

Ricerca di Sistema elettrico



Implementazione di un codice di calcolo per la modellazione
energetica delle pareti verdi (LA2.7)

V. Corrado, I. Ballarini, V. Nesci, P. Rando Mazzarino



Politecnico
di Torino

IMPLEMENTAZIONE DI UN CODICE DI CALCOLO PER LA MODELLAZIONE ENERGETICA DELLE PARETI VERDI (LA2.7)

V. Corrado (Politecnico di Torino), I. Ballarini (Politecnico di Torino), V. Nesci (Politecnico di Torino), P. Rando Mazzarino (Politecnico di Torino)

Con il contributo di Arianna Astolfi e Marco Simonetti

Dicembre 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: *LA2.7*

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fabio Zanghirella

Responsabile scientifico Dipartimento Energia – Politecnico di Torino: Prof. Vincenzo Corrado

Mese inizio previsto: gennaio 2023

Mese inizio effettivo: gennaio 2023

Mese fine previsto: dicembre 2023

Mese fine effettivo: dicembre 2023

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione per una attività di ricerca dal titolo "Implementazione di un codice di calcolo per la modellazione energetica delle pareti verdi".

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	7
4	Prodotti sviluppati	8
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	9
6	Sintesi delle attività svolte	10
7	Dettaglio delle attività svolte.....	11
7.1	Risultati green façade.....	12
7.2	Risultati living wall	15
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	18
9	Pubblicazioni scientifiche.....	19
10	Eventi di disseminazione	20

Indice delle figure

Figura 1 – Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 17 agosto.....	13
Figura 2 – Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 10 dicembre.....	13
Figura 3 – Comparazione tra i valori del fabbisogno termico ideale su base mensile.....	14
Figura 4 – Analisi di sensibilità: variazione del LAI - green façade.....	14
Figura 5 – Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 17 agosto.	15
Figura 6 – Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 10 dicembre.....	15
Figura 7 – Comparazione tra i valori del fabbisogno termico ideale su base mensile.....	16
Figura 8 – Analisi di sensibilità: LAI variabile - living wall.....	16
Figura 9 – Analisi di sensibilità: spessore substrato variabile - living wall.....	17

1 Risultati attesi

La ristrutturazione degli edifici pubblici e privati è un'azione essenziale oggi, stante il potenziale di risparmio energetico che il patrimonio edilizio contemporaneo presenta. Il *Green Deal* europeo individua nella promozione dell'efficienza energetica del settore edilizio un'iniziativa chiave per conseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra fissati dall'Unione Europea.

L'adozione di soluzioni innovative per l'involucro edilizio – quali *green façades* e *living walls* – può contribuire al raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica, per la potenziale capacità che queste soluzioni hanno di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio. Scostandosi dalle soluzioni tecniche tradizionali, queste tecnologie necessitano di un'analisi attraverso modelli numerici raffinati e affidabili che permettano di valutarne l'effetto sulla prestazione energetica dell'edificio.

In tale contesto, la presente linea d'attività riguarda la modellazione di pareti verdi in regime dinamico e lo sviluppo di un codice di calcolo da collegare al software *EnergyPlus*.

La linea di attività prevedeva i seguenti risultati:

- classificazione dei sistemi di inverdimento verticale (VGS);
- definizione di modelli matematici per le pareti verdi;
- sviluppo di codici di calcolo per i modelli matematici;
- validazione dei modelli.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono in accordo con i risultati attesi.

Nello specifico i risultati sono di seguito dettagliati.

- Classificazione dei sistemi di inverdimento verticale (VGS): l'analisi della letteratura sulle pareti verdi ha consentito di sviluppare una classificazione dei sistemi di inverdimento verticale (VGS), partendo dalla distinzione tra *green façade* e *living wall* e procedendo poi con la classificazione delle diverse sottocategorie appartenenti ad ogni specifica tipologia.
- Definizione di modelli matematici per le pareti verdi: per la *green façade* e la *living wall* sono stati individuati due modelli matematici distinti. Il modello *Dynamic Heat Transfer (DHT)* di Zhang è stato scelto per la *green façade*; per la *living wall*, invece, si è adottato come punto di partenza il modello di tetto verde di Sailor, il quale è stato adeguato sulla base delle risultanze della ricerca scientifica recente.
- Sviluppo di codici di calcolo: per i modelli matematici suddetti sono stati elaborati i rispettivi codici di calcolo, al fine di simulare le tecnologie *green façade* e *living wall* nel software di calcolo *EnergyPlus*. La simulazione ha permesso di valutare le prestazioni energetiche del caso studio in esame, a seguito dell'implementazione delle soluzioni verdi e analizzarne i benefici che ne derivano.
- Validazione degli algoritmi: gli algoritmi sviluppati sono stati validati, verificando manualmente i risultati dei bilanci e delle singole equazioni restituiti dal software di calcolo. In questo modo si è potuto verificare, per ogni singolo parametro che concorre ai bilanci di energia, la corrispondenza tra il calcolo manuale e il calcolo restituito dalla simulazione in *EnergyPlus*.

I risultati ottenuti dalle simulazioni energetiche per la *green façade* e la *living wall* sul caso studio hanno evidenziato l'impatto di questi sistemi sulle prestazioni termo-energetiche. Utilizzando tre giorni rappresentativi rispettivamente delle stagioni invernale, intermedia ed estiva, sono stati esaminati i profili di temperatura superficiale esterna delle pareti e la temperatura operativa interna, sia con sia senza le tecnologie verdi, in condizione di *free-floating* e considerando variazioni stagionali del *Leaf Area Index (LAI)*. Si è poi calcolato il fabbisogno termico ideale per il riscaldamento e il raffrescamento, simulando la presenza di un impianto ideale a capacità termica infinita. Infine, è stata condotta l'analisi di sensibilità per entrambe le tecnologie, facendo variare i parametri ritenuti più significativi: nello specifico il valore del *LAI* per ambedue le tecnologie e lo spessore del substrato per la *living wall*.

Per entrambe le tecnologie, si è constatato che il maggior vantaggio in termini di riduzione della temperatura superficiale esterna della parete e il miglioramento della temperatura operativa interna si è verificato nel giorno estivo di riferimento. Questo miglioramento è attribuibile principalmente all'effetto schermante fornito dalla vegetazione nella *green façade*, nonché all'apporto del substrato nella *living wall*. In termini di fabbisogno termico ideale,

entrambe le tecnologie presentano un maggiore impatto sulla diminuzione del fabbisogno di raffrescamento rispetto all'aumento del fabbisogno di riscaldamento.

Attraverso l'analisi di sensibilità si è constatato come nella *green façade*, il valore assunto dal *LAi* incida notevolmente sulla temperatura media giornaliera della superficie, a differenza della *living wall*, in cui l'impatto più significativo viene fornito dal valore assunto per lo spessore del substrato.

3 Prodotti attesi

I prodotti attesi previsti dalla linea di attività sono i seguenti:

- Rapporto tecnico strutturato come segue:
 - Organizzazione dell'attività
 - Analisi della letteratura
 - Definizione dei modelli matematici
 - Codici di calcolo sviluppati
 - Validazione dei modelli
- Eseguitibile di *EnergyPlus* o codice di calcolo in linguaggio *Python*
- Manuale d'uso del codice sviluppato
- Pacchetto software

4 Prodotti sviluppati

Di seguito si riportano i prodotti sviluppati nella linea d'attività

- Rapporto tecnico strutturato come segue:
 - Organizzazione dell'attività
 - Analisi della letteratura per la definizione di una classificazione dei sistemi di inverdimento verticale (VGS) e dei modelli matematici
 - Definizione di due modelli matematici, rispettivamente uno per la *green façade* e uno per la *living wall*
 - Codici di calcolo sviluppati per i modelli matematici
 - Validazione dei modelli matematici
 - Risultati e analisi di sensibilità
- Codici di calcolo in linguaggio *Python*
- Manuale d'uso del codice sviluppato
- Pacchetto software

Gli utenti possono accedere al pacchetto software attraverso il *repository* GitHub indicato nel manuale d'uso, dove sono illustrati i procedimenti per il primo utilizzo e le installazioni richieste per operare con il pacchetto. Per poter usufruire del pacchetto è essenziale che gli utenti dispongano del software *EnergyPlus* (versione 23.1 o 23.2).

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si rilevano scostamenti significativi su attività e risultati.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività del presente lavoro sono state suddivise in cinque fasi principali:

1. Analisi della letteratura
2. Definizione di modelli matematici
3. Sviluppo di codici di calcolo
4. Validazione degli algoritmi
5. Risultati e analisi di sensibilità

I risultati ottenuti dalle attività svolte sono rispondenti agli obiettivi prefissati, e sono stati:

- La classificazione di sistemi di inverdimento verticale (VGS)
- I modelli matematici per le pareti verdi, rispettivamente per *green façade* e *living wall*
- I codici di calcolo per le suddette pareti verdi
- Gli esiti della validazione dei codici di calcolo
- Gli esiti dell'applicazione dei codici ad un caso studio (analisi dell'effetto delle tecnologie studiate rispetto ad una soluzione d'involucro tradizionale e analisi di sensibilità ai principali parametri che caratterizzano le tecnologie)

7 Dettaglio delle attività svolte

Il presente lavoro è stato sviluppato in cinque fasi principali:

1. **Analisi della letteratura:** questa fase ha permesso di sviluppare una classificazione dei sistemi di inverdimento verticale (VGS), partendo dalla distinzione tra *green façade* e *living wall* per passare poi al dettaglio di ogni singola tecnologia.
2. **Definizione dei modelli matematici:** in questa fase sono stati identificati i modelli matematici per la *green façade* e la *living wall*. Per la *green façade* è stato selezionato il modello *Dynamic Heat Transfer (DHT)* di Zhang; per la *living wall*, invece, si è adottato come punto di partenza il modello di tetto verde di Sailor, che è stato adeguato sulla base delle risultanze della ricerca scientifica recente.
3. **Sviluppo di codici di calcolo:** identificati i modelli matematici, essi sono stati implementati nel software di calcolo *EnergyPlus* grazie all'impiego dei plugin *Python*. In particolare, questa fase è consistita nella scrittura degli script *Python*, nella definizione dei parametri di calcolo, nel collegamento dello script specifico a *EnergyPlus*, e nell'esecuzione poi della simulazione in modo tradizionale (lo script viene richiamato automaticamente dal software). La simulazione delle tecnologie ha permesso di valutare le prestazioni energetiche del caso studio con l'implementazione delle soluzioni verdi e i benefici che ne derivano.
4. **Validazione degli algoritmi:** in questa fase sono stati validati gli algoritmi sviluppati, verificando manualmente i risultati dei bilanci e delle singole equazioni restituiti dal software di calcolo e accertandone l'esattezza.
5. **Risultati e analisi di sensibilità:** una volta validati gli algoritmi, essi sono stati applicati ad un caso studio di base per verificare l'effetto delle soluzioni adottate sulla prestazione termo-energetica in diverse condizioni al contorno. Il caso studio consiste in un *BesTest Case*, nello specifico il *Case 900FF*, definito secondo le linee guida dello standard ANSI/ASHRAE 140-2020. Dopo avere analizzato i risultati dalle simulazioni, sono stati fatti variare alcuni parametri di input ritenuti particolarmente significativi per le tipologie di parete verde selezionate.

Come sottolineato nei punti 3 e 4, sono stati sviluppati due algoritmi per descrivere rispettivamente la *green façade* e la *living wall*. Questi ultimi sono stati implementati e simulati in *EnergyPlus* per valutare il loro impatto sulla performance energetica delle tecnologie analizzate nel caso studio. Poiché *EnergyPlus* non dispone di oggetti per descrivere le componenti verticali verdi, è necessario un richiamo esterno per integrare gli algoritmi. Ciò è stato ottenuto sviluppando due plugin *Python*, tramite cui si esternalizzano i calcoli per i componenti verticali della soluzione verde. Per modificare i bilanci energetici di *EnergyPlus*, data la presenza della soluzione verde, il plugin *Python* deve essere richiamato in *EnergyPlus* in un momento specifico. Durante ogni timestep della simulazione, il bilancio termico della parete su cui è applicata la soluzione verde viene modificato, introducendo un termine aggiuntivo calcolato sulla base del modello integrato, fornito a *EnergyPlus* sotto forma di attuatore.

Come descritto, i calcoli sono stati eseguiti all'esterno di *EnergyPlus*, mentre la modellazione dei componenti verdi verticali è stata eseguita in parte in *EnergyPlus*, attraverso l'oggetto *Material:Roofvegetation*, e in parte esternamente, attraverso un file di configurazione per integrare le informazioni non già incluse nell'oggetto *EnergyPlus*.

L'approccio di base sviluppato per entrambi i plugin *Python* consta di tre scambi principali, tra l'ambiente *EnergyPlus* e l'ambiente *Python*: il primo avviene una sola volta e consente l'inizializzazione del plugin, il secondo e il terzo rappresentano le interazioni tra gli input e gli output di *EnergyPlus* e *Python*, i quali si ripetono per ogni fase di simulazione fino alla conclusione.

Durante la simulazione, a seconda della tipologia di parete verde, viene risolto il sistema di equazioni del bilancio termico della vegetazione e/o del substrato. Gli output finali della simulazione sono rispettivamente, la temperatura della vegetazione, sia per la *green façade* sia per la *living wall*, e la temperatura del substrato per la *living wall*. Si tratta di un sistema non lineare di quarto grado che viene risolto grazie a una linearizzazione delle equazioni. Questa assunzione permette una risoluzione numerica, la cui precisione aumenta al diminuire dei timestep di simulazione.

Le equazioni di bilancio si linearizzano esprimendo le quarte potenze delle temperature in gioco al timestep i , secondo la seguente formula:

$$T_i^4 = T_{i-1}^4 + 4 (T_{i-1})^3 (T_i - T_{i-1}) \quad (1)$$

dove T_{i-1} rappresenta la temperatura [K] nel timestep precedente, mentre T_i rappresenta la temperatura [K] nel timestep attuale, nonché l'incognita dell'equazione.

I risultati presentati derivano dalle simulazioni effettuate tramite il software di calcolo *EnergyPlus* implementato con gli script di *Python*. Al fine di valutare il comportamento delle pareti verdi nei periodi più significativi dell'anno, sono stati considerati tre giorni di riferimento, rispettivamente uno per la stagione invernale (10 dicembre), uno per le stagioni intermedie (20 marzo) e uno per la stagione estiva (17 agosto). Per ciascuno di questi tre giorni sono stati analizzati, con e senza la presenza della tecnologia, i profili di temperatura superficiale esterna della parete e la temperatura operativa dell'ambiente interno, in condizione di *free-floating* (assenza di impianto). Inoltre, è stato calcolato il fabbisogno termico utile per il riscaldamento e il raffrescamento dell'ambiente, simulando la presenza di un impianto ideale a capacità termica infinita. Infine, è stata condotta l'analisi di sensibilità per entrambe le tecnologie, facendo variare i parametri ritenuti più significativi per la determinazione della prestazione di questi sistemi: il *Leaf Area Index (LAI)* sia per la *green façade* sia per la *living wall*, e lo spessore del substrato per la *living wall*.

Nelle sezioni 7.1 e 7.2 vengono riportati i risultati più significativi derivanti dalle simulazioni e dall'analisi di sensibilità, rispettivamente per la *green façade* e la *living wall*.

7.1 Risultati *green façade*

In Figura 1 e Figura 2 si confrontano i profili di temperatura superficiale esterna della parete, rispettivamente, per il giorno estivo (17 agosto) e il giorno invernale (10 dicembre), con e senza soluzione di parete verde. Nella stagione estiva, la schermatura dall'irraggiamento solare e l'evapotraspirazione garantite dalla presenza della soluzione verde determinano una significativa diminuzione della temperatura superficiale esterna della parete (41 %). Allo stesso

tempo, nella stagione invernale, sempre per i motivi espressi poco fa, si registra una diminuzione della temperatura superficiale esterna (26 %), che in questo caso comporta uno svantaggio.

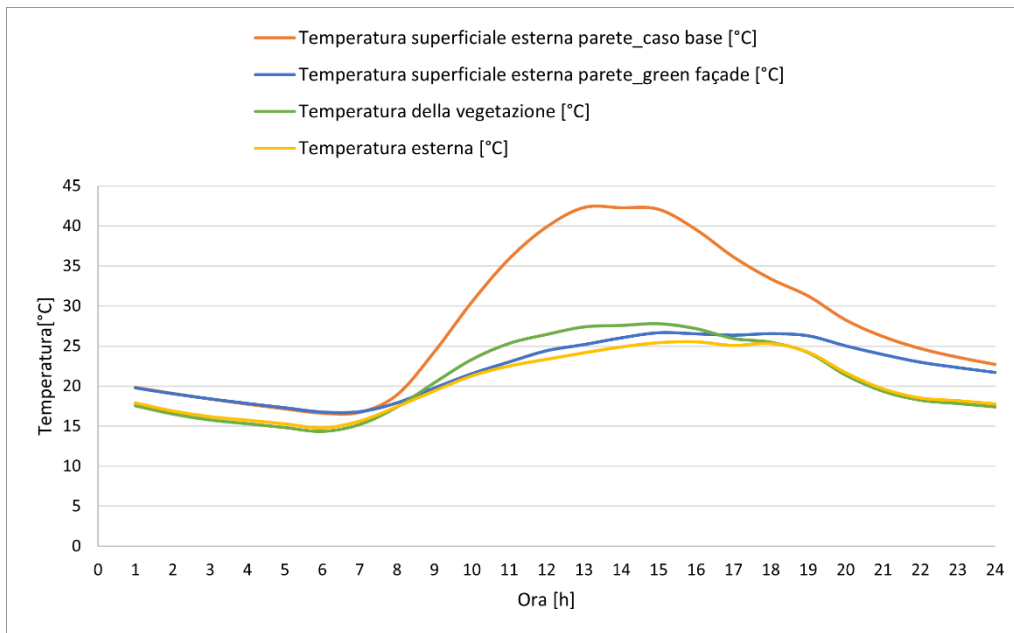


Figura 1 - Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 17 agosto.

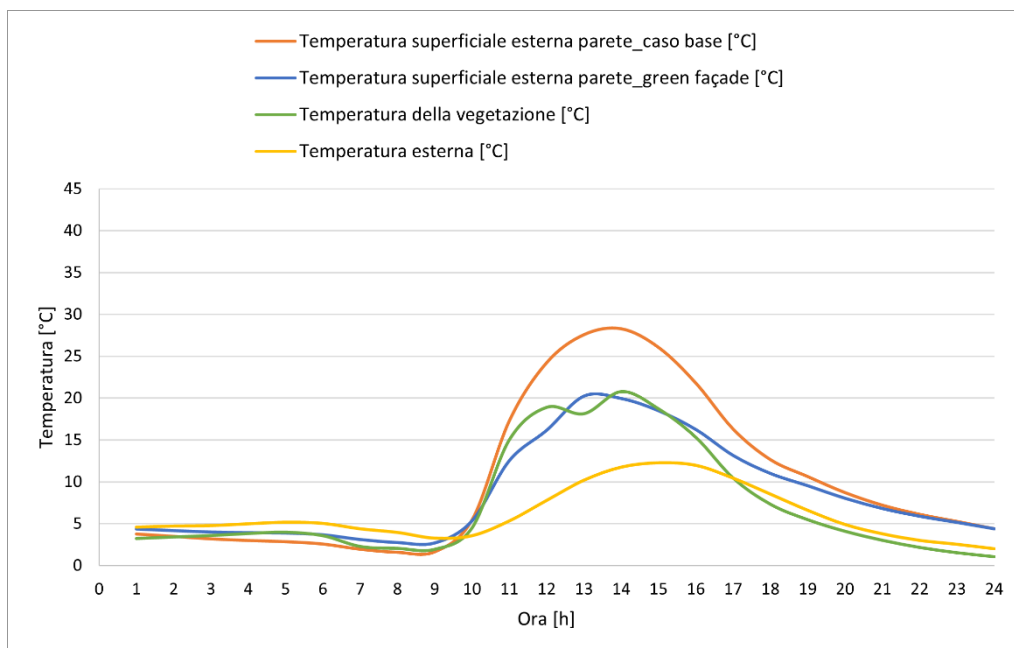


Figura 2 - Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 10 dicembre.

Per quanto riguarda il fabbisogno termico ideale per il riscaldamento e per il raffrescamento (Figura 3), il raffreddamento della superficie esterna in inverno in presenza della tecnologia causa un aumento seppur minimo (1.0 %) del fabbisogno per il riscaldamento dell'ambiente. Parimenti, in estate, si registra una diminuzione del fabbisogno di raffrescamento (15.2 %). Limitatamente al clima analizzato e alle condizioni al contorno definite, su base annua, la *green façade* determina una diminuzione del fabbisogno di raffrescamento che risulta prevalente rispetto all'aumento del fabbisogno di riscaldamento.

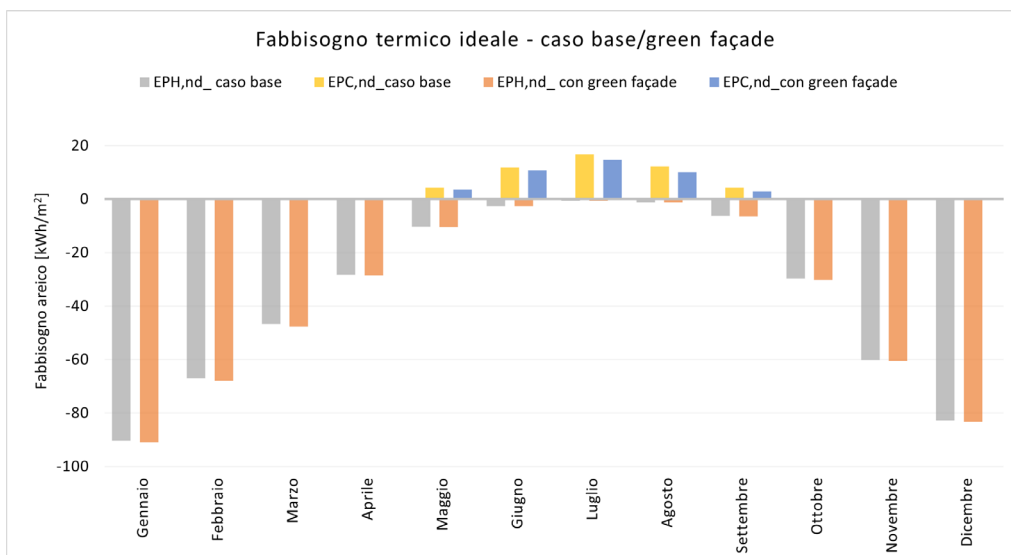


Figura 3 – Comparazione tra i valori del fabbisogno termico ideale su base mensile.

In Figura 4 viene rappresentata l'analisi di sensibilità svolta per la *green façade*. Ciò che viene riportato è la variazione della temperatura media giornaliera sulla superficie su cui è applicata la soluzione *green façade* al variare del *LAI*. Vengono considerati come giorni di riferimento quello estivo (17 agosto) e quello invernale (10 dicembre).

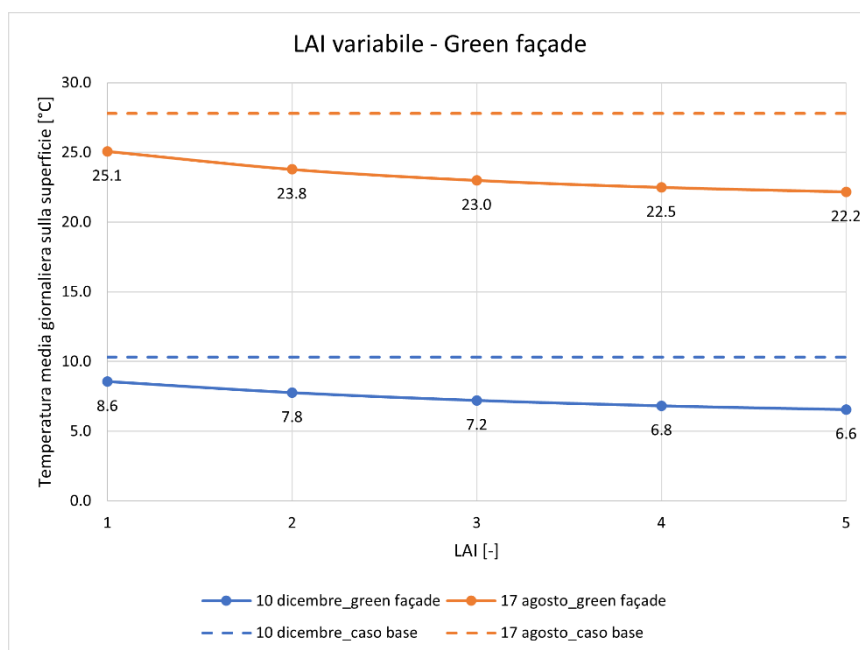


Figura 4 – Analisi di sensibilità: variazione del *LAI* - *green façade*.

Considerando il giorno invernale, emerge che all'aumentare del valore del *LAI*, la temperatura media giornaliera sulla superficie con la soluzione verde tende progressivamente a diminuire. Inoltre, si può notare come essa sia sempre più bassa rispetto a quella del caso base.

Le medesime considerazioni possono essere avanzate per l'analisi di sensibilità effettuata per il giorno estivo; nello specifico in questo caso, in presenza della *green façade*, la sensibilità della temperatura media giornaliera della superficie esterna al variare del *LAI* è maggiore rispetto al caso invernale.

7.2 Risultati living wall

Anche per la *living wall* si confrontano i profili di temperatura superficiale esterna della parete sia per il giorno estivo (17 agosto) sia per il giorno invernale (10 dicembre), con e senza soluzione di parete verde. Come per la *green façade*, anche in questo caso, nel giorno estivo (Figura 5), l'installazione della parete verde determina una diminuzione della temperatura superficiale esterna della parete (30 %), con una conseguente riduzione del carico termico nell'ambiente interno. Allo stesso modo, nel giorno invernale (Figura 6), la presenza della soluzione comporta una riduzione della temperatura superficiale esterna della parete su cui è applicata (18 %).

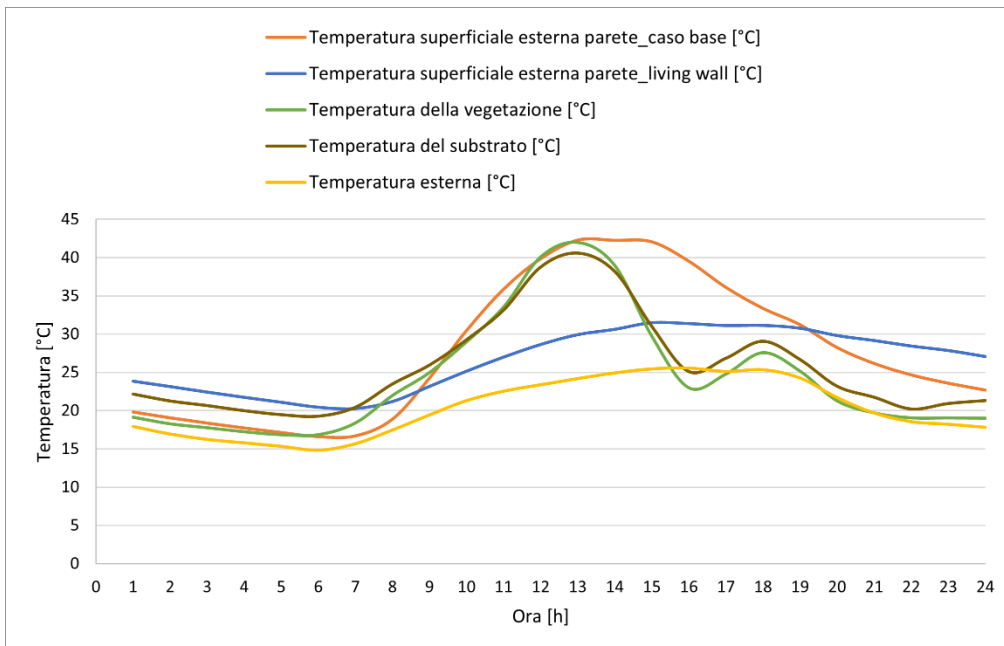


Figura 5 - Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 17 agosto.

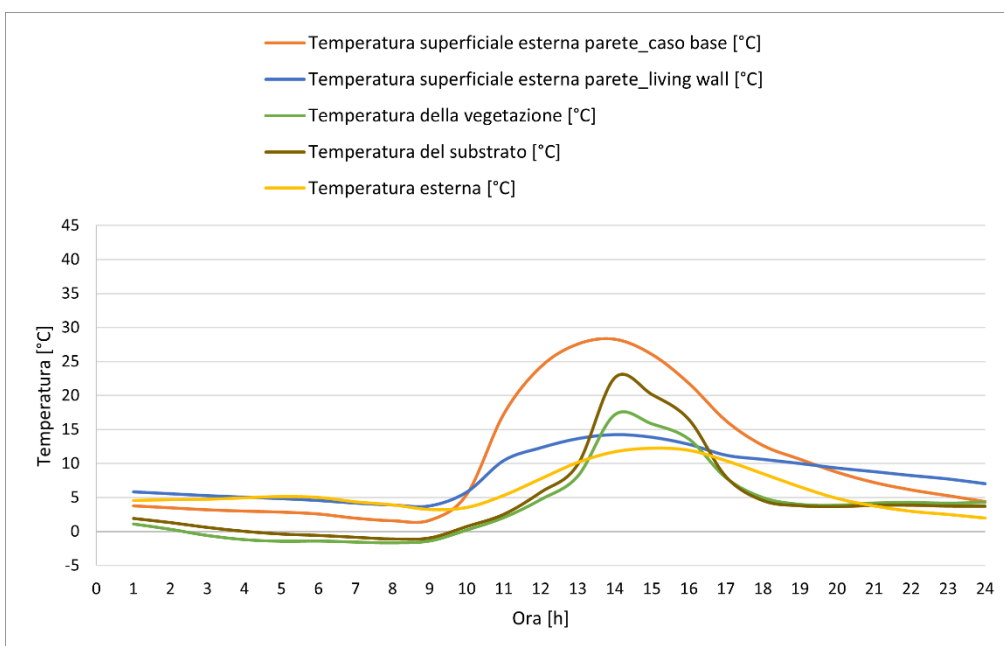


Figura 6 - Comparazione tra i profili di temperatura superficiale esterna - 10 dicembre.

Per quanto riguarda il fabbisogno termico ideale (Figura 7), la soluzione *living wall* rispetto ad una parete senza substrato e vegetazione, determina una riduzione - seppur minima - del fabbisogno di energia termica per il riscaldamento (3.2 %) e una più sensibile diminuzione di quello per il raffrescamento (8.5 %). La riduzione del fabbisogno di riscaldamento sarebbe da ascrivere ad una maggiore resistenza termica della parete per la presenza del substrato.

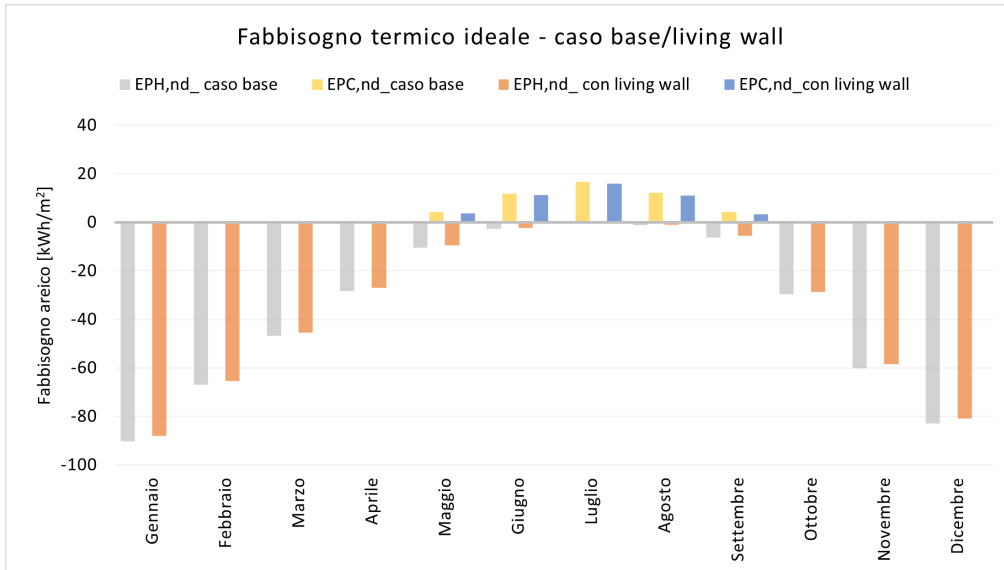


Figura 7 - Comparazione tra i valori del fabbisogno termico ideale su base mensile.

In Figura 8 viene riportata la temperatura media giornaliera sulla superficie su cui è applicata la *living wall*, al variare del LAI, mantenendo lo spessore del substrato fisso.

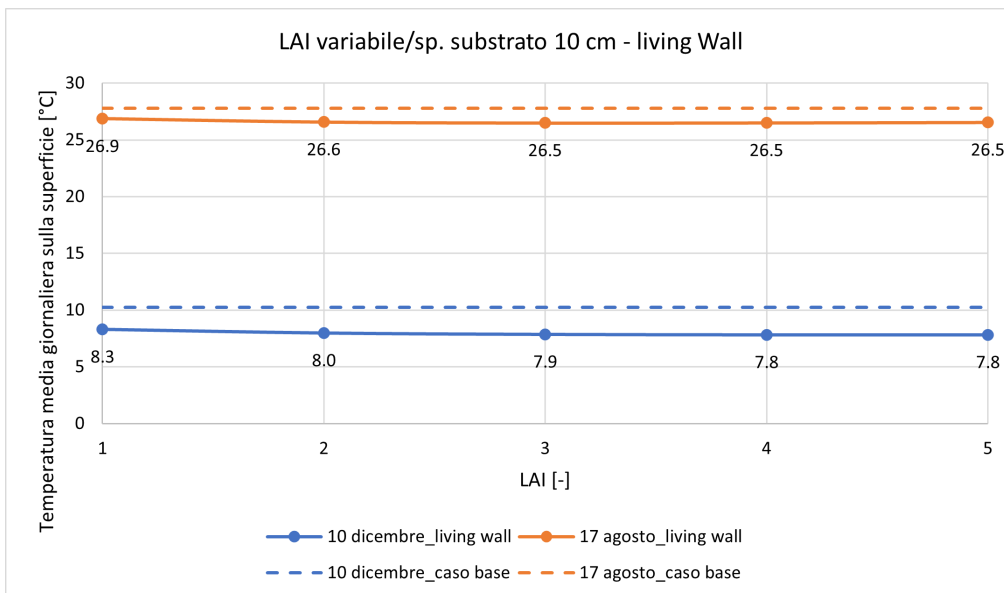


Figura 8 - Analisi di sensibilità: LAI variabile - living wall.

Sia per il giorno invernale sia per quello estivo, la temperatura media giornaliera sulla superficie tende a mantenersi pressoché costante al variare del LAI. La presenza della soluzione adottata determina una riduzione della temperatura media giornaliera sulla superficie esterna rispetto al caso base, anche se non risulta essere influenzata dalla variazione della quantità del fogliame.

In Figura 9 viene riportata la variazione della temperatura media giornaliera sulla superficie su cui è applicato il substrato, mantenendo il LAI fisso e facendo variare lo spessore del substrato. In questo caso, si può notare come il substrato e il variare del suo spessore, abbiano influenza sulla temperatura media giornaliera della superficie esterna della parete.

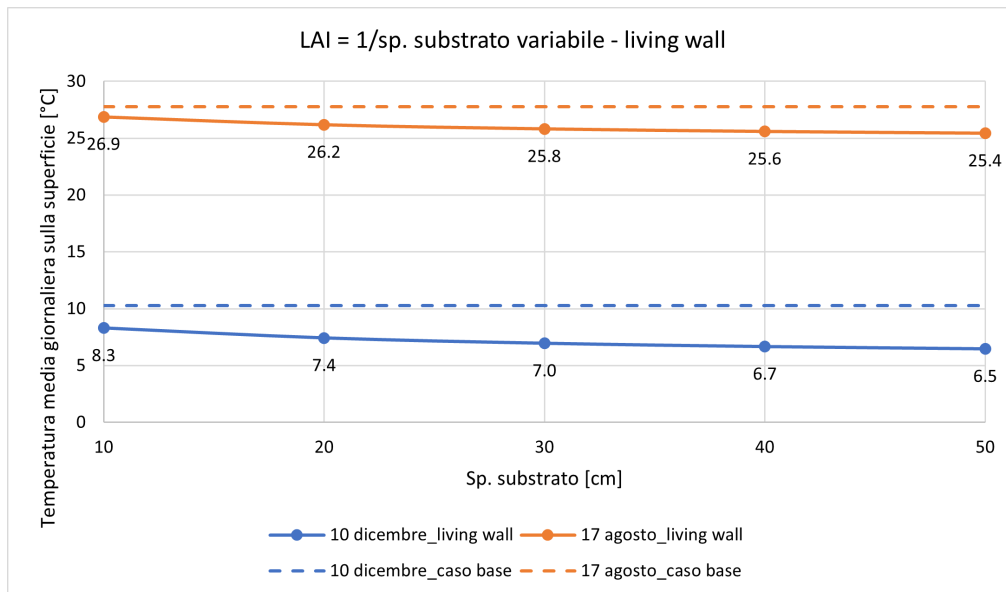


Figura 9 – Analisi di sensibilità: spessore substrato variabile - living wall.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non è stata attivata alcuna consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Gli esiti dell'attività di ricerca sono riportati nelle seguenti pubblicazioni scientifiche:

- Nesci V.; Ballarini I.; Corrado V. (2025). Implementation of a Calculation Code for the Energy Modelling of Vertical Greenery Systems. In Berardi U. (Ed.) Multiphysics and Multiscale Building Physics. Proceedings of the 9th International Building Physics Conference (IBPC 2024) Volume 3: Building Systems and HVAC Technologies, Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, Singapore, 2025, ISSN: 2366-2557, doi: 10.1007/978-981-97-8313-7.
- Nesci V.; Ballarini I.; Rando Mazzarino P.; Corrado V. (2024). Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation. Buildings, S.I. Thermal Performance of the Building Envelope – Original Methods and Advanced Solutions, vol. 14, issue 7, article number 2040, pp. 1-18, ISSN: 2075-5309, July 2024, doi: 10.3390/buildings14072040.

10 Eventi di disseminazione

IBPC 2024 9th International Building Physics Conference, Official Triennial Conference IABP (International Association of Building Physics), Toronto Metropolitan University, 25-27 July, 2024.