con il sistema di ventilazione meccanica a tutt'aria. Il dimensionamento dell'impianto è stato eseguito in relazione sia alla possibilità di contribuire al raffrescamento dell'intero edificio nelle stagioni intermedie, sia di soddisfare il fabbisogno di raffrescamento in locali specifici (biblioteca, laboratori, uffici), utilizzati anche nel periodo estivo più caldo. Il layout e i dettagli del sistema sono descritti negli elaborati planimetrici di riferimento per la sistemazione del sito. Una sintesi descrittiva delle principali caratteristiche, dimensionali e di funzionamento, del sistema è contenuta nell'allegato E.

Illuminazione naturale

Il sistema di schermatura delle chiusure trasparenti a sud è composto da doghe orizzontali di dimensione variabile con l'altezza e operabili stagionalmente, al fine di consentire un controllo solare ottimale senza penalizzare l'illuminazione naturale delle aule; le doghe sono previste con superfici superiori riflettenti in modo da riflettere all'interno, nel periodo invernale, la radiazione solare luminosa. Al fine di risparmiare energia elettrica per l'illuminazione, sono previsti, inoltre, dispositivi di *controllo automatico dell'illuminazione artificiale*, basati sulla disponibilità di illuminazione naturale e sull'occupazione degli spazi. Tali sistemi, così come gli altri finalizzati al risparmio di consumi d'energia elettrica, sono descritti nella relazione relativa al progetto esecutivo dell'impianto elettrico.

Elemento a soffitto a prestazioni integrate

Al fine di consentire il raffrescamento ventilativo notturno della massa esposta (intradosso) dei solai – in tutti i locali, ad eccezione di quello adibito a mensa – senza creare penalizzazioni nelle prestazioni connesse con le condizioni acustiche, quelle dell'illuminazione naturale e artificiale, e la diffusione dell'aria in ambiente, si è ipotizzata la progettazione e produzione di un elemento a carattere di prototipo, da appendere al soffitto, in numero e posizione tali da soddisfare i diversi requisiti. Tale elemento integra le seguenti funzioni e relativi componenti tecniche: assorbimento acustico, tramite materiale discontinuo tipo *top-acoustic*; illuminazione artificiale, tramite lampade ad alta efficienza, con curve fotometriche idonee; condotti d'aria circolari con diffusione distribuita tramite microfori; struttura autoportante tramite carter in metallo con connessi sistemi d'aggancio a soffitto. Schemi grafici illustrativi di tale elemento sono contenuti negli elaborati grafici di dettaglio del progetto.

Nelle simulazioni CFD dei flussi da ventilazione naturale notturna negli spazi aula del corpo sud, di cui all'Allegato D, si è tenuto conto di tali elementi.

4. Analisi del comportamento termico dell'edificio

Al fine di valutare l'efficacia dei sistemi tecnologici e impiantistici di climatizzazione e ventilazione proposti, si è sviluppata un'analisi dettagliata, in regime transitorio, del comportamento termico dell'edificio nel suo complesso e delle singole unità spaziali/zone termiche. Tale analisi è stata condotta utilizzando il programma di simulazione termica TRNSYS versione 16, associato al modello di simulazione multizona dei flussi d'aria COMIS, entrambi integrati nell'ambiente operativo IIsiBat, sviluppato dal CSTB.

I risultati delle simulazioni (Allegato B) consentono valutazioni sia di tipo energetico, connesse ai profili orari di tutti i giorni dell'anno e al relativo bilancio termico, sia sulle condizioni di benessere, con riferimento all'andamento orario della temperatura dell'aria, esterna e interna, nelle diverse zone, in regime controllato e free-floating.

4.1. Bilancio energetico, emissioni di gas serra e fattore d'efficienza energetico-ambientale

Fabbisogno termico

Il fabbisogno netto annuale di energia (al netto delle perdite di trasformazione della rete e del rendimento dell'impianto) per la climatizzazione, nella soluzione progettuale prospettata, e il contributo dei diversi sistemi di controllo climatico "passivo" (naturale e ibrido), sopra descritti, sono riportati in modo analitico nell'Allegato C, sia per il complesso dell'edificio, sia per le singole unità spaziali/zone termiche.

In sintesi, tenendo conto del contributo integrato dei sistemi di controllo climatico "passivo", si stima che il fabbisogno annuo di energia consegnata (al lordo del rendimento dell'impianto) sia di 224374 kWh, per la climatizzazione invernale ⁽⁵⁾, e 52800 kWh ⁽⁶⁾ per quella estiva ⁽⁷⁾.

Il fabbisogno annuo di energia consegnata per il riscaldamento dell'acqua igienico-sanitaria (ACS) è stimato in 20430 kWh, di cui 17713 kWh (86,7%) si prevede siano forniti dal sistema solare termico ad acqua. Si stima che quest'ultimo produca 21945 kWh/anno, contribuendo, quindi, anche al fabbisogno di riscaldamento ambienti, per 4232 kWh, che coprono il 1,89 % del fabbisogno stesso.

Il fabbisogno totale annuo effettivo di energia termica consegnata può essere stimato, quindi, in 220142 kWh per riscaldamento ambienti e 2717 kWh per produzione ACS, per un totale di 222859 kWh. Tale fabbisogno sarà fornito dal teleriscaldamento, "fonte" energetica che può essere considerata a metà rinnovabile, in quanto prodotta da un impianto di co-generazione elettricità-calore. Se ne desume che il fabbisogno di energia primaria (al lordo delle perdite di trasformazione e normalizzando rispetto all'impatto dei combustibili fossili non gassosi), applicando un fattore di conversione di 0,5, risulta essere di 111429 kWh, pari a 23,21 kWh/m²-anno.

Fabbisogno elettrico

Il fabbisogno annuale di energia elettrica consegnata è stato stimato tenendo conto della potenza delle apparecchiature installate e delle ore presunte di utilizzo, per tre categorie d'uso: illuminazione, ventilazione e pompaggio, altri usi. I dati di dettaglio, suddivisi per unità spaziale, sono contenuti nella tabella della pagina seguente. In sintesi, si prevede un consumo di energia elettrica pari a 189165 kWh_e, così suddivisi: 54161, per l'illuminazione; 124212, per la ventilazione e il pompaggio; 10792, per altri usi.

Si stima che il sistema solare fotovoltaico produca 64870 kWh_e/anno (potenza installata di 49,9 kW_e per 1300 ore equivalenti di produzione utile), che corrisponde al 34,29 % del fabbisogno totale.

Il fabbisogno annuo di energia consegnata effettivo, vale a dire sottraendo al fabbisogno totale la quota fornita dal sistema fotovoltaico, è stimabile in 124295 kWh_e. Il corrispondente fabbisogno annuo d'energia primaria ⁽⁸⁾ risulta essere di 331868 kWh_e, corrispondenti a 69,14 kWh_e/m²-anno.

Fattore d'efficienza energetico-ambientale

Il Fattore d'efficienza energetico-ambientale è dato da:

$$F_{eea} = (FEP_{rif} - FEP_{pro}) / FEP_{rif}$$

dove:

FEP_{rif} = Fabbisogno annuo d'energia primaria di riferimento

FEP_{pro} = Fabbisogno annuo d'energia primaria di progetto

Il FEP_{rif} è composto da: 902417 kWh ⁽⁹⁾, per il riscaldamento ambienti; 15322 kWh, per la produzione ACS, con fonte di riferimento metano ⁽¹⁰⁾; 505071 kWh, per consumi elettrici

⁽⁵⁾ Calcolato applicando un rendimento di 0,8 – riferibile alla sottocentrale dell'impianto di teleriscaldamento – al fabbisogno netto di energia termica per riscaldamento ambienti come ricavato da Scheda O, Allegato C (179499 kWh/anno).

⁽⁶⁾ Calcolato applicando un rendimento di 0,6 – riferibile alla sottocentrale dell'impianto di teleraffrescamento (0,8) e al gruppo di assorbimento (0,75) – al fabbisogno netto di energia termica per raffrescamento come ricavato da Scheda O, Allegato C (6,6 kWh/m²-anno x 4800 m² pari a 31680 kWh/anno).

⁽⁷⁾ Tale dato è da considerarsi un fabbisogno teorico per il raggiungimento di una temperatura ambiente interna di 26°, durante tutto il periodo estivo, ma non corrisponde a una previsione di consumo, in quanto non è previsto un impianto di condizionamento; in realtà, il fabbisogno reale sarà pressoché azzerato dal non completo utilizzo dell'edificio nei mesi di luglio e agosto e dal contributo dei condotti interrati.

⁽⁸⁾ Calcolato applicando un fattore di conversione per l'elettricità, normalizzato al combustibile fossile non gassoso, pari a 2,67, che tiene conto delle perdite di trasformazione e della fonte primaria (petrolio) della rete elettrica italiana.

⁽⁹⁾ Calcolato applicando un rendimento dell'impianto pari a 0,75 al fabbisogno netto così come indicato nella Scheda B, allegato C (676813 kWh), e considerando come fonte di riferimento il gasolio (coeff. conversione normalizzato a energia primaria =1);

(illuminazione, ventilazione e pompaggio, altri usi); 222921 kWh (¹¹) per il condizionamento ambienti.

Totale FEP_{rif} = 1646 MWh/anno.

Il FEP_{pro} è composto da: 111 MWh (fabbisogno termico per riscaldamento ambienti e acqua igienico-sanitaria); 332 MWh (fabbisogno elettrico).

Totale FEP_{pro} = 443 MWh/anno

$$F_{eea} = (1646 - 443) / 1646 = 0,73$$

Valore appartenente alla classe 4.

Emissioni di gas serra

La quantità di gas serra (CO₂ equivalente) evitata all'anno può essere stimata in funzione dell'energia primaria risparmiata, rispetto alla configurazione di riferimento, così come segue:

$$1203000 \text{ KWh} \times 0.03 \text{ Kg/KWh} = 36090 \text{ Kg/anno}$$

dove:

1203000 KWh è l'energia primaria risparmiata all'anno, desunta dal calcolo del Fattore d'efficienza energetico-ambientale;

0.03 Kg/KWh è il fattore di emissione di CO_{2(eq)} per unità di energia primaria.

il fabbisogno netto d'energia fa riferimento ai requisiti di involucro del DL 192/05 e a un funzionamento dell'impianto per 24 ore.

⁽¹⁰⁾ Coefficiente di conversione a energia primaria normalizzato = 0,75.

⁽¹¹⁾ Calcolato applicando un rendimento dell'impianto pari a 2,2 (macchina frigorifera con condensazione ad aria) al fabbisogno netto così come indicato nella Scheda B, allegato C (183680 kWh), e considerando come fonte di riferimento l'elettricità; il fabbisogno netto d'energia fa riferimento ai requisiti di involucro del DL 192/05 e a un funzionamento dell'impianto per 24 ore.

CALCOLO DEL FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA

1. energia elettrica per l'illuminazione degli ambienti

rif. quadro	ambiente	potenza [KW]	n° ambienti	ore di utilizzo												fatt_sett	Fabb_anno [KWh]
				gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic		
Q0	scale lato est	1,6	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	991,89
	esterna lato est	1,5	1	12	11	10	9	8	7	8	9	10	11	12	13	0,79	3899,89
	lato est	3,1	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	1921,78
Q6	corridoio p. int / archivi	6,2	1	2	2	2	2	2	2	0	0	2	2	2	2	0,79	2659,80
	scala ovest	1,52	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	942,29
	esterna ovest	1,5	1	12	11	10	9	8	7	8	9	10	11	12	13	0,79	3899,89
Q7	corridoio	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
	vano tecnico	0,5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0,71	96,92
Q7.1	aule e altri	0,55	32	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	10910,74
Q8	corridoio p.t. nord	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
	androne	3,1	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2313,93
	tunnel	3,1	1	2	2	1	1	0	0	0	1	1	2	2	0,79	759,94	
Q8.1	biblioteca	1,2	1	7	6	5	4	3	2	2	3	4	5	6	7	0,79	1376,57
Q8.2	mensa	1,2	1	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3	3	0,71	697,79
Q8.3	luci cucina	1,2	1	4	4	4	4	4	4	0	0	4	4	4	4	0,71	930,38
	altre	29	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0,71	5621,07
Q9	corridoio p.1. Sud	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
	corridoio p.1. Nord	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
Q10.1	ufficio	1,1	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	681,92
Q10.8	sala insegnanti	1,2	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	743,91
Q11	corridoio p.2. Sud	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
Q12	corridoio p.2. Nord	3,01	1	6	5	4	3	2	2	0	0	2	3	4	5	0,79	2246,75
Q12.1	ufficio-laboratorio	1,2	1	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	743,91
Q12.4	laboratorio	0,6	4	5	4	3	2	1	1	0	0	2	3	4	5	0,79	1487,83
totale anno [KWh]																54160,96	

2. energia elettrica per la ventilazione e il pompaggio

rif. quadro	ambiente	potenza [KW]	n° ambienti	ore di utilizzo												fatt_sett	Fabb_anno [KWh]
				gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic		
-	ventilatori p. interrato	20	1	0	0	0	3	6	6	6	0	6	3	0	0	0,79	13907,14
-	ventilatori mensa	17	1	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	4	4	0,71	10500,90
-	ventilatori biblioteca	17	1	7	7	7	7	7	7	7	0	7	7	7	7	0,79	28424,00
-	ventilatori aule e laboratori	43	1	6	6	6	6	6	4	0	0	4	6	7	8	0,79	53719,29
-	pompaggi primari	33	1	5	5	3	1	0	0	0	0	0	0	3	5	0,79	14338,50
-	pompaggi secondari	14	1	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2	0,79	3322,00
totale anno [KWh]																124211,83	

3. energia elettrica per altri usi

rif. quadro	ambiente	potenza [KW]	n° ambienti	ore di utilizzo												fatt_sett	Fabb_anno [KWh]
				gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic		
-	varie	50	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0,71	10792,00
totale anno [KWh]																10792,00	

Fabbisogno di energia elettrica	totale anno [KWh]	189164,79
--	--------------------------	------------------

5. Uso razionale delle risorse idriche

5.1. Tecnologie per il contenimento del consumo di acqua potabile

Le tecnologie volte al contenimento del consumo di acqua potabile stanno acquistando un'importanza crescente, anche in relazione al trend di cambiamento climatico in atto verso condizioni di riscaldamento globale dell'atmosfera e di conseguente siccità. Nel progetto esecutivo dell'edificio per la Scuola Media L. Orsini sono inserite le seguenti strategie.

- a) *Riduzione del fabbisogno di acqua potabile*, tramite rubinetti a controllo automatico dell'erogazione e vaschette di cacciata a doppia portata.
- b) *Recupero e riutilizzo dell'acqua piovana a fini irrigui*: l'acqua piovana sarà raccolta e accumulata in serbatoi, per essere riutilizzata – previo filtraggio e trattamento deacidificante – per l'irrigazione delle superfici a verde.

5.2. Dimensionamento dei serbatoi d'accumulo dell'acqua piovana

Il dimensionamento dei serbatoi d'accumulo sono stati effettuati utilizzando la seguente procedura, indicata dalla norma tedesca DIN 1989-1 (*DIN 1989-1:2002-04 Rainwater harvesting systems - Part 1: Planning, installation, operation and maintenance*).

La *quantità d'acqua piovana che è possibile captare in un anno* è data da:

$$V = (\varphi \times S \times P \times \eta) / 0,001$$

dove:

- V = quantità d'acqua piovana che può essere raccolta (l);
- φ = coefficiente di deflusso (0,8 per coperture rigide; 0,6 per coperture con ciottoli e ghiaia; 0,5 per superfici pavimentate; 0,4 per giardini pensili);
- S = superficie complessiva da cui si raccoglie la pioggia, calcolata, nel caso di tetti a falde, come proiezione in pianta (m²);
- P = altezza annuale di pioggia (m);
- η = efficienza del filtro (dato fornito dal costruttore, assumibile pari a 0,9);
- 0,001 = fattore di conversione per passare da m³ a l (si ricorda che 1 m³ = 1000 l).

Il *fabbisogno idrico annuale per uso irrigazione* è dato da:

$$F_i = A \times f_i$$

dove:

- F_i = quantità d'acqua necessaria per irrigazione (l);
- A = superficie da irrigare (m²);
- f_i = fabbisogno annuo specifico del tipo di coltura, variabile da 60 a 150 l/m² (l/m²).

Il *calcolo della capienza del serbatoio* è dato da:

$$V_{\text{serbatoio}} = \min(V, F) \times n_{\text{gps}} / 365$$

$$n_{\text{gps}} = \text{numero di giorni periodo secco}$$

I risultati di tale calcolo, le caratteristiche del sistema di raccolta e recupero dell'acqua piovana e la collocazione dei serbatoi di accumulo, sono illustrati nella relazione allegata alla progettazione dell'impianto idrosanitario.

6. Uso razionale delle risorse derivanti da scarti e rifiuti

6.1. Rifiuti da demolizione e costruzione

Una gestione sostenibile dei rifiuti da C&D implica la necessità di ridurre al minimo la quota non recuperabile o riciclabile dei medesimi, attraverso strategie e tecnologie da porsi in atto nelle fasi produttive del ciclo di vita dell'edificio: quella in opera (cantiere) e quella di dismissione (demolizione).

Per quanto attiene la fase in opera, si tratta di porre in atto misure di recupero e riciclaggio dei materiali da costruzione in *cantiere*, razionalizzando il programma di fornitura e posa in opera, come sarà fatto in fase di programmazione del cantiere.

Per la *fase di dismissione*, occorre prevedere tecniche di demolizione selettiva e di conferimento a centri di distribuzione e riciclaggio dei materiali recuperati. Tali requisiti saranno inclusi nel programma di dismissione, connesso a quello di manutenzione programmata.

6.2. Impiego di tecnologie costruttive a secco

Per aumentare il potenziale di recupero e riciclaggio in fase di dismissione, risulta sostanziale l'utilizzo di *sistemi costruttivi stratificati a secco*, come quelli previsti nel presente progetto esecutivo. Avendo scelto una struttura portante in c.a. con solai a piastra, al fine di garantire la necessaria massa termica per il raffrescamento ventilativo notturno, l'opzione "a secco" riguarda gli elementi di involucro – chiusure esterne opache di tamponamento, esclusi i "contrafforti" strutturali lato sud – e le partizioni interne verticali. I dettagli descrittivi di tali sistemi sono inclusi nella relazione del progetto architettonico e nelle relative tavole di progetto.

7. Benessere, igiene e salute dell'utente

7.1. Benessere degli spazi esterni

Nel progetto di sistemazione degli spazi esterni si è tenuto conto degli effetti dei materiali, della vegetazione e degli arredi sul benessere dell'utente. Dal punto di vista del *benessere termoigrometrico*, percorsi, arredi, pavimentazioni, rivestimenti, e sistemazione a verde sono tali da garantire: esposizione alla radiazione solare e protezione dai venti, d'inverno; protezione dalla radiazione solare, esposizione ai venti e scambi termici radianti ridotti, d'estate.

Per quanto riguarda il *controllo del rumore*, sono previste barriere vegetali idonee a proteggere gli ambienti interni – particolarmente, quelli destinati a aula e biblioteca – da possibili fonti di rumore esterna.

In relazione al *benessere percettivo*, infine, i criteri di sistemazione degli spazi esterni tengono conto della funzione di stimolazione sensoriale, particolarmente importante in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio in oggetto.

7.2. Benessere degli spazi interni

Il progetto prevede le seguenti strategie e tecnologie per migliorare le prestazioni ambientali degli spazi interni ai fini del benessere.

- a) *Benessere termoigrometrico*. Il progetto esecutivo del sistema di climatizzazione, con integrazione delle tecnologie ecocompatibili sopra descritte, realizza condizioni quantitative di benessere termoigrometrico durante tutto il periodo d'uso, come evidenziano le simulazioni in regime transitorio delle temperatura dell'aria, radiante e operativa (Allegato B). Dal punto di vista qualitativo, contribuiscono, altresì, alle condizioni di benessere: l'impiego di canali diffusori microforati, in modo tale da evitare correnti fastidiose e velocità eccessive dell'aria; utilizzo dei terminali radianti del sistema di climatizzazione, con della temperatura interna per singolo ambiente.
- b) *Benessere percettivo*. Il progetto esecutivo prevede l'inserimento in Capitolato di una selezione attenta dei colori delle superfici interne, in relazione alle destinazioni d'uso specifiche dei locali, basata su criteri mutuati dalla cromo-terapia e interpretati in chiave pedagogica.

7.3. Assenza di emissioni nocive negli spazi interni

Le emissioni tossico-nocive negli spazi interni possono essere eliminate attraverso strategie e tecnologie, che interessano sia la fase di progetto, sia quella di gestione dell'edificio in oggetto. Per quanto attiene il progetto esecutivo dell'edificio per la Scuola Media L. Orsini, si sono considerate le opzioni di seguito illustrate.

- a) Scelta di *materiali esenti da emissioni nocive*, relative, in particolare, a sostanze cancerogene e allergeniche, quali i composti organici volatili, i composti del PVC e i componenti lapidei che emettono radon. Tale scelta risulta evidente dalla descrizione dettagliata dei materiali previsti, contenuta nel Computo metrico e nel Capitolato speciale, nonché indicata negli elaborati di progetto. In particolare, i materiali isolanti scelti e le sostanze che compongono i rivestimenti interni a contatto con gli ambienti d'uso, sono essenzialmente di origine naturale e, comunque, ne sarà richiesta certificazione ambientale di tipo ISO III (*environmental labelling*) o II (*environmental declaration*).
- b) *Qualità dell'aria* garantita dalla regolazione del tasso di ricambio dell'aria, realizzata con l'impianto di ventilazione meccanica controllata a portata variabile, in taluni casi anche tramite attuatori collegati a sensori della concentrazione di CO₂.
- c) *Inquinamento elettromagnetico* minimizzato da una progettazione esecutiva dell'impianto elettrico (si veda la relazione specifica), tale da minimizzare le variazioni di campo elettrico e magnetico a frequenza estremamente bassa.

8. Gestione e monitoraggio dei sistemi di controllo climatico

Considerata la complessità dell'edificio progettato e delle interazioni tra elementi architettonici, funzioni d'uso e controllo ambientale/microclimatico da parte dei sistemi "passivi" e attivi (impiantistici), sarà di particolare importanza la gestione dell'edificio, dal punto di vista del controllo climatico, e l'implementazione del relativo monitoraggio post-occupancy.

8.1. Gestione del controllo climatico dell'edificio

L'integrazione tra sistema di climatizzazione meccanico e tecnologie di controllo climatico ecocompatibili – basate sullo sfruttamento controllato di risorse e pozzi naturali, con o senza l'ausilio di energia esogena per la movimentazione dei fluidi – funziona a condizione che siano funzionanti i dispositivi di regolazione automatizzata dei flussi, previsti dal progetto.

Nel definire tale sistema di regolazione, si è tenuto conto della specificità della destinazione d'uso dell'edificio in progetto. In particolare, il sistema risponde alle seguenti caratteristiche:

- a) l'automazione dei dispositivi si ha solamente quando strettamente necessaria, ad evitare interferenze negative per il funzionamento del sistema di controllo climatico;
- b) dove possibile, sono previsti dispositivi di backup, che garantiscono il funzionamento manuale dell'attuatore di controllo, con ritorno in automatico dopo un certo periodo di tempo;
- c) la centrale di controllo dei dispositivi di regolazione automatica dei flussi è integrata con il sistema di raccolta dei dati di monitoraggio;
- d) si distinguono dispositivi a complessità e operabilità differenziata, in relazione a due tipologie di intervalli temporali di attivazione: giornalieri (ad esempio, intervallo giorno-notte per le aperture relative al raffrescamento strutturale, intervallo stagionale, per le schermature a doghe orizzontali mobili delle chiusure a sud).

In particolare, il sistema di regolazione automatica dei flussi, si caratterizza per le seguenti modalità di funzionamento.

Ottimizzazione del funzionamento degli impianti

Ciascuna UTA avrà una programmazione oraria settimanale, che distingua le ore di occupazione (di seguito indicate come GIORNO) da quelle di non occupazione (NOTTE). Tale gestione ha come obiettivo l'impostazione di un utilizzo ottimale del sistema impiantistico, in integrazione con quello naturale, sia nel periodo invernale, sia in quello estivo, con conseguente potenziale risparmio di energia, come si evince dai risultati delle simulazioni termiche (Allegato C).

La programmazione potrà essere effettuata dai manutentori e modificata ogni qual volta si registri una variazione di orario e quindi di utilizzo dei diversi locali.

Le modalità GIORNO e NOTTE saranno attivate in funzione del regime di occupazione, ma anche considerando variabili microclimatiche ⁽¹²⁾.

Analogo tipo di regolazione potrà essere attuato facendo funzionare il sistema solare termico ad acqua, in associazione con i terminali radianti a pavimento, in modalità NOTTE, qualora vi sia energia in esubero rispetto a quella accumulata al fine di soddisfare il fabbisogno di acqua calda sanitaria.

Regolazione del sistema di ventilazione naturale controllata

Si prevede un sistema di regolazione automatica di controllo dei flussi d'aria, generati per effetto camino, al fine di ottimizzarne l'utilizzo, sia per il ricambio a scopi igienico-sanitari, sia per il raffrescamento ambientale e strutturale. Le

⁽¹²⁾ Ad esempio, in inverno, l'impianto di ventilazione meccanica potrà funzionare anche in modalità NOTTE (nel caso il pomeriggio), qualora gli apporti del Solarwall®, utilizzando le masse dell'edificio come accumulo termico, compensino l'energia consumata dai ventilatori delle UTA. In tal caso il funzionamento dell'impianto sarà guidato dalla temperatura in uscita del Solarwall®.

caratteristiche di tale regolazione variano in relazione ai locali considerati e all'utilizzo dei flussi, come di seguito descritto.

Ventilazione naturale notturna estiva dei locali

Si prevede l'installazione di una sonda di temperatura dell'aria interna, in prossimità del serramento apribile tra locali e atrio (da collocarsi in posizione baricentrica rispetto l'apertura) e di due sonde di temperatura dell'aria esterna, posizionate, rispettivamente, sul lato S-SO e N-NE dell'edificio (in facciata).

La ventilazione notturna (modalità NOTTE) si aziona con l'apertura di serramenti esterni a *vasistas*, in funzione della differenza di temperatura tra interno ed esterno ($T_e < T_i$); se $T_e > T_i$, la ventilazione naturale non è attivata e può entrare in funzione il sistema di scambio geotermico ⁽¹³⁾.

Si prevede un consenso all'apertura dei *vasistas*, in funzione della velocità del vento, fissando una soglia limite superiore (ad esempio 6 m/s).

Ventilazione naturale diurna estiva dei locali

Premesso che l'ottimizzazione del sistema di gestione e supervisione avverrà solamente in fase d'uso, sulla base delle misure in opera (monitoraggio), si prevede, in modalità GIORNO, il funzionamento del sistema di ventilazione meccanica. Durante il periodo estivo, quindi, le UTA preleveranno aria dall'esterno o dai condotti interrati, in funzione delle esigenze interne e delle condizioni climatiche esterne (temperatura e umidità relativa).

Dopo la fase di messa a regime del sistema di supervisione e controllo, potrà essere prevista la possibilità di ventilare naturalmente i singoli ambienti anche in modalità GIORNO (senza prevedere altri sistemi di regolazione rispetto quelli già previsti per la ventilazione notturna), ponendo la condizione che la temperatura esterna sia compresa fra 20 e 26 °C e l'UR < 60 %.

Si dovrà verificare che le portate da ventilazione naturale garantiscano, come media giornaliera, ricambi d'aria sufficienti nei locali, confermando i risultati delle simulazioni dei flussi d'aria (vedi Allegato B). In ogni caso, ventilazione naturale e meccanica non funzioneranno congiuntamente.

Ventilazione naturale dell'atrio centrale

Si prevede che i *torrini* d'estrazione, posizionati in copertura, abbiano le serrande in posizione di massima apertura costantemente, durante il periodo estivo. La portata da effetto camino è comandata dalle aperture esterne delle aule e da quelle collocate sulla parte inferiore delle pareti vetrate est e ovest dell'atrio, operabili con attuatori collegati ad una sonda di temperatura dell'aria ad ogni piano.

In modalità GIORNO tali aperture saranno operate in funzione della differenza di temperatura dell'aria tra interno e esterno; il flusso naturale dell'aria avverrà contemporaneamente al funzionamento della ventilazione meccanica, come ausilio per evitare il surriscaldamento dell'aria nelle parti alte dell'atrio.

Per quanto riguarda la modalità NOTTE, occorrerà verificare, sulla base del monitoraggio, le possibili interferenze tra la ventilazione dell'atrio (aperture basse e alte) e l'estrazione per effetto camino dell'aria delle aule, al fine di settare appropriate soglie di differenza di temperatura dell'aria interno/esterno per l'azionamento dell'apertura delle serrande dei torrini d'estrazione.

⁽¹³⁾ Tale ipotesi potrebbe interessare le ore del mattino che precedono l'occupazione, al fine di pre-raffrescare i locali, ulteriormente rispetto al free-cooling (raffrescamento strutturale) notturno. La decisione dovrà essere presa in seguito al monitoraggio diretto delle prestazioni dei condotti interrati ed in relazione alle effettive potenzialità del raffrescamento strutturale.

Valori di soglia, e condizioni di funzionamento del sistema di aperture, sono stati ipotizzati per la descrizione del modello TRNSYS-COMIS (si veda Allegato B).

Controllo solare

La gestione degli schermi mobili a rullo, posizionati sulle facciate S-SO e E-SE, dipenderà dalla quantità di radiazione solare incidente sulle facciate stesse, con un valore di soglia massimo di 300 W/m².

Il livello di abbassamento dello schermo sarà differenziato in relazione all'orientamento:

- a S-SO dovrà essere tale da coprire la chiusura trasparente nella parte alta;
- a E-SE sarà totale, essendo necessario schermare già dalle prime ore del mattino, quando gli ambienti non sono occupati.

All'interno dell'aula sarà comunque possibile modificare la configurazione dello schermo in relazione a specifiche esigenze.

La gestione del sistema di schermatura fissa, con doghe orientabili, sulla facciata S-SO, prevede posizioni predefinite dell'inclinazione delle stesse, regolate attraverso una programmazione stagionale.

9. Monitoraggio

Il progetto prevede l'installazione di dispositivi di controllo e sensori ambientali per il rilevamento dei dati di alcuni parametri climatici, nel breve, medio e lungo termine, al fine di verificare il funzionamento in fase d'uso dei sistemi di controllo climatico, attivi e passivi, applicati nell'edificio.

Il sistema prevede l'installazione dei dispositivi di rilevamento di seguito descritti in sintesi e posizionati come indicato negli elaborati del progetto esecutivo dell'impianto di climatizzazione.

Misure microclimatiche esterne

Si prevede l'installazione di una centralina microclimatica, localizzata sul tetto, per la misura di: temperatura, velocità e direzione del vento, irraggiamento solare, altezza delle precipitazioni.

Si prevedono, inoltre, due sonde di temperatura aria da collocarsi sul fronte Sud e su quello Nord, da utilizzarsi per il controllo del sistema di aperture dell'edificio, rispettivamente, del blocco Sud e di quello Nord.

Monitoraggio sperimentale del raffrescamento ventilativo strutturale

Al fine di verificare l'efficacia del raffrescamento ventilativo strutturale, è previsto un programma di monitoraggio specifico, a campione, su tre aule sovrapposte del blocco S-SO e nell'atrio.

I dispositivi di rilevamento che si prevede di installare sono i seguenti.

In ogni aula:

- 3 sonde per la misura della temperatura superficiale del soffitto, poste secondo un piano di sezione ortogonale, rispetto alla facciata, e in posizione coperta e scoperta alla vista degli elementi appesi a prestazione integrata;

- 3 sonde per la misura della temperatura superficiale del pavimento, in corrispondenza di quelle a soffitto;
- 3 dispositivi, in corrispondenza dei serramenti a *vasistas*, per la misura, rispettivamente, della temperatura dell'aria, della velocità dell'aria e della UR;
- 4 dispositivi, in corrispondenza dei serramenti tra aula e atrio, per la misura, rispettivamente, della temperatura dell'aria, della velocità dell'aria, della UR e della CO₂.
- 1 misuratore di CO₂ in corrispondenza della bocchetta di ripresa dell'aria del sistema di ventilazione meccanica.
- 5 sonde, per la misura della temperatura, da annegare nella struttura del solaio in c.a. (4) e del pavimento (1).

Nell'atrio:

- 15 sonde, per la misura della temperatura dell'aria, e 15 anemometri, da collocare ad ogni piano, in coppia, in corrispondenza delle 5 aree vuote che "forano" il solaio interpiano nello spazio dell'atrio stesso;
- 1 anemometro e una sonda per la misura della temperatura dell'aria, per ogni torrino di estrazione, collocato in copertura.

Monitoraggio dello scambiatore geotermico

Al fine di verificare l'efficacia del sistema di scambio geotermico in fase d'uso, e nel medio-lungo termine, si prevede un programma di monitoraggio basato su due livelli, uno generale, l'altro più dettagliato.

Livello generale

Per ciascuno dei tre campi di condotti interrati è prevista una misura della temperatura e umidità dell'aria in corrispondenza della camera di presa (ingresso del flusso) e di quella di condensazione (uscita del flusso).

Livello di dettaglio

In un solo campo di condotti interrati, preso come campione, si prevede 1 misura di velocità e temperatura dell'aria ogni 2 condotti (su 12). In tre condotti sono previste, inoltre, misure della temperatura superficiale del condotto, una misura della temperatura aria interna al condotto, più misure della temperatura del terreno, condotte a diverse profondità distanze tra i condotti stessi, come da progetto esecutivo.

ALLEGATO A

DATI CLIMATICI

1. Parametri climatici e dati medi mensili e annuali

I parametri climatico-territoriali caratteristici del Comune di Imola sono: latitudine 44° 21', longitudine 11° 43', zona climatica E, gradi giorno 2292 ⁽¹⁴⁾; regione di vento B, zona di vento 1 (media annuale della velocità giornaliera del vento 1,6 m/s, direzione prevalente SW), temperatura e ampiezza massime estive, rispettivamente, di 33 e 12 °C ⁽¹⁵⁾.

Dati medi mensili delle principali variabili climatiche sono indicati nella tabella che segue ⁽¹⁾.

mese	temp. media dell'aria (°C)		radiazione solare giornaliera (MJ/m ²)	vento		umidità relativa (%)	
	t _{min}	t _{max}		velocità media (m/s)	direzioni prevalenti	min.	max.
Gennaio	-0,7	5,9	5,2	2,9	W-N	73	92
Febbraio	1,3	9,3	7,8	2,8	W-N	63	90
Marzo	4,5	14,0	13,6	2,9	W-S	53	87
Aprile	7,8	18,1	17,2	2,9	S-E	54	89
Maggio	11,8	22,9	21,2	2,9	S-W	52	87
Giugno	15,6	26,9	23,0	2,8	S-E	48	86
Luglio	17,5	29,8	23,3	2,9	E-S	45	86
Agosto	17,5	29,4	19,9	2,7	E-S	47	86
Settembre	14,6	25,5	14,9	2,7	S-W	52	89
Ottobre	10,0	19,4	10,3	2,8	W-S	64	93
Novembre	4,8	12,4	6,1	2,9	W-NW	75	95
Dicembre	0,0	7,0	4,3	2,9	W-N	74	93

2. Anno tipo

La simulazione energetica effettuata, utilizzando il programma TRNSYS, versione 16, utilizza valori orari delle variabili climatiche, riferiti all'anno tipo. Per i valori di temperatura dell'aria, riferiti al comune di Imola, si è utilizzato l'anno tipo fornito dall'ARPA di Bologna, mentre per le altre variabili, si è utilizzato l'anno tipo sviluppato dal programma Meteonorm, già incluso nel data-base di TRNSYS.

Le pagine che seguono riportano grafici del profilo orario ⁽¹⁶⁾, riferito all'anno tipo, per le seguenti variabili:

GRAFICO A1 – Profilo orario delle variabili climatiche per l'anno tipo: temperatura dell'aria esterna e radiazione solare sul piano orizzontale;

GRAFICO A2 – Profilo orario delle variabili climatiche per l'anno tipo: temperatura dell'aria esterna e radiazione solare sul piano verticale a S-SO;

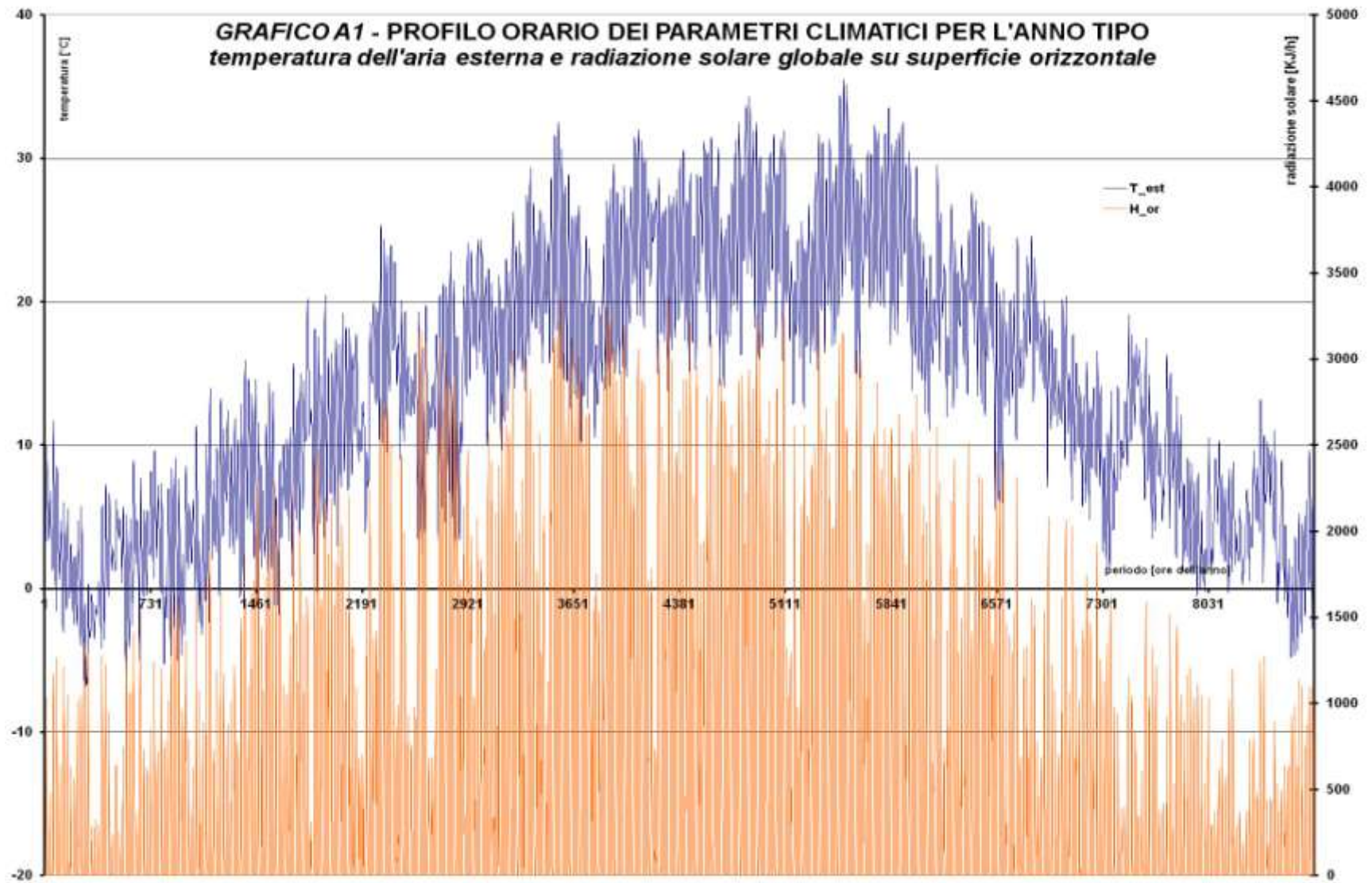
GRAFICO A3 – Profilo orario delle variabili climatiche per l'anno tipo: temperatura dell'aria esterna e umidità relativa;

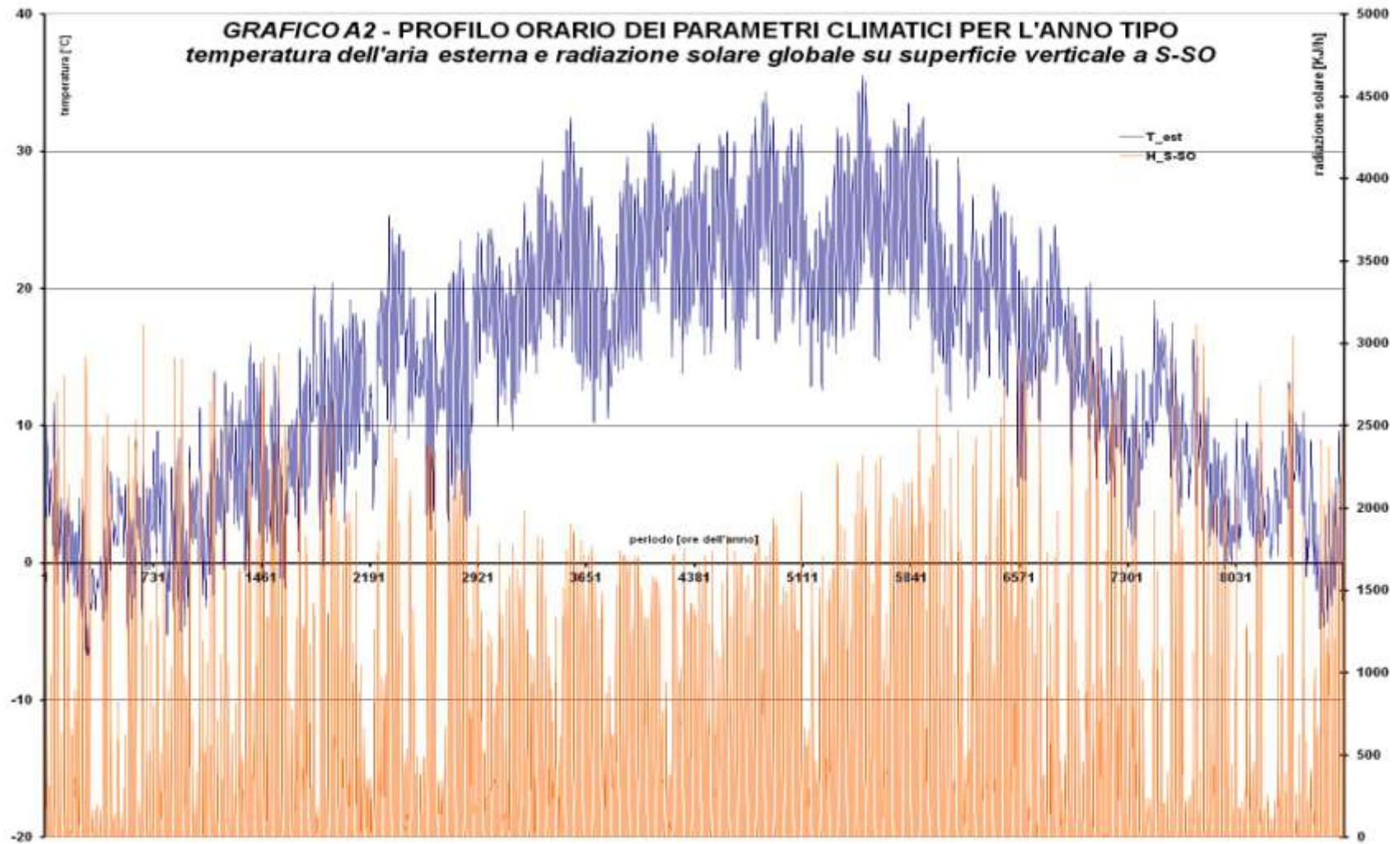
GRAFICO A4 – Profilo orario delle variabili climatiche per l'anno tipo: temperatura dell'aria esterna e velocità media omnidirezionale del vento

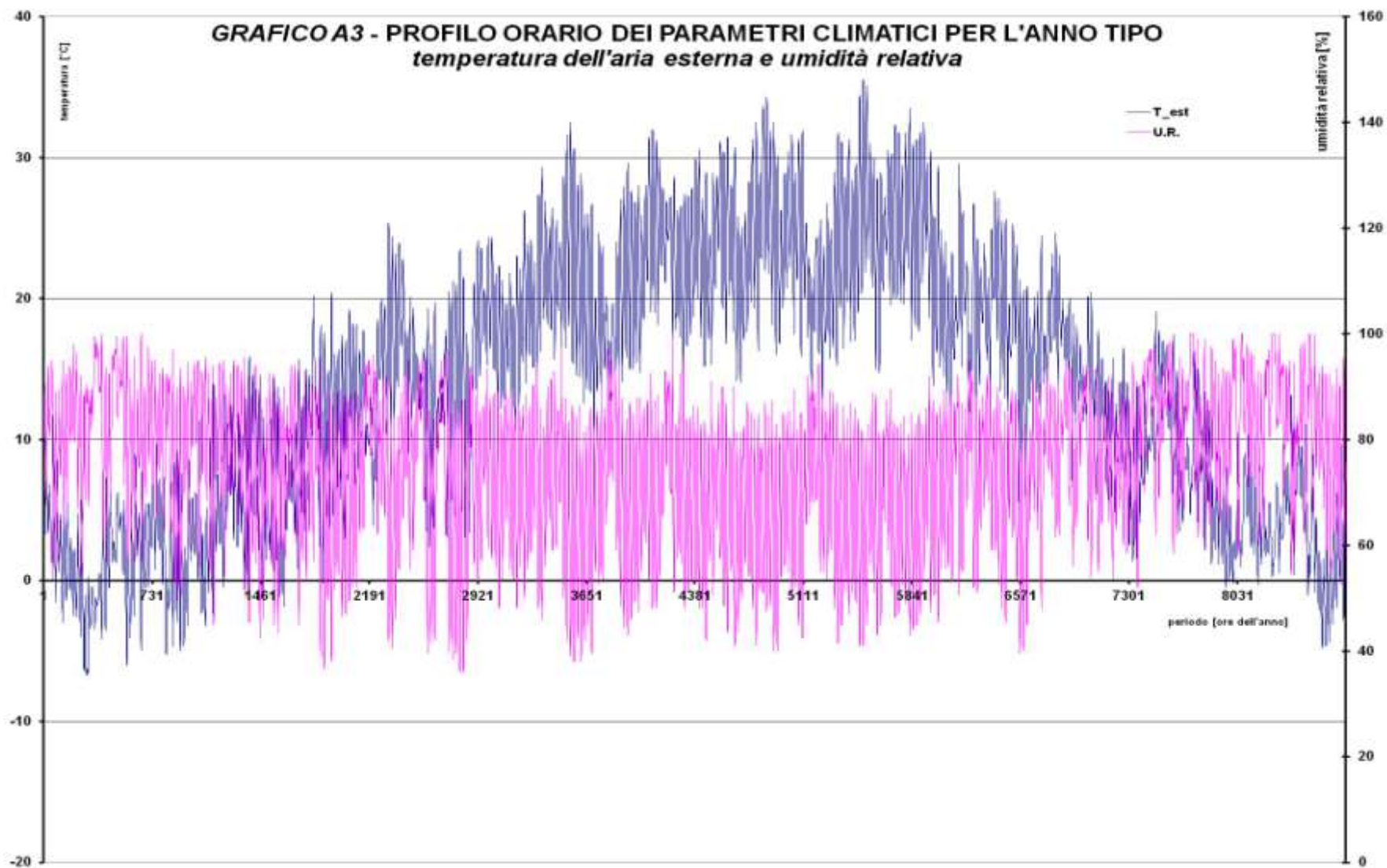
⁽¹⁴⁾ Fonte: Petrarca S., Spinelli F., Cogliani E., Mancini M., *Profilo climatico dell'Italia, Volume 2 – Lombardia, Emilia Romagna*, ENEA, Dipartimento Energia, Roma, 1999.

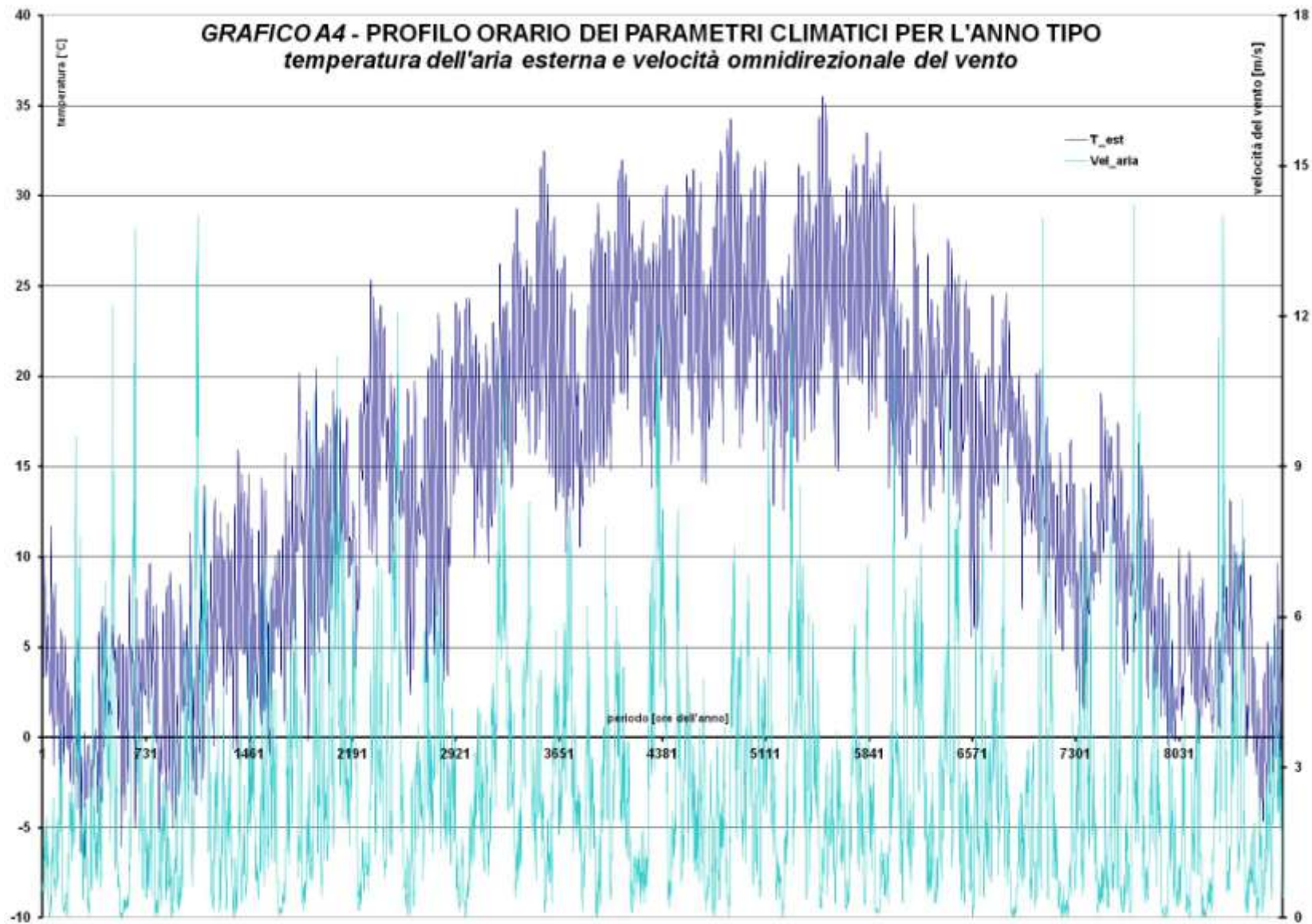
⁽¹⁵⁾ Fonte: UNI 10349: 1994/CE. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici. I dati indicati sono quelli del capoluogo di provincia (Bologna).

⁽¹⁶⁾ Fonte: banca dati Meteonorm di TRNSYS 16.









ALLEGATO B

ANALISI DEL COMPERTAMENTO TERMICO DELL'EDIFICIO

1. Obiettivi, strumenti e struttura del modello di simulazione

1.1 Obiettivi e strumenti di simulazione

La presente simulazione ha come obiettivo l'analisi del comportamento termico, in regime dinamico, dell'edificio della scuola media L. Orsini di Imola, così come prevista nel progetto esecutivo, che congela l'insieme delle strategie elaborate in fase progettuale e volte alla riduzione dei fabbisogni di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, e all'innalzamento della qualità ambientale degli spazi interni.

Il calcolo è finalizzato alla quantificazione del fabbisogno di energia per il riscaldamento, dei flussi d'aria in regime di ventilazione naturale e della temperatura media dell'aria all'interno di alcuni spazi significativi.

Lo strumento impiegato è un programma di simulazione termica a parametri concentrati, il TRNSYS versione 16, abbinato ad un programma di simulazione dei flussi d'aria naturali, il COMIS 3.2, con interfaccia IISiBat2 sviluppato dal CSTB di Sophia Antipolis (FR).

1.2 Struttura del modello

La struttura del programma è di tipo modulare, costituito da "type", che rappresentano un sottoprogramma in Fortran in grado di elaborare degli input di ingresso secondo una serie di algoritmi precostituiti (o modificabili) e restituire degli output. I collegamenti tra i moduli originano una rete nella quale si scambiano input ed output.

La figura 1 mostra la videata del modello realizzato in TRNSYS per l'edificio in questione e la rete dei collegamenti tra le varie type.

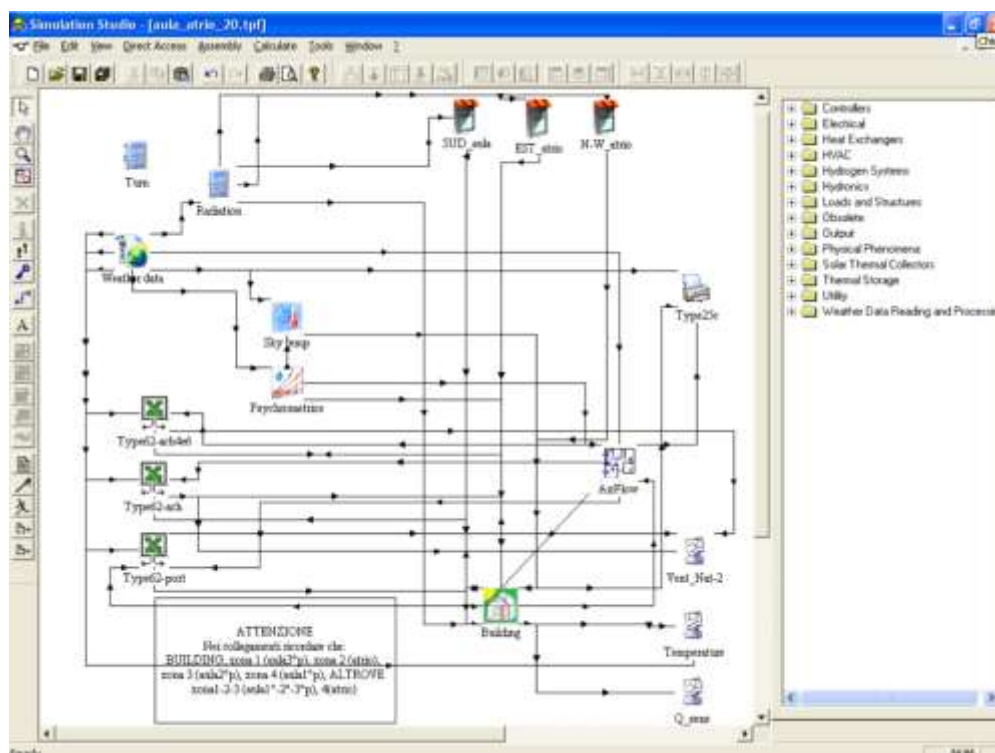


Figura 1 – Videata di TRNSYS e rete dei collegamenti tra le Type

Le type configurate per la simulazione secondo il modello sopra riportato sono le seguenti.

Definizione delle condizioni climatiche e dell'ambiente esterno

WEATHER DATA, che preleva da una apposita banca dati (*Meteonorm*) il file climatico della località in esame (nel caso si è fatto riferimento ai dati climatici di Bologna);

RADIATION E TURN, hanno funzione di controllo dei dati climatici, spesso non completi a causa di problemi relativi alla stazione di misurazione;

SKY TEMP, permette di calcolare la temperatura effettiva del cielo per lo scambio radiativo a grande lunghezza d'onda;

PSYCHROMETRICS, calcola la temperatura a bulbo umido ed altri parametri dell'aria umida in funzione delle caratteristiche esterne;

Descrizione dell'edificio

SUD_AULA, EST_ATRIO, N-W_ATRIO, type che permettono di tenere conto della presenza di schermi ed ostruzioni esterne, in particolare di oggetti orizzontali e oggetti verticali, in funzione della loro geometria;

BUILDING, richiama un programma esterno (TRNbuild) attraverso il quale è possibile descrivere l'edificio distinguendolo in zone termiche. Ciascuna di queste viene definita per mezzo delle caratteristiche termofisiche dei componenti di involucro, i parametri di utilizzo e di occupazione, le modalità di funzionamento e regolazione degli impianti.

AIRFLOW, permette di richiamare un programma esterno (COMIS 3.2) al fine di calcolare le portate e i ricambi di ventilazione naturale in relazione alle temperature degli ambienti interni; è anch'esso di tipo modulare con collegamenti tra le varie type (Figura 2).

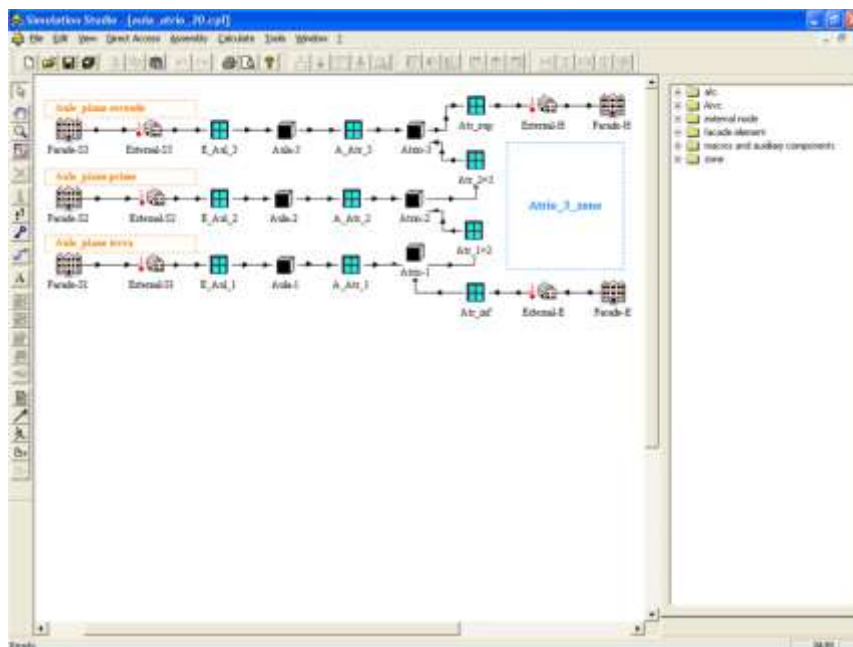


Figura 2 – Videata di COMIS e rete dei collegamenti

2. Oggetto della simulazione

2.1. Descrizione generale

L'edificio della scuola media si sviluppa, planimetricamente, secondo un asse longitudinale ruotato di 15° a Ovest, rispetto all'esposizione Sud, e può essere distinto in tre principali blocchi: blocco a Sud, blocco Atrio e blocco Laboratori-Servizi, sovrapposti ad un piano interrato non riscaldato (Figura 3).

La presente simulazione fa riferimento all'intero edificio scolastico per il periodo invernale, al blocco Atrio e al blocco Sud per il periodo estivo.

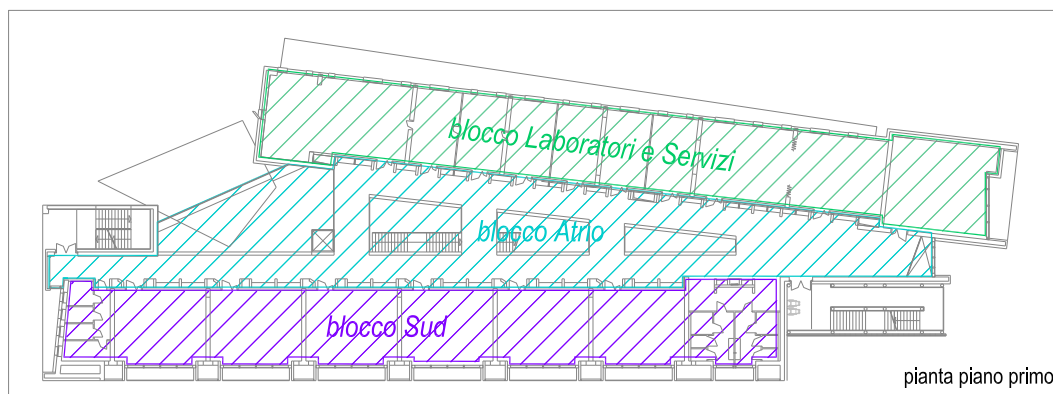


Figura 3 – Indicazione dei blocchi, in planimetria, in cui l'edificio è stato suddiviso

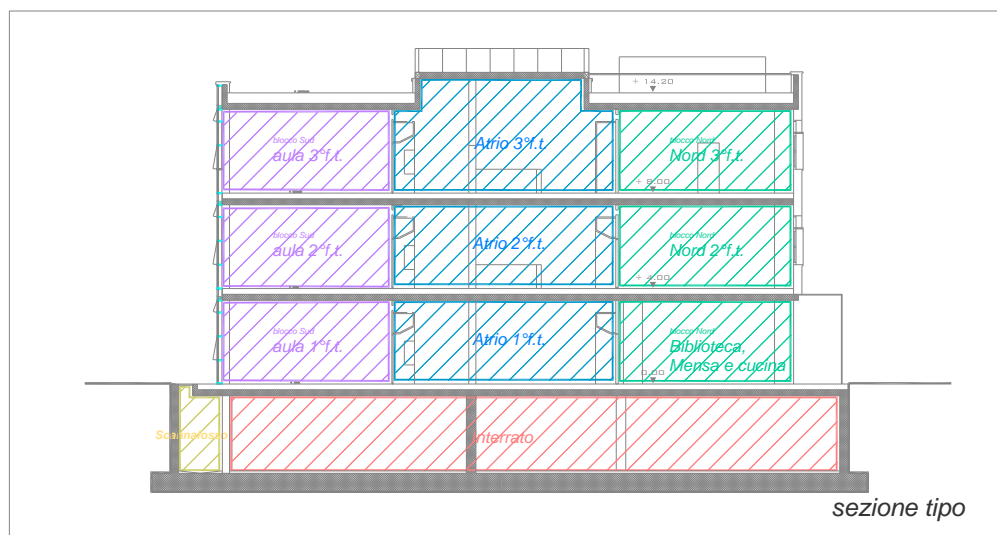


Figura 4 – Indicazione, in sezione, delle zone termiche di riferimento

2.2. Suddivisione delle zone termiche

La naturale conformazione dei blocchi e la loro articolazione su tre piani ha portato alla definizione del modello in 14 zone termiche con caratteristiche omogenee. In particolare si individuano 12 zone termiche riscaldate e 2 non riscaldate (Figura 4).

La videata di TRNSYS con la configurazione dell'edificio e le varie zone termiche è rappresentata in Figura 5.

Il blocco a Sud è così suddiviso:

Aule 1° piano f.t., confinante con l'esterno a S-S/O, compreso fra il piano interrato e il piano aule sovrastante, adiacente all'atrio e ai blocchi dei bagni;

Aule 2° piano f.t., confinante con l'esterno a S-S/O, compreso tra il 1° e 3° piano f.t. delle aule, adiacente all'atrio e ai blocchi dei bagni;

Aule 3° piano f.t., confinante con l'esterno a S-S/O ed in copertura, sovrastante il 2° piano f.t. delle aule, adiacente all'atrio e ai blocchi dei bagni;

le aperture di collegamento tra le aule e l'atrio sono intese normalmente chiuse, salvo in regime di ventilazione naturale.

Il blocco dei bagni a S-S/O, confina con l'esterno a S-S/O e a N-N/O ed in copertura, è sovrastante il piano interrato, adiacente l'atrio e il blocco aule ai vari piani.

Il blocco dell'Atrio è "fittiziamente" suddiviso in:

Atrio 1° piano f.t., confinante con l'esterno a E-N/E e N-N/O, compreso tra il piano interrato e il piano dell'atrio soprastante, adiacente alle aule del 1° piano f.t., ai blocchi dei bagni, alla mensa, alla biblioteca e alla cucina;

Atrio 2° piano f.t., confinante con l'esterno a E-N/E e N-N/O, compreso tra i piani 1° e 3° f.t. dell'atrio, adiacente alle Aule, al blocco Laboratori e Servizi del 2° piano f.t. e al blocco dei bagni;

Aule 3° piano f.t., confinante con l'esterno a E-N/E, a N-N/O ed in copertura, sovrastante al 2° piano f.t. dell'atrio, adiacente alle Aule, al blocco Laboratori e Servizi del 3° piano f.t. e al blocco dei bagni;

ciascuno dei quali è reciprocamente collegato mediante ampie aperture orizzontali. Rispetto ad un ambiente monozona (come è nella realtà), tale impostazione permette una migliore descrizione del comportamento termico dell'ambiente stesso, in quanto considera la stratificazione della temperatura dell'aria tra i piani ed i moti convettivi che per sua causa si generano.

Il blocco dei Laboratori e Servizi è suddiviso in:

Biblioteca al 1° piano f.t., confinante con l'esterno a N-N/O e N-N/E, compreso fra l'interrato e il piano sovrastante, adiacente all'atrio;

Mensa al 1° piano f.t., confinante con l'ambiente esterno a N-N/E, compreso tra l'interrato e il piano sovrastante, adiacente all'atrio e alla cucina;

Cucina al 1° piano f.t., confinante con l'esterno a N-N/E e E-S/E, compreso tra l'interrato e il piano sovrastante, adiacente all'atrio e alla mensa;

2° piano f.t. NORTH, comprende gli uffici amministrativi e i laboratori atipici, confina con l'esterno a N-N/O, N-N/E e E-S/E, compreso tra il 1° e il 3° piano f.t. del blocco Laboratori e Servizi, adiacente all'atrio;

3° piano f.t. NORTH, confina con l'esterno a N-N/O, N-N/E, E-S/E ed in orizzontale, sovrastante il 2° piano f.t. del blocco Laboratori e Servizi, adiacente all'atrio;

le aperture di collegamento previste tra spazi ed atrio sono intese normalmente chiuse, salvo in regime di ventilazione naturale.

Il blocco del piano interrato, non riscaldato, sottostante il 1° piano fuori terra dell'edificio, confina con l'esterno in prossimità dei blocchi scale e rampe di accesso, adiacente sul lato Sud allo scannafosso ed interrato lungo gli altri lati.

Lo scannafosso non riscaldato, infine, è adiacente al piano interrato, confina orizzontalmente con l'esterno e con il terreno per i restanti lati;

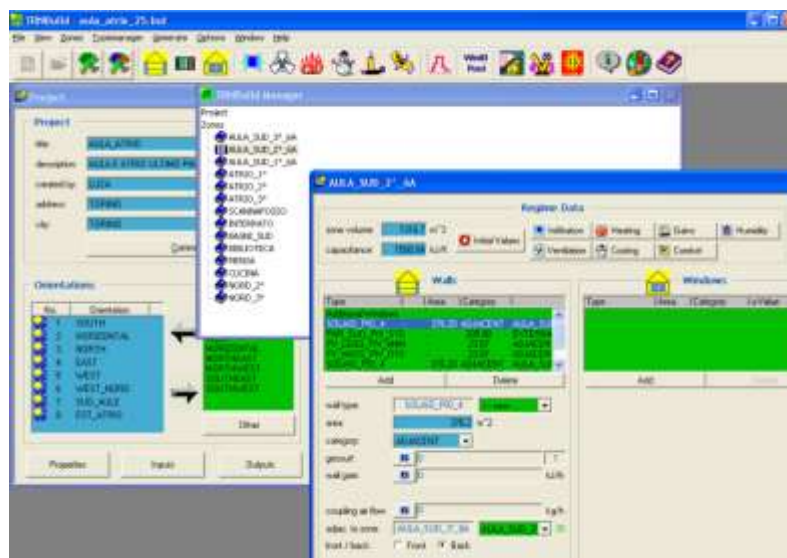


Figura 5 – Videata del “Building” di TRNSYS

3. Definizione dei parametri di calcolo (input)

3.1. Caratterizzazione termofisica dei componenti di involucro opaco

L’ampio numero e la ripetitività delle stratigrafie dell’involucro opaco, ha indirizzato verso una analisi dei componenti raggruppati per famiglie omogenee, ossia con caratteristiche simili ⁽¹⁷⁾ tra loro.

Il valore della trasmittanza termica media ponderata dei componenti opachi è pari a 0.30 W/m²K e soddisfa le prescrizioni del DL.192/05.

Di seguito, in figura, si riportano le stratigrafie di riferimento, le cui caratteristiche sono riassunte in tabella 1.

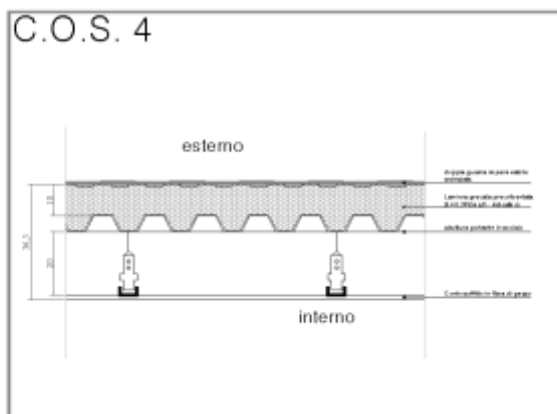
Tabella 1 – Trasmittanza termica dei componenti di involucro opaco

elemento	trasmittanza termica [W/m ² K]	posizione elemento	□ _{s,e} [-]
SOLAIO_INTERNO	0.475	int - int	-
SOLAIO_COPERTURA	0.146	int - est	0.0
SOLAIO_PT	0.475	int - n.r.	-
COP_ATRIO	0.265	int - est	0.6
PAV_INTERRATO	3.050	n.r. - ter	-
PVI_AULA_ATRIO	0.203	int - int	-
PIV_CAVEDI	0.339	int - est	0.0
PVI_LEGGERA	0.113	int - int	-
PVI_MASSIVA	2.768	int - int	-
PORTA_LEGNO	1.970	int - int int - est	0.6
PORTA_MET	5.789	n.r. - est	0.6
PVE_VENTILATA	0.187	int - est	0.0
SETTO_INTERRATO	2.628	n.r. - ter	-

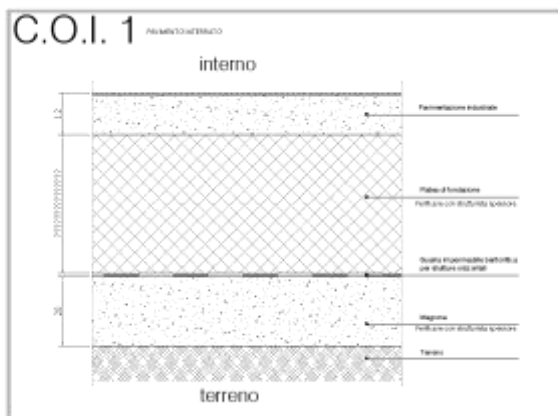
Legenda: int – interno; est – esterno; n.r. – spazio non riscaldato; ter – terreno; □_{s,e} – coefficiente di assorbimento solare esterno
 Nota: i valori delle trasmittanze termiche si riferiscono alla sola stratigrafia della parete, escludono quindi le resistenze termiche superficiali, calcolate direttamente da Trnsys; la facciata ventilata è considerata trascurando la resistenza termica dell'intercapedine (in quanto areata) e nullo il coefficiente di assorbimento solare esterno.

⁽¹⁷⁾ Sono ritenuti simili tutti quegli elementi che non variano per tipologia, struttura, spessore e posizione dell’isolamento. All’interno della stessa famiglia può essere differente la finitura interna in relazione agli ambienti ed il rivestimento esterno nel caso di una facciata ventilata.

Stratigrafia tipo del COP_ATRIO

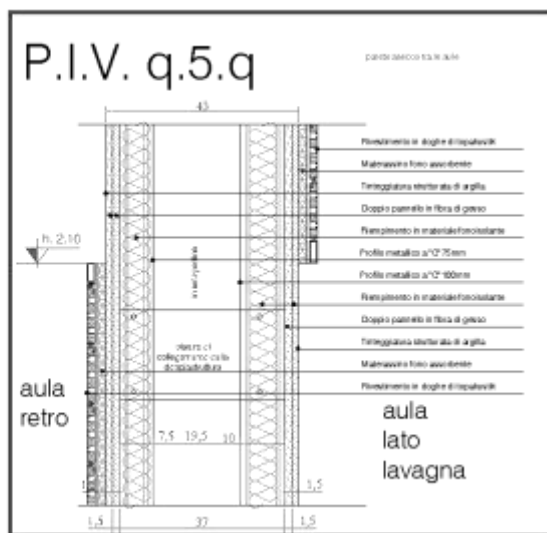


Stratigrafia tipo del PAV_INTERRATO

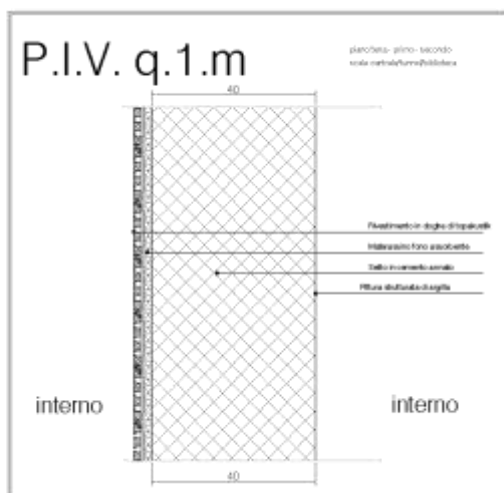


Chiusure verticali

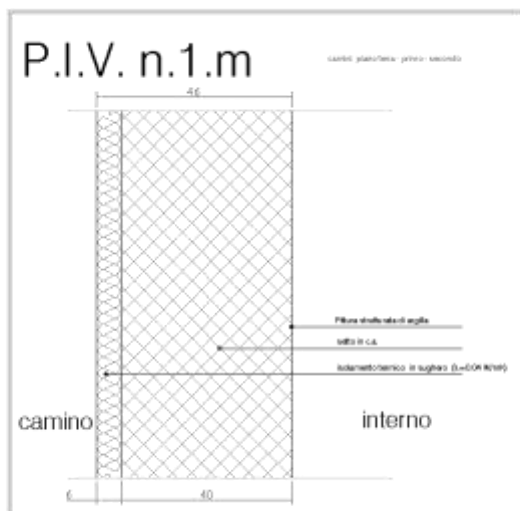
Stratigrafia tipo della PVI_LEGGERA



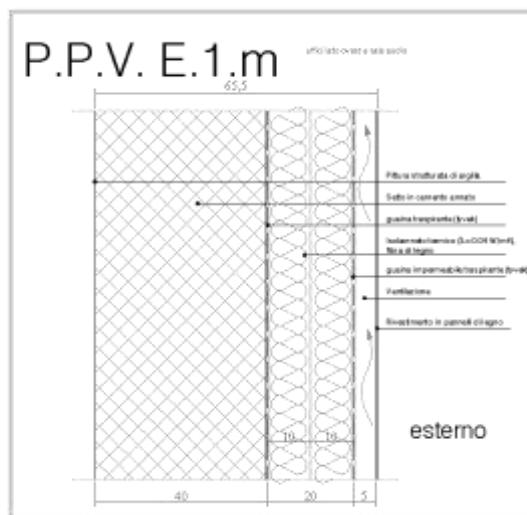
Stratigrafia tipo della PVI_MASSIVA



Stratigrafia tipo della PVI_CAVEDI



Stratigrafia tipo della PVE_VENTILATA



3.2. Caratterizzazione termofisica dei componenti dell'involucro trasparente

I componenti di involucro trasparente possono essere distinti in due principali famiglie in relazione alla tipologia di impiego: vetrata verticale e vetrata orizzontale.

Il valore della trasmittanza termica media ponderata dei componenti trasparenti è pari a $1.57 \text{ W/m}^2\text{K}$ e soddisfa le prescrizioni del DL.192/05.

Di seguito si riassumono le principali caratteristiche per ciascuna tipologia.

<i>vetrata verticale (aule e atrio)</i>							
s [mm]	U_{vetro} [W/(m ² K)]	U_{telaio} [W/(m ² K)]	% [-]	telaio	h_{si} [W/(m ² K)]	h_{se} [W/(m ² K)]	g [-]
6-12-6	1.26	3.30	0.15		calcolato	17.7	0.40

<i>vetrata orizzontale (atrio)</i>							
s [mm]	U_{vetro} [W/(m ² K)]	U_{telaio} [W/(m ² K)]	% [-]	telaio	h_{si} [W/(m ² K)]	h_{se} [W/(m ² K)]	g [-]
6-12-6	1.40	3.30	0.10		calcolato	17.7	0.20

3.3. Caratterizzazione del sistema di controllo della radiazione solare

La radiazione solare che incide sulle superfici trasparenti è controllata da schermature di natura diversa seconda l'esposizione delle superfici.

Blocco Aule Sud e Bagni

Il sistema di schermatura previsto per ciascun modulo vetrato comprende una tenda esterna mobile, elementi orizzontali orientabili stagionalmente e degli aggetti verticali sul lato destro e sinistro.

Tenda esterna mobile, costituita da un rullo avvolgibile in tessuto con trama tale da garantire una ostruzione della radiazione solare non inferiore al 70%. La mobilità, di tipo meccanico, è gestita dal sistema di supervisione in funzione della radiazione solare misurata in prossimità della vetrata (valore limite di soglia dell'irradianza solare pari a 300 W/m^2)¹⁹;

Doghe esterne orizzontali orientabili, costituite da pale in alluminio di larghezza variabile, poste sul filo esterno della facciata ad altezza tale da non ostacolare la visuale interno-esterno. Le doghe ruotano stagionalmente lungo il proprio asse orizzontale, al fine di ottimizzare il comportamento invernale – *captazione della radiazione solare e riflessione della luce verso l'interno* – e quello estivo – *protezione della radiazione solare* -. La simulazione considera uno sporto equivalente di 1,1 m per il periodo invernale e di 1,6 m per il periodo estivo.

Aggetti esterni verticali, sono costituiti dai cavetti che caratterizzano la facciata a Sud. Sono pertanto fissi e con finitura superficiale in legno (rivestimento della facciata ventilata). La profondità è di 1.3 m.

⁽¹⁹⁾ Valore suggerito dalla prEN wi 14 del 2004, in relazione al disconfort che può essere arrecato dal contatto diretto con la radiazione solare;

Blocco Atrio

Il controllo della radiazione solare è attuato, seconda l'esposizione, attraverso oggetti verticali, scelta della geometria e delle caratteristiche dei componenti vetrati.

La vetrata ad Est è protetta da due oggetti verticali, con finitura superficiale tipica del rivestimento esterno della facciata ventilata. La profondità che risulta dalla naturale conformazione dell'edificio è di 6.75 m e 1.5 m rispettivamente a sinistra e a destra della vetrata.

La vetrata a Nord-Nord/Ovest è caratterizzata dall'orientamento (a 150° rispetto al Sud), che reca pochi problemi di surriscaldamento estivo, e dall'inclinazione di 120° rispetto l'orizzontale, favorendo la riflessione della radiazione solare incidente.

In copertura, le superfici opache si alternano a quelle trasparenti. Quest'ultime, sprovviste di schermi esterni, sono caratterizzate da ottime prestazioni in termini di fattore solare ($g=0.2$), ottenute attraverso una serigrafia esterna o a pellicole interposte nello stratificato interno.

Blocco Laboratori e Servizi

A causa dell'esposizione principale a Nord-Nord/Est, non si attendono particolari fenomeni di surriscaldamento estivo. Sono tuttavia presenti sistemi per il controllo della radiazione solare per le vetrate a Est-Sud/Est, per le quali è previsto un oggetto esterno verticale di profondità pari a 1.5 m sul lato destro e una tenda a rullo mobile. Le caratteristiche di questi schermi sono simili a quelle descritte per il blocco Aule Sud e Bagni.

4. Profili di occupazione

Vista la destinazione d'uso dell'edificio e sulla base delle indicazioni fornite dai committenti, per i locali adibiti ad attività didattica ed amministrazione (quali le aule, laboratori ed uffici) si ipotizza un utilizzo mattutino per tutti i giorni della settimana dal lunedì al sabato ed un rientro pomeridiano dal lunedì al venerdì; per la biblioteca un utilizzo giornaliero continuato dal lunedì al venerdì e sabato mezza giornata, mentre per il locali adibiti al riscaldamento e al consumo dei cibi una fruibilità di cinque giorni settimanali.

Durante la domenica l'edificio non risulta utilizzato.

I mesi di luglio ed agosto, sono stati comunque oggetto di calcolo, in quanto utili per la valutazione delle condizioni di temperatura interna in assenza di impianto .

La settimana tipo per i mesi compresi da settembre a giugno è riassunta nelle tabelle 2 che seguono.

Tabella 2a – Profilo d'occupazione dei locali didattici, amministrativi e biblioteca

giorno	ore settimana tipo			
	00.00 - 10.00	10.00-12.00	12.00-14.00	14.00-24.00
<i>lunedì</i>	0	pre-risc	1	0
<i>martedì</i>	0	pre-risc	1	0
<i>mercoledì</i>	0	pre-risc	1	0
<i>giovedì</i>	0	pre-risc	1	0
<i>venerdì</i>	0	pre-risc	1	0
<i>sabato</i>	0	0	0	0
<i>domenica</i>	0	0	0	0

Tabella 2b – Profilo d'occupazione dei locali mensa e cucina

giorno	ore settimana tipo			
	00.00 - 8.00	8.00-13.00	13.00-16.00	16.00-24.00
<i>lunedì</i>	0	1	1	0
<i>martedì</i>	0	1	1	0
<i>mercoledì</i>	0	1	1	0
<i>giovedì</i>	0	1	1	0
<i>venerdì</i>	0	1	1	0
<i>sabato</i>	0	1	0	0
<i>domenica</i>	0	0	0	0

5. Definizione dei guadagni termici interni

Gli apporti termici interni sono stati calcolati considerando le attività che si svolgono all'interno degli spazi e l'effettiva occupazione degli stessi.

Blocco Aule a Sud-Sud/Ovest

All'interno di ciascuna aula si ipotizza la presenza di 26 persone (25 alunni e 1 insegnante) che svolgono una tipica attività sedentaria in ambiente ben illuminato, per tutto il periodo di occupazione. L'apporto unitario riferito alle tabelle ISO 7730 è di 120 W/persona (65% convettivo – 35% radiativo).

Blocco Atrio

L'atrio è caratterizzato da un utilizzo saltuario e di passaggio. L'apporto principale è dovuto alla presenza di apparecchi di illuminazione, mentre quello legato agli occupanti, qualora considerato, andrebbe sottratto dagli altri spazi (aule).

Si considera una potenza media pari a 2 W/m² per il previsto periodo di occupazione.

Biblioteca

Per la biblioteca, caratterizzata da un affollamento variabile, si è ipotizzata la presenza media di 5 persone che svolgono una tipica attività sedentaria, e la presenza di corpi illuminanti. Per tutto il periodo di occupazione l'apporto unitario riferito alle tabelle ISO 7730 è di 120 W/persona (65% convettivo – 35% radiativo), a cui si sommano 2 W/m² di potenza termica media dovuta ai dispositivi elettrici.

Mensa

E' prevista una distribuzione dei pasti su doppio turno, con una presenza contemporanea di 288 persone che svolgono un'attività leggera in ambiente ben illuminato e la presenza di corpi illuminanti. L'apporto unitario riferito alle tabelle ISO 7730 è di 150 W/persona

(50%conveittivo – 50%radiativo), a cui si sommano 2 W/m² di potenza termica media dovuta ai dispositivi elettrici.

Cucina

Il locale è adibito solamente al riscaldamento dei cibi e non alla loro preparazione e cottura. Si ipotizza durante l'orario di occupazione la presenza di circa 4 persone e l'utilizzo di un forno elettrico. L'apporto unitario riferito alle tabelle ISO 7730 è di 185 W/persona (50%conveittivo – 50%radiativo), a cui si sommano 10 KW di potenza termica media per il forno e gli altri dispositivi elettrici.

Laboratori

Hanno un utilizzo tipico di natura saltuaria. L'apporto principale è dovuto alla presenza di apparecchi di illuminazione ed eventuali apparecchiature, mentre quello legato agli occupanti, qualora considerato, andrebbe sottratto dagli altri spazi (aule). Si considera una potenza media pari a 5 W/m² per il previsto periodo di occupazione.

Uffici e Amministrazione

Sono spazi il cui utilizzo ipotizzato è continuativo, ma caratterizzati da una bassa densità di affollamento. L'apporto principale è dovuto alla presenza di apparecchi di illuminazione, di eventuali apparecchiature ed occupanti. Si considera una potenza media pari a 5 W/m² per il previsto periodo di occupazione.

6. Definizione delle infiltrazioni d'aria in regime di ventilazione naturale

Si intendono per infiltrazioni d'aria i ricambi e le portate d'aria tra ambiente esterno ed ambiente interno che avvengono in regime di ventilazione naturale, e innescate a causa del gradiente di temperatura che si viene a creare per stratificazione dell'aria stessa all'interno dell'atrio centrale.

La ventilazione naturale è prevista alternativa all'impianto di ventilazione forzata ed ha come principale finalità:

il raffrescamento ventilativo corporeo e la de-stratificazione diurna dell'atrio;

il raffrescamento strutturale in periodo di non occupazione e con condizioni esterne favorevoli.

Gli spazi, ad eccezione dei bagni che sono tenuti meccanicamente in depressione, sono dotati di aperture verso l'ambiente esterno e verso l'atrio, dal quale l'aria naturalmente fuoriesce per mezzo dei "torrini" di estrazione posti in copertura.

La gestione delle aperture è automatica ed affidata al sistema di supervisione. Il controllo, autonomo per ogni spazio, è effettuato sulla base delle condizioni dell'ambiente interno in relazione a quelle dell'ambiente esterno, così come meglio indicato di seguito e considerato nella presente simulazione.

A causa di una necessaria del modello, la simulazione dei flussi d'aria in regime di ventilazione naturale riguarda solo il blocco delle aule e quello dell'atrio, ritenuti maggiormente significativi e rappresentativi per l'edificio. Meccanismi analoghi sono comunque previsti per il blocco dei Laboratori e Servizi, Biblioteca e Mensa, per i quali, tuttavia, si hanno aperture meno ampie rispetto al blocco Aule e, nel caso della mensa, la controsoffittatura del solaio riduce le potenzialità del raffrescamento strutturale notturno.

Aule a Sud-Sud/Ovest

Si ha ventilazione naturale quando lo spazio non è occupato e pertanto l'impianto di ventilazione meccanica risulta spento. Le aperture predisposte sono le ribalte nella parte bassa della vetrata esterna posta a S-S/O (l'area netta apribile per ciascuna aula è di 1 m², per un totale di 6 m² per piano) e quelle nella parte alta della parete di separazione tra aula e atrio (l'area netta è di pari valore rispetto a quella di ingresso).

La condizione affinché si inneschi il meccanismo è basato sulla temperatura dell'aria interna, che deve essere superiore ai 22°C (al fine di escludere il periodo invernale) e comunque maggiore rispetto quella esterna.

Atrio

L'ambiente ha un ruolo di primaria importanza nell'ambito della gestione della ventilazione naturale dell'intero edificio. Esso è, infatti, predisposto come estrattore naturale, per effetto camino, di ogni ambiente del blocco Aule, del blocco Laboratori e Servizi e dei vari piani dell'atrio stesso, attraverso l'apertura dei "torrini" di estrazione posti in copertura (l'area netta è di pari valore rispetto la somma delle aperture degli ambienti serviti, ed ha valore di circa 33 m²).

La condizione affinché si inneschi il meccanismo è basato sulla temperatura dell'aria interna del 3° piano f.t., che deve essere maggiore di quella esterna e comunque superiore a 24°C (apertura dei torrini superiori).

Le aperture poste alla base sono anch'esse sottoposte a condizione di temperatura dell'aria interna del 3° piano f.t., e movimentate quando la stessa risulta maggiore rispetto a quella dell'aria esterna e comunque superiore a 28 °C.

6.1. Tipologia dei flussi d'aria

La compresenza di tali condizioni, per gli spazi considerati, può dare origine ai seguenti flussi di ventilazione naturale:

INF_1, ricambi in ventilazione naturale del blocco aule al piano terreno o 1°f.t.;

INF_2, ricambi in ventilazione naturale del blocco aule al piano primo o 2°f.t.;

INF_3, ricambi in ventilazione naturale del blocco aule al piano secondo o 3°f.t.;

INF_Atrio_sup, ricambi in ventilazione naturale dell'atrio – aperture alte;

INF_Atrio_inf, ricambi in ventilazione naturale dell'atrio – aperture basse;

Nella presente simulazione sono trascurati i possibili contributi alla ventilazione naturale che provengono per differenza di pressione tra le facciate. La località, infatti, non ha una costanza di vento in termini di frequenza, direzione e intensità. L'effetto camino ipotizzato non si pone, comunque, in contrasto con l'eventuale presenza di ventilazione orizzontale passante ⁽²⁰⁾.

6.2. Definizione della ventilazione degli ambienti in regime forzato

Si intende per ventilazione degli ambienti l'aria primaria distribuita e ripresa negli stessi dall'apposito impianto di ventilazione meccanica, secondo le portate previste dalla UNI 13399:95.

⁽²⁰⁾ sono previste infiltrazioni naturali dovute alla non perfetta tenuta dei serramenti e all'apertura occasionale di porte e finestre considerando, durante l'intero anno, un ricambio minimo di 0.1 volumi/h.

Per l'intero periodo di occupazione l'impianto garantirà ⁽²¹⁾:

aule, ricambi pari a 3 volumi/h;
atrio, ricambi pari a 0.5 volumi/h;
laboratori, ricambi pari a 2 volumi/h;
uffici amministrativi, ricambi pari a 2 volumi/h;
biblioteca, ricambi pari a 2 volumi/h;
mensa, ricambi pari a 3 volumi/h;
bagni, ricambi pari a 3 volumi/h;
cucina, ricambi pari a 3 volumi/h.

L'impianto di ventilazione immette in ambiente aria che, in inverno, viene pre-riscaldata attraverso unità di trattamento aria, dotate di recuperatore di calore a flussi incrociati (con efficienza stimata al 50%). Quelle a servizio del blocco aule, atrio, piani 2° e 3° f.t. del blocco Laboratori e Servizi, inoltre, possono prelevare l'aria dal Solarwall posto sulla facciata a S-S/O.

Il funzionamento è previsto in funzione della temperatura dei canopi del Solarwall e subordinato ad una temperatura degli ambienti interni inferiori a 22°C (tipico dei periodo di riscaldamento). Se la temperatura del Solarwall è superiore a 20°C il recuperatore di calore viene by-passato e l'aria prelevata direttamente dal sistema solare; in caso contrario l'aria, solo parzialmente pre-riscaduta, beneficia di un ulteriore incremento termico gratuito grazie al contatto con l'aria esausta ed un riscaldamento finale ad opera della batteria calda presente in ciascuna UTA.

E' previsto che l'impianto di ventilazione possa entrare in funzione anche nel caso in cui l'edificio non sia occupato (es. domenica e festivi), qualora sia rilevante il contributo del Solarwall. In modalità invernale, se la temperatura dell'aria in uscita dal sistema solare supera i 22°C, ed è pertanto superiore rispetto a quella interna, viene immessa negli ambienti sfruttando la capacità termica della struttura come accumulatore.

La presente simulazione considera i sistemi sopra elencati, il cui apporto è mitigato per effetto della reciproca interazione ed esclusione in particolari momenti della giornata.

7. Definizione del sistema climatizzazione

L'edificio sarà collegato alla rete del teleriscaldamento della città di Imola, ed è dotato di un sistema di riscaldamento, attivo durante il periodo invernale, e di una predisposizione per il sistema di raffrescamento.

Nella presente simulazione non è, tuttavia, considerata alcuna tipologia di impianto in quanto il calcolo effettuato si riferisce al fabbisogno netto di energia che deve essere fornita al fine di garantire le preimpostate condizioni di confort all'interno degli spazi e quindi non a quella lorda che deve essere consegnata dalla rete all'edificio e che sconta il rendimento globale dell'impianto in relazione alle caratteristiche del sistema di produzione, distribuzione, emissione e regolazione.

L'impianto di riscaldamento può essere ipotizzato acceso e a servizio dei vari ambienti secondo le specifiche esigenze dovute all'occupazione a alle attività. Esso è considerato con potenza illimitata e predisposto a mantenere, durante le ore di effettiva occupazione

⁽²¹⁾ Eventuali differenze rispetto ai valori di ricambi orari previsti nel progetto dell'impianto di ventilazione sono dovute ad una semplificazione del presente modello di simulazione.

(salvo i casi previsti di pre-riscaldamento dei locali), la temperatura di set-point. In orario differente è consentita una attenuazione fino ad una temperatura di set-back. Il calcolo non tiene conto del controllo dell'umidità relativa, né del condizionamento estivo.

Blocco Aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione (set-point) nella stagione di riscaldamento è di 20°C, mentre in regime di attenuazione (set-back) può scendere a 15°C; si considera la regolazione effettuata per singolo locale a mezzo di apposito sensore di temperatura.

Blocco Atrio

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione nella stagione di riscaldamento è di 18°C, mentre in regime di attenuazione può scendere a 13°C; si considera la regolazione effettuata per singolo piano a mezzo di apposito sensore di temperatura.

Biblioteca

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione nella stagione di riscaldamento è di 20°C, mentre in regime di attenuazione può scendere a 15°C.

Mensa

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione nella stagione di riscaldamento è di 20°C, mentre in regime di attenuazione può scendere a 15°C. Si considera un pre-riscaldamento anticipato degli spazi.

Blocco Laboratori e Servizi

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione (set-point) nella stagione di riscaldamento è di 20°C, mentre in regime di attenuazione (set-back) può scendere a 15°C; si considera la regolazione effettuata per singolo locale a mezzo di apposito sensore di temperatura.

Blocco Bagni

La temperatura prevista durante il periodo di occupazione (set-point) nella stagione di riscaldamento è di 20°C, mentre in regime di attenuazione (set-back) può scendere a 15°C.

8. Caratteristiche dimensionali e di controllo climatico delle zone

Blocco aule a Sud-Sud/Ovest, 1° piano f.t.

Volume= 1316.7 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_PT, area= 376.2 m², sovrastante al piano interrato;
- PIV_CAVEDI, area= 65.1 m², confina con l'esterno a S-S/O (F_{sky}=0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 140.7 m², confina con l'esterno a S-S/O, tenda esterna, (F_{sky}=0.5);
- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- SOLAIO_INTERNO, area= 376.2 m², adiacente al blocco aule a S-S/O, 2° piano;
- PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente alla zona atrio, 1°piano f.t.;
- PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente alla zona atrio, 1°piano f.t.; (flusso d'aria PORT1_ATRIO)

Apporti interni= 150 persone per 120 W/pers, durante il periodo di occupazione;
 Infiltrazioni= INF_1 secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;
 Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;
 Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;
 Raffrescamento= spento.

Blocco aule a Sud-Sud/Ovest, 2° piano f.t.

Volume= 1316.7 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_INTERNO, area= 376.2 m², adiacente al blocco aule a S-S/O, 3°piano;
- PIV_CAVEDI, area= 65.1 m², confina con l'esterno a S-S/O (F_sky=0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 140.7 m², confina con l'esterno a S-S/O, tenda esterna, (F_sky=0.5);
- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- SOLAIO_INTERNO, area= 376.2 m², adiacente al blocco aule a S-S/O, 1°piano;
- PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente alla zona atrio, 2° piano f.t.;
- PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente alla zona atrio, 2° piano f.t.; (flusso d'aria PORT2_ATRIO).

Apporti interni= 150 persone per 120 W/pers, durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= INF_2 secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Blocco aule a Sud-Sud/Ovest, 3° piano f.t.

Volume= 1316.7 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_COPERTURA, area= 376.2 m², confina con l'esterno, superficie orizzontale, (F_sky=1);
- PIV_CAVEDI, area= 65.1 m², confina con l'esterno a S-S/O (F_sky=0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 140.7 m², confina con l'esterno a S-S/O, tenda esterna, (F_sky=0.5);
- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- SOLAIO_INTERNO, area= 376.2 m², adiacente al blocco aule a S-S/O, 2° piano;
- PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente alla zona atrio, 3° piano f.t.;
- PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente alla zona atrio, 3°piano f.t.; (flusso d'aria PORT3_ATRIO).

Apporti interni= 150 persone per 120 W/pers, durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= INF_3 secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Blocco atrio 1° piano

Volume= 2185 m³;

Temperatura iniziale= 18 °C con impianto, 3°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- PVE_VENTILATA, area= 34.62 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);

- PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);
 - VETR_VERTICALE, area= 68.2 m², confina con l'esterno a N-N/O, (F_sky=0.25);
 - PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente al blocco aule, 1° piano f.t.;
 - PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente al blocco aule, 1° piano f.t.; (flusso d'aria PORT1_ATRIO)
 - SOLAIO_PT, area= 570.0 m², sovrastante il piano interrato;
 - PVE_VENTILATA, area= 18.4 m², confina con l'esterno a O-N/O, (F_sky=0.5)
 - PIV_MASSIVA, area= 28.25 m², interna;
 - PV_LEGGERA, area= 80.5 m², adiacente alla biblioteca;
 - PV_LEGGERA, area= 112 m², adiacente alla mensa;
 - PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
 - PVI_MASSIVA, area= 14.55 m², adiacente alla cucina;
 - PORTA_LEGNO, area= 1.9 m², adiacente alla cucina;
 - VETR_VERTICALE, area= 14.03 m², confina con l'esterno a E-S/E, (F_sky=0.50);
 - PVE_VENTILATA, area= 51.375 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky=0.50);
 - PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a Sud-Sud/Ovest, (F_sky=0.50);
 - PIV_AULA_ATRIO, area= 76.55 m², interna;
 - SOLAIO_INTERNO, area= 377 m², adiacente atrio, 2° piano f.t.; (flusso d'aria ATRIO_1 > 2).
- Apporti interni= 2 W/m², durante il periodo di occupazione;
 Infiltrazioni= INF_Atrio_inf, secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;
 Ventilazione = 0.5 vol/h durante il periodo di occupazione;
 Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;
 Raffrescamento= spento.

Blocco atrio 2° piano

Volume= 2185 m³;

Temperatura iniziale= 18 °C con impianto, 3°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_INTERNO, area= 377.0 m², adiacente all'atrio 1° piano, (flusso d'aria ATRIO_1 > 2);
- PVE_VENTILATA, area= 34.62 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);
- PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 68.2 m², confina con l'esterno a N-N/O, (F_sky=0.25);
- PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente al blocco aule, 2° piano f.t.;
- PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente al blocco aule, 2° piano f.t.; (flusso d'aria PORT2_ATRIO)
- PVE_VENTILATA, area= 18.4 m², confina con l'esterno a O-N/O, (F_sky=0.5)
- PVI_MASSIVA, area= 28.25 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- PIV_LEGGERA, area= 189.75 m², adiacente al blocco Nord 2° f.t.;
- PIV_MASSIVA, area= 28.14 m², interna;
- VETR_VERTICALE, area= 14.03 m², confina con l'esterno a E-S/E, (F_sky=0.50);
- PVE_VENTILATA, area = 51.375 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky =0.50);
- PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky =0.50);
- PIV_AULA_ATRIO, area= 76.55 m², interna;
- SOLAIO_INTERNO, area= 377 m², adiacente atrio, 3° piano f.t.; (flusso d'aria ATRIO_2 > 3)

Apporti interni= 2W/ m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= INF_Atrio_inf, secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 0.5 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Blocco atrio 3° piano

Volume= 2185 m³;

Temperatura iniziale= 18 °C con impianto, 3°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_INTERNO, area= 377.0 m², adiacente all'atrio 1° piano, (flusso d'aria ATRIO_2>3);
- PVE_VENTILATA, area= 34.62 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);
- PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky=0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 68.2 m², confina con l'esterno a N-N/O, (F_sky=0.25);
- PORTA_LEGNO, area= 20.94 m², adiacente al blocco aule, 3° piano f.t.;
- PIV_AULA_ATRIO, area= 160.68 m², adiacente al blocco aule, 3° piano f.t.; (flusso d'aria PORT2_ATRIO)
- PVE_VENTILATA, area= 18.4 m², confina con l'esterno a O-N/O, (F_sky=0.5)
- PVI_MASSIVA, area= 28.25 m², adiacente al blocco Bagni Sud;
- PIV_LEGGERA, area= 189.75 m², adiacente al blocco Nord 3° f.t.;
- PIV_MASSIVA, area= 28.14 m², interna;
- VETR_VERTICALE, area= 14.03 m², confina con l'esterno a E-S/E, tenda esterna, (F_sky=0.50);
- PVE_VENTILATA, area = 51.375 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky =0.50);
- PORTA_LEGNO, area= 6.6 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky =0.50);
- PIV_AULA_ATRIO, area= 76.55 m², interna;
- COPERTURA_ATRIO, area= 228.65 m², confina con l'esterno, orizzontale, (F_sky= 1);
- VETR_OR, area= 237.35 m², confina con l'esterno, orizzontale, (F_sky= 1);
- SOLAIO_COPERTURA, area= 22.7 m², confina con l'esterno, orizzontale, (F_sky= 1);
- PVE_VENTILATA, area= 135 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_sky= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 135 m², confina con l'esterno a N-N/E, (F_sky= 0.5);

Apporti interni= 2W/ m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= INF_Atrio_inf, secondo condizioni poste e 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 0.5 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Biblioteca

Volume= 794.5 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_PT, area= 227 m², sovrastante il piano interrato;
- SOLAIO_INTERNO, area= 174 m², adiacente al 2° piano f.t. Nord;
- VETR_OR, area= 53 m², confina con l'ambiente esterno orizzontalmente, (F_sky= 0.6);
- VETR_VERTICALE, area= 76.3 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_sky= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 27.95 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/W, (F_sky= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 11.55 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/W,
- PVI_LEGGERA, area= 80.5 m², adiacente al 1° piano f.t. dell'atrio;

Apporti interni= 5 persone per 120 W/pers, e 2W/m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 2 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Mensa

Volume= 973 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_PT, area= 278 m², sovrastante il piano interrato;
- SOLAIO_INTERNO, area= 226 m², adiacente al 2° piano f.t. Nord;
- VETR_OR, area= 52 m², confina con l'ambiente esterno orizzontalmente, (F_sky= 0.6);

- PVE_VENTILATA, area= 4.7 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 132 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- PVI_LEGGERA, area= 112 m², adiacente al 1° piano f.t. dell'atrio;
- PVI_MASSIVA, area= 25.2 m², adiacente alla cucina;

Apporti interni= 288 persone per 150 W/pers, e 2W/m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Cucina

Volume= 292 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_PT, area= 137 m², sovrastante il piano interrato;
- SOLAIO_INTERNO, area= 139 m², adiacente al 2° piano f.t. Nord;
- PVI_MASSIVA, area= 25.2 m², adiacente alla mensa;
- PVE_VENTILATA, area= 35.1 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 2.5 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 13.09 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 20.16 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, tenda esterna (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 15.6 m², confina con l'ambiente esterno a S-S/O, (F_{sky}= 0.5);
- PORTA_LEGNO, area= 1.9 m², confina con l'ambiente esterno a S-S/O, (F_{sky}= 0.5);
- PVI_MASSIVA, area= 14.55 m², adiacente al 1° piano f.t. dell'atrio;
- PORTA_LEGNO, area= 1.9 m², adiacente al 1° piano f.t. dell'atrio;

Apporti interni= 4 persone per 180 W/pers, e 10 KW, durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Blocco Laboratori e Servizi, 2° piano f.t. Nord

Volume= 1764 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_INTERNO, area= 174 m², sovrastante la biblioteca;
- SOLAIO_INTERNO, area= 226 m², sovrastante la mensa;
- SOLAIO_INTERNO, area= 83.4 m², sovrastante la cucina;
- PVI_LEGGERA, area= 189.75 m², adiacente al 2° piano f.t. dell'atrio;
- PVE_VENTILATA, area= 191.9 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 51.1 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- SOLAIO_INTERNO, area= 504 m², sottostante al 3° piano f.t. del blocco Nord;
- PVE_VENTILATA, area= 27.65 m², confina con l'ambiente esterno a O-N/O, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 2.1 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/O, (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 14 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 19.6 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, tenda esterna (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 17.9 m², confina con l'ambiente esterno a S-S/O, (F_{sky}= 0.5);

Apporti interni= 5 W/m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 2 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;
Raffrescamento= spento.

Blocco Laboratori e Servizi, 3° piano f.t. Nord

Volume= 1764 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- SOLAIO_INTERNO, area= 504 m², sovrastante al 2° piano f.t. del blocco Nord;
- PVI_LEGGERA, area= 189.75 m², adiacente al 3° piano f.t. dell'atrio;
- PVE_VENTILATA, area= 189.5 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 51.1 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/E, (F_{sky}= 0.5);
- SOLAIO_COPERTURA, area= 504 m², confina con l'esterno orizzontalmente, (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 27.65 m², confina con l'ambiente esterno a O-N/O, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 2.1 m², confina con l'ambiente esterno a N-N/O, (F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 14 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 19.6 m², confina con l'ambiente esterno a E-S/E, tenda esterna(F_{sky}= 0.5);
- PVE_VENTILATA, area= 17.9 m², confina con l'ambiente esterno a S-S/O, (F_{sky}= 0.5);

Apporti interni= 5 W/m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 2 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Blocco Bagni Sud-Sud/Ovest

Volume= 1060.5 m³;

Temperatura iniziale= 20 °C con impianto, 5°C senza impianto;

Superfici di involucro=

- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al 3° piano f.t. delle aule;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al 3° piano f.t. delle aule;
- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al 2° piano f.t. delle aule;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al 2° piano f.t. delle aule;
- PVI_LEGGERA, area= 23.87 m², adiacente al 1° piano f.t. delle aule;
- PVI_MASSIVA, area= 23.87 m², adiacente al 1° piano f.t. delle aule;
- PVI_MASSIVA, area= 28.25 m², adiacente al 1° piano f.t. dell'atrio;
- PVI_MASSIVA, area= 28.25 m², adiacente al 2° piano f.t. dell'atrio;
- PVI_MASSIVA, area= 28.25 m², adiacente al 3° piano f.t. dell'atrio;
- SOLAIO_INTERNO, area= 101 m², adiacente al piano interrato;
- PVE_VENTILATA, area= 149.1 m², confina con l'esterno a S-S/O, (F_{sky}= 0,5);
- VETR_VERTICALE, area= 35.7 m², confina con l'esterno a S-S/O, tenda esterna, (F_{sky}= 0,5);
- PVE_VENTILATA, area= 86.5 m², confina con l'esterno a O-N/O, (F_{sky}= 0.5);
- VETR_VERTICALE, area= 8.7 m², confina con l'esterno a O-N/O, (F_{sky}= 0,5);
- SOLAIO_COPERTURA, area= 101.0 m², confina con l'esterno orizzontalmente, (F_{sky}= 1);
- PVE_VENTILATA, area= 110.6 m², confina con l'esterno a E-S/E, (F_{sky}= 0,5);

Apporti interni= 5W/ m², durante il periodo di occupazione;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = 3 vol/h durante il periodo di occupazione;

Riscaldamento= acceso o spento secondo la finalità del calcolo;

Raffrescamento= spento.

Interrato

Volume= 5612.8 m³;

Temperatura iniziale= 15 °C, privo di impianto;

Superfici di involucro=

- SETTO_INTERRATO, area= 210.3 m², adiacente allo scannafosso;
- PORTA_METALLO, area= 14 m², adiacente allo scannafosso;
- PAV_INTERRATO, area= 1754 m², confinante con il terreno;
- SETTO_INTERRATO, area= 97 m², confinante con l'ambiente esterno a N-N/O, (F_Sky= 0.2);
- SETTO_INTERRATO, area= 414.7 m², confinante con il terreno;
- PORTA_METALLO, area= 14.4 m², confinante con l'ambiente esterno a N-N/O, (F_Sky= 0.5);
- SOLAIO_PT, area= 227 m², sottostante la biblioteca;
- SOLAIO_PT, area= 278 m², sottostante la mensa;
- SOLAIO_PT, area= 83.4 m², sottostante la cucina;
- SOLAIO_PT, area= 570 m², sottostante il blocco atrio;
- SOLAIO_PT, area= 376.2 m², sottostante il blocco aule 1° piano f.t.;
- SOLAIO_PT, area= 101 m², sottostante il blocco bagni a Sud;

Apporti interni= assenti;

Infiltrazioni= 0.1 vol/h costanti;

Ventilazione = assente;

Riscaldamento= assente;

Raffrescamento= assente.

Scannafosso

Volume= 310 m³;

Temperatura iniziale= 3 °C, privo di impianto;

Superfici di involucro=

- SETTO_INTERRATO, area= 210.3 m², adiacente all'interrato;
- PORTA_METALLO, area= 14 m², adiacente all'interrato;
- SETTO_INTERRATO, area= 219.3 m², confinante con il terreno;
- PAV_INTERRATO, area= 96.6 m², confinante con il terreno;
- PAV_INTERRATO, area= 96.6 m², confinante l'esterno orizzontalmente, (F_sky= 0.5);

Apporti interni= assenti;

Infiltrazioni= 0.5 vol/h costanti;

Ventilazione = assente;

Riscaldamento= assente;

Raffrescamento= assente.

9. Simulazione dinamica

9.1. Modalità di calcolo

Il programma effettua un calcolo orario sulla base di un periodo impostato dall'utente.

Per ciascuno step svolge una serie di iterazioni successive, fino a raggiungere una convergenza di integrazione ed una tolleranza corrispondente ad 1/10 di unità, giusto compromesso tra precisione e tempi di esecuzione dei calcoli. In tal modo è possibile risolvere l'indeterminazione del problema dovuto alla dipendenza tra input ed output tra i singoli moduli, ed in particolare tra la type del Building e quella di Comis (in quanto temperature e ricambi d'aria sono direttamente correlati).

Le simulazioni sono state effettuate per i seguenti periodi:

- dall'ora 1 alla 8760, corrispondente ad un anno solare;
- dall'ora 1 alla 744, corrispondente al mese di gennaio;
- dall'ora 3624 alla 4344, corrispondente al mese di giugno.

Per ciascuno di essi sono state calcolate le condizioni in presenza ed assenza di impianto di riscaldamento, funzionamento dell'impianto di ventilazione meccanica durante il periodo di occupazione e la ventilazione naturale secondo le condizioni imposte.

La temperatura di inizio del calcolo varia in funzione del periodo e del locale, così come precedentemente indicato per le singole zone termiche.

9.2. Analisi dei risultati della simulazione (Output)

9.2.1. Fabbisogno di riscaldamento

Il fabbisogno complessivo annuale di energia netta per il riscaldamento degli ambienti stimato attraverso la presente simulazione, sulla base dei dati di input sopra descritti, è pari a 647'431 MJ e corrisponde ad un fabbisogno medio unitario di circa 37,5 kWh/(m² anno).

Il dettaglio del fabbisogno medio annuale di energia netta per il riscaldamento, riferito alle zone termiche dell'edificio è riportato nella Tabella 3; il diagramma a torta di Figura 6 riporta gli stessi dati raggruppati per blocchi principali.

Tabella 3 – Fabbisogno netto di energia per riscaldamento

	Energia [MJ]
Q_aula_1	-39,402
Q_aula_2	-37,194
Q_aula_3	-39,474
Q_atrio_1	-73,248
Q_atrio_2	-77,004
Q_atrio_3	-154,339
Q_bagni_sud	-51,927
Q_biblioteca	-66,019
Q_mensa	-6,706
Q_cucina	-4,532
Q_nord_2	-45,404
Q_nord_3	-52,175
Q_totale	-647,423

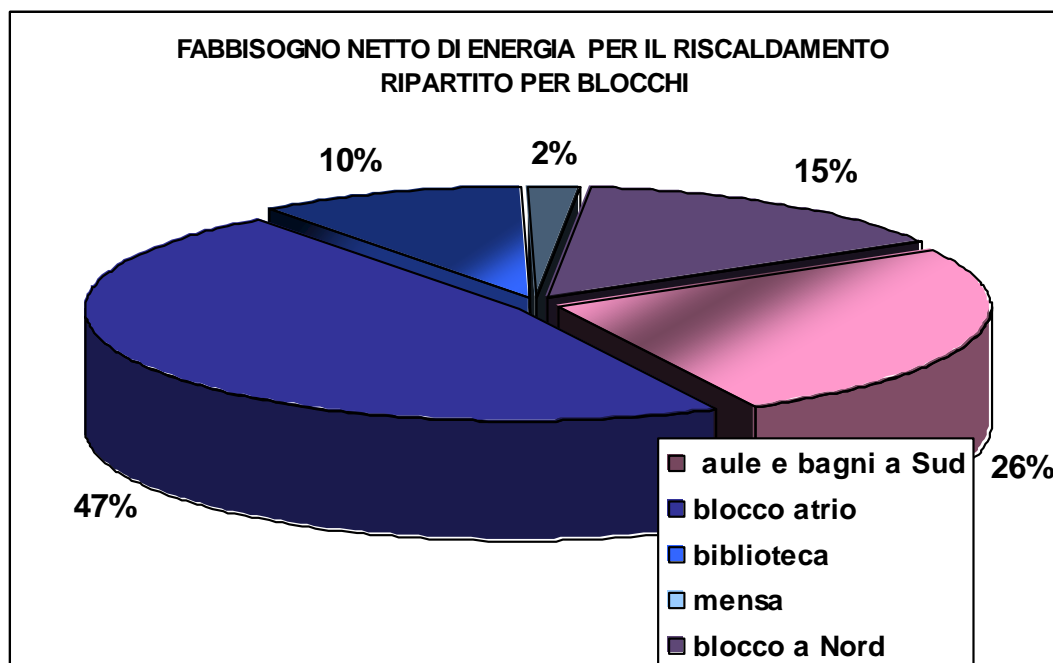


Figura 6 – Divisione per blocchi di zone termiche del fabbisogno netto d'energia per riscaldamento.

L'ambiente maggiormente energivoro, così come era prevedibile, risulta essere l'atrio, per la grande quantità di superfici vetrate disperdenti e i ridotti apporti gratuiti (occupazione occasionale e di passaggio, radiazione solare schermata in modo indistinto tra estate ed inverno). Per ragioni analoghe, una buona fetta del fabbisogno, in relazione alla superficie occupata, è quella relativa alla biblioteca, mentre la mensa si avvantaggia dei ridotti periodi di riscaldamento. Ridotti sono i fabbisogni di energia per il riscaldamento delle aule, grazie alle prestazioni di involucro, agli apporti solari il cui controllo garantisce il confort termico degli occupanti, ed il contributo del *Solarwall*[®].

Il prospetto riportato in Tabella 4, e i relativi diagrammi a torta (Figura 7) e istogramma (Figura 8), indicano la ripartizione del fabbisogno di energia netta per il riscaldamento sui dodici mesi dell'anno.

Considerando la forte differenza di valori tra i mesi di marzo ed aprile e quelli di ottobre e novembre, si può affermare che la stagione di riscaldamento per l'edificio in questione sia fortemente ridotta e limitata ai mesi compresi tra novembre e marzo. In particolare, i mesi di dicembre ⁽²²⁾, gennaio e febbraio sono quelli per i quali dovrà essere fornita una quantità maggiore di energia, anche perchè risultano inferiori gli apporti di calore dei sistemi solari.

⁽²²⁾ I mesi di dicembre e gennaio sono stati interamente considerati. Il fabbisogno diminuisce pertanto se si esclude il periodo natalizio durante il quale l'edificio non è occupato.

Tabella 4 – Fabbisogno netto mensile di energia per riscaldamento ⁽²³⁾

	Energia [MJ]
gen	188,999
feb	132,411
mar	50,187
apr	8,798
mag	1,467
giu	198
lug	0
ago	0
set	67
ott	10,479
nov	82,640
dic	172,178
totale	647,423

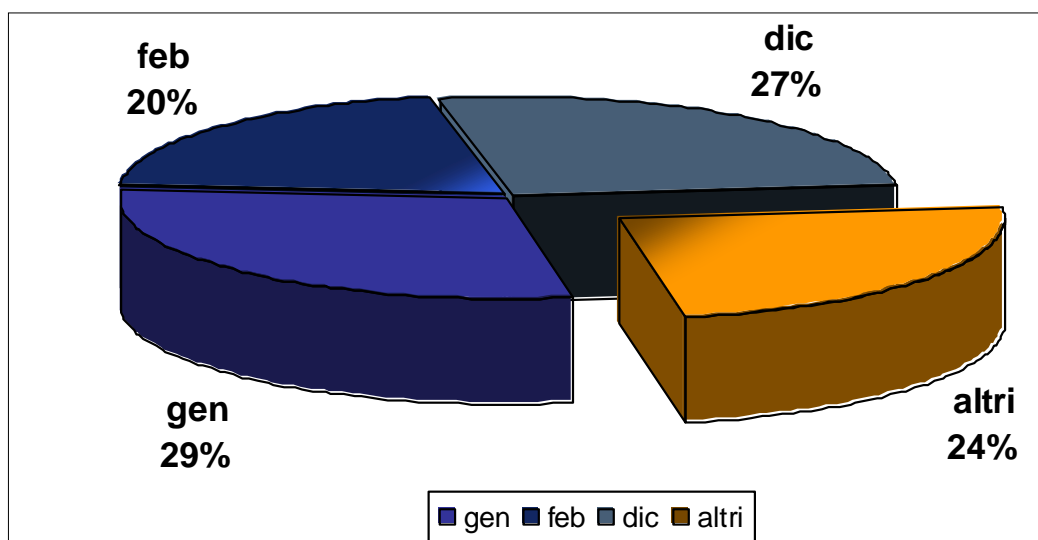


Fig 7 – Fabbisogno netto di energia ripartito per periodi della stagione di riscaldamento

⁽²³⁾ il fabbisogno di energia calcolato per i mesi compresi tra maggio e settembre sono dovuti alle impostazioni del modello e al possibile verificarsi di condizioni per cui la temperatura degli ambienti interni risulta, seppur di poco, inferiore a quella di set-point o set-back, richiedendo pertanto l'accensione dell'impianto.

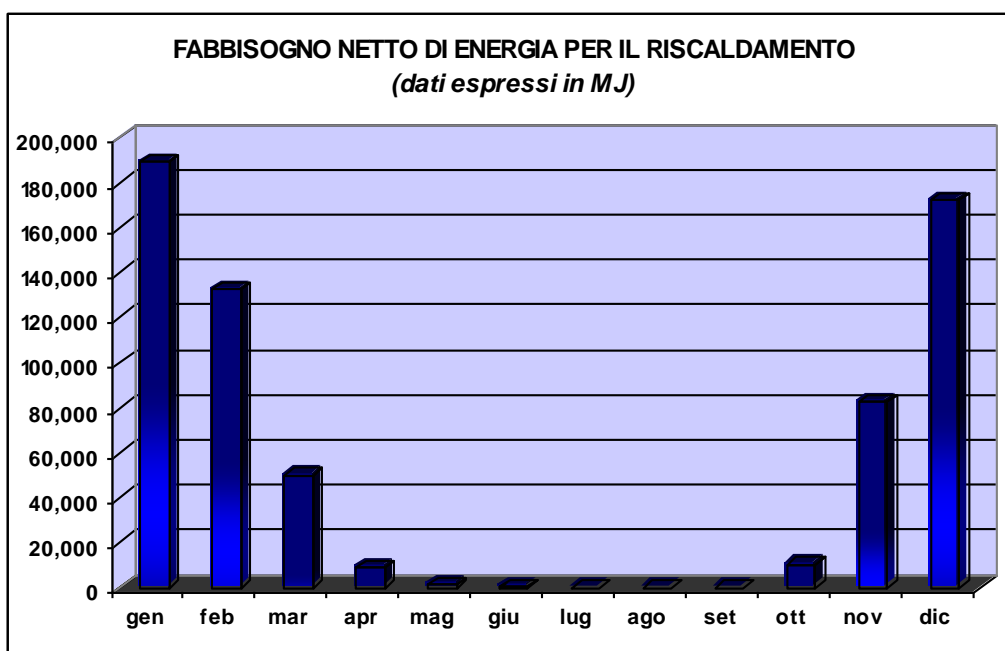
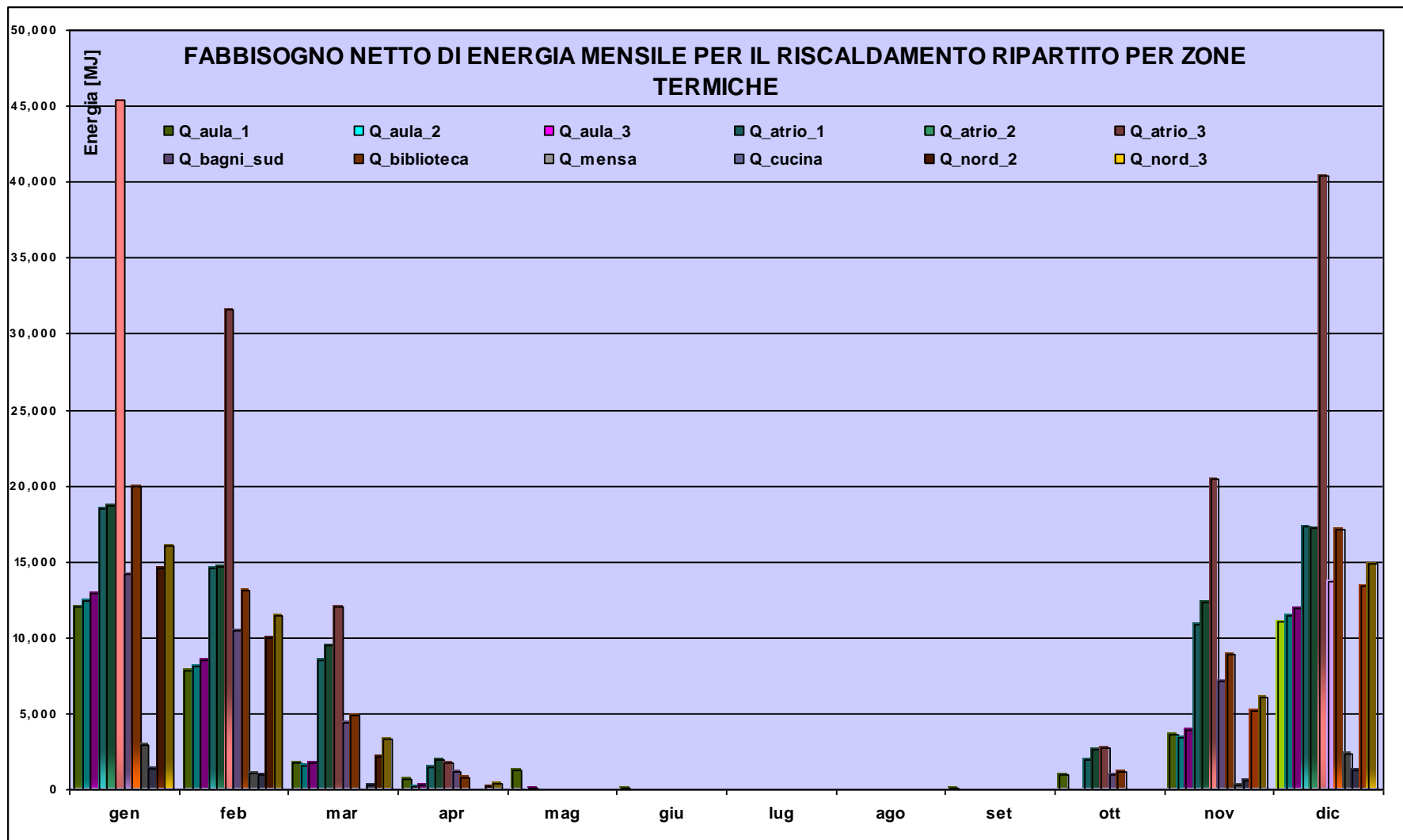


Figura 8 – Ripartizione mensile del fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

L'istogramma della pagina che segue riporta i valori del fabbisogno netto mensile d'energia per riscaldamento, suddiviso per le varie zone termiche.



9.2.2. Comportamento termico annuale

I principali risultati della simulazione, che rappresentano il comportamento termico dell'edificio nell'arco dell'intero anno, sono raffigurati sotto forma di grafici e riportati nelle tavole seguenti.

Comportamento dell'edificio in assenza dell'impianto di riscaldamento

GRAFICO B1 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura delle aule per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Si può notare la differenza tra la temperatura ai diversi piani ed in particolare la maggiore escursione termica invernale ed estiva che caratterizza il 3° piano fuori terra. Nell'arco dell'anno la temperatura di ciascuno spazio si mantiene compresa tra i 10 e i 30 °C, con punte inferiori in gennaio e dicembre, superiori, ma di breve durata, nei mesi di luglio e agosto.

GRAFICO B2 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura delle aule per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Così come nel precedente grafico, si può notare la differenza tra la temperatura delle aule ai diversi piani ed in particolare la maggiore escursione termica invernale che caratterizza quelli del 3° piano fuori terra. I picchi che si leggono testimoniano l'effetto degli apporti interni (occupanti, attrezzature elettriche, ...) e di quelli solari (diretti e indiretti da SW).

GRAFICO B3 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GIUGNO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura delle aule per il mese di giugno, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Così come nei due precedenti grafici, si può notare la differenza tra la temperatura delle aule ai diversi piani ed in particolare la maggiore escursione termica estiva che caratterizza quelli del 3° piano fuori terra. Quest'ultimo risulta essere il piano più caldo in quanto meglio esposto alla radiazione solare e con minori ricambi d'aria da ventilazione naturale, per effetto del dislivello ridotto tra aperture in ingresso ed uscita dell'aria; mediamente le temperature diurne sono superiori di 3-5 °C rispetto i piani sottostanti. I picchi che si leggono testimoniano l'effetto degli apporti interni (occupanti, attrezzature elettriche, ...) e di quelli solari diretti, seppur mitigati dal sistema di controllo della radiazione solare, e la capacità dissipativi notturna legata al raffrescamento strutturale.

GRAFICO B4 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - blocco atrio

La temperatura ai diversi piani dell'atrio per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Si può notare la differenza tra la temperatura ai diversi piani ed in particolare la maggiore escursione termica invernale ed estiva che caratterizza il 3° piano fuori terra. Nell'arco dell'anno la temperatura di ciascuno spazio si mantiene compresa tra 0 e 30 °C, con punte inferiori in gennaio e dicembre, superiori, ma di breve durata, nei mesi di luglio e agosto.

Il confronto con il profilo della temperature delle aule, fa emergere la differenza di involucro e il relativo isolamento termico: le ampie superfici vetrate legano maggiormente la temperatura

degli ambienti interni all'andamento delle condizioni climatiche esterne (temperatura e radiazione solare) in quanto caratterizzate da maggiori trasmittanza termiche.

GRAFICO B5 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - blocco atrio

La temperatura ai diversi piani dell'atrio per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Così come nel precedente grafico, si può notare la differenza tra la temperatura ai diversi piani ed in particolare la maggiore escursione termica che caratterizza il 3° piano fuori terra, vetrato anche in copertura e con minore inerzia termica. I picchi che si leggono testimoniano l'effetto degli apporti interni (occupanti, attrezzature elettriche, ...) e di quelli solari (diretti e indiretti da SW).

GRAFICO B6 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GIUGNO - blocco atrio

La temperatura ai diversi piani dell'atrio per il mese di giugno, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Valgono le considerazioni precedentemente fatte in merito alla differenza tra la temperatura ai diversi piani.

Si può notare, inoltre, la criticità in estate del 3° piano fuori terra, anche se il controllo della radiazione solare (principalmente attuato per mezzo delle caratteristiche del componente trasparente – basso fattore solare) e gli elevati ricambi d'aria da ventilazione naturale, provenienti dalla base dell'atrio stesso, permettono di mantenere le temperature a livelli non elevati (inferiori a 33°C), seppur al di sopra del limite superiore della zona di confort.

GRAFICO B7 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - biblioteca e mensa

La temperatura dei locali adibiti a mensa e biblioteca per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, esclusa la ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale, lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Si nota come la temperatura dei due locali sia sensibile alle variazioni climatiche esterne per via dell'ampia superficie vetrata a Nord-Nord/Est.

Nella mensa, il profilo è condizionato dagli alti apporti interni (compresenza di persone durante i pasti) e oltrepasserebbe, in assenza di ventilazione naturale, il limite superiore di confort - 26°C – a partire dal mese di aprile fino ad ottobre inoltrato. Frequenti condizioni di discomfort, sempre in assenza del contributo della ventilazione naturale, si presenterebbero anche nella biblioteca con picchi anche oltre i 30°C da fine maggio a settembre.

GRAFICO B8 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - biblioteca e mensa

La temperatura dei locali adibiti a mensa e biblioteca per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento.

Così come nel precedente grafico, si può notare la differenza tra i due locali dovuta ai diversi apporti interni e l'ampia escursione termica invernale causata dalla presenza della superficie vetrata. L'andamento risulta tuttavia attenuato rispetto quello della temperatura esterna, senza mai raggiungere gli 0°C anche per nella biblioteca, naturalmente più fredda rispetto la mensa.

GRAFICO B9 - PROFILO ORARIO DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER L'ANNO TIPO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

I ricambi d'aria da ventilazione naturale ai diversi piani delle aule, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico escluso lo scambiatore geotermico. Rappresentano i flussi d'aria che si innescano, al fine del raffrescamento strutturale nel periodo caldo, quando nei locali non sono presenti le persone.

Il profilo della temperatura dell'aria esterna è utile riferimento dell'alternarsi del giorno con la notte oltre che indice delle condizioni dell'ambiente esterno.

Si può notare come la ventilazione sia necessaria nei mesi compresi tra aprile e ottobre, con una frequenza maggiore da giugno a settembre. I ricambi orari sono differenti a seconda dei piani, in relazione al dislivello tra le aperture di ingresso e quelle di uscita. Per le aule del 1° piano fuori terra si hanno mediamente 10 vol/h, quelle al 2° piano f.t. 7 vol/h e quelle al 3° piano f.t. 4 vol/h, con picchi rispettivamente di 17, 12 e 15 vol/h. Quest'ultimo dato è giustificato in quanto si manifesta quando sono nulli i ricambi da ventilazione naturale dei piani sottostanti e l'atrio ha esclusiva funzione di camino solare per l'ultimo piano.

GRAFICO B10 - PROFILO ORARIO DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER IL MESE DI GIUGNO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

I ricambi d'aria da ventilazione naturale ai diversi piani delle aule per il mese di giugno, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico. Rappresentano i flussi d'aria che si innescano, al fine del raffrescamento strutturale nel periodo caldo, quando nei locali non sono presenti le persone.

Il profilo della temperatura dell'aria esterna è utile riferimento dell'alternarsi del giorno con la notte oltre che indice delle condizioni dell'ambiente esterno.

Valgono le considerazioni precedentemente fatte in merito alla differente ventilazione dei piani. In particolare si nota la diversa intensità dei ricambi orari e la non contemporaneità rispetto alla presenza delle persone.

GRAFICO B11 - PROFILO ORARIO DELLE TEMPERATURE E DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER IL MESE DI GIUGNO - aula del 1° piano f.t.

I ricambi d'aria da ventilazione naturale delle aule del 1° piano fuori terra per il mese di giugno, confrontati con il profilo di temperatura, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico.

Si può notare la dipendenza tra le due variabili di temperatura e flussi d'aria, legata sia a fenomeni fisici sia alle condizioni di controllo e gestione delle aperture. In particolare, quando nei locali non vi è presenza di persone, e la temperatura dell'aria è superiore alla soglia impostata (nel caso i 22°C) e comunque maggiore rispetto quella dell'aria esterna, l'apertura automatica delle finestre determina un abbassamento della temperatura interna che può anche richiedere la chiusura delle stesse nello step di calcolo successivo.

GRAFICO B12 - PROFILO ORARIO DELLE TEMPERATURE E DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER IL MESE DI GIUGNO - aula del 3° piano f.t.

I ricambi d'aria da ventilazione naturale delle aule del 3° piano fuori terra per il mese di giugno, confrontati con il profilo di temperatura, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico.

Valgono le considerazioni fatte a commento del grafico precedente, rispetto al quale si possono notare le differenti temperature e flussi d'aria.

GRAFICO B13 - PROFILO ORARIO DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER L'ANNO TIPO - blocco atrio

I ricambi d'aria da ventilazione naturale dell'atrio per l'anno tipo, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico.

Nel grafico sono esclusivamente rappresentati i flussi d'aria in ingresso dall'ambiente esterno verso l'interno (non quindi le portate d'aria d'estrazione immesse per effetto camino dagli ambienti interni –aule, biblioteca, mensa, laboratori e servizi), che si innescano, al fine del

raffrescamento ventilativo e strutturale nel periodo di potenziale surriscaldamento dell'ambiente.

Quando la temperatura nella parte alta dell'atrio supera i 24 °C, le aperture poste in sommità si aprono predisponendo l'atrio come estrattore; se non vi è immissione né dalla base né da altri ambienti, si hanno dei ricambi (ACH_{sup}) per caduta dell'aria più fredda esterna. Se la temperatura nella parte alta dell'atrio supera, invece, i 28 °C, l'apertura delle finestre poste alla base innesca dei ricambi per effetto camino (ACH_{inf}).

L'unidirezionalità (esterno-interno) del flusso rappresentato è testimoniato dalla non contemporaneità d'immissione tra le aperture basse e quelle alte dell'atrio stesso.

I flussi d'aria che interessano esclusivamente l'atrio per immissione diretta dall'esterno sono considerevoli, con picchi di 8-10 vol/h, ed avvengono anche in presenza di persone nell'edificio. In assenza di queste ultime agli ACH_{inf} si possono sommare le immissioni dagli ambienti interni (quali ad esempio quelli rappresentati nei grafici del blocco aule).

GRAFICO B14 - PROFILO ORARIO DELLE TEMPERATURE E DEI RICAMBI D'ARIA DA VENTILAZIONE NATURALE PER IL MESE DI GIUGNO - blocco atrio

I ricambi d'aria da ventilazione naturale dell'atrio per il mese di giugno, si riferiscono alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico.

Il grafico mostra in dettaglio quanto descritto a commento del precedente, anche in relazione del profilo di temperatura dell'aria nella parte alta dell'atrio.

Comportamento dell'edificio in presenza dell'impianto di riscaldamento

GRAFICO B15 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura delle aule per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento funzionante.

Si può notare che, durante il periodo invernale, la temperatura è mantenuta compresa tra quelle di set-back e di set-point (cioè tra i 15 e i 20°C), mentre durante il periodo estivo, il profilo ha andamento analogo a quello riportato nel GRAFICO B1.

Le differenze tra i piani possono essere giustificate facendo riferimento alle considerazioni riportate a commento del GRAFICO B1.

GRAFICO B16 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - blocco aule a Sud-Sud/Ovest

La temperatura ai diversi piani delle aule per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento funzionante.

In particolare, rispetto al grafico precedente, si può notare come la temperatura interna sia sensibile agli apporti interni (occupanti e attrezzature elettriche utilizzate) e quelli solari della vetrata a Sud-Sud/Ovest, con conseguente superamento della temperatura di set-point (20°C).

Il differente decremento della temperatura in seguito allo spegnimento dell'impianto, è dovuto agli ambienti confinanti attraverso le superfici disperdenti.

GRAFICO B17 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - blocco atrio

La temperatura ai diversi piani dell'atrio per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento funzionante.

Si può notare che, durante il periodo invernale, la temperatura è mantenuta compresa tra quelle di set-back e di set-point (cioè tra i 13 e i 18°C), mentre durante il periodo estivo, il profilo ha andamento analogo a quello riportato nel GRAFICO B4.

Le differenze tra i piani possono essere giustificate facendo riferimento alle considerazioni riportate a commento del *GRAFICO B4*.

GRAFICO B18 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - blocco atrio

La temperatura ai diversi piani dell'atrio per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, escluso lo scambiatore geotermico e l'impianto di riscaldamento funzionante.

Si nota come sia più netto il decremento della temperatura dell'aria al 3° piano f.t. rispetto gli altri piani, a causa delle maggiori dispersioni per trasmissione attraverso i componenti vetrati.

GRAFICO B19 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - mensa e biblioteca

La temperatura dei locali adibiti a mensa e biblioteca per l'anno tipo, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, esclusa la ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale, lo scambiatore geotermico e funzionante l'impianto di riscaldamento.

Così come già riportato a commento del *GRAFICO B7*, si nota come la temperatura dei due locali sia sensibile ai differenti apporti interni.

Durante il periodo invernale, la temperatura è mantenuta compresa tra quelle di set-back e di set-point (cioè tra i 15 e i 20°C), mentre durante il periodo estivo ed in assenza di ventilazione naturale, il profilo avrebbe un andamento analogo a quello riportato nel *GRAFICO B7*.

GRAFICO B20 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER IL MESE DI GENNAIO - biblioteca e mensa

La temperatura dei locali adibiti a mensa e biblioteca per il mese di gennaio, confrontata con quella dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, esclusa la ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale, lo scambiatore geotermico e funzionante l'impianto di riscaldamento.

Si può notare chiaramente il periodo giornaliero di occupazione degli spazi e il superamento della temperatura di set-point conseguente agli elevati apporti interni e temperatura esterna non particolarmente rigida.

GRAFICO B21 - PROFILO ORARIO DEL FABBISOGNO NETTO DI ENERGIA PER L'ANNO TIPO - intero edificio

Il fabbisogno netto di energia per l'anno tipo, confrontata con il profilo delle temperature dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, lo scambiatore geotermico e funzionante l'impianto di riscaldamento. Così come da progetto non è presente alcun impianto di raffrescamento estivo.

Il profilo rappresenta la richiesta di energia all'impianto di riscaldamento al fine di mantenere la temperatura dell'aria interna non inferiore ai limiti prefissati.

Si nota chiaramente che la stagione di riscaldamento, grazie ai contributi dei vari sistemi di controllo climatico integrati, è essenzialmente compresa tra novembre e marzo.

GRAFICO B22 - PROFILO ORARIO DEL FABBISOGNO NETTO DI ENERGIA PER IL MESE DI GENNAIO - intero edificio

Il fabbisogno netto di energia per il mese di gennaio, confrontata con il profilo delle temperature dell'aria esterna, si riferisce alla condizione di edificio occupato, presenti i sistemi di controllo climatico, lo scambiatore geotermico e funzionante l'impianto di riscaldamento.

Il grafico riporta il fabbisogno distinto per blocchi (aule, atrio e altri ambienti) e quello totale.

Si può notare come l'atrio richieda energia anche in regime di attenuazione del funzionamento dell'impianto a causa della maggiori dispersioni termiche per trasmissione, a differenza del blocco aule, caratterizzato da un maggiore isolamento termico.

ALLEGATO C

ANALISI COMPARATIVA TRA SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE

1. Obiettivi e strumenti dell'analisi

Come risulta dall'allegato B, il fabbisogno netto unitario di energia per il riscaldamento degli ambienti durante la stagione invernale è stimato pari a 37.4 KWh/m² anno, mentre quello per il raffrescamento pari a 6.6 KWh/m² anno, che dovrebbe essere pressoché annullato per effetto del contributo dei condotti interrati (si faccia riferimento all' *allegato E – sistema di ventilazione geotermico*).

Obiettivo della presente analisi è quello di scorporare il contributo di energia termica di ognuno dei sistemi ipotizzati nel progetto, attraverso una valutazione sintetica dei singoli apporti e la loro possibilità di interazione. Quest'ultima, infatti, determina una mitigazione dei contributi dei singoli, per effetto della necessaria esclusione di funzionamento in particolari momenti della giornata a favore di configurazioni più vantaggiose.

Lo strumento di simulazione impiegato è il TRNSYS 16 abbinato al COMIS 3.2, con interfaccia IISiBat2, per la cui descrizione ed impostazioni di calcolo si rimanda all' *allegato B – analisi del comportamento termico dell'edificio*.

2. Modalità di analisi

2.1. Condizioni di riferimento

L'analisi è svolta prendendo come riferimento un edificio con caratteristiche standard, rispetto alla corrente pratica progettuale, e valutando l'effetto, in termini di miglioramento delle prestazioni energetiche, dovuto ad una serie di variabili fisico-microclimatiche, caratteristiche delle strategie e dei sub-sistemi adottati.

Le strategie/subsistemi considerati sono:

- isolamento termico dei componenti opachi d'involucro;
- isolamento termico dei componenti trasparenti d'involucro;
- schermi fissi esterni;
- schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni;
- recuperatore di calore dell'aria di ventilazione;
- sistema *Solarwall*[®];
- ottimizzazione del funzionamento dell'impianto;
- ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale.

Le caratteristiche di progetto di tali strategie/sub-sistemi sono descritte in dettaglio sia nella relazione generale, sia nell' *allegato B – analisi del comportamento termico dell'edificio*.

Le condizioni di riferimento sono relative all'edificio stesso della scuola media, ipotizzato come rispondente ai requisiti minimi previsti per legge.

In particolare, in relazione alle strategie/subsistemi sopra indicati, si considerano le seguenti condizioni:

- isolamento termico dei componenti opachi come da DL.192/05;
- isolamento termico dei componenti trasparenti come da DL.192/05;
- schermature solari esterne fisse assenti;
- schermature solari esterne mobili assenti;
- recuperatore di calore dell'aria di ventilazione non previsto;
- *Solarwall*[®] non previsto;
- orario di funzionamento dell'impianto, pari a 12 ore continuative dalle 8 del mattino alle 20 di sera;
- ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale non prevista.

2.2. Confronto tra i subsistemi di controllo climatico

Il parametro di confronto tra le differenti configurazioni, che si vengono a creare inserendo singolarmente, o in modo abbinato, le variabili della simulazione, riferite alle strategie/subsistemi sopra indicate, in rapporto alle condizioni di riferimento, è il *fabbisogno netto di energia* ⁽²⁴⁾ per la climatizzazione dell'edificio. Si considera pertanto funzionante, durante l'intera stagione invernale, l'impianto di riscaldamento e, nonostante il progetto non lo preveda, anche funzionante un impianto di raffrescamento estivo, secondo l'orario specificato e con riferimento alle temperature di set-point e set-back riportate nell' *allegato B – analisi del comportamento termico dell'edificio* ⁽²⁵⁾.

I risultati possono essere riassunti nella tabella 1, dove è evidenziata la configurazione di riferimento e quella finale del progetto.

Tabella 1 – Confronto delle prestazioni energetiche dei sistemi di controllo climatico

configurazione	fabbisogno netto unitario [KWh/m ² anno]	
	riscaldamento	raffrescamento
A - CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO	-79.5	22.4
B - CONFIGURAZIONE DA DL.192/05	-141.0	38.3
C - CONTRIBUTO DELL'ISOLAMENTO DEI COMPONENTI OPACHI	-72.7	25.1
D - CONTRIBUTO DELL'ISOLAMENTO DEI COMPONENTI TRASPARENTI	-66.2	28.6
E - CONTRIBUTO DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO	-64.9	15.4
F - CONTRIBUTO DEGLI SCHERMI FISSI ESTERNI	-84.0	15.8
G - CONTRIBUTO DEGLI SCHERMI FISSI E MOBILI ESTERNI	-86.8	14.0
H - CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO	-67.0	20.1
I - CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO E DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO	-54.1	13.4
L - CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DEL RECUPERATORE DI CALORE	-44.3	13.4
M - CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DEL SOLARWALL	-42.5	13.4
N - CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DELLA VENTILAZIONE NATURALE	-54.1	6.6
O - CONTRIBUTO DEI SISTEMI INTERGRATI	-37.4	(-6.6)

Ciascuna configurazione è sinteticamente descritta in una apposita scheda – di cui alle pagine seguenti – e valutata confrontando, in termini assoluti e percentuali, il corrispondente fabbisogno netto di energia annuo per la climatizzazione con quello dell'edificio di riferimento.

I grafici riportati dopo le schede approfondiscono il confronto tra la situazione di riferimento e quella in progetto. In particolare, essi riguardano:

⁽²⁴⁾ Il fabbisogno netto di energia è la quantità di energia che deve essere fornita dal sistema impiantistico all'ambiente, al fine di mantenere costante la temperatura interna dell'aria. E' un dato indipendente dal tipo di impianto e pertanto non comprende le perdite di energia e il relativo rendimento.

⁽²⁵⁾ Le temperature di set-point per il periodo estivo sono rispettivamente 26°C e 28°C, corrispondenti a quelle invernali di 20°C e 18°C, mentre quella di set-back sono di 31°C e 33°C, corrispondente a quelle invernali di 15°C e 13°C.

GRAFICO C1 - PROFILO ORARIO DEL FABBISOGNO NETTO DI ENERGIA DI RISCALDAMENTO PER L'ANNO TIPO - *configurazione di riferimento, scheda A*

Il fabbisogno netto di energia per il riscaldamento per l'anno tipo, secondo la configurazione di riferimento (scheda A) considera non presenti i sistemi di controllo climatico, funzionante l'impianto di riscaldamento e quello di raffrescamento.

GRAFICO C2 - PROFILO ORARIO DEL FABBISOGNO NETTO DI ENERGIA DI RISCALDAMENTO PER L'ANNO TIPO - *configurazione di progetto, scheda O*

Il fabbisogno netto di energia per il riscaldamento per l'anno tipo, secondo la configurazione di progetto (scheda O) considera presenti i sistemi di controllo climatico indicati in scheda, funzionante l'impianto di riscaldamento e quello di raffrescamento.

Il confronto del profilo con quello riportato nel grafico precedente permette di notare la differente richiesta di energia tra le due configurazioni.

GRAFICO C3 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - aula 3° piano f.t. - *configurazione di riferimento e di progetto*

Il confronto della temperatura dell'aria dell'aula al 3° piano f.t., secondo la configurazione di riferimento e quella di progetto, considera presenti i sistemi di controllo climatico indicati nella scheda A e O, e l'impianto di riscaldamento.

Il confronto tra i due profili permette di apprezzare le migliori condizioni ambientali estive della configurazione di progetto rispetto a quella di riferimento.

Le temperature nel periodo di luglio e agosto hanno una differenza media di 4-5 °C, in particolare i picchi di temperatura nella configurazione di progetto non superano i 32-33 °C, contro i 36-37 °C previsti in quella di riferimento.

GRAFICO C4 - PROFILO ORARIO DELLA TEMPERATURA DELL'ARIA PER L'ANNO TIPO - atrio 3° piano f.t. - *configurazione di riferimento e di progetto*

Il confronto della temperatura dell'aria dell'atrio al 3° piano f.t., secondo la configurazione di riferimento e quella di progetto, considera presenti i sistemi di controllo climatico indicati nella scheda A e O, e l'impianto di riscaldamento.

Il confronto tra i due profili permette di apprezzare le migliori condizioni ambientali estive della configurazione di progetto rispetto a quella di riferimento.

Le temperature nel periodo di luglio e agosto hanno una differenza media di 5-6 °C, in particolare i picchi di temperatura nella configurazione di progetto non superano i 32-33 °C, contro i 37-38 °C previsti in quella di riferimento.

Scheda A

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONFIGURAZIONE DI RIFERIMENTO

descrizione: si considera l'edificio come rispondente ai requisiti minimi previsti per legge e isolamento conforme al DL.192/05 ed impianto funzionante per 12 ore su 24

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.45 W/m²K

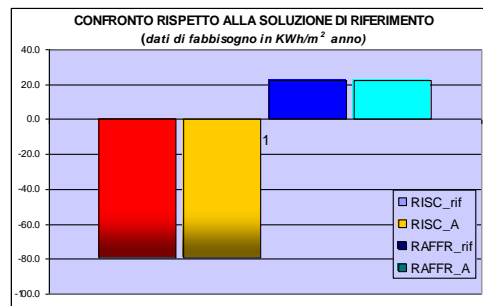
U_{mp_tr} = 2.65 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-98039.3	-87765.6	-93209.4	-113432.5	-117093.5	-212219.2
KWh	-27233.2	-24379.3	-25891.5	-31509.0	-32526.0	-58949.8
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-132762.4	-164320.9	-29339.7	-15882.2	-141258.6	-167888.4
KWh	-36878.4	-45644.7	-8149.9	-4411.7	-39238.5	-46635.7
fabbisogno netto totale [KWh]:		-381447.7				
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]:		-79.5				
rispetto alla configurazione di riferimento [%]:					0.0	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	61824.4	79359.5	63985.0	93.1	3933.8	47199.3
KWh	17173.4	22044.3	17773.6	25.9	1092.7	13110.9
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	13631.1	21232.3	47592.2	0.0	25100.6	22322.5
KWh	3786.4	5897.9	13220.1	0.0	6972.4	6200.7
fabbisogno netto totale [KWh]:		107298.3				
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]:		22.4				
rispetto alla configurazione di riferimento [%]:					0.0	



osservazioni:

la configurazione corrisponde a quella di riferimento.

scheda B

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO
CONFIGURAZIONE DA DL.192/05

descrizione: si considera l'edificio come rispondente ai requisiti minimi previsti per legge e isolamento conforme al DL.192/05 ed impianto funzionante 24 ore su 24

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

$U_{mp_op} = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$

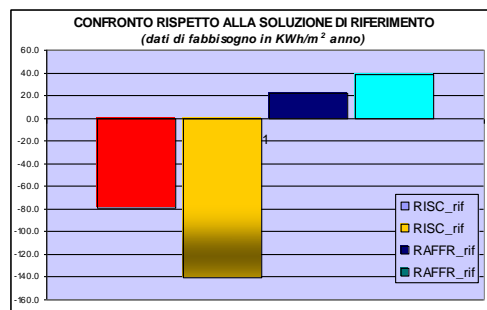
$U_{mp_tr} = 2.65 \text{ W/m}^2\text{K}$

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrío_1	Q_atrío_2	Q_atrío_3
MJ	-210037.4	-179047.9	-196483.7	-145778.8	-143755.6	-314758.6
KWh	-58343.7	-49735.5	-54578.8	-40494.1	-39932.1	-87432.9
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-285946.5	-223356.4	-28123.9	-72088.2	-295385.5	-341765.7
KWh	-79429.6	-62043.5	-7812.2	-20024.5	-82051.5	-94934.9
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		-676813.4				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		-141.0				
				<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>		77.4

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrío_1	Q_atrío_2	Q_atrío_3
MJ	81761.1	104061.3	92309.7	88.5	3404.4	52118.1
KWh	22711.4	28905.9	25641.6	24.6	945.7	14477.3
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	11850.2	25576.6	263935.8	0.0	13509.3	12634.5
KWh	3291.7	7104.6	73315.5	0.0	3752.6	3509.6
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		183680.4				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		38.3				
				<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>		71.2



osservazioni:

la configurazione corrisponde alle condizioni richieste per il calcolo del FEP (da DL.192/05); è tuttavia un dato scarsamente significativo in quanto riferito ad una destinazione d'uso scolastica e non residenziale.

scheda C

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'ISOLAMENTO DEI COMPONENTI OPACHI

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda A con incremento dell'isolamento termico dei componenti opachi di involucro, come da progetto

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.30 W/m²K

U_{mp_tr} = 2.65 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-84671.1	-83650.6	-88010.0	-109547.8	-114947.2	-207044.4
KWh	-23519.7	-23236.3	-24447.2	-30429.9	-31929.8	-57512.3
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-112995.0	-163655.9	-20710.7	-14892.3	-123779.1	-132799.6
KWh	-31387.5	-45460.0	-5753.0	-4136.7	-34383.1	-36888.8

fabbisogno netto totale [KWh]: **-349084.3**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **-72.7**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

-8.5

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

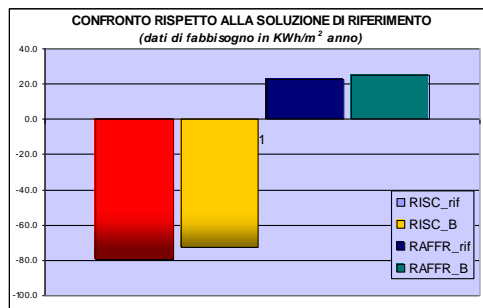
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	70575.1	80965.0	67691.9	1114.4	5787.4	48323.9
KWh	19604.2	22490.3	18803.3	309.6	1607.6	13423.3
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	16644.2	24051.6	70966.2	0.0	25461.1	22121.1
KWh	4623.4	6681.0	19712.8	0.0	7072.5	6144.7

fabbisogno netto totale [KWh]: **120472.7**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **25.1**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

12.3



osservazioni:

L'incremento dell'isolamento termico consente un miglioramento delle prestazioni degli elementi dell'involucro opaco, ed in particolare una riduzione del fabbisogno di riscaldamento. Durante il periodo estivo l'effetto dell'isolamento -che determina una riduzione delle dispersioni verso l'ambiente esterno, mediamente con temperature inferiori rispetto quelli interni- in una facciata di tipo ventilato -che considera nulli gli apporti della radiazione solare- si ha un incremento dei carichi di raffrescamento. Tale quota è tuttavia da ritenersi fittizia se abbinata ad un raffrescamento strutturale -per il quale sono preponderanti le dispersioni per ventilazione.

scheda D

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'ISOLAMENTO DEI COMPONENTI TRASPARENTI

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda A con incremento dell'isolamento termico dei componenti trasparenti di involucro, come da progetto

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.45 W/m²K

U_{mp_tr} = 1.57 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-81957.5	-67898.5	-73957.7	-99253.6	-99669.1	-160353.4
KWh	-22766.0	-18860.7	-20543.8	-27570.5	-27685.9	-44542.6
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-124312.4	-138387.7	-11021.8	-10957.7	-122646.5	-153512.8
KWh	-34531.2	-38441.0	-3061.6	-3043.8	-34068.5	-42642.4

fabbisogno netto totale [KWh]: **-317757.9**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **-66.2**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

-16.7

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

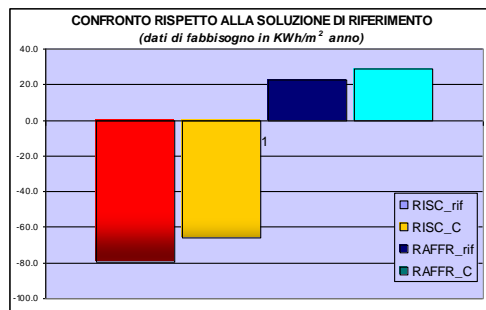
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	63785.1	84169.8	67579.5	142.5	9759.1	97992.1
KWh	17718.1	23380.5	18772.1	39.6	2710.9	27220.0
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	14137.9	31917.9	74932.4	0.0	27257.4	22831.6
KWh	3927.2	8866.1	20814.6	0.0	7571.5	6342.1

fabbisogno netto totale [KWh]: **137362.6**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **28.6**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

28.0



osservazioni:

Le migliori prestazioni dei componenti trasparenti permettono una riduzione significativa del fabbisogno invernale, specie per il blocco atrio caratterizzato da ampie superfici vetrate. Nel periodo estivo comporta un maggior confort termico interno in relazione alla coincidenza temporale tra occupazione e temperature massime esterne, mentre l'incremento del fabbisogno di raffrescamento è giustificato da considerazioni analoghe a quelle riportate nella scheda C.

scheda E

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'OTTIMIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO DELL'IMPIANTO

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda A con orario di funzionamento dell'impianto ridotto alle effettive ore di occupazione e per destinazione d'uso, come da *allegato B*.

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.45 W/m²K

U_{mp_tr} = 2.66 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-76798.4	-68822.5	-71966.3	-97407.8	-95755.4	-191027.9
KWh	-21332.9	-19117.4	-19990.6	-27057.7	-26598.7	-53063.3
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-97982.0	-151178.8	-24905.6	-10696.8	-108419.1	-126704.3
KWh	-27217.2	-41994.1	-6918.2	-2971.3	-30116.4	-35195.6

fabbisogno netto totale [KWh]: **-311573.6**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **-64.9**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

-18.3

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

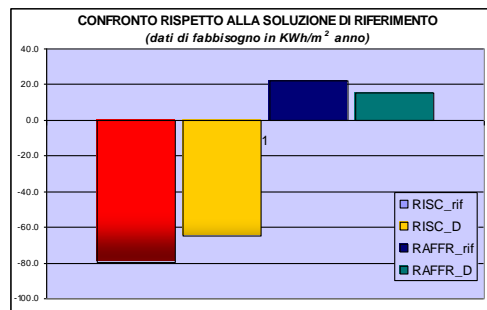
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	41274.9	55276.2	41116.2	74.4	3145.0	36814.2
KWh	11465.3	15354.5	11421.2	20.7	873.6	10226.2
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	8862.7	14132.8	27332.4	0.0	20188.6	17318.4
KWh	2461.8	3925.8	7592.3	0.0	5607.9	4810.7

fabbisogno netto totale [KWh]: **73760.0**

fabbisogno netto unitario [KWh/m²]: **15.4**

rispetto alla configurazione di riferimento [%]:

-31.3



osservazioni:

L'ottimizzazione dell'orario di funzionamento dell'impianto dovuto ad una corretta gestione del sistema impiantistico comporta una riduzione del fabbisogno nella stagione estiva e in quella invernale (come già apparso nella scheda B)

scheda F

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO
CONTRIBUTO DEGLI SCHERMI FISSI ESTERNI

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda A con l'inserimento degli schermi esterni fissi per le vetrate verticali a S-S/O e il minor fattore solare delle vetrate orizzontali dell'atrio, come da progetto.

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- no** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.45 W/m²K

U_{mp_tr} = 2.66 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

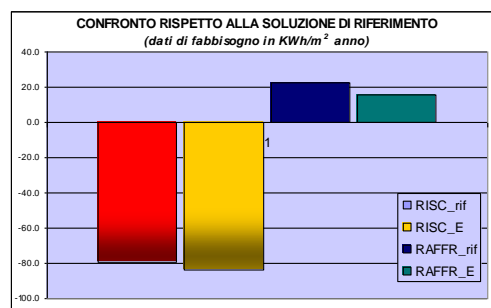
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-107841.5	-98884.4	-104740.6	-116252.0	-124813.6	-238766.3
KWh	-29956.0	-27467.9	-29094.6	-32292.2	-34670.5	-66324.0
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-135229.1	-164372.6	-29466.8	-17195.7	-144021.6	-170384.5
KWh	-37563.6	-45659.0	-8185.2	-4776.6	-40006.0	-47329.0

fabbisogno netto totale [KWh]: -403324.6	rispetto alla configurazione di riferimento [%]: 5.7
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]: -84.0	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	39618.3	53200.9	46004.8	0.0	599.2	11782.2
KWh	11005.1	14778.0	12779.1	0.0	166.5	3272.8
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	11690.1	21121.6	46747.3	0.0	21844.3	19785.2
KWh	3247.2	5867.1	12985.4	0.0	6067.9	5495.9

fabbisogno netto totale [KWh]: 75665.0	rispetto alla configurazione di riferimento [%]: -29.5
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]: 15.8	



osservazioni:

La presenza di sistemi per il controllo della radiazione solare determina indubbi vantaggi in termini di riduzione dei carichi termici di raffrescamento e di confort degli ambienti interni, a fronte di un previsto incremento del fabbisogno di termico invernale, durante il quale, comunque, è necessario per evitare il contatto diretto tra la radiazione solare e i fruitori degli spazi

scheda G

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO
CONTRIBUTO DEGLI SCHERMI FISSI E MOBILI ESTERNI

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda E con l'inserimento degli schermi esterni mobili per le vetrate verticali a S-S/O e quelle a E-S/E del blocco Laboratori e Servizi, come da progetto.

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- no** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

$$U_{mp_op} = 0.45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

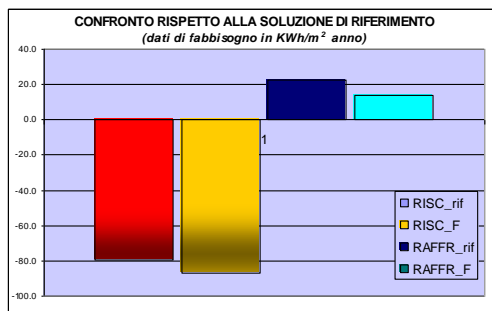
$$U_{mp_tr} = 2.66 \text{ W/m}^2\text{K}$$

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-119216.9	-112334.3	-118157.3	-117006.3	-125608.8	-239489.9
KWh	-33115.8	-31204.0	-32821.5	-32501.8	-34891.3	-66525.0
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-143142.8	-164384.3	-29474.5	-17204.7	-144028.7	-170386.9
KWh	-39761.9	-45662.3	-8187.4	-4779.1	-40008.0	-47329.7
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		-416787.6				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		-86.8				
					<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>	
					9.3	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	30505.9	42336.5	38943.9	0.0	536.7	11558.0
KWh	8473.9	11760.1	10817.8	0.0	149.1	3210.6
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	8504.2	21113.6	46714.2	0.0	21835.5	19784.8
KWh	2362.3	5864.9	12976.2	0.0	6065.4	5495.8
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		67175.9				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		14.0				
					<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>	
					-37.4	



osservazioni:

La presenza di un sistema combinato di schermi fissi e mobili aumenta i benefici estivi in termini di confort e riduzione dei carichi termici, a fronte di un incremento del fabbisogno di riscaldamento. Valgono le stesse considerazioni riportate nella scheda F.

scheda H

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO
CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda A con l'integrazione dei sistemi analizzati nelle schede B, C, F.

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- no** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

$U_{mp_op} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$

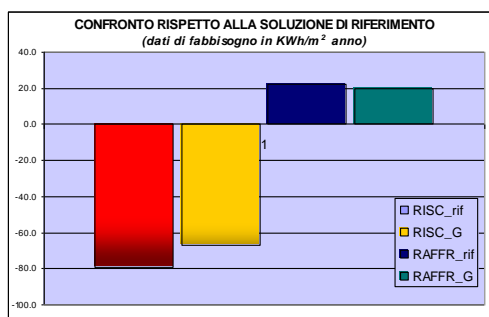
$U_{mp_tr} = 1.57 \text{ W/m}^2\text{K}$

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrrio_1	Q_atrrio_2	Q_atrrio_3
MJ	-85886.7	-84296.3	-89404.5	-99274.0	-110552.1	-188094.6
KWh	-23857.4	-23415.6	-24834.6	-27576.1	-30708.9	-52248.5
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-114257.1	-137120.3	-10979.2	-10212.0	-107841.0	-119883.8
KWh	-31738.1	-38089.0	-3049.8	-2836.7	-29955.8	-33301.1
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		-321611.6				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		-67.0				
<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>					-15.7	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrrio_1	Q_atrrio_2	Q_atrrio_3
MJ	40209.9	48736.6	44040.9	375.3	2516.4	27750.7
KWh	11169.4	13537.9	12233.6	104.2	699.0	7708.5
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	11313.4	35753.3	92421.1	0.0	23675.1	19986.8
KWh	3142.6	9931.5	25672.5	0.0	6576.4	5551.9
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		96327.6				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		20.1				
<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>					-10.2	



osservazioni:

Complessivamente il contributo dei sistemi di involucro permette una riduzione del fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento. Per quest'ultimo occorre far riferimento alle considerazioni delle schede C e D.

scheda I

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO E DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda G con l'integrazione della scheda D, relativa all'ottimizzazione degli orari di funzionamento dell'impianto.

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.30 W/m²K

U_{mp_tr} = 1.57 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

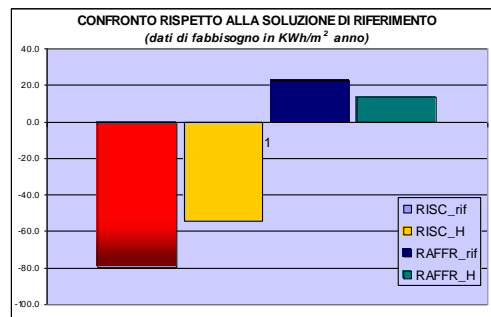
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-65760.5	-67625.2	-70722.8	-86790.0	-89263.7	-168825.8
KWh	-18266.8	-18784.8	-19645.2	-24108.3	-24795.5	-46896.1
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-82747.4	-126187.9	-8896.2	-6828.8	-76872.3	-84794.5
KWh	-22985.4	-35052.2	-2471.2	-1896.9	-21353.4	-23554.0

fabbisogno netto totale [KWh]: -259809.7	rispetto alla configurazione di riferimento [%]: -31.9
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]: -54.1	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	23073.4	29320.9	25335.0	230.8	1838.0	21066.6
KWh	6409.3	8144.7	7037.5	64.1	510.6	5851.8
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	6823.0	26639.9	60432.6	0.0	20430.1	16313.2
KWh	1895.3	7400.0	16786.8	0.0	5675.0	4531.5

fabbisogno netto totale [KWh]: 64306.5	rispetto alla configurazione di riferimento [%]: -40.1
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]: 13.4	



osservazioni:

L'ottimizzazione del funzionamento dell'impianto permette di amplificare i contributi positivi in termini di riduzione dei fabbisogni estivi ed invernali, così come descritto nelle scheda E

scheda L

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DEL RECUPERATORE DI CALORE

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda H con la presenza aggiuntiva dei recuperatori di calore delle unità di trattamento aria, come da progetto

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- si** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

$U_{mp_op} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$

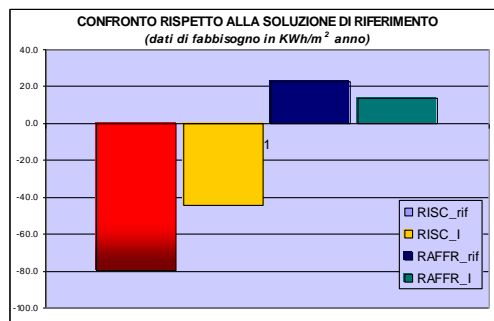
$U_{mp_tr} = 1.57 \text{ W/m}^2\text{K}$

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-51044.4	-52095.5	-54996.2	-80270.9	-84111.1	-160670.2
KWh	-14179.0	-14471.0	-15276.7	-22297.5	-23364.2	-44630.6
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-70742.1	-66118.5	-6734.4	-4581.0	-63087.2	-71451.8
KWh	-19650.6	-18366.2	-1870.7	-1272.5	-17524.2	-19847.7
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		-212750.9				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		-44.3				
					<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>	
					-44.2	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	23073.4	29320.9	25335.0	230.8	1838.0	21066.6
KWh	6409.3	8144.7	7037.5	64.1	510.6	5851.8
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	6823.0	26639.9	60432.6	0.0	20430.1	16313.2
KWh	1895.3	7400.0	16786.8	0.0	5675.0	4531.5
<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i>		64306.5				
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i>		13.4				
					<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i>	
					-40.1	



osservazioni:

Il contributo del recuperatore di calore comporta una riduzione del fabbisogno di energia per il riscaldamento. Essa è particolarmente significativa per ambienti quali il blocco aule, la biblioteca ed il blocco dei laboratori e servizi, caratterizzati da elevati ricambi di ventilazione in occupazione.

scheda M

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DEL SOLARWALL

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda H con la presenza aggiuntiva del Solarwall presente in facciata a S-S/W, come da progetto

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- si** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.30 W/m²K

U_{mp_tr} = 1.57 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

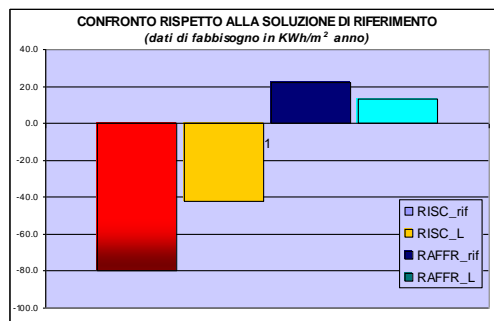
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-38354.8	-38999.1	-41163.6	-77099.1	-79864.5	-159720.2
KWh	-10654.1	-10833.1	-11434.3	-21416.4	-22184.6	-44366.7
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-53954.7	-126082.8	-8932.4	-5985.1	-48597.9	-55498.1
KWh	-14987.4	-35023.0	-2481.2	-1662.5	-13499.4	-15416.1

fabbisogno netto totale [KWh]:	-203959.0	rispetto alla configurazione di riferimento [%]:	-46.5
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²):	-42.5		

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	23073.4	29320.9	25335.0	230.8	1838.0	21066.6
KWh	6409.3	8144.7	7037.5	64.1	510.6	5851.8
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	6823.0	26639.9	60432.6	0.0	20430.1	16313.2
KWh	1895.3	7400.0	16786.8	0.0	5675.0	4531.5

fabbisogno netto totale [KWh]:	64306.5	rispetto alla configurazione di riferimento [%]:	-40.1
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²):	13.4		



osservazioni:

Il Solarwall® riduce i carichi termici relativi ai ricambi d'aria per ventilazione e, in alcuni periodi può contribuire positivamente al riscaldamento degli spazi. Sono stati considerati anche gli apporti di calore durante il periodo di non occupazione (secondo condizioni meglio descritte nell'allegato B – analisi del comportamento termico dell'edificio) al fine di sfruttare la capacità termica dell'edificio come struttura di accumulo.

Gli ambienti che ne beneficiano sono quelli del blocco aule a S-S/O, l'atrio e il blocco laboratori e servizi a N-N/E.

scheda N

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO

CONTRIBUTO DELL'INVOLUCRO, DELL'OTTIMIZZAZIONE DELL'IMPIANTO E DELLA VENTILAZIONE NATURALE

descrizione: si considera l'edificio come alla scheda H con la presenza aggiuntiva del sistema che permette la ventilazione naturale finalizzata al raffrescamento strutturale

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- no** recuperatore dell'aria di ventilazione
- no** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- si** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

$U_{mp_op} = 0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$

$U_{mp_tr} = 1.57 \text{ W/m}^2\text{K}$

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

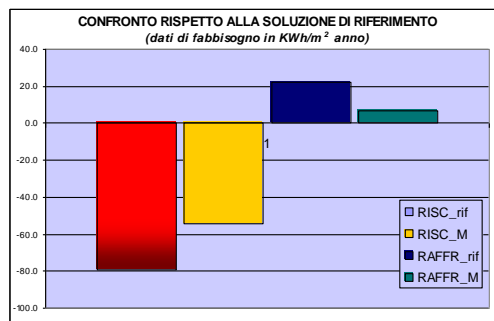
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-65760.5	-67625.2	-70722.8	-86790.0	-89263.7	-168825.8
KWh	-18266.8	-18784.8	-19645.2	-24108.3	-24795.5	-46896.1
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-82747.4	-126187.9	-8896.2	-6828.8	-76872.3	-84794.5
KWh	-22985.4	-35052.2	-2471.2	-1896.9	-21353.4	-23554.0

<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i> -259809.7	<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i> -31.9
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i> -54.1	

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	16518.7	20814.8	25418.0	76.9	434.2	14503.9
KWh	4588.5	5781.9	7060.5	21.4	120.6	4028.9
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato
KWh	-	-	-	-	-	-

<i>fabbisogno netto totale [KWh]:</i> 21601.8 (parziale)	<i>rispetto alla configurazione di riferimento [%]:</i> -70.6
<i>fabbisogno netto unitario [KWh/m²]:</i> 6.6	



osservazioni:

La ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale, abbinato al controllo della radiazione solare, permette di abbattere il 70% il fabbisogno netto di energia per il raffrescamento degli spazi.

scheda O

CARATTERISTICHE DEL SISTEMA DI CONTROLLO CLIMATICO
CONTRIBUTO DEI SISTEMI INTEGRATI

descrizione: si considera l'edificio con tutti i sistemi integrati ed interagenti, così come previsto nella soluzione finale del progetto

sub-sistema analizzato:

- si** isolamento dei componenti opachi di involucro
- si** isolamento dei componenti trasparenti di involucro
- si** schermi fissi esterni
- si** schermi fissi abbinati a schermi mobili esterni
- si** recuperatore dell'aria di ventilazione
- si** Solarwall
- si** ottimizzazione del funzionamento dell'impianto
- no** ventilazione naturale per il raffrescamento strutturale

U_{mp_op} = 0.30 W/m²K

U_{mp_tr} = 1.57 W/m²K

fabbisogno netto di energia per il riscaldamento

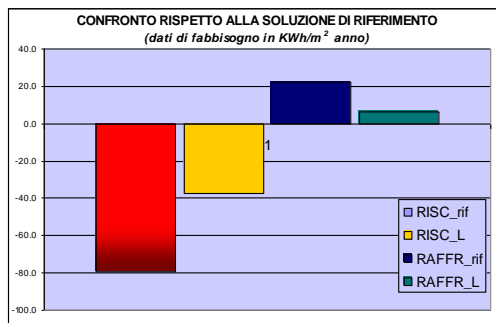
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	-37611.0	-37211.8	-39432.0	-73401.1	-77115.4	-154389.2
KWh	-10447.5	-10336.6	-10953.3	-20389.2	-21420.9	-42885.9
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	-51968.9	-66030.5	-6718.5	-4559.0	-45508.5	-52251.7
KWh	-14435.8	-18341.8	-1866.3	-1266.4	-12641.2	-14514.4

fabbisogno netto totale [KWh]:	-179499.3	rispetto alla configurazione di riferimento [%]:	-52.9
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]:	-37.4		

fabbisogno netto di energia per il raffrescamento

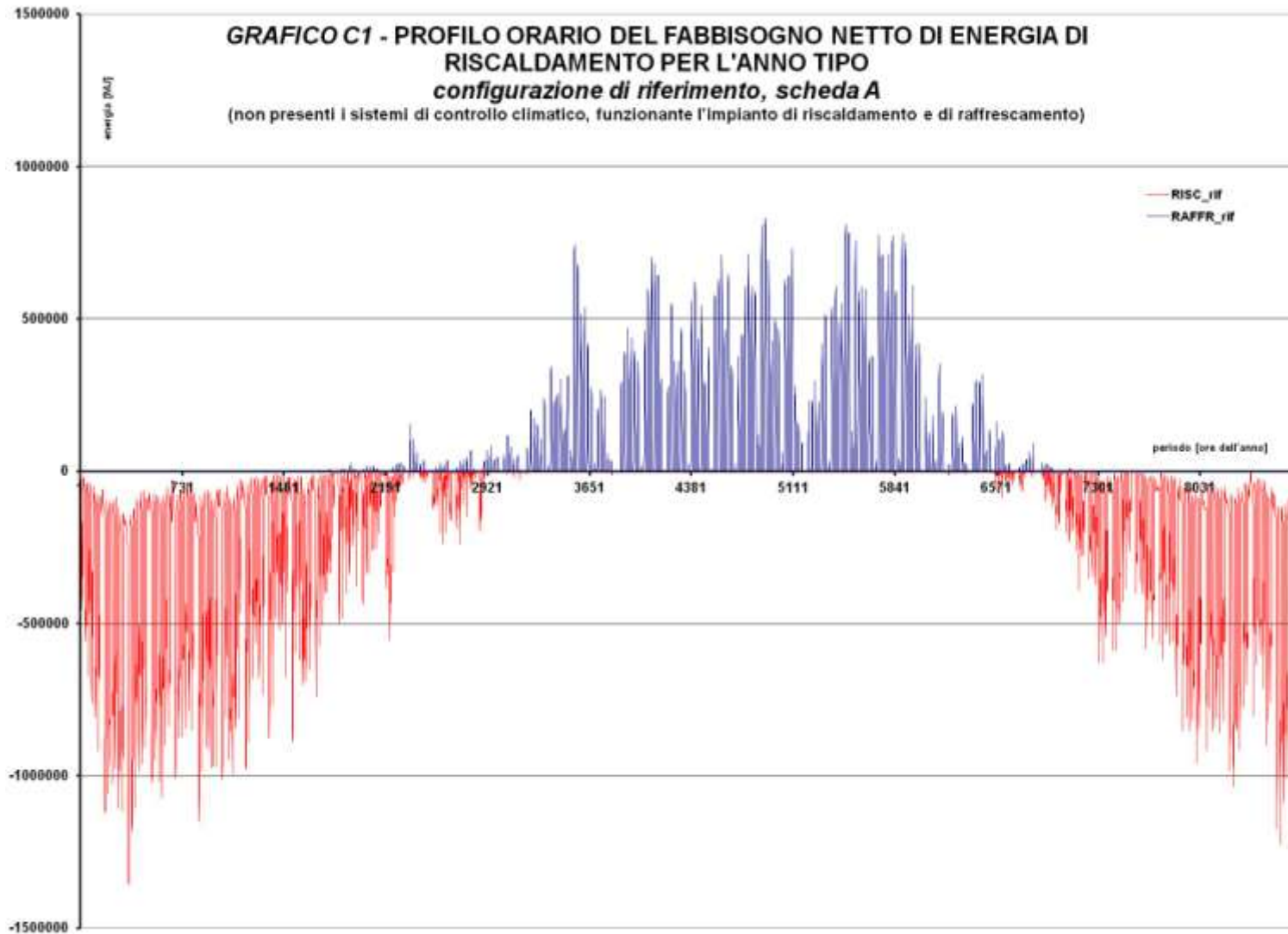
	Q_aula_1	Q_aula_2	Q_aula_3	Q_atrio_1	Q_atrio_2	Q_atrio_3
MJ	16518.7	20814.8	25418.0	76.9	434.2	14503.9
KWh	4588.5	5781.9	7060.5	21.4	120.6	4028.9
	Q_bagni_sud	Q_biblioteca	Q_mensa	Q_cucina	Q_nord_2	Q_nord_3
MJ	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato	non considerato
KWh	-	-	-	-	-	-

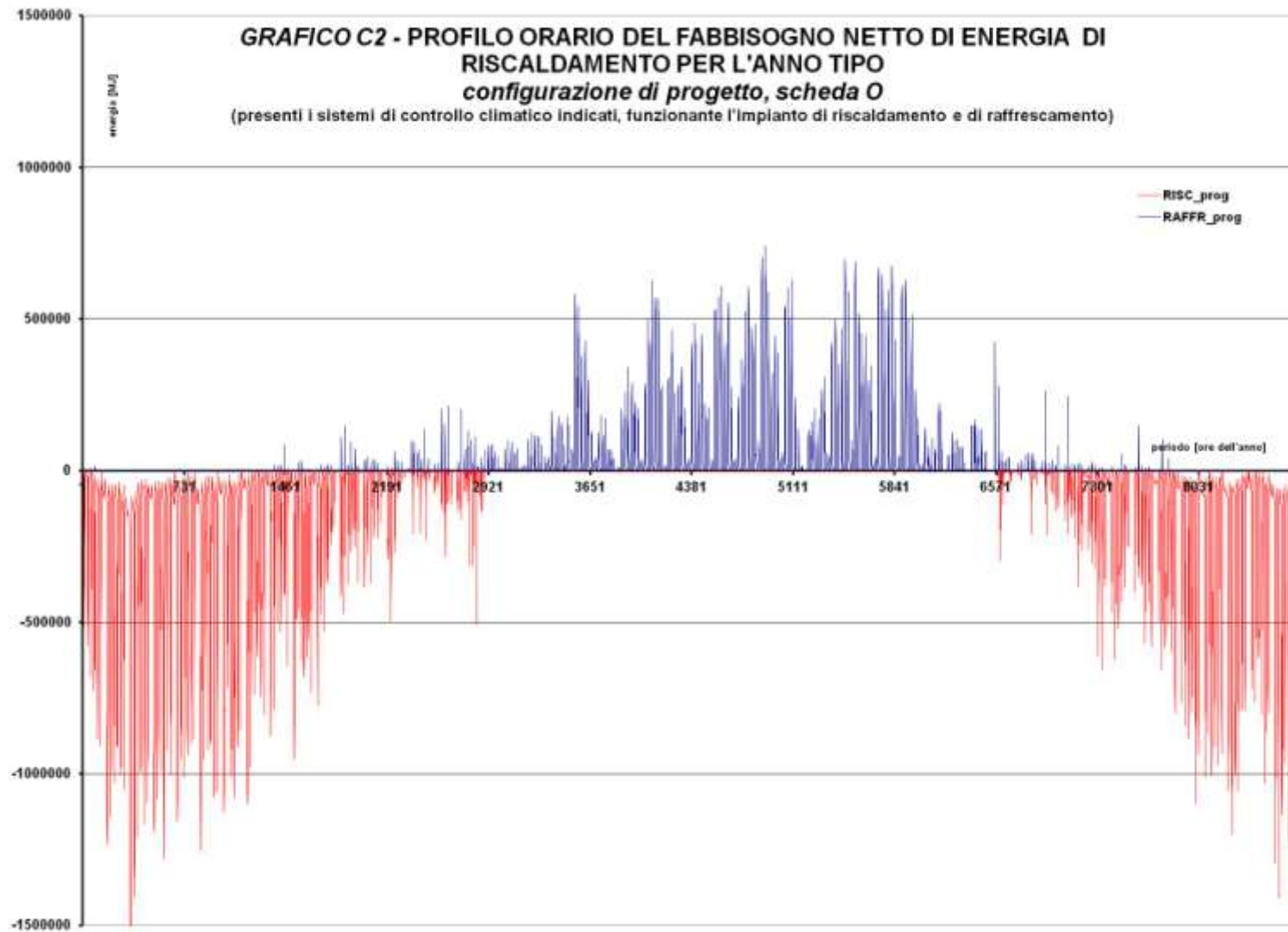
fabbisogno netto totale [KWh]:	21601.8 (parziale)	rispetto alla configurazione di riferimento [%]:	-70.6
fabbisogno netto unitario [KWh/m ²]:	6.6		

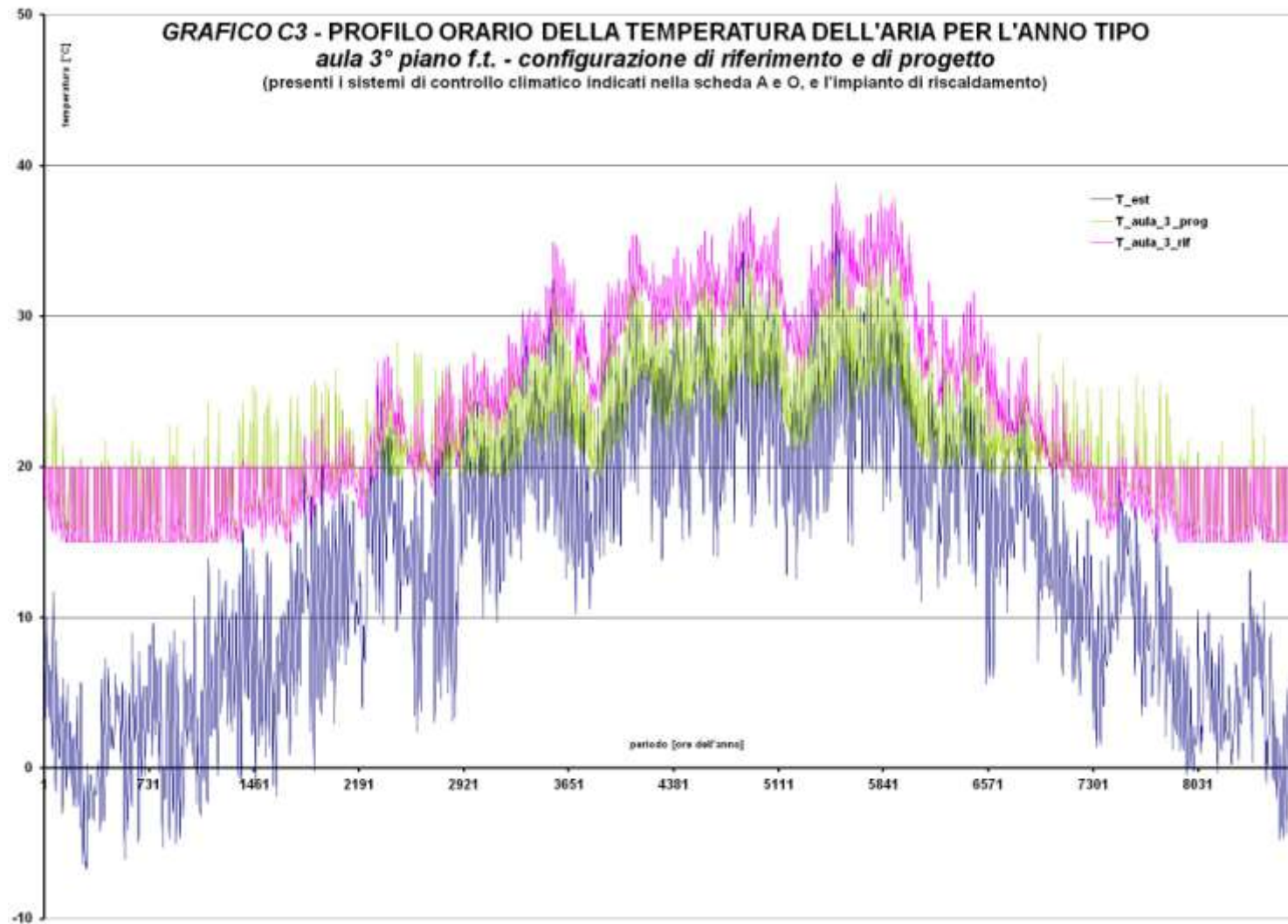


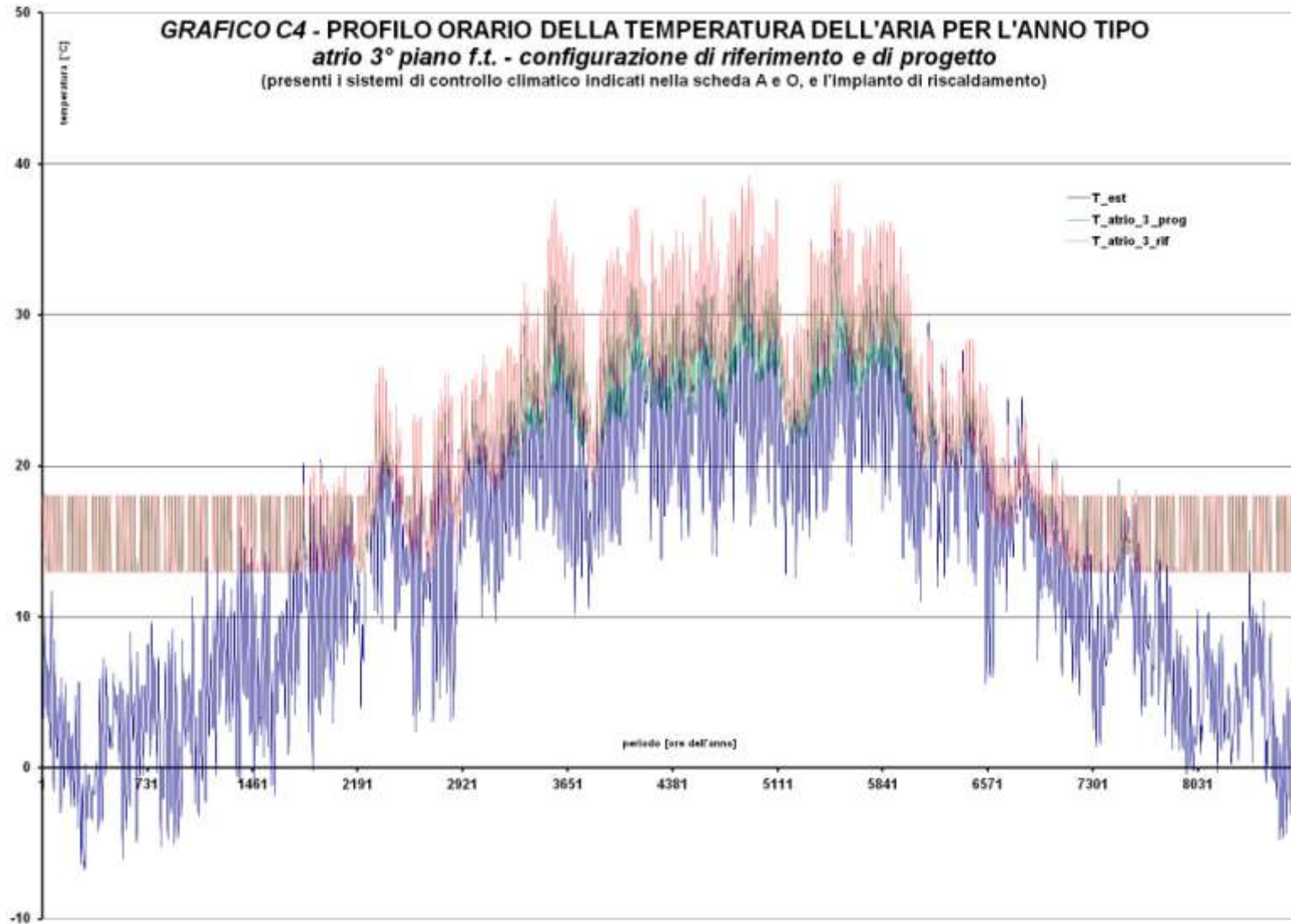
osservazioni:

Il contributo complessivo dei sistemi di controllo climatico permette di raggiungere buoni livelli di efficienza energetica. Come descritto nell'allegato B – analisi del comportamento termico, l'interazione tra i sistemi mitiga il contributo dei singoli a causa di possibili e reciproche esclusioni di funzionamento.









ALLEGATO D

ANALISI TERMO- FLUIDODINAMICA

1. Modelli CFD di *night cooling*

1.1 Modello della singola aula

La prima indagine con software CFD (computational fluid dynamic) è stata compiuta realizzando un modello di una delle aule di lezione. Gli obiettivi primari di questo primo modello consistono in:

- apprezzare la fisica del sistema per quanto concerne topologia del flusso e i meccanismi di scambio termico;
- determinare i valori medi dei coefficienti di scambio termico, convettivo e radiativo, da utilizzarsi per correggere i valori utilizzati nella simulazione dinamica multi-zona con il programma TRNSYS 16;
- verificare se, e in che misura, la presenza degli elementi a prestazione integrata, appesi a soffitto, comportino una diminuzione dell'efficacia del raffrescamento notturno della massa.

Per quanto concerne il terzo punto si sottolinea che questa influenza non si esercita unicamente sulla condizione notturna, ma anche sulla fase diurna, in cui il solaio massivo deve essere il più efficacemente possibile caricato delle potenze endogene dell'ambiente.

1.2. Descrizione del modello

Il modello matematico è costruito per simulare i meccanismi di scambio transitorio di un'aula, partendo da una condizione iniziale assunta come realistica, sulla base di calcoli preliminari e dell'analisi dei dati meteo disponibili. In particolare, si tratta di simulare la dinamica di raffreddamento dei solai durante la notte di un giorno tipico di Maggio-Giugno, ad opera dei flussi di ventilazione, che si attivano per convezione naturale, ovvero per effetto proprio del calore accumulato durante il giorno dalla massa termica, che viene rilasciato di notte e riscalda l'aria esterna introdotta.

Si tratta di un modello di calcolo accoppiato (*conjugate heat-transfer model*), in cui vengono simulati i meccanismi di conduzione (nei solidi), di convezione (solido-fluido) e di radiazione. I flussi di aria sono derivati dai termini di forze di galleggiamento, risolti all'interno del set di equazioni di Navier-Stokes mediate. La turbolenza è modellata con il metodo k-omega.

Si rimanda la descrizione di dettaglio del modello numerico a documento specialistico.

1.3. Risultati

Sono state realizzate alcune simulazioni per verificare l'effetto della presenza degli elementi integrati appesi e della posizione delle aperture esterne, a livello del soffitto o a livello del pavimento.

Caso 1

In questo modello si è posizionato il vasistas a livello del soffitto. Il flusso freddo in ingresso calcolato subisce una immediata caduta dovuta alle forze di galleggiamento, che risulta in uno scambio termico convettivo del solaio del soffitto molto inferiore alle aspettative. Il pavimento, al contrario, si raffredda per convezione più velocemente, instaurando uno scambio radiativo con il soffitto, a questo punto rimasto caldo, raffreddandolo. Nella dinamica termica vengono quindi coinvolti entrambi i solai.

Caso 2

Nel caso 2, sono inseriti gli elementi integrati appesi al soffitto per verificare l'effetto della loro presenza sui meccanismi di scambio termico. Si nota una diminuzione dello scambio radiativo tra i due solai dell'ordine del 10-15 %, che comporta una riduzione della potenza scambiata totale del 5-10%. Ciò determina, ovviamente, una diminuzione della quantità di calore che è possibile scambiare in una notte.

Caso 3

In questo caso si tiene conto dell'effetto di incremento del flusso, spiegato nel paragrafo successivo, dovuto alla presenza dell'atrio. Si invita a leggere prima quella descrizione.

Le figure 1÷4 illustrano le principali caratteristiche di flusso e di scambio termico nell'aula considerata.

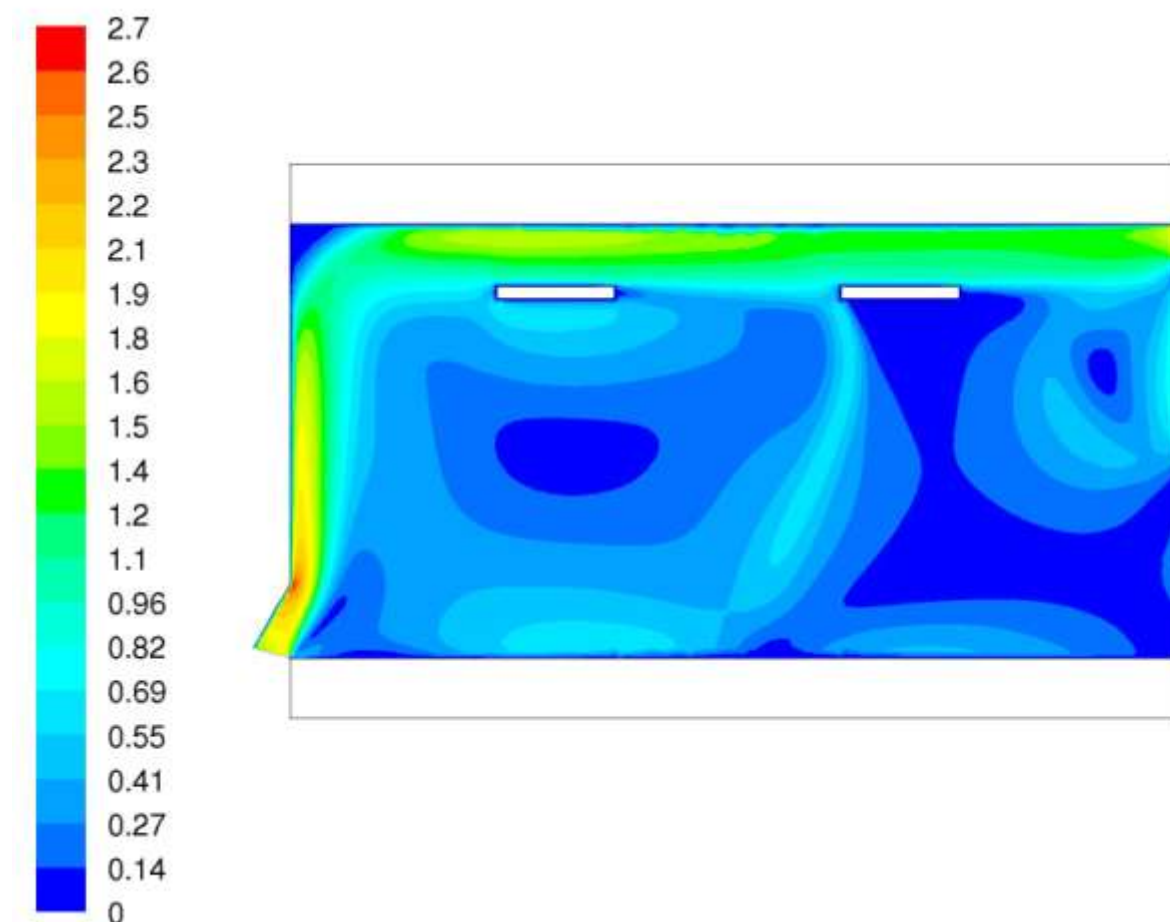


Figura 1 - Caso 3: mappe di velocità dell'aria; si nota che il flusso prosegue dritto fino al soffitto e vi si mantiene aderente per effetto "Coanda" e per la funzione di ala degli elementi integrati.

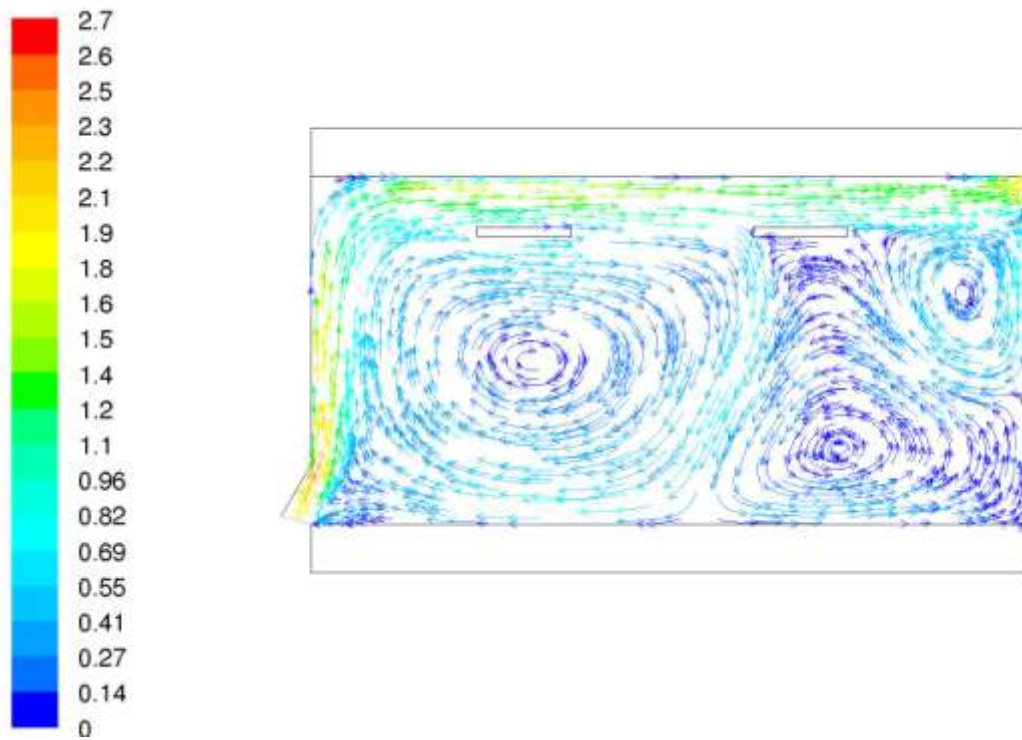


Figura 2 – Caso 3: andamento dei flussi d'aria all'interno dell'aula.

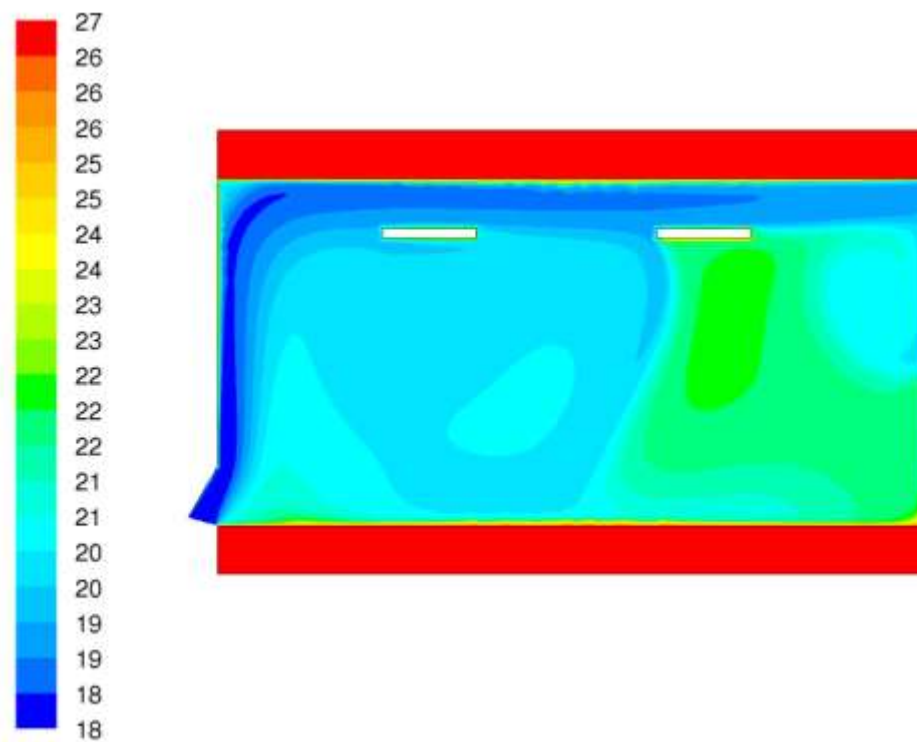


Figura 3 – Caso 3: profili di temperatura a regime, dopo un tempo di circa un'ora dall'innescio del flusso ventilativo.

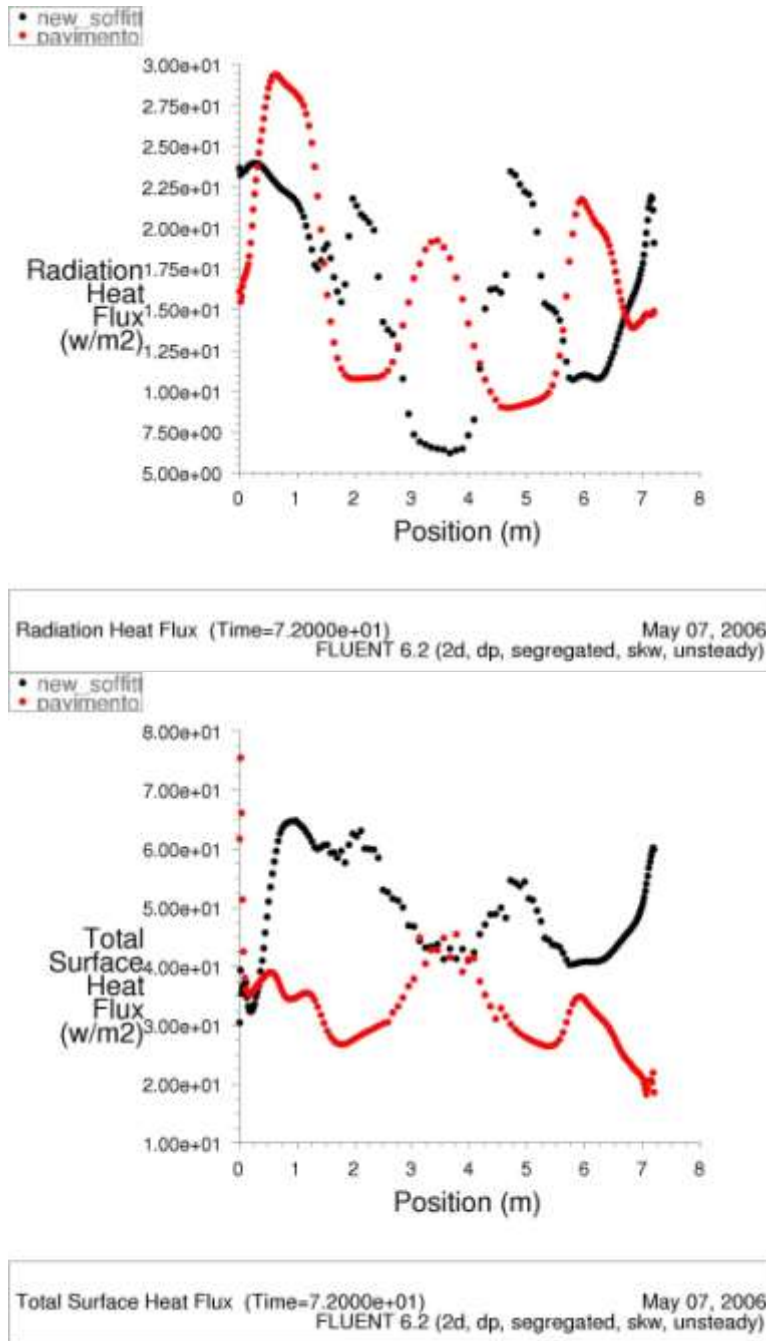


Figura 4 – Caso 3: diagrammi dei flussi termici per radiazione (sopra) e totali (sotto), per il soffitto (nero) e il pavimento (rosso); si evidenzia l'andamento a picchi, legato alla presenza degli elementi integrati appesi.

2. Modello a 3 piani con atrio

La presenza dell'atrio è sicuramente in grado di influenzare i flussi di ventilazione e la dinamica degli scambi delle singole aule, a causa del maggiore sviluppo verticale dei gradienti idrostatici di pressione che si sviluppano.

Il modello, che ne include la descrizione matematica, è stato realizzato con i seguenti obiettivi:

- verificare le portate d'aria previste nei casi precedenti, considerando tutto lo sviluppo verticale dell'atrio;
- analizzare le differenze di comportamento dinamiche delle aule ai tre livelli;
- ottenere una prima descrizione della topologia dei flussi all'interno dell'atrio stesso.

La descrizione 2D dell'atrio è sicuramente meno adatta di quella delle aule, per via della presenza fitta degli attraversamenti che riducono la validità dell'assunzione di simmetria longitudinale, ma è molto affidabile invece dal punto di vista dello sviluppo del gradiente idrostatico interno, che ha molta influenza sulle portate nelle aule.

2.1. Descrizione del modello

Dal punto di vista fisico il modello con atrio simula esattamente gli stessi effetti di quello dei casi precedenti. Al fine di mantenere lo stesso livello di precisione, si è ipotizzato un modello con un numero di celle di calcolo superiore rispetto a quello della singola aula.

2.2. Risultati della simulazione

2.2.1. Risultati della simulazione di base

Caso 4

La presenza dell'atrio modifica sostanzialmente la tipologia del flusso descritta dal primo caso. Infatti, l'incremento di prevalenza disponibile è ovviamente associato ad un aumento della portata d'aria, la quale raggiunge velocità di ingresso tali per cui la direzione iniziale non è immediatamente modificata dall'accelerazione dovuta alle forze di galleggiamento, ma tende a proseguire nella sua iniziale direzione fino al soffitto, anche aiutata dall'effetto di aderenza alla parete finestrata ("effetto Coanda"). La dinamica dello scambio termico è fortemente influenzata da questa variazione e viene sostanzialmente invertita: mentre nel caso di basse velocità di ingresso era il pavimento a raffreddarsi per convezione e il soffitto per radiazione, qui le parti quasi si scambiano.

In termini di valori assoluti lo scambio convettivo sul solaio è incrementato dalle strutture sospese, che funzionano come spoiler confinando più a lungo il flusso in aderenza al soffitto. Resta, comunque, l'effetto di riduzione sullo scambio termico radiativo.

Le figure 5÷9 descrivono le diverse caratteristiche di flusso e scambio termico nelle tre aule e nell'atrio.

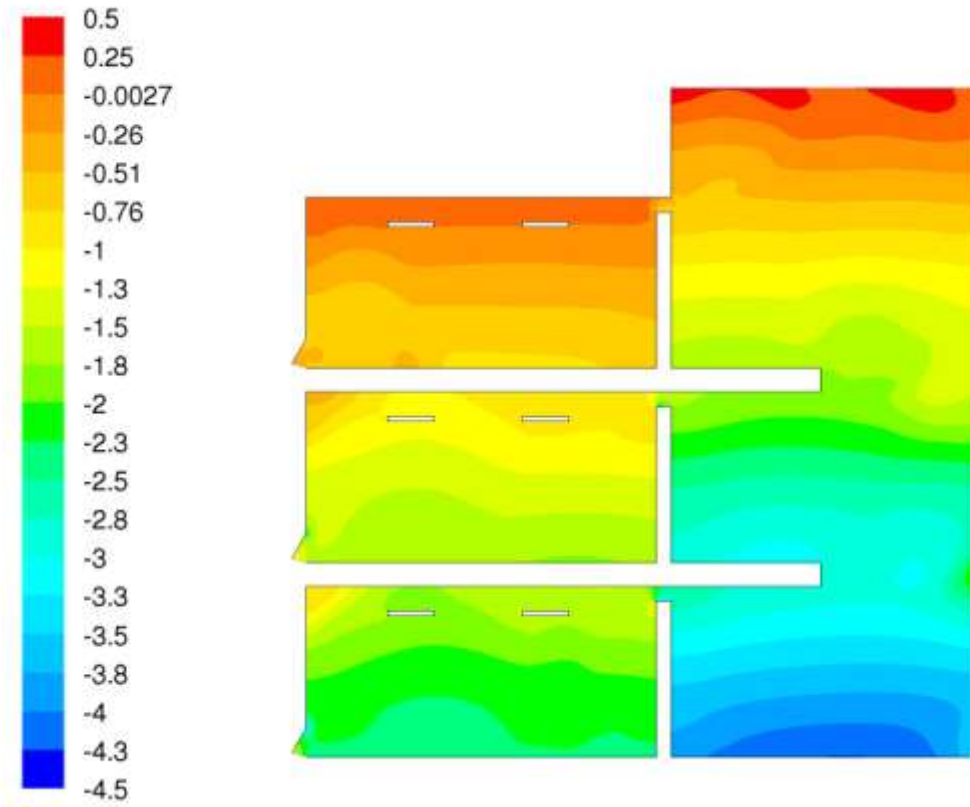


Figura 5 – Caso 4: gradiente della differenza di pressione interno-esterno.

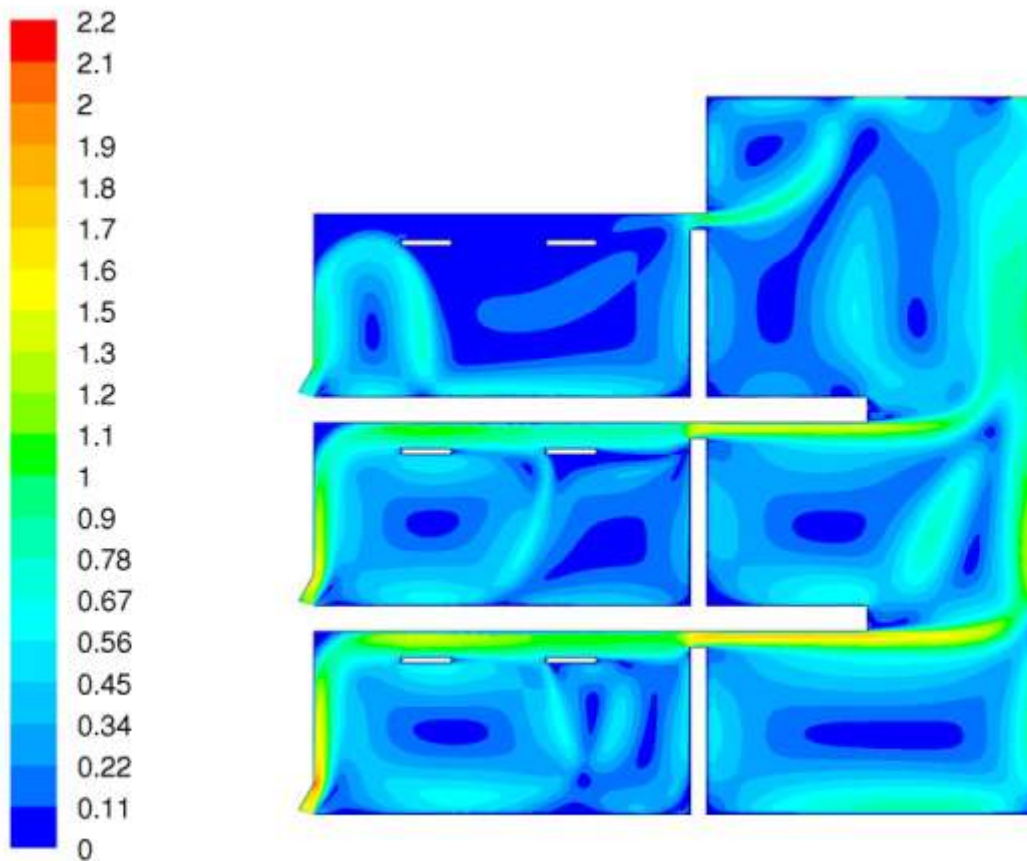


Figura 6 – Caso 4: nei contorni di velocità si evidenziano le differenze tra i tre livelli; il livello superiore ha una velocità del flusso più bassa, non sufficiente a vincere le forze di galleggiamento, che lo fanno deviare verso il pavimento.

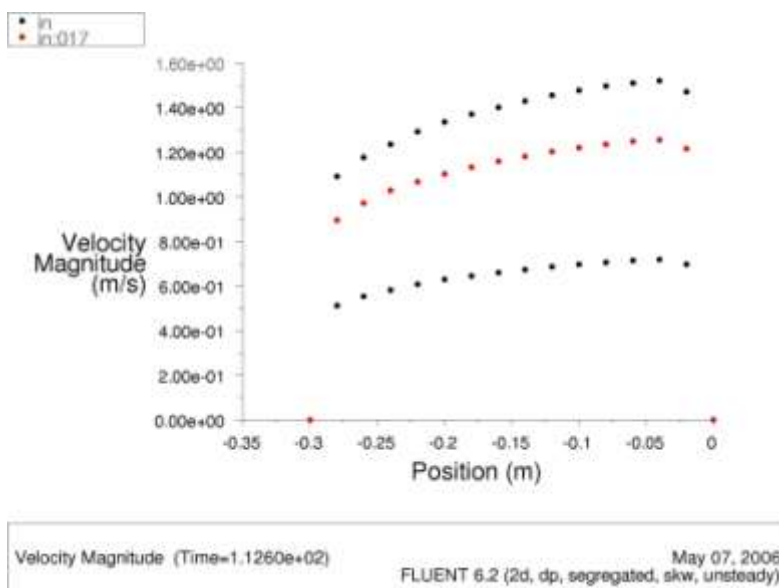


Figura 7 – Caso 4: diagramma delle velocità di ingresso dell’aria sulle sezioni dei vasistas per le tre aule; il livello più alto ha le velocità minori.

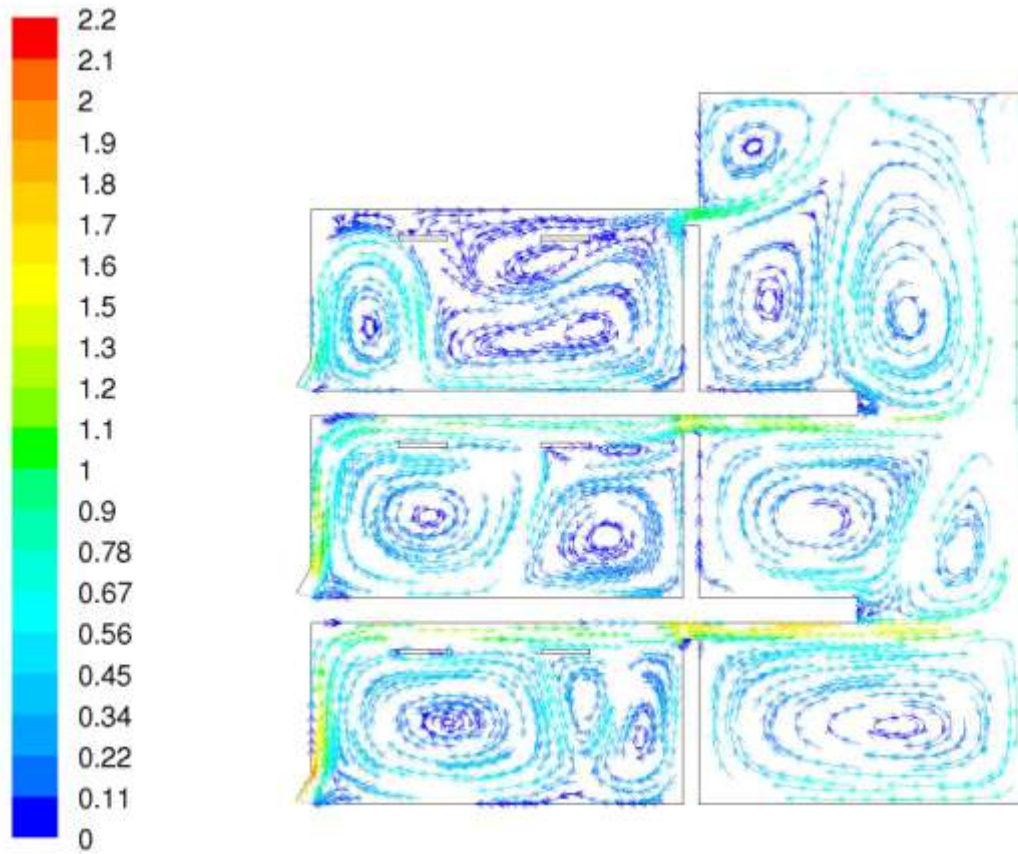


Figura 8 – Caso 4: le linee di flusso evidenziano i complessi vortici locali, comunque di bassa velocità.

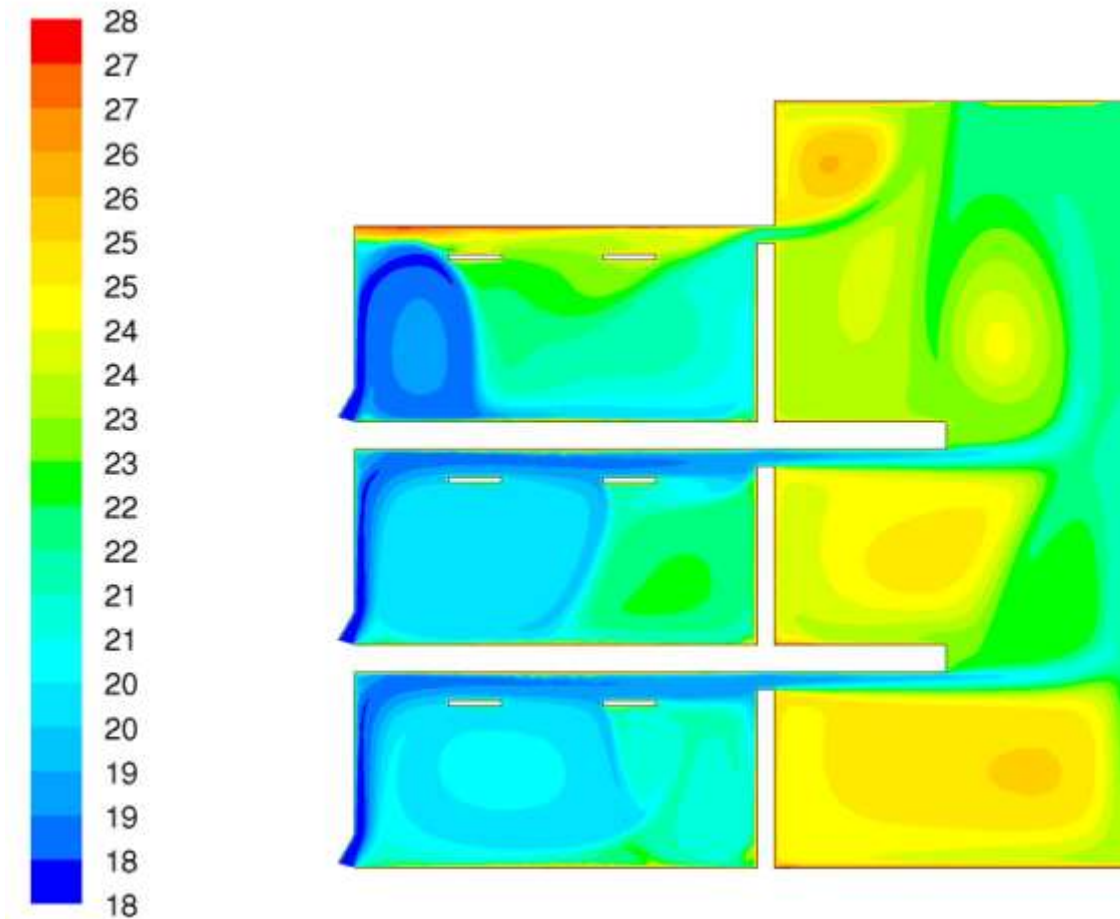


Figura 9 – Caso 4: i contorni di temperatura ad un tempo, dall'inizio del night cooling, equivalente a 1 ora; si nota la differenza tra i 3 livelli e il confinamento del calore nell'atrio a livello terreno, dovuto al flusso di aria dall'aula. Questo effetto potrà essere limitato con opportuni convogliatori di flusso.

Risultati della simulazione con bilanciamento dei flussi

Per garantire un funzionamento bilanciato, rispetto ai tre piani, devono essere introdotte delle perdite di carico aggiuntive per il 2° e 3° piano. All'interno dello stesso modello precedentemente utilizzato, le tre superfici di immissione dell'aria, che rappresentano la sezione netta dei vasistas reali ai tre piani, sono state definite con coefficienti di perdita concentrata progressivi, fino ad ottenere un deflusso bilanciato, nei suoi valori medi temporali.

Contestualmente, sono stati descritti con maggior dettaglio gli elementi integrati appesi, rappresentando i canali dell'aria che li alimentano.

Sono stati poi calcolate differenti condizioni di funzionamento, legate a differenze di temperatura tra aria interna ed esterna, che è possibile ipotizzare si verifichino.

Caso 5 – flusso bilanciato e ΔT_{10}

Il bilanciamento dei flussi d'aria ai tre piani è realizzato con livelli di tolleranza piuttosto elevati, dato che il fenomeno è di tipo transitorio e caratterizzato da fluttuazioni dei valori di pressione su scale temporali dell'ordine dei minuti. Non si ritiene possibile realizzare esattamente gli stessi flussi, se non per limitati intervalli temporali. Oltre a ciò, la simulazione 2D rappresenta una semplificazione di fenomeni ancor più complessi che avverrebbero nella

realtà da edificare, per cui non si ritiene significativo rendere un modello ideale in qualche modo ancora più perfetto, allontanandolo troppo da quanto potrebbe accadere nella sua controparte reale.

I coefficienti di perdita di carico localizzato ξ , imposti ai tre piani, e le portate medie specifiche (per unità di profondità del serramento) ricavate nel ciclo notturno di raffrescamento delle masse, sono riportate nella tabella seguente. Le altre colonne riportano la velocità media, la portata totale (riferita a tutta la lunghezza delle superfici di immissione), le perdite di carico concentrate risultanti, la differenza di pressione statica all'interfaccia e il coefficiente di scarico C_d . Quest'ultimo è ricavato dalla seguente relazione, derivata dall'applicazione delle equazioni di continuità e di Bernoulli:

$$\dot{V} = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

che lega la portata volumetrica alla sezione (A), alla differenza di pressione statica Δp e alla densità dell'aria ρ .

Un coefficiente C_d pari a 1 significa conservazione dell'energia e della massa al passaggio attraverso l'interfaccia, ovvero il caso ideale. Un valore universalmente accettato di C_d per un serramento verticale è 0,5. Il valore ricavato per il vasistas delle aperture poste al terzo piano è decisamente superiore. Si può pensare di spiegare il risultato considerando che, rispetto al caso di un serramento verticale e flusso di aria mono-direzionale orizzontale, la vena fluida è accompagnata da una sola zona di ricircolo locale, poiché da uno dei due lati il flusso si sviluppa in "appoggio" alla superficie del vasistas stesso, con il risultato che la zona di *vena contracta* ha una sezione minore.

Livello	ξ	portata spec	vel media	portata tot.	Δp conc.	Δp statica	C_d
	□	kg/(s*m)	m/s	kg/s	Pa	Pa	
3	0,5	0,136	0,342	1,02	0,036	0,121	0,803
2	4	0,2	0,5	1,5	0,613	0,859	0,443
1	10	0,209	0,521	1,5675	1,663	1,690	0,330

Le figure 10÷13 descrivono le caratteristiche del flusso e di scambio termico nelle tre aule e nell'atrio, nel caso 5.

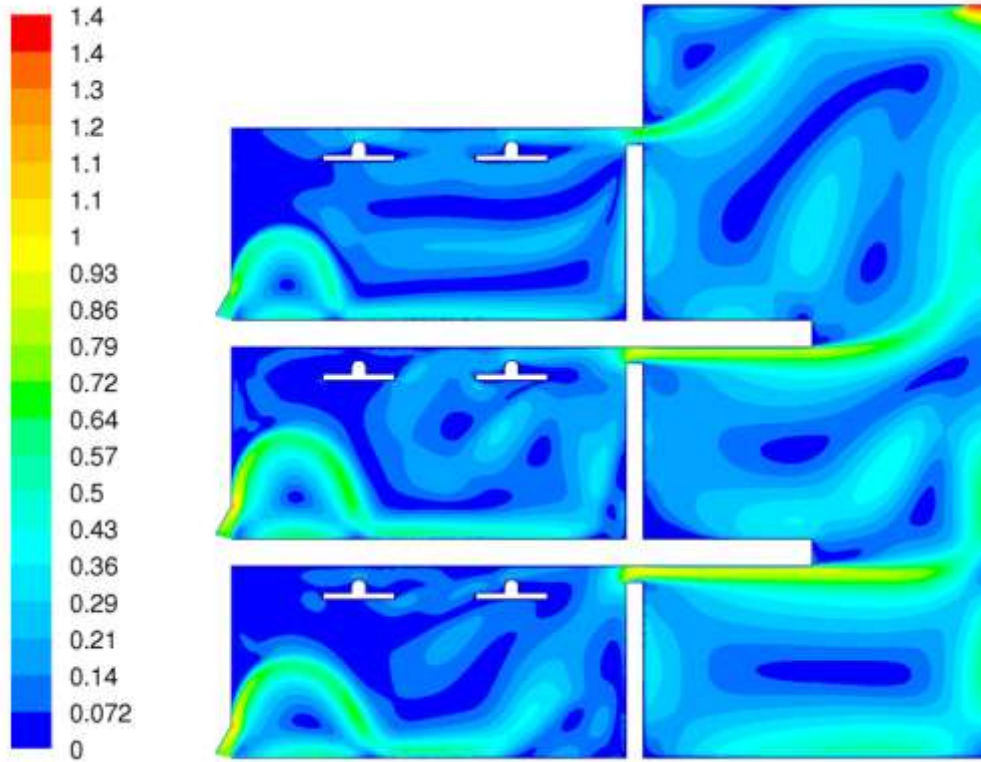


Figura 10 – Caso 5: profili di velocità ad un istante temporale +15min dall’inizio del transitorio, nel caso con flussi bilanciati.

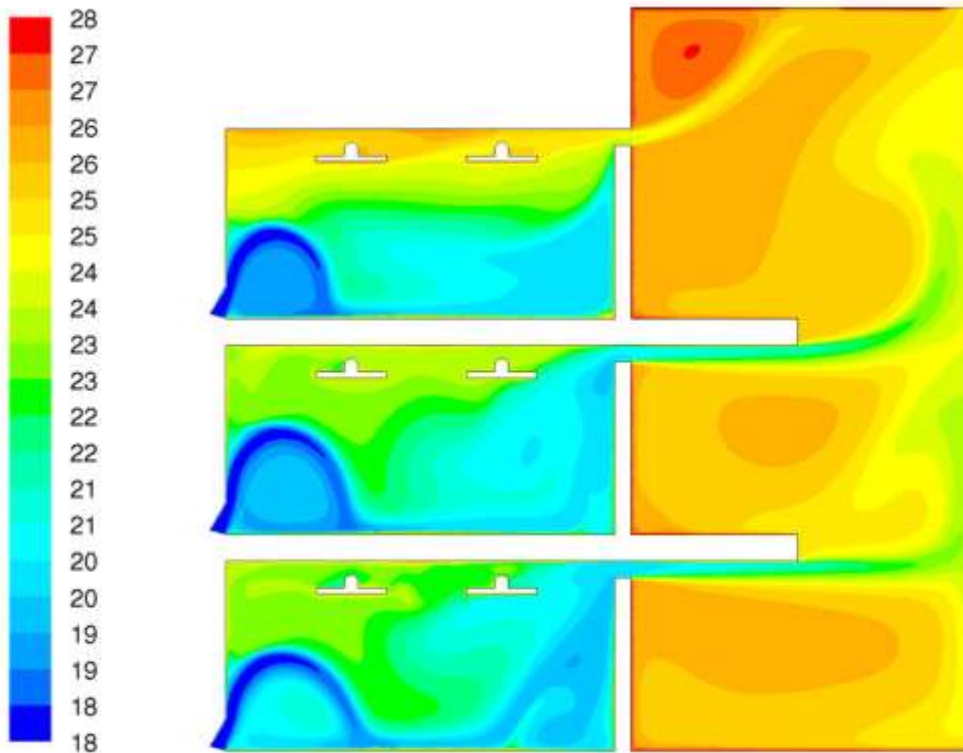


Figura 11 – Caso 5: contorni di temperatura all’istante +15min.

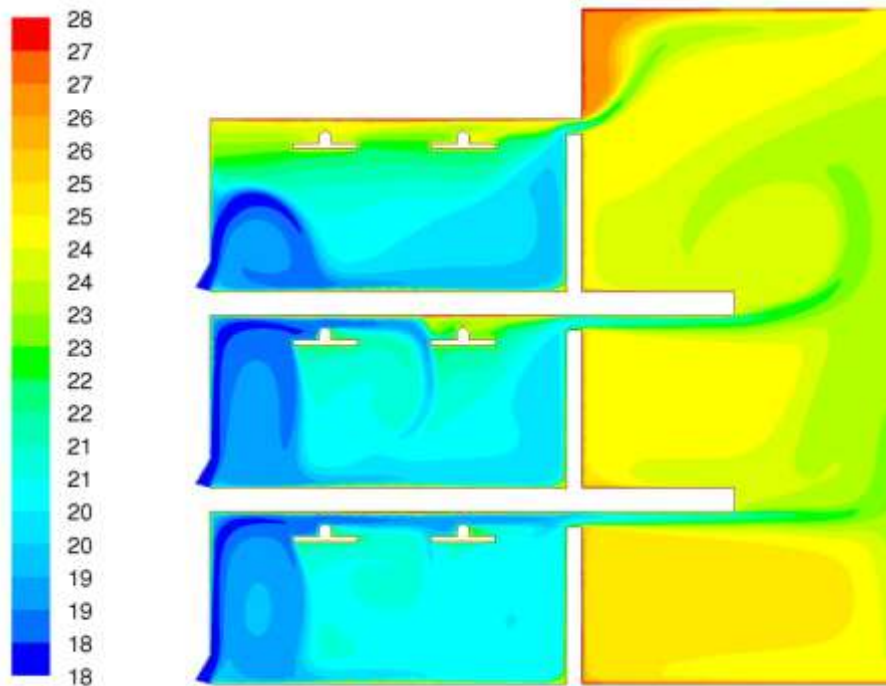


Figura 12 – Caso 5: contorni di temperatura all'istante temporale +1h; la differenza di flusso iniziale, pur ridotta, ha prodotto un abbassamento di temperatura interna ai livelli 1 e 2 più rapida, determinando una nuova direzione dei getti freddi in ingresso, che subiscono forze di galleggiamento negative ridotte.

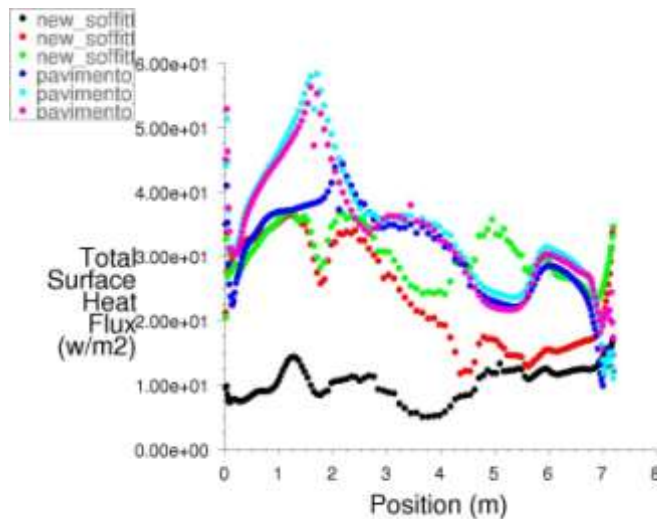


Figura 13 – Caso 5: l'andamento dei coefficienti globali di scambio termico al tempo +15min, con ΔT_{10} ; nonostante l'operazione di bilanciamento, i valori iniziali di solaio (in nero) e pavimento (in blu), del livello tre, non raggiungono quelli dei livelli 1 e 2, che invece sono molto simili.

Caso 5: flusso bilanciato a $\Delta T4$

Sono state effettuate simulazioni con $\Delta T4$, utilizzando lo stesso approccio seguito nelle precedenti con differenza di temperatura di 10°C e mantenendo gli stessi coefficienti di perdite di carico localizzate.

Coefficienti di scambio termico medi sui solai

Sono stati valutati i coefficienti di scambio termico convettivo medi previsti sui solai e soffitti dei tre livelli, mediando i valori temporali ottenuti durante l'evoluzione del transitorio. Dai valori con differenza di temperatura 10 e 4 è stata ricavata una relazione lineare, che lega i coefficienti di scambio termico alla differenza di temperatura interno-esterno. Queste funzioni sono state poi utilizzate nella simulazione di transitorio multi-zona TRANSYS-Comis, i cui risultati sono descritti nell'allegato B.

I coefficienti di scambio termico assumono una varianza temporale elevata: per esempio, si riportiamo in tabella i valori relativi a tre istanti del tempo di simulazione, intervallati di 20 minuti l'uno dall'altro.

Superficie	Coefficienti medi W/(m ² *K)			Media temporale
	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	
Soffitto 3	0,69	0,7	0,78	0,72
Pavimento 3	2,43	2,44	2,36	2,41
Soffitto 2	1,11	1,34	1,83	1,43
Pavimento 2	2,66	2,9	2,69	2,75
Soffitto 1	1,29	1,68	2,32	1,76
Pavimento 1	2,82	2,99	2,6	2,80

I coefficienti rappresentano valori di scambio termico globale, radiativo e convettivo.

ALLEGATO E

SCAMBIATORE GEOTERMICO AD ARIA A CONDOTTI ORIZZONTALI

1. Introduzione

Il progetto esecutivo della scuola media L. Orsini di Imola prevede, tra i sistemi di controllo climatico ecocompatibili, uno scambiatore geotermico, funzionante sia per il pre-riscaldamento, sia per il pre-raffrescamento dell'aria di ventilazione, sulla base dello scambio termico tra l'aria stessa, convogliata in condotti interrati, e il terreno, che mantiene una temperatura pressoché costante nell'arco dell'anno. In funzione della differenza di temperatura tra aria esterna e terreno, si ha un apporto termico da terreno a condotto (riscaldamento) o da condotto a terreno (raffrescamento).

Lo schema funzionale e dei flussi, nello scambiatore geotermico progettato per la Scuola "L. Orsini" di Imola, è rappresentato in Figura 1.

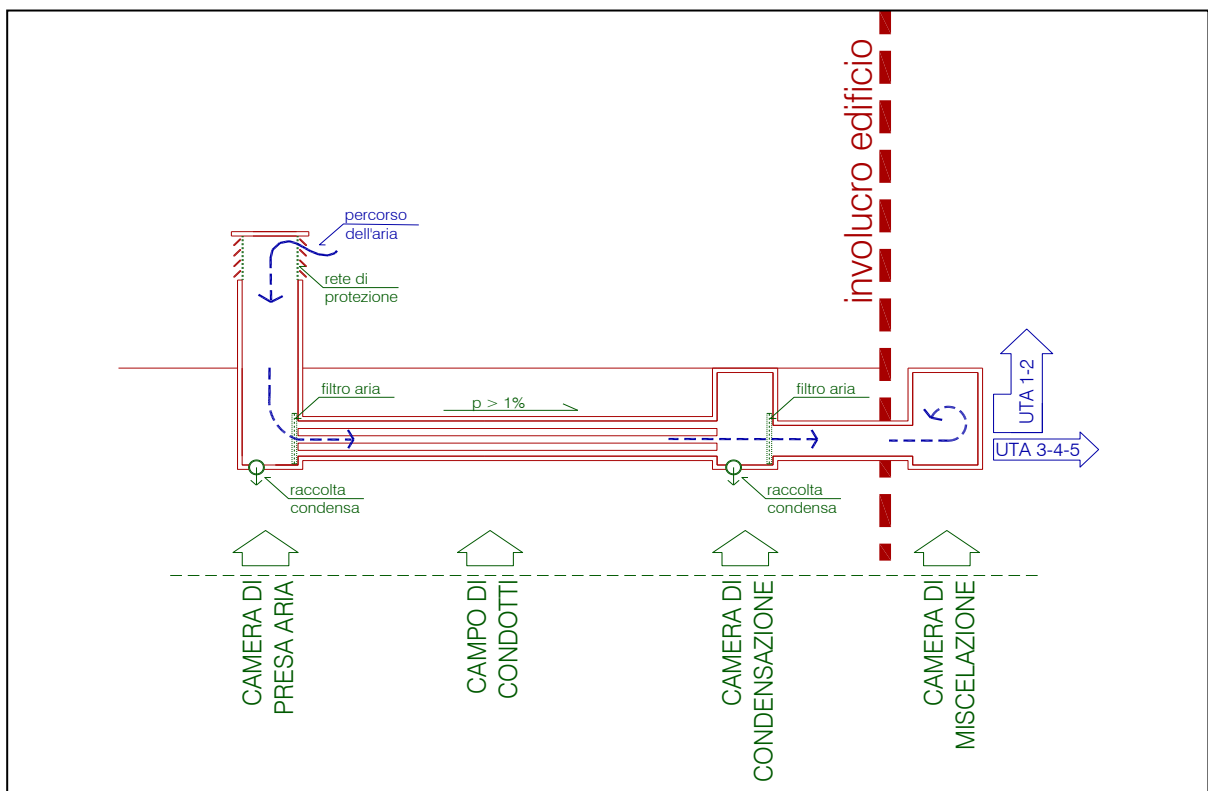


Figura 1 – Schema di funzionamento e dei flussi dello scambiatore geotermico.

2. Descrizione del sistema

Il sistema di scambio geotermico previsto per l'edificio scolastico di Imola si compone di tre campi – insiemi di condotti, in numero variabile, collegati in parallelo a due collettori principali, uno di distribuzione, l'altro di raccolta.

Ogni campo è composto dalle seguenti parti, elencate in sequenza con il percorso dell'aria:

- testa di captazione e camera di presa;
- collettore di distribuzione;
- condotti interrati;
- collettore di raccolta;
- camera di condensazione;
- canale di raccordo;
- camera di miscelazione.

L'aria, prelevata all'esterno attraverso la testa di captazione, è filtrata grossolanamente e convogliata nella camera di presa, primo elemento interrato, che ha la funzione di favorire il deposito delle impurità presenti nell'aria. Da tale camera l'aria è introdotta, attraverso un filtro per polveri grosse, in un collettore orizzontale per essere distribuita, secondo uno schema a pettine, tra i condotti del campo dello scambiatore. Tali condotti costituiscono il vero e proprio scambiatore geotermico: l'aria, infatti, che percorre il canale in lunghezza, ad una velocità definita in funzione della portata richiesta, scambia calore con il terreno circostante, riscaldandosi o raffreddandosi, in funzione della differenza di temperatura, rispettivamente, negativa o positiva, tra aria esterna e terreno. Al termine dei condotti l'aria è raccolta da un secondo collettore e convogliata nella camera di condensazione, preposta allo smaltimento dell'acqua che può venirsi a formare, in seguito all'abbassamento della temperatura al di sotto della temperatura di rugiada, con conseguente saturazione del vapore acqueo contenuto nell'aria in ingresso. Un canale di raccordo collegherà, infine, la camera di condensazione con il piano interrato dell'edificio, dove è presente una nuova camera, detta di miscelazione, poiché raccoglie e miscela l'aria proveniente dai tre collettori di raccolta e la rende disponibile per il sistema di ventilazione dell'edificio.

Il sistema geotermico può funzionare tutto l'anno: durante il periodo invernale ha funzione di pre-riscaldamento dell'aria di ventilazione, in quello estivo determina un raffrescamento e una deumidificazione dell'aria stessa.

Le unità di trattamento aria (UTA), presenti nell'edificio, sono collegate, attraverso appositi canali, alla camera di miscelazione. Qualora necessario, quindi, preleveranno l'aria pre-riscaldata o raffrescata e la distribuiranno per mezzo dei condotti di ventilazione agli ambienti che la richiedono.

Poiché la capacità termica del terreno non è infinita, e il contributo dello scambiatore geotermico è proporzionale alla quantità d'aria trattata, la presenza di più UTA permette di razionalizzare lo sfruttamento della risorsa, soprattutto durante il periodo estivo.

3. Caratteristiche dimensionali e funzionali

Il sistema geotermico è dimensionato al fine di trattare un quantitativo massimo d'aria pari a 40500 m³/h, pari al fabbisogno dell'edificio in piena occupazione.

I campi di condotti sono costituiti da un numero variabile di condotti. La figura 2 mostra la loro collocazione rispetto l'edificio e l'articolazione planimetrica delle parti costituenti.

Le camere di presa, condensa e miscelazione sono progettate in modo da consentire l'accesso per l'ispezione da parte del personale addetto, per mezzo di un chiusino in superficie (si veda le figure 3 e 4).

Le principali caratteristiche di ciascun campo sono:

- CAMPO 1
 - numero di condotti per collettore: 12;
 - lunghezza di ciascun condotto: 70 m;
 - quantità massima d'aria trattata: 15200 m³/h circa;
 - velocità massima dell'aria: 5 m/s;
 - perdita di carico massima (collettore e collegamento): 410 Pa;
 - area netta d'apertura per l'ingresso dell'aria nella testa di presa: 1,4 m².
- CAMPO 2
 - numero di condotti per collettore: 12;
 - lunghezza di ciascun condotto: 70 m;
 - quantità massima d'aria trattata: 15200 m³/h circa;
 - velocità massima dell'aria: 5 m/s;
 - perdita di carico massima (collettore e collegamento): 420 Pa;
 - area netta per d'apertura l'ingresso dell'aria nella testa di presa: 1,4 m².
- CAMPO 3
 - numero di condotti per collettore: 8;
 - lunghezza di ciascuna condotto: 70 m;
 - quantità massima d'aria trattata: 10100 m³/h circa;
 - velocità massima dell'aria: 5 m/s;
 - perdita di carico massima (collettore e collegamento): 350 Pa;
 - area netta d'apertura per l'ingresso dell'aria nella testa di presa: 1,0 m².

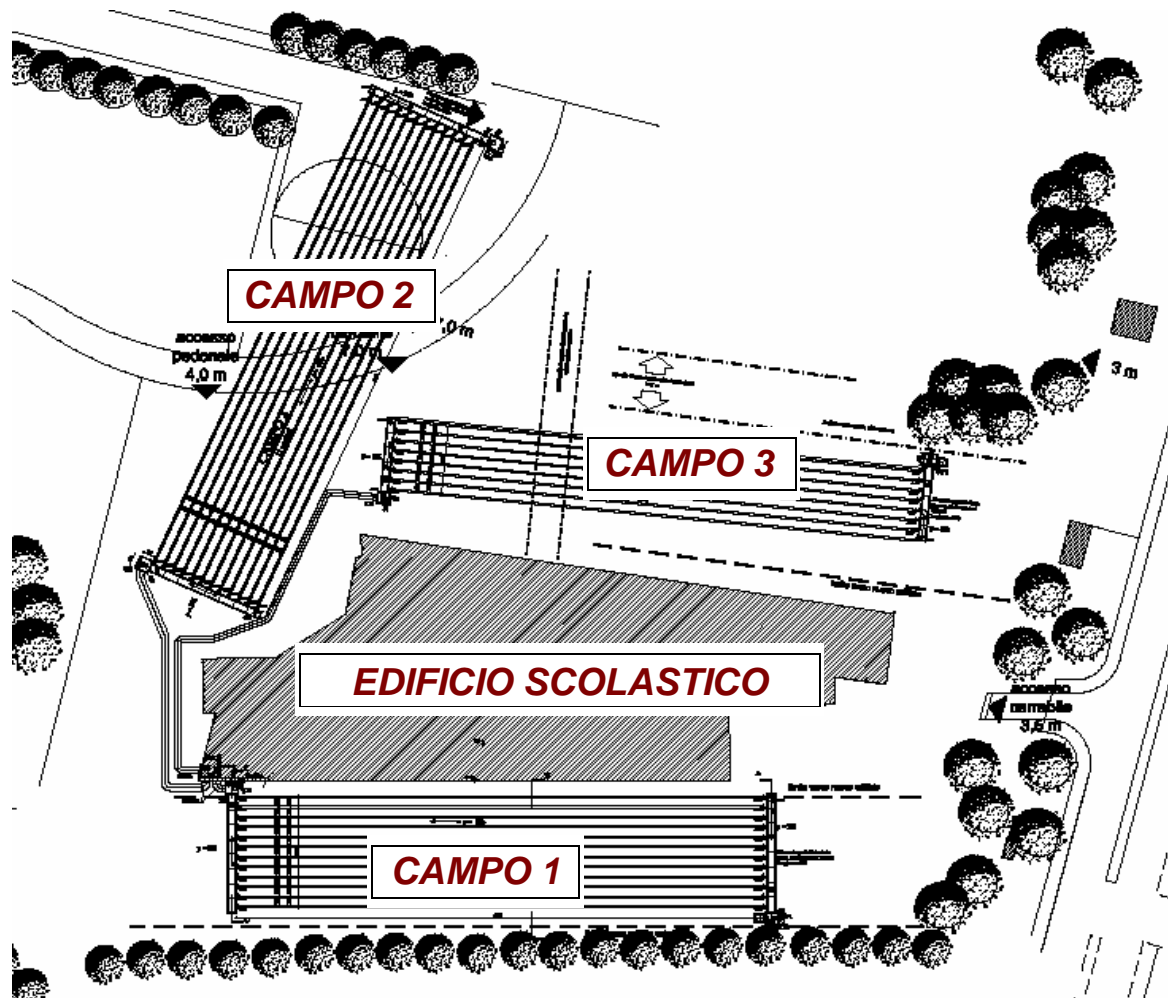


Figura 2 – Schema della distribuzione planimetrica del sistema di scambio geotermico

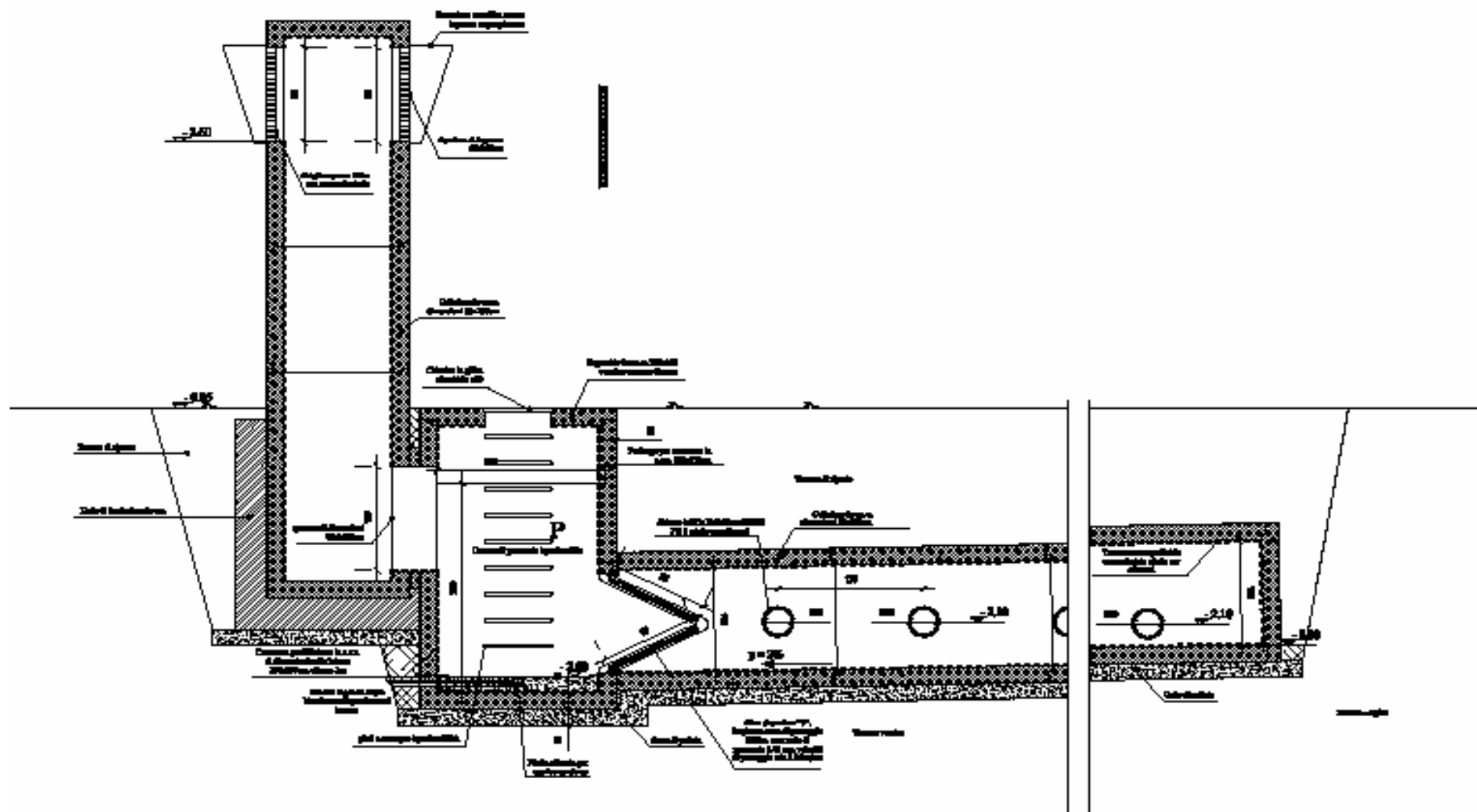


Figura 3 – Sezione verticale in corrispondenza del collegamento tra camera di presa e collettore di distribuzione (per maggiori dettagli si vedano i disegni del progetto esecutivo delle sistemazioni esterne)

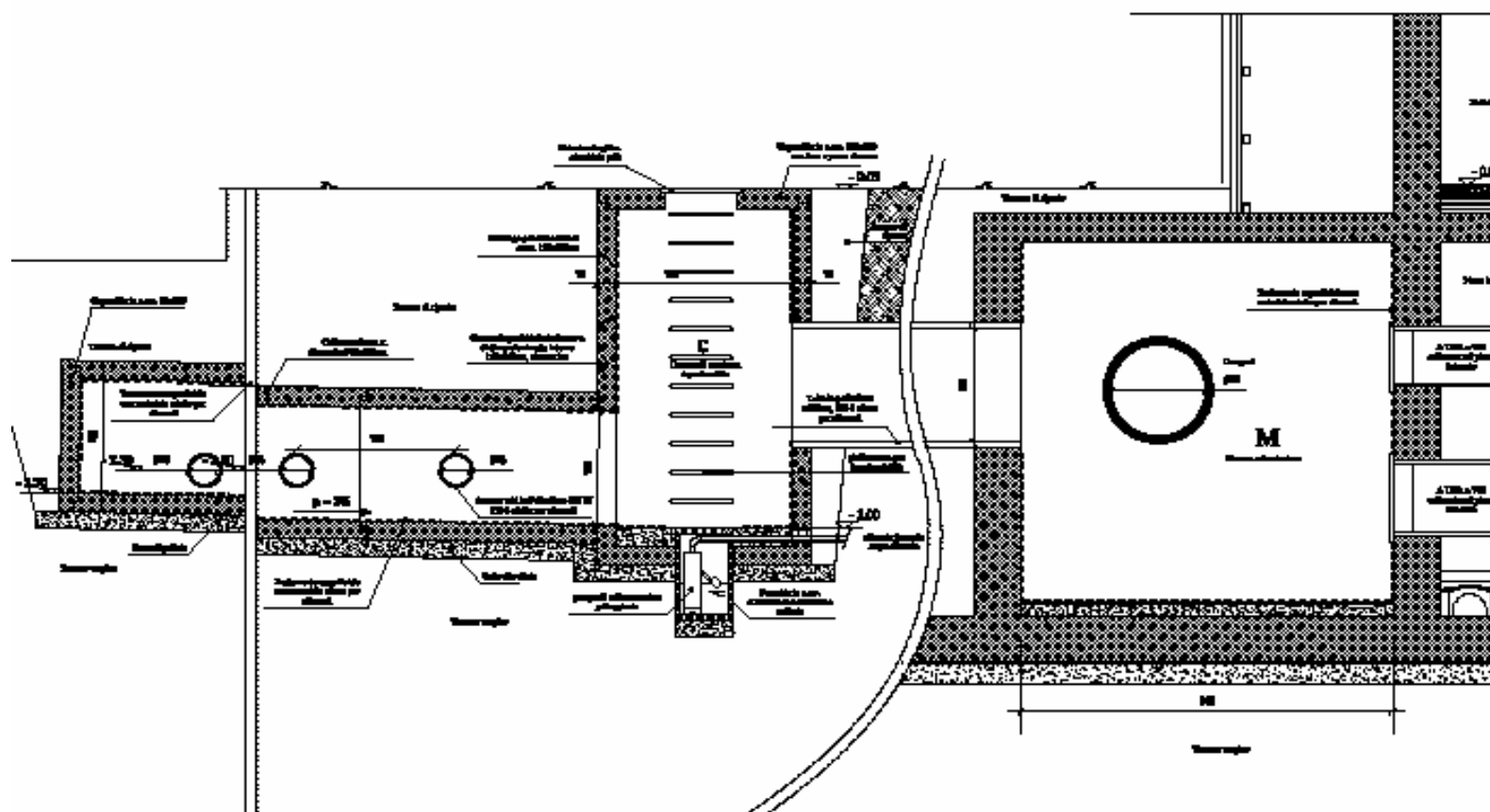


Figura 4 – Sezione verticale in corrispondenza del collegamento tra collettore di distribuzione, camera di condensa e camera di miscelazione (per maggiori dettagli si vedano i disegni del progetto esecutivo delle sistemazioni esterne).

4. Caratteristiche fisiche e di posa in opera

Materiali

I condotti di ciascun collettore sono in polietilene irrigidito, con trattamento anti-ratto e anti-muffa. La scelta del polietilene, rispetto al PVC, è dettata da considerazioni di carattere ambientale. Il polietilene, infatti ha un impatto inferiore, durante il ciclo produttivo, per quanto attiene le emissioni tossiche per l'uomo e l'ambiente.

I collettori di distribuzione e raccolta sono realizzati mediante l'utilizzo di elementi prefabbricati in calcestruzzo. Le camere di presa, condensa e miscelazione saranno anch'esse in cls, a elementi prefabbricati o gettate in opera.

Poiché il trattamento dell'aria avviene in ambiente umido, tutte le superfici interne, a contatto con l'aria, degli elementi dello scambiatore dovranno essere lisce e trattate in modo da impedire la formazione di muffe e altre ammalorazioni causate da agenti organici e fisici. Si prevede pertanto il trattamento delle superfici in cls con rivestimento atossico per serbatoi, realizzato impiegando un prodotto bi-componente, privo di solventi, tipo *NORPHEN FOOD* della Nord Resine S.p.A.

Le teste di presa dell'aria esterna dovranno essere realizzate con materiali poco assorbenti la radiazione solare, per non determinare un incremento termico indesiderato.

Filtraggio e drenaggio

Le teste di presa dell'aria esterna devono essere dotate di una griglia d'aspirazione, con passo di 100 mm o simile, alette anti-pioggia e rete anti-topo per evitare l'ingresso di animali e fogliame all'interno (tipo modello GVA-100 della ditta FCR SpA).

All'imbocco del collettore di distribuzione dovrà essere collocato un elemento filtrante per polvere grossa (classe G4), del tipo a celle ondulate in fibra sintetica (tipo modello MEZ, serie PRE-FIL della ditta FCR SpA), per la cui collocazione si prevede una disposizione a V, al fine di limitare la velocità di attraversamento dell'aria.

In prossimità di ciascuna camera dovrà essere predisposto un sistema per l'allontanamento di eventuale acqua infiltrata o prodotta per condensazione, a mezzo di pozzetto a perdere. In corrispondenza della camera si condensa, tuttavia, le portate d'acqua previste, richiedono un pozzetto di raccolta, collegato alla rete fognaria tramite una pompa d'aspirazione, azionata da galleggiante meccanico.

Posa in opera

La posa in opera dei condotti dovrà avvenire su letto di sabbia battuta, avendo cura di mantenerli paralleli e con pendenza costante, non inferiore al 6.5‰. Ogni tubazione, di lunghezza pari a 70 m, dovrà avere un numero sufficiente di giunti di dilatazione al fine di permettere l'assestamento del terreno.

I collettori di distribuzione e raccolta sono posati su getti di livellamento. Il collegamento con il singolo condotto avverrà per mezzo di appositi raccordi, al fine di consentire eventuali assestamenti tra le due differenti strutture.

5. Prestazione energetica dello scambiatore

La prestazione energetica annuale dello scambiatore geotermico, in termini sia di apporto termico, sia di sottrazione di calore, è stata stimata utilizzando il programma di calcolo GAEA, sviluppato dall'Università di Siegen, Germania ⁽²⁶⁾. Il programma non consente di simulare più di 10 condotti, per cui, la simulazione è stata effettuata separatamente per i diversi campi, considerando anche la differenza in un dato di input che non dipende dal numero dei condotti: la distanza dall'edificio.

Per i due campi che hanno un numero maggiori di condotti (1 e 2), il calcolo è stato effettuato rapportando i valori di input al numero massimo di condotti consentito. Il contributo del campo di progetto è valutato determinando lo scambio termico per condotto e rapportandolo al numero effettivo dei condotti dello scambiatore geotermico progettato.

Dati di input

Si riportano, di seguito, i dati inseriti per la simulazione. Si riporta un valore unico, se valido per tutti e tre i campi (C1, C2, C3); viceversa, si riportano i valori differenziati.

Proprietà dello scambiatore

Number of pipes: C1=10, C2=10, C3=8

Length of pipes: 70.00 m

Pipe diameter: 250 mm

Distance between pipes: 1.4 m

Depth of pipes: 2.61 m Distance from building: C1=6 m , C2=30 m, C3=6 m

Fan after earth-heat-exchanger

Proprietà del suolo

Type of soil: sand

Density: 1780.00 kg/m³

Heat capacity: 1.39 kJ/(kg K)

Thermal conductivity: 0.93 W/(mK)

Ground water level: 6.00 m

Dati climatici

Temperature model: sinusoidal

Monthly maximum value: 29.8 °C

Yearly mean temperature: 14.6 °C

Monthly minimum value: -0.7 °C

Month with maximum temperature: 7

Day with maximum temperature: 20

Caratteristiche del sistema di ventilazione e controllo climatico

Building calculation: quasi stationary

Building volume: 5600.00 m³

Air change rate: C1=C2=2.27 1/h, C3=1,8 1/h

Ventilation flow: C1=C2=12700.00 m³/h, C3=10100 m³/h

EHX control by temperature range:

Set point temperature: 20.0 °C

Boundary value for heating: 20.0

⁽²⁶⁾ Scaricabile dal sito <http://nesa1.uni-siegen.de>

Boundary value for cooling: 27.0

Temperature offset*: 0.0 K

Caratteristiche fluidodinamiche dello scambiatore

Constant pressure drop: C1=C2=400.00 Pa, C3=350 Pa

Pressure drop in pipes: C1=C2=3 Pa/m \approx 210 Pa, C3=2,68 Pa/m \approx 187,60 Pa

Total pressure drop: C1=C2=589 Pa, C3=537,41

Fan efficiency: 0.50

Fan power: C1=C2=4159 W, C3=3015 W

Specific energy consumption: 0.33 Wh/m³

Dati di output

I dati di output della simulazione sono riassunti di seguito.

Scambio termico annuale

CAMPO	IN APPORTO		IN SOTTRAZIONE	
	kWh	kWh/condotto	kWh	kWh/condotto
CAMPO 1	45868,8	4586,88	7355,5	735,55
CAMPO 2	45360,7	4536,07	7471,3	747,13
CAMPO 3	35442,0	4430,25	6556,6	819,57
TOTALE	126671,5	4523,98	21383,4	763,69

Temperature dell'aria e periodo d'uso

CAMPO	Temperatura massima (°C)		Temperatura minima (°C)		Periodo d'uso (ore/anno)
	ingresso	uscita	ingresso	uscita	
CAMPO 1	35,8	34,0	-6,7	-3,2	6796
CAMPO 2	35,8	33,9	-6,7	-3,2	6760
CAMPO 3	35,8	33,8	-6,7	-3,2	6703
MEDIE	35,8	33,9	-6,7	-3,2	6753

Prestazione energetica complessiva del sistema geotermico

Rapportando i risultati della simulazione sopra descritta al numero totale dei condotti del sistema geotermico in progetto, si ottengono i valori riportati nella Tabella sottostante.

COMPONENTE DEL SISTEMA GEOTERMICO	PRODUZIONE TERMICA ANNUA IN APPORTO		PRODUZIONE TERMICA ANNUA IN SOTTRAZIONE	
	kWh	% (*)	kWh	% (§)
CAMPO 1	55042,56		8826,60	
CAMPO 2	54432,84		8965,56	
CAMPO 3	35442,00		6556,60	
TOTALE	144917,40	64,59	24348,76	76,86
Note:	(*) rispetto al fabbisogno termico annuale da riscaldamento (224374 kWh di energia consegnata – Rel. Generale, § 3.5)			
	(§) rispetto al fabbisogno termico annuale da raffrescamento (31680 kWh di energia netta – Scheda A dell'All C).			

Si deve considerare che i valori percentuali riportati in tabella sono teorici e riferiti al fabbisogno termico totale dell'edificio, in piena occupazione.

Nella realtà, il contributo di riscaldamento è sicuramente ridondante, se si tiene conto che lo scambiatore geotermico sarà utilizzato, nella stagione invernale e nel periodo di occupazione, unicamente quando la temperatura in uscita dai

condotti è superiore a quella in uscita dal sistema *Solarwall*[®]. Al fine di sfruttare tale eccesso di calore, tuttavia, si potrebbe ipotizzare, nei periodi in cui la temperatura dell'aria interna è inferiore a quella in uscita dai condotti, di utilizzare l'aria prelevata dal sistema geotermico per pre-riscaldare la massa termica dell'edificio, abbassando, quindi, il carico di riscaldamento diurno.

Nell'eventualità che si volesse sfruttare tale ipotesi, tuttavia, dovrà essere svolta una valutazione energo-economica, relativamente al bilancio tra quanto si guadagna in calore fornito e quanto si spende in energia elettrica per far funzionare i ventilatori.

Per quanto riguarda il raffrescamento, invece, il contributo indicato è, probabilmente, inferiore a quello che si potrà avere nella realtà, in quanto, nel periodo estivo, il carico termico non sarà mai riferito all'intero edificio, ma solo a parti di esso, quelle effettivamente occupate. Queste, nei mesi più caldi – luglio e agosto – non riguarderanno mai (salvo eccezioni) le aule, che rappresentano il volume più consistente dell'edificio.

In conclusione, lo scambiatore geotermico si dimostra essere un sistema ecocompatibile efficace, anche se l'effettivo rendimento e, soprattutto, il ritorno economico del capitale investito, non potranno che essere valutati in modo accurato dopo i primi anni di applicazione nell'edificio occupato.

Per tale ragione è stata prevista l'installazione di dispositivi di misura e raccolta di dati fisico-climatici, che consentiranno l'attuazione di un programma di monitoraggio accurato di breve, medio e lungo termine (si veda la Relazione principale, § 7).