



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di tecniche di realizzazione di un
prototipo di edificio con parete verde a
microclima controllato per testare il
modello del flusso energetico tra la parete
verde e la superficie dell'edificio

G. Vox, F. Convertino, I. Blanco, E. Schettini

STUDIO DI TECNICHE DI REALIZZAZIONE DI UN PROTOTIPO DI EDIFICIO CON PARETE VERDE A MICROCLIMA CONTROLLATO PER TESTARE IL MODELLO DEL FLUSSO ENERGETICO TRA LA PARETE VERDE E LA SUPERFICIE DELL'EDIFICIO.

Giuliano Vox, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Evelia Schettini

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto D.1: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: C. Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Studio di tecniche di realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato per testare il modello del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio"

Responsabile scientifico ENEA: Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Università di Bari: Giuliano Vox

INDICE

SOMMARIO.....	4
1. INTRODUZIONE.....	5
2. REALIZZAZIONE DI UN PROTOTIPO DI EDIFICIO CON PARETE VERDE A MICROCLIMA CONTROLLATO PRESSO IL CAMPO SPERIMENTALE DELL'UNIVERSITÀ DI BARI	5
3. PUBBLICAZIONI	20
4. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21
5. BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	22

Sommario

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" nell'ambito dell'accordo di collaborazione con l'ENEA riguardano la realizzazione di un prototipo sperimentale per lo studio del comportamento energetico degli edifici caratterizzati dalla soluzione di involucro del tipo parete verde a doppia pelle.

Nell'ambito delle attività "Studio di tecniche di realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato per testare il modello del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio", il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha progettato e realizzato un prototipo sperimentale dotato di parete verde verticale e caratterizzato da microclima controllato, per testare un modello utile a simulare gli scambi termici in un sistema edificio-parete verde con particolare attenzione ai parametri relativi all'evapotraspirazione. Il blocco sperimentale è stato, infatti, dotato di specifica sensoristica, necessaria alla misurazione dei parametri fisico-tecnici e ambientali, indispensabili alla descrizione e all'analisi del funzionamento energetico di tale soluzione verde. L'obiettivo è quello di valutarne il comportamento e i vantaggi/svantaggi energetici connessi, sia con riferimento alla stagione calda che a quella fredda.

La rilevazione dei dati sperimentali e l'applicazione di un modello di bilancio energetico hanno permesso di descrivere i principali meccanismi di scambio di calore e di massa che si verificano in presenza di pareti verdi e di dimostrare la congruenza tra l'approccio analitico e, quindi, le equazioni di bilancio e le misurazioni empiriche. Con riferimento allo strato vegetale, in particolare, sono stati, infatti, determinati i contributi di calore sensibile, rappresentanti la quota parte di energia in ingresso, e confrontati con l'energia in uscita, il calore latente associato all'evapotraspirazione. I due termini risultano confrontabili sia per quanto concerne l'entità che l'andamento delle curve.

1. Introduzione

La moderna progettazione di un edificio richiede l'applicazione di software utili alla simulazione del comportamento termico dello stesso. Questo implica la conoscenza del comportamento energetico di tutte le sue componenti, incluse le strutture verdi (Cheng et al., 2010; Djedjig et al., 2015). Fra queste, le pareti verdi rivestono un ruolo di rilievo, ma la loro modellizzazione energetica non ha raggiunto al momento un grado elevato di affidabilità. Il problema principale è che le pareti verdi sono principalmente dei biosistemi e, in quanto tali, il loro comportamento termico è di difficile definizione da un punto di vista matematico (Flores Larsen et al., 2015; Hunter et al., 2014). A tal fine è necessario definire tutti gli scambi di calore e di massa che avvengono fra l'edificio e la parete verde (Kimball, 1973; Kindelan, 1980; Hoelscher *et al.*, 2016). Un punto molto critico riguarda la definizione dello scambio di calore latente legato all'evapotraspirazione, che dipende da diversi fattori ambientali quali la radiazione solare, la radiazione nell'infrarosso lungo, la velocità del vento, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, la temperatura fogliare, le caratteristiche fisiche delle foglie (Cascone et al., 2019; Jim e Tsang, 2011). Le ricerche sviluppate negli ultimi anni hanno mostrato un'ampia variabilità nei risultati ottenuti, quindi la ricerca nel campo richiede lo sviluppo di modelli di simulazione ben definiti, basati su serie di dati sperimentali affidabili. A tal fine, il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali dell'Università di Bari ha progettato e realizzato un prototipo sperimentale di una sezione di edificio per la misura dei parametri termici di una parete verde. Il sistema consiste di un volume confinato climatizzato dotato di sensoristica adatta a rilevare i parametri utili a definire lo scambio termico, nelle sue diverse forme, che avviene fra parete verde ed edificio. I parametri rilevati sperimentalmente sono stati scelti in modo da definire con accuratezza le formule di scambio di calore e massa da utilizzare nei modelli di simulazione.

2. Realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato presso il campo sperimentale dell'Università di Bari

Il gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT ha realizzato un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato in scala presso il centro didattico sperimentale "Martucci" dell'Università di Bari sito in Valenzano (Bari; 41°05' N, 16° 53' E). Il sito è caratterizzato da condizioni climatiche tipicamente mediterranee.

Il prototipo sperimentale ha una pianta rettangolare, con dimensioni esterne pari a 4.30 m x 1.50 m, ed un'altezza interna media di 2.30 m. Esso è stato pensato e realizzato privilegiando soluzioni costruttive a secco e impiegando diversi materiali.

Alla base è stato realizzato un cordolo in calcestruzzo armato su cui è stata innalzata la parete a sud in laterizi, mentre il riempimento della restante superficie è stato fatto con pietrisco, che funge anche da allettamento per la pavimentazione costituita da mattoni con ciottoli.

La parete rivolta a sud è stata realizzata con la tecnologia costruttiva maggiormente diffusa negli edifici residenziali esistenti nel contesto climatico oggetto di studio. Questa parete è costituita da laterizi forati (Figura 1a). Il mattone forato utilizzato ha le seguenti dimensioni: 20 cm di spessore, 25 cm di altezza e 25 cm di lunghezza. Le caratteristiche termiche del mattone forato sono: conducibilità equivalente λ del blocco pari a $0.223 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e della muratura (con giunti orizzontali, in malta cementizia, di spessore 7 mm; senza intonaco) pari a $0.235 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$; trasmittanza termica della muratura, con giunti orizzontali interrotti di spessore 7 mm, in malta generica (densità pari a 1700 kg m^{-3} e λ pari a $0.73 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) più un doppio strato di 1.5 cm di intonaco interno (λ pari a $0.54 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e

1.5 cm intonaco esterno (λ pari a $0.73 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) pari a $0.934 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$; massa superficiale (senza intonaco) pari a 142 kg m^{-2} , calore specifico pari a $1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

La parete esposta a sud è stata suddivisa in tre parti con pannelli termoisolanti, in polistirene espanso estruso (Figure 2-3). I pannelli in polistirene sono caratterizzati da uno spessore pari a 50 mm e da conduttività termica λ pari a $0.033 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Al fine di rendere stabile il muro a sud sono stati realizzati dei rinforzi laterali e all'interno, utilizzando mattoni forati del tipo 8 cm x 25 cm x 25 cm (Figura 1b e Figura 3).

Il muro a sud, caratterizzato dunque da uno spessore di 20 cm, è stato intonacato e presenta esternamente una colorazione bianca, anch'essa caratteristica peculiare degli edifici in clima mediterraneo.

La struttura portante è di tipo metallico, realizzata ricorrendo alla soluzione a tubi e giunti (Figura 4). In particolare, sono stati utilizzati telai ad arco, aventi altezza utile pari a 2 m e larghezza pari a 1.05 m, correnti (lunghezza pari a 1.85 m), diagonali (lunghezza pari a 2.3 m) e tubi innocenti, tenuti insieme da morsetti orientabili. Alla base dei montanti sono stati, inoltre, posti dei piedi regolabili.



Figura 1: Mattoni forati usati per la realizzazione del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: a) mattoni forati a 24 fori usati per la realizzazione della parete rivolta a sud; b) mattoni forati a 10 fori usati per la realizzazione dei rinforzi.



Figura 2: Pannelli termoisolanti in polistirene espanso estruso con spessore pari a 50 mm usati per la realizzazione del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



Figura 3: Parete rivolta a sud e rinforzi laterali; la parete è stata suddivisa con pannelli termoisolanti.



(a)



(b)

Figura 4: Struttura portante metallica interna del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: a) render; b) realizzazione.

Le pareti esterne orientate a nord, est e ovest, e la copertura del volume sono state realizzate in pannelli coibentati, aventi trasmittanza termica pari a $0.54 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, costituiti da uno strato di poliuretano espanso di spessore pari a 4 cm e strato di supporto esterno e interno in lamiera verniciata di bianco/grigio (Figure 5-6). I pannelli utilizzati per le chiusure verticali presentano una superficie esterna liscia, mentre quelli utilizzati per la copertura sono grecati esternamente e sono stati posti in opera con una opportuna pendenza.



Figura 5: Particolare della parete laterale esposta ad est e della copertura del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

Come sopradetto, la parete a sud è suddivisa con pannelli termoisolanti in tre parti: due sono dotate di verde verticale, la terza è stata lasciata nuda e costituisce la parete di controllo rispetto a cui confrontare il comportamento delle altre due. La soluzione tecnologica proposta per la parete verde è del tipo facciata verde a doppia pelle. Lo strato verde è stato realizzato antepoendo alla parete, ad una distanza pari a circa 15 cm da essa, una rete metallica che funge da supporto per la vegetazione costituita dal *Rhyncospermum Jasminoides*, una specie rampicante sempreverde che ben si adatta alle condizioni climatiche del sito. La differenza tra le due porzioni di parete dotate di verde verticale è legata al fatto che la porzione centrale è caratterizzata da piante collocate all'interno di tre vasi, mentre in quella di estremità le piante sono radicate direttamente nel terreno (Figura 7).

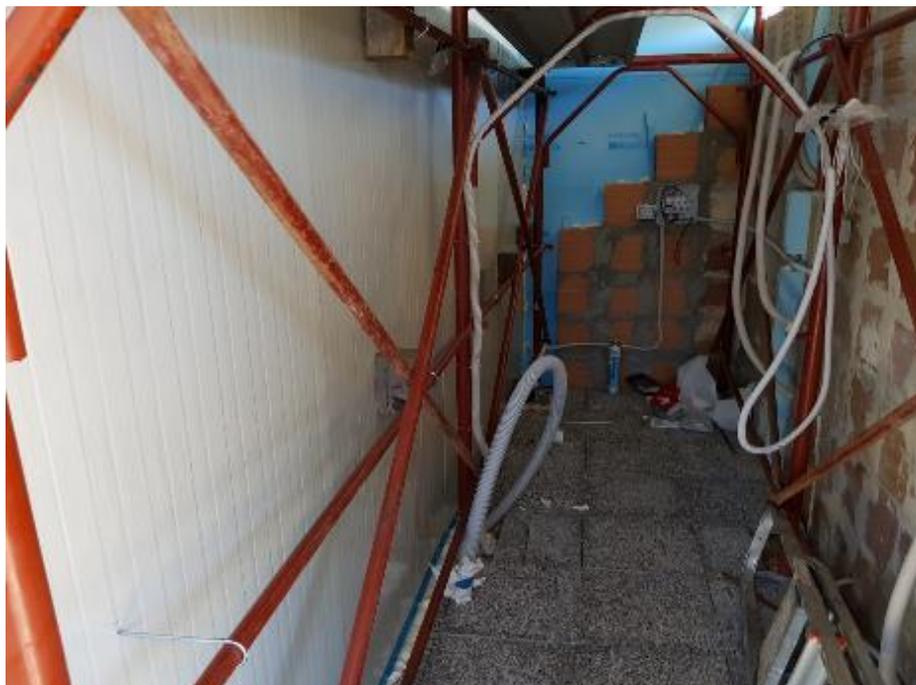


Figura 6: Parete esposta a Nord ed interno del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



Figura 7: Parete esposta a sud: a destra parete ricoperta da *Rhynchospermum Jasminoides* messo a dimora nel terreno, nel centro parete ricoperta da *Rhynchospermum Jasminoides* in vaso, la parete a sinistra non coperta è il testimone.

Il volume interno del prototipo è climatizzato, in modo tale da poter controllare e fissare le condizioni microclimatiche interne. A tal fine, all'interno del blocco è stato posto un condizionatore portatile monoblocco a pompa di calore (ELLISSE hp, Olimpia Splendid) (Figura 8), avente capacità

nominale di raffrescamento e riscaldamento pari a 2.4 kW, in grado di raffrescare e riscaldare l'ambiente, a seconda delle stagioni. Le temperature sono state settate a 22 °C e 26°C, rispettivamente nel periodo freddo e nel periodo caldo.

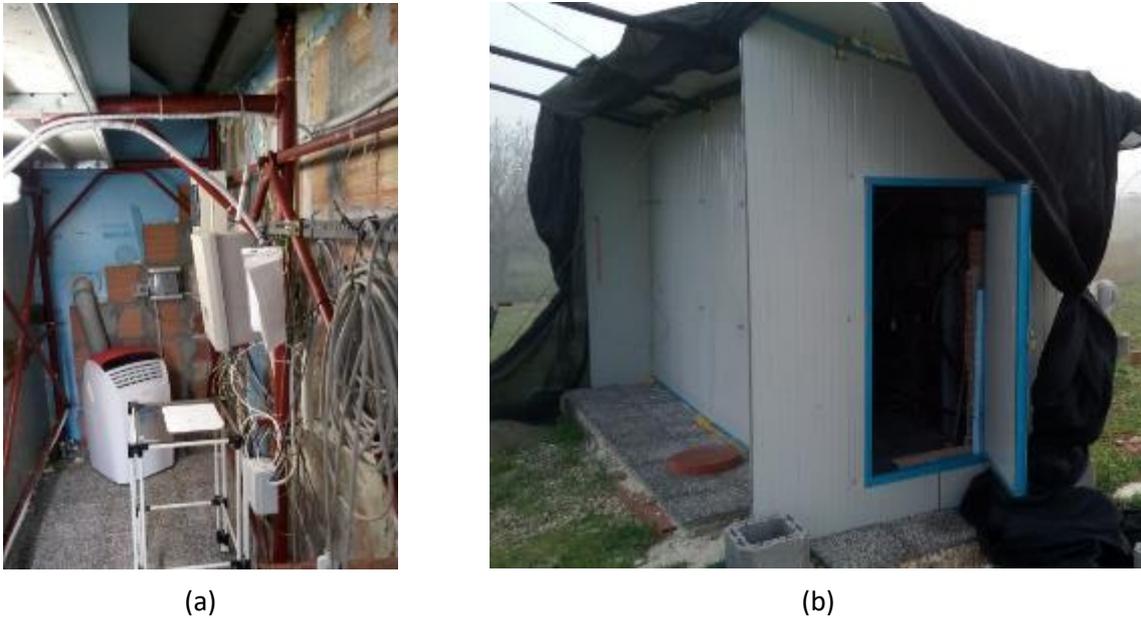


Figura 8: Prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari: a) interno con condizionatore, data logger e sonde; b) porta per accedere all'interno.

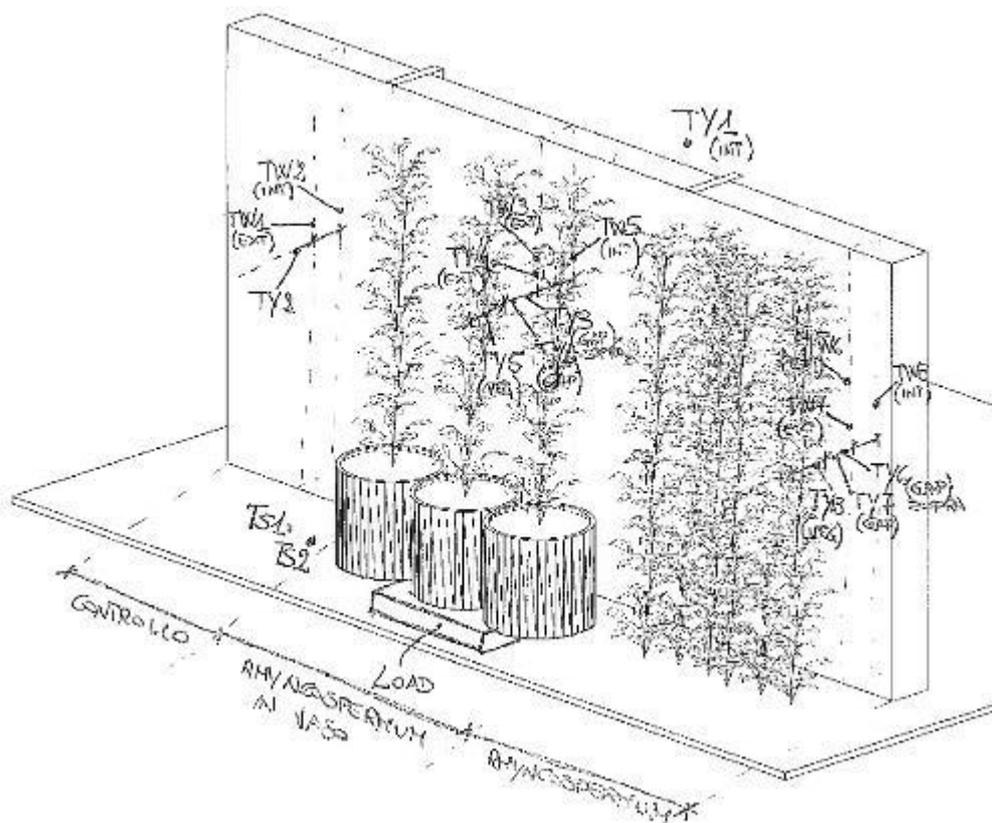


Figura 9: Schema delle componenti principali della sensoristica prevista nel prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.

Una parte altrettanto importante del prototipo, accanto a quella costruttiva, è costituita dalla strumentazione tecnica necessaria alla misurazione e alla registrazione dei parametri fisico-tecnici, utili a monitorare il comportamento energetico (Figura 9). I dati meteorologici sono raccolti attraverso una stazione meteorologica, che comprende un sistema di acquisizione dati costituito da un data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA) (Figura 10) e da numerosi sensori per la rilevazione dei differenti parametri climatici. I dati sono registrati ogni 60 s dal data logger e memorizzati come valori medi ogni 15 minuti. La radiazione solare incidente sulla superficie verticale viene misurata da un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratorio, Newport, RI, USA) nell'intervallo di lunghezze d'onda 0.3-3 μm (Figura 11). La temperatura dell'aria esterna è, invece, rilevata con sonde Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera), opportunamente schermate dalla radiazione solare. Un sensore Young Wind Sentry 03002 (Wind Sentry 03002 Data Sheet, R. M. Young Company 1999) è utilizzato per misurare la velocità e la direzione del vento. I campi di misura sono 0-50 m s^{-1} per la velocità del vento e 0-360° per la direzione del vento.

Su ognuna delle tre parti di parete sud sono misurate la temperatura superficiale della parete sul lato esterno, esposto alla radiazione solare, e la temperatura superficiale sul lato interno (Figura 12 a). Le temperature sono state misurate mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Rome, Italy), opportunamente posizionati sulle superfici della parete. Due termistori sono stati previsti per la misurazione della temperatura del terreno antistante la parete (Figura 13). Per la misurazione di temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno del blocco sperimentale (Figura 12 b), davanti alla parete di controllo, nelle due intercapedini (tra parete e vegetazione, Figura 14) e all'interno dello strato fogliare (Figura 15) sono utilizzati otto sensori Hygroclip-S3 (Rotronic, Zurigo, Svizzera). La quantità di radiazione infrarossa incidente sulla parete è misurata attraverso un pirgeometro (Eppley pyrgeometer, model PIR).

Al fine di misurare il fenomeno dell'evapotraspirazione, infine, è stata posizionata, al di sotto del vaso centrale della seconda porzione di parete (Figura 7), una piastra con cella di carico (Scaime, AG C3, Figura 16), che consente di rilevare le variazioni di peso e, quindi, di contenuto d'acqua del sistema substrato di coltivazione-pianta.



Figura 10: Data logger posizionato all'interno del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



Figura 11: Piranometro presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



(a)



(b)

Figura 12: Sensori: a) Termistori per misurare la temperatura superficiale della parete sul lato esterno (TW1), esposto alla radiazione solare, e la temperatura superficiale sul lato interno (TW2 int); b) sensore per misurare la temperatura e l'umidità relativa dell'aria all'interno del prototipo presso il campo sperimentale dell'Università di Bari.



Figura 13: Due termistori per la misurazione della temperatura del terreno antistante la parete.



Figura 14: Sensori per misurare temperatura e umidità relativa dell'aria all'interno della intercapedine tra parete e vegetazione.



Figura 15: Sensori per misurare la temperatura e l'umidità relativa dell'aria all'interno dello strato fogliare.

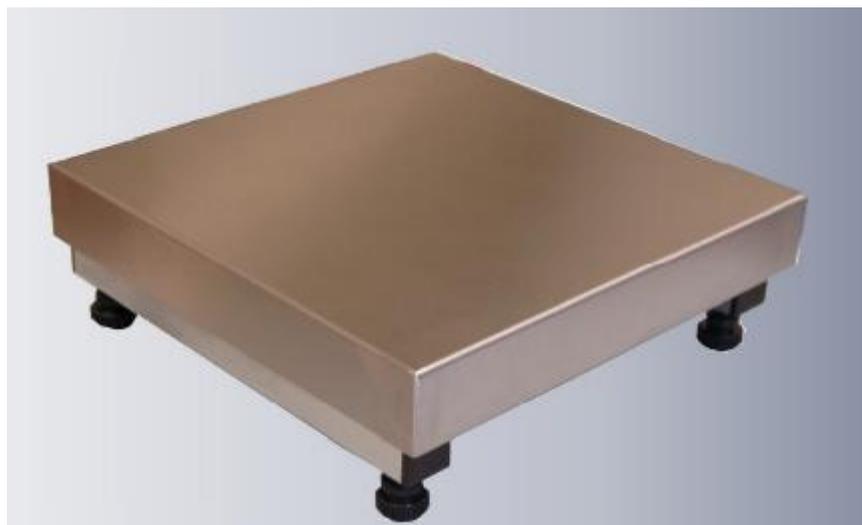


Figura 16: Piastra con cella di carico.

Un parametro importante nella modellizzazione delle pareti verdi è rappresentato dalle caratteristiche radiometriche delle foglie.

Sono state valutate le caratteristiche radiometriche delle foglie verdi e rosse della parete verde, raccolte a dicembre 2018 (Figura 17). Sono state eseguite prove di laboratorio per valutare le curve di trasmissività e di riflessività, espresse in funzione della lunghezza d'onda, delle foglie del *Rhynchospermum Jasminoides* (Papadakis et al., 2000; Pearson et al., 1995; Duffie e Beckman, 1991; Monteith e Unsworth, 1990). Le misure spettrofotometriche sono state eseguite presso il laboratorio del Dipartimento DISAAT dell'Università di Bari.

Le misure della trasmissività e riflessività spettrale sono state realizzate nel range di lunghezza d'onda del solare, compreso fra 200 e 2500 nm, mediante spettrofotometro Perkin Elmer Lambda 950 UV/VIS/NIR (Norwalk, USA), con passo di 10 nm. La trasmissività totale spettrale e la riflettività sono state misurate utilizzando una sfera integratrice di 100 mm di diametro utilizzata come ricevitore dello spettrofotometro Lambda 950, con un metodo di confronto a doppio raggio (Wendlandt e Hecht, 1966).

Le misure radiometriche, nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'IR lungo compreso tra 2500 e 25000 nm (LWIR-Long Wave Infrared), sono state eseguite con uno spettrofotometro FT-IR (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) con passo di 4 cm⁻¹; è stata misurata la riflessività quasi normale, cioè con angolo di incidenza del raggio sul campione rispetto alla normale allo stesso pari a 10°. Le misure delle caratteristiche radiometriche sono state elaborate analiticamente in funzione delle diverse lunghezze d'onda in modo da ottenere coefficienti di trasmittività e riflessività negli intervalli dell'UVA (320-380 nm), dell'UVB (280-320 nm), del PAR (400-700 nm), del solare (300-2500 nm) e dell'IR lungo (7500-12500 nm) (Papadakis et al, 2000; Vox e Schettini, 2007).



Figura 17: Parete esposta a sud: foglie verdi e foglie rosse nelle piante di *Rhyncospermum jasminoides*.

I coefficienti radiometrici calcolati, nel range di lunghezze d'onda solare, radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) e infrarosso lungo, per le due colorazioni di foglia sono riportati in Tabella 1.

Tabella 2.1: Coefficienti radiometrici delle foglie, nelle due colorazioni, della specie *Rhyncospermum jasminoides*: PAR, radiazione fotosinteticamente attiva; LWIR, radiazione infrarossa ad onde lunghe.

Tipologia foglia	τ_{solar}^{total} (%)	τ_{PAR}^{total} (%)	τ_{LWIR} (%)	ρ_{solar} (%)	ρ_{PAR} (%)	ε_{LWIR} (%)
Foglie verdi	13.6	0.7	0.0	32.3	7.8	96.4
Foglie rosse	13.5	2.1	0.0	32.5	8.3	96.4

I valori riportati in Tabella 1 e le Figure 18 e 19 non evidenziano, nel complesso, differenze radiometriche significative tra le due tipologie di foglie. Dalle misurazioni relative all'intervallo 200-2500

nm è possibile ricavare un valore di assorbanza solare, valido per entrambe le colorazioni, pari al 54%. Con riferimento alla frazione di spettro corrispondente alla radiazione visibile (390-760 nm), tuttavia, si possono notare i picchi di riflessività per le foglie di colore verde e quelle di colore rosso rispettivamente in corrispondenza dei valori di lunghezza d'onda di 550 nm e 630 nm (Figura 18). Per quanto riguarda l'emissività nel campo della radiazione infrarossa ad onde lunghe, il valore ricavato per le due tipologie di foglie è pari al 96%.

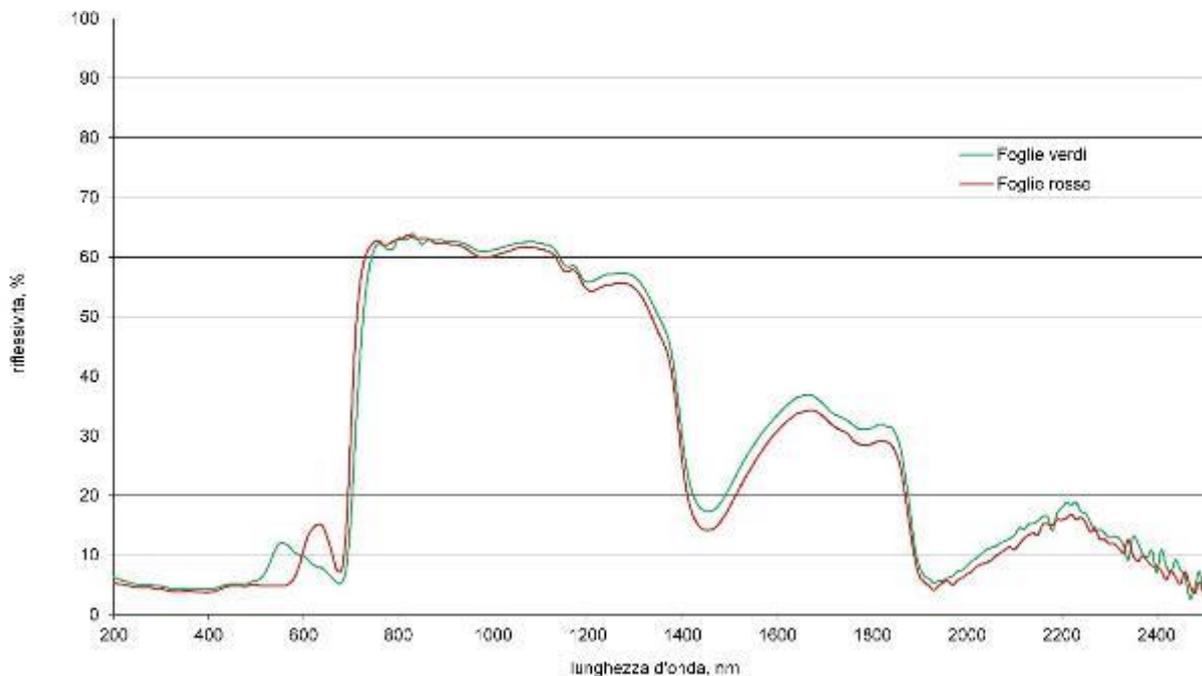


Figura 18: Riflessività spettrale totale delle due tipologie di foglie nel range di lunghezze d'onda 200-2500 nm.

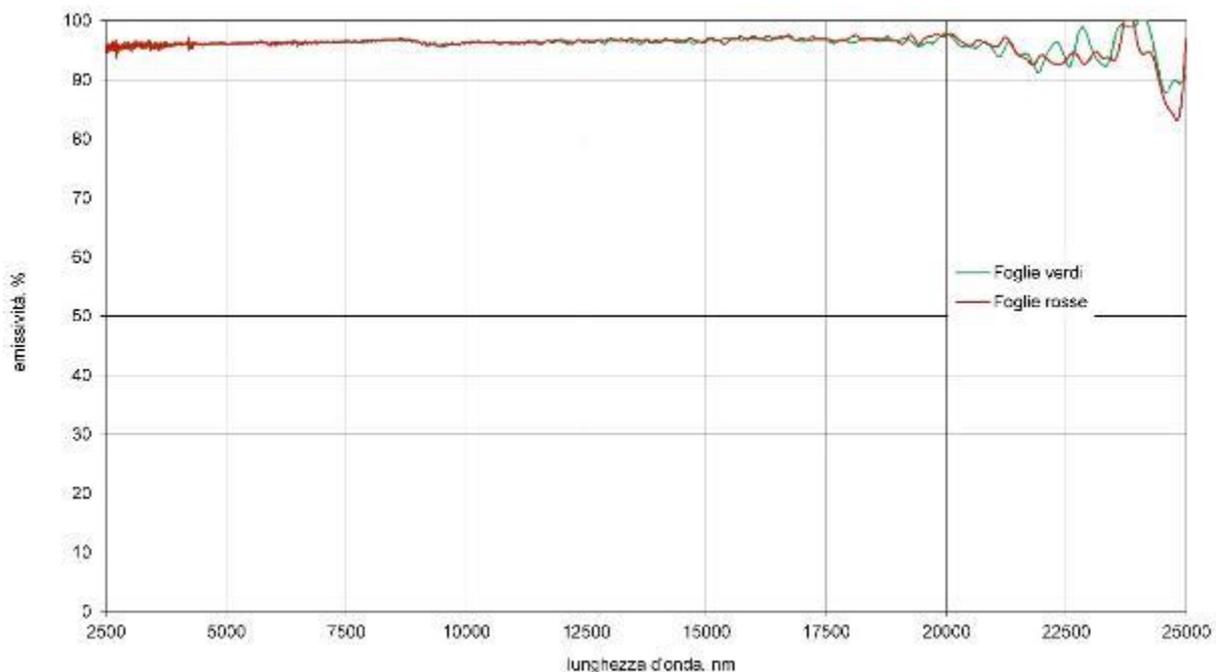


Figura 19: Emissività spettrale delle due tipologie di foglie nel range di radiazione infrarossa ad onde lunghe (lunghezze d'onda 2500-25000 nm).

Una volta completata la costruzione del prototipo e installata la sensoristica necessaria, si è proceduto al rilievo sperimentale dei dati. Tali misurazioni sono state effettuate in un periodo particolarmente rigido in corrispondenza dell'ultima parte del 2018.

Attualmente, le piante poste davanti alla parte centrale della parete non risultano ancora particolarmente sviluppate e folte, pertanto, alcune considerazioni sono state fatte principalmente con riferimento al muro di controllo e alla parete verde all'estremità opposta (piante radicate direttamente nel terreno). Le misurazioni relative alle temperature superficiali della facciata verde e del muro di controllo hanno permesso di evidenziare che l'influenza della radiazione solare è sensibilmente maggiore sulla temperatura superficiale del muro di controllo, la quale risulta, nelle ore centrali del giorno, superiore a quella della facciata verde, con una differenza massima pari a 10 °C (Figura 20). Nelle ore in cui la radiazione solare è assente, seppur dopo un certo arco temporale, invece, la situazione appare invertita e la temperatura superficiale della parete verde risulta superiore a quella del controllo, pur essendo la differenza meno marcata rispetto alle altre ore. Tale comportamento è sintomatico della funzione schermante svolta dalla vegetazione, che impedisce alla radiazione solare di incidere direttamente sulla parete retrostante, riscaldandola, nelle ore diurne, e dell'effetto isolante e, quindi, della sua funzione di "protezione radiativa" durante la notte.

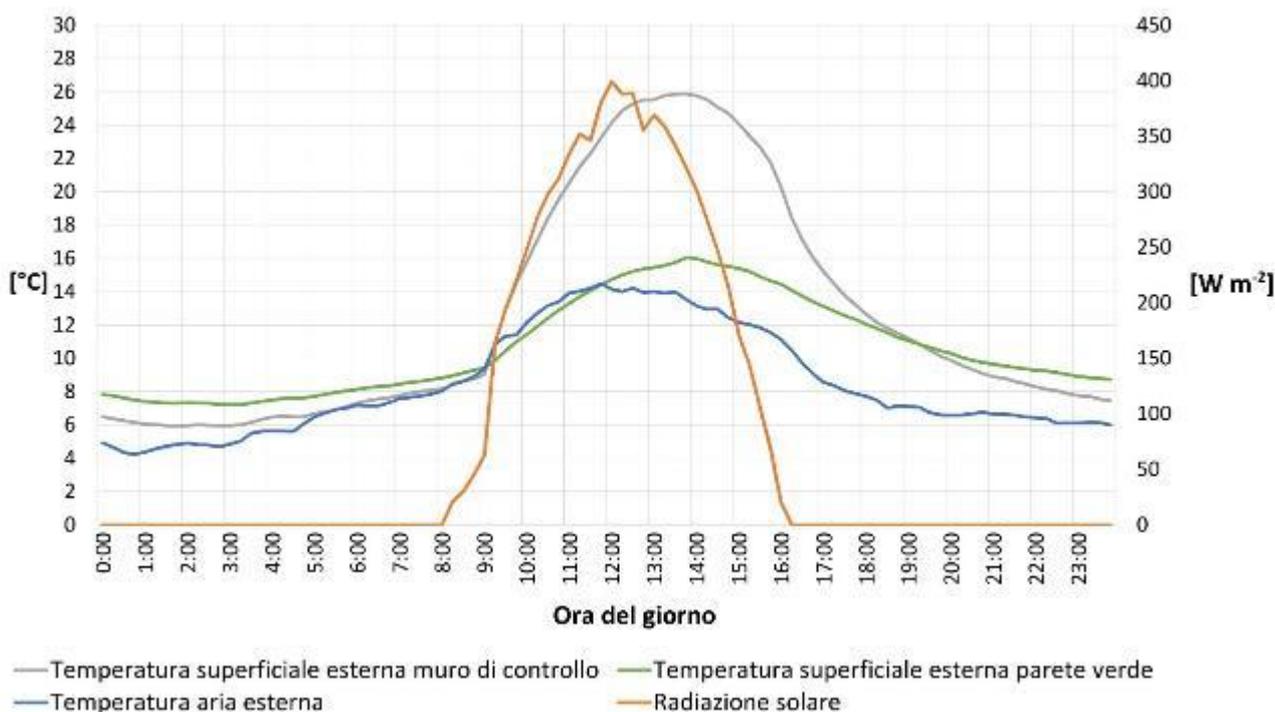


Figura 20: Valori misurati di: temperatura dell'aria esterna, temperatura superficiale del muro di controllo e della parete verde (asse principale) e radiazione solare (asse secondario), 29 dicembre 2018.

Una stima dell'energia persa mediante il processo di evapotraspirazione può essere, inoltre, fatta a partire dalla lettura dei dati relativi alla variazione di peso del sistema substrato di crescita-pianta. Tale variazione coincide, infatti, proprio con la variazione di contenuto d'acqua, associata all'evapotraspirazione. In particolare, con riferimento al periodo invernale, come si evince dalla Figura 21, la quantità d'acqua persa per evapotraspirazione, nell'arco di una giornata, risulta circa pari a 0.5 l, che corrispondono a circa 1.26 MJ. Occorre notare che tali valori fanno riferimento al numero di foglie presenti sulla pianta al momento della rilevazione e coincidenti con una superficie fogliare di 0.54 m². Va evidenziato, inoltre, che è ragionevole trascurare, in questo calcolo, la riduzione di peso che si registra all'incirca nella prima ora dopo l'irrigazione della pianta in quanto essa è legata alla percolazione dal vaso che avviene dopo l'irrigazione.

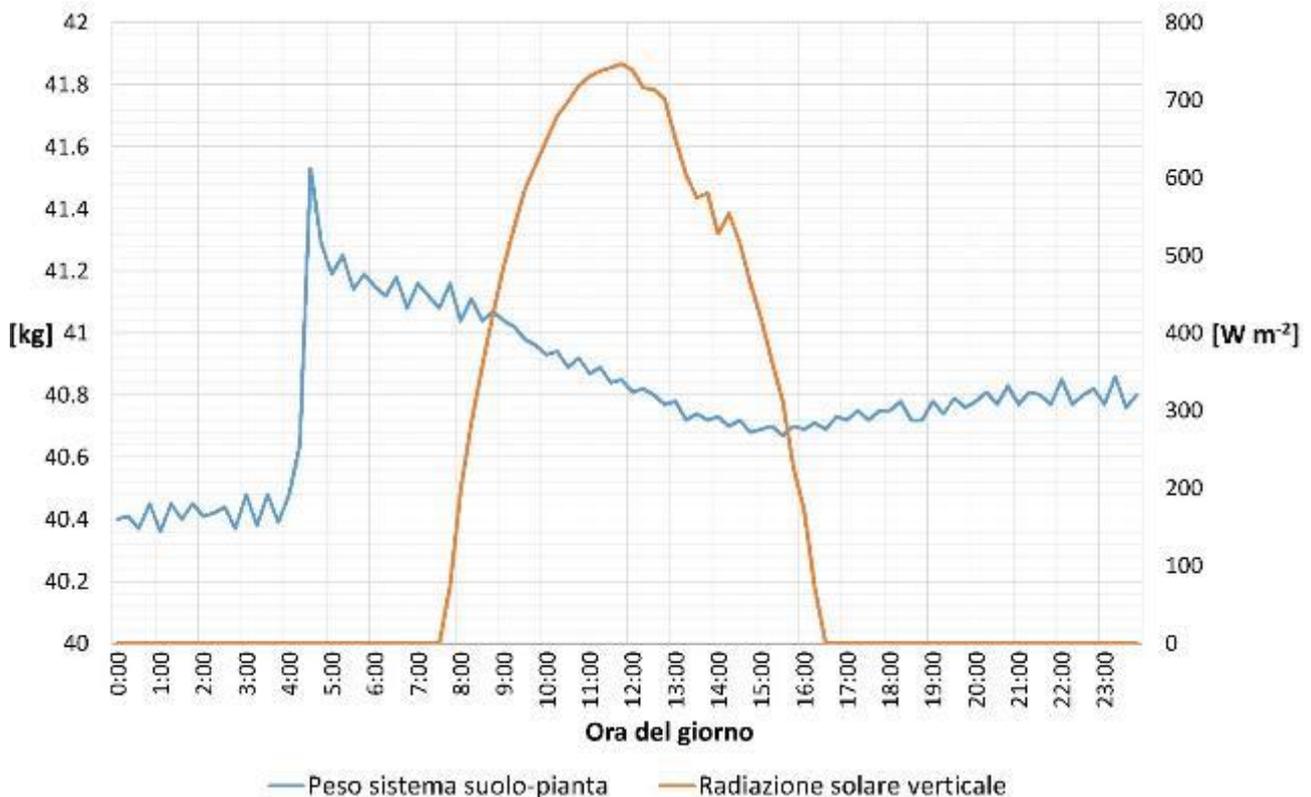


Figura 21: Valori misurati di: peso del sistema substrato di coltivazione-pianta (asse principale) e radiazione solare incidente su una superficie verticale (asse secondario), 28 dicembre 2018.

È, quindi, opportuno sottolineare come l'energia assorbita per evapotraspirazione influisca direttamente sul volume circostante raffreddandolo. Questo ha influenza sul bilancio energetico dell'edificio. I valori registrati di evapotraspirazione si riferiscono ad un periodo invernale in cui tale fenomeno è minimo, in quanto dipendente dalle condizioni climatiche: velocità del vento, radiazione solare, temperatura e umidità relativa dell'aria.

Infine, l'applicazione del modello di bilancio energetico allo strato di vegetazione e l'implementazione in quest'ultimo dei dati misurati sperimentalmente ha permesso di ricavare l'energia scambiata sotto forma di calore sensibile e la quantità di calore latente, associato al fenomeno evapotraspirativo (Figura 22). I contributi che concorrono alla determinazione del calore sensibile (eq. 1) sono: la radiazione solare, E , caratterizzata da lunghezze d'onda nel range 300-3000 nm; la radiazione R , scambiata nel campo dell'infrarosso lungo ($>3\mu\text{m}$) e gli scambi convettivi CV .

$$\text{Calore sensibile} = E + R + CV \quad (1)$$

Le formule utilizzate per definire i singoli contributi dello scambio energetico sono state illustrate dettagliatamente nel report del PAR 2017 "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra", relativo all'attività svolta dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari nel periodo 01/10/2017-30/09/2018.

Il calore latente, il quale rappresenta la frazione di energia persa dallo strato fogliare, è stato validato utilizzando le variazioni di contenuto d'acqua registrate dalla cella di carico.

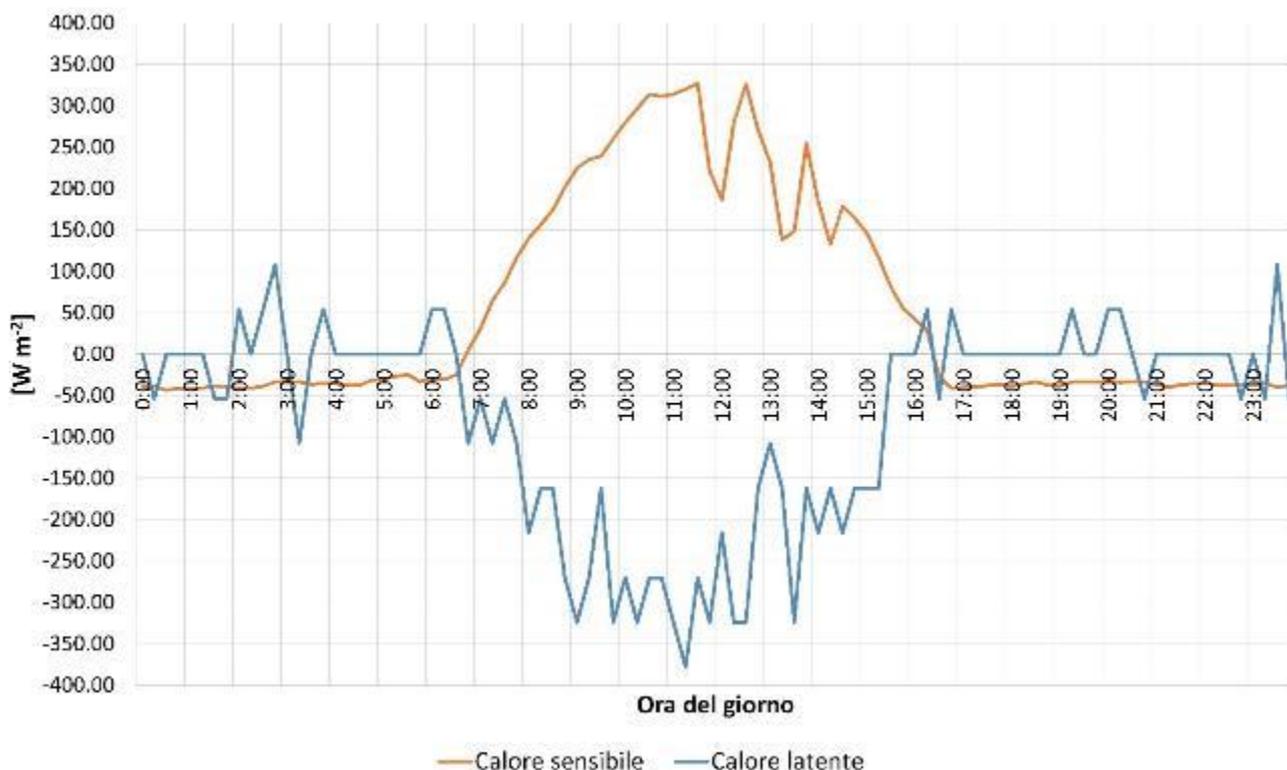


Figura 22: Valori di calore latente e sensibile scambiati dallo strato di vegetazione, 17 ottobre 2018.

Com'è noto, per poter ritenere corretta la definizione dei termini energetici, deve verificarsi la condizione per cui la somma di tutti i flussi energetici che riguardano lo strato vegetale sia nulla. Il grafico in Figura 22 permette di leggere l'esistenza di una simmetria tra la curva relativa al contributo latente e quella che esprime la somma dei contributi sensibili. La loro somma algebrica risulta, inoltre, quasi nulla. È possibile, dunque, ritenere verificato il bilancio energetico, nei singoli termini, per la parete verde.

I dati sperimentali hanno consentito quindi di verificare il modello descritto anche nel periodo invernale, validando le formule già descritte e validate nel periodo estivo, come illustrato nel report del PAR 2017, relativo all'attività svolta dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari nel periodo 01/10/2017-30/09/2018.

3. Pubblicazioni

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati durante i seguenti convegni:

- "13th Conference on Advanced Building Skins", Berna, Svizzera, 1-2 Ottobre 2018.
- Urban Agriculture 2018 "1st International Conference on Urban Agriculture and City Sustainability", New Forest, Regno Unito, 9 - 11 Ottobre 2018.

Le presentazioni sono state oggetto di domande e richieste di approfondimenti da parte di ricercatori partecipanti alle Conferenze.

Gli articoli pubblicati sono stati:

1. Blanco I., Schettini E., Vox G. (2018) Influence of green facades on building surface temperature in South Italy. Proceedings of 13th Conference on Advanced Building Skins, 1-2 October 2018, Bern, Switzerland, pag 368-387. ISBN 978-3-9524883-4-8.
2. Convertino F., Vox G., Schettini E. (2018). Energy Balance in Green Façades. Proceedings of 13th Conference on Advanced Building Skins, 1-2 October 2018, Bern, Switzerland, 390-398. ISBN 978-3-9524883-4-8.
3. Schettini, E., Campiotti, C.A., Blanco, I. and Vox, G. (2018). Green façades to enhance climate control inside buildings. *Acta Horticulturae* 1227, 77-84. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.9
4. Vox, G., Scarascia Mugnozza, G., Blanco, I. and Schettini, E. (2018). Heat fluxes in green walls. *Acta Horticulturae*. 1215, 273-278. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1215.49
5. Bibbiani, C., Campiotti, A., Giagnacovo, G., Incrocci, L., Pardossi, A., Latini, A., Schettini, E. and Vox, G. (2018). Green roofs and green façades for improving sustainability of towns. *Acta Horticulturae*. 1215, 333-336. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1215.61
6. Blanco I., Schettini E., Vox G. (2018). Effects of vertical green technology on building surface temperature. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 13(4), 384-394. ISSN: 1755-7437. DOI: 10.2495/DNE-V13-N4-384-394
7. Convertino F., Vox G., Schettini E. (2019). Heat transfer mechanisms in vertical green systems and energy balance equations., *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 14(1), 7-18. DOI: 10.2495/DNE-V14-N1-7-18

4. Riferimenti bibliografici

Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., Pérez, G., 2019. The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147, 337-355.

Cheng, C.Y., Cheung, K.K.S., Chu, L.M., 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*. 45, 1779-1787.

Djedjig, R., Bozonnet, E., & Belarbi, R., 2015. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 86, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.057>

Duffie, J. A., Beckman, W.A., 1991. *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons. New York.

Flores Larsen, S., Filippin, C., & Lesino, G., 2015. Modeling double skin façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.08.033>

Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Janicke, B., & Wessolek, G., 2016. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047>

Hunter, A., Williams, N. S., Rayner, J. P., Aye, L., Hes, D., & Livesley, S. J., 2014. Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review. *Ecological Engineering*, 63, 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.021>

Jim C.Y., Tsang S.W., 2011. Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs. *Energy Building*, 43, 1341-1350

Kimball, B.A., 1973. Simulation of the energy balance of a greenhouse. *Agricultural Meteorology*, 11, 243-260. [doi.org/10.1016/0002-1571\(73\)90067-8](https://doi.org/10.1016/0002-1571(73)90067-8)

Kindelan, M., 1980. Dynamic modelling of greenhouse environment. Transaction of the ASAE, 1232-1239. DOI: 10.13031/2013.34752

Monteith J. L., Unsworth, M., 1990. Principles of environmental physics. Arnold. London

Papadakis, G., Briassoulis, D., Scarascia-Mugnozza, G., Vox, G., Feuilloley, P., Stoffers, J. A., 2000. Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials. Journal of Agricultural Engineering Research, 77, 7-38.

Pearson, S., Wheldon, A. E., Hadley, P., 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding materials. Journal of Agricultural Engineering Research, 62: 61-70.

Vox, G., Schettini, E., 2007. Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection. Polymer Testing 26 (5), 639-651.

Wendlandt, W.W., Hecht, H.G., 1996. Reflectance spectroscopy, John Wiley and Sons, New York, 253-274.

5. Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli. Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili. Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation- Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy 2007-2013 "Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD" (2013 - 2015); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011); Piano Annuale di Realizzazione 2012 "Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"; Piano Annuale di Realizzazione 2013 "Eco-Greenroof & Vertical Greenery System"; Piano Annuale di Realizzazione 2015 "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2016 "Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2017 "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra", Progetto finanziato dalla Regione Puglia "Razionalizzazione d'uso delle risorse primarie per una peschicoltura sostenibile - SUS-PEACH" (2017-2019).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

prof. ing. Giuliano Vox – responsabile scientifico, Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale.

prof.ssa ing. Evelia Schettini – Professore Associato, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre, di agricoltura urbana e infrastrutture verdi.

prof. ing. Giacomo Scarascia Mugnozza – Professore Ordinario, Ingegnere Civile, esperto di strutture serricole, di materiali costruttivi, di energie rinnovabili.

ing. Ileana Blanco – Assegnista di ricerca, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria dei Biosistemi, esperta di impianti per la climatizzazione delle serre alimentati da energia rinnovabile, di pareti verdi e infrastrutture verdi.

Ing. Fabiana Convertino – Ingegnere Civile, Dottoranda in “Biodiversità, agricoltura e Ambiente”.

Sig. Francesco Ferrulli - Tecnico, esperto di sensoristica.