



Ricerca di Sistema elettrico

## Analisi energetica delle prestazioni delle pareti “verdi” dell’edificio F92

C. Bibbiani, F. Fantozzi, C. Gargari



## ANALISI ENERGETICA DELLE PRESTAZIONI DELLE PARETI “VERDI” DELL’EDIFICIO F92

C. Bibbiani, F. Fantozzi, C. Gargari

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: Tecnologie “green” per gli edifici

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all’interno dell’Accordo di collaborazione *“Analisi energetica delle prestazioni delle pareti “verdi” dell’edificio F92”*

Responsabile scientifico ENEA: Dott. Carlo Alberto Campiotti

Responsabile scientifico Ing. Carlo Bibbiani

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 ANALISI DELLA DISPOSIZIONE DEI SENSORI SULL'EDIFICIO .....	5
3 ANALISI DEI DATI DI MONITORAGGIO. ....	15
3.1 ANALISI E ORDINAMENTO DEI DATI.....	15
4 CONCLUSIONI.....	27
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	27
6 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ.....	28

## Sommario

La ricerca muove dalla elaborazione dei dati termoigrometrici raccolti attraverso una campagna di monitoraggio dei flussi energetici all'interno degli ambienti dell'Edificio F92, con particolare riferimento alle sezioni dell'edificio orientate a sud-est, sud-ovest schermate da parete verde.

Su tale edificio, nell'ambito della medesima ricerca, ENEA ha provveduto ad installare nella primavera 2018 una serie di sensori atti a rilevare una molteplicità di parametri tra cui T° dell'aria, T° superficiale interna ed esterna delle pareti, Irraggiamento solare, velocità del vento.

Nell'ottica da un lato di validare il funzionamento dei sensori e l'attendibilità dei parametri estrapolabili dalla analisi critica delle letture, dall'altro di derivare, dalle informazioni raccolte, indicazioni per una possibile schematizzazione del contributo offerto dalla parete verde al miglioramento delle condizioni di comfort indoor, la ricerca si è focalizzata sulla interpretazione dei valori misurati dai sensori per la validazione di modelli semplificati di calcolo disponibili in bibliografia.

L'analisi è stata condotta mediante fogli di calcolo per la successiva restituzione grafica di risultati.

L'analisi ha consentito l'estrapolazione dei dati utili al calcolo del parametro Kv o "*fattore verde*", un indice sintetico in grado di descrivere il contributo al raffrescamento offerto dalla parte verde.

La valutazione dei valori calcolati del parametro K, vicini all'unità, dimostra il contributo sostanziale della parete verde alla riduzione del flusso entrante nella parete opaca.

## 1 Introduzione

La funzione della parete verde è quella di schermare la superficie dell'edificio che sarebbe esposta altrimenti alla radiazione solare diretta al fine di ridurre l'energia assorbita dalla parete e, di conseguenza, trasmessa all'interno. La presenza della parete verde, quindi, è finalizzata a mitigare le elevate temperature interne al fabbricato nei periodi più caldi e consente la riduzione del fabbisogno energetico necessario al condizionamento estivo.

Presso l'edificio F92 è stata installata una serie di sensori volti a misurare la temperatura superficiale delle pareti, la velocità dell'aria, l'umidità relativa, la radiazione solare globale (e relativa componente fotosintetica) all'esterno e all'interno della parete verde, in vari punti delle stesse.

La complessità dei fenomeni di trasmissione di calore relativa all'involucro dell'edificio schermato dalla parete verde, in regime transitorio, coinvolge modalità conduttive, convettive, raggianti ed evapotraspirative e fa sì che l'analisi dei dati acquisiti sia da considerare con estrema attenzione, sotto varie ipotesi di condizioni al contorno.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Analisi della disposizione dei sensori sull'edificio

La parete verde con struttura metallica è stata installata sull'angolo Sud dell'edificio F92 nel corso dell'anno 2017, ma il completamento dello sviluppo fogliare della coltre vegetale si è completato solo nella stagione 2018.

A partire dall'ottobre 2017, sono stati installati, in serie successive, numerosi sensori per la misurazione dei parametri termogrometrici

**Tabella 1 evoluzione della coltre vegetale da ottobre 2017 a settembre 2018**

Ottobre 2017	Novembre 2017	Gennaio 2018	Inizio Marzo 2018	Fine Marzo 2018	Aprile 2018	Maggio 2018	Giugno - Luglio - Agosto - Settembre 2018
							<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>Giugno</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>Luglio</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>Agosto</p> </div> <div style="width: 50%; text-align: center;">  <p>Settembre</p> </div> </div>

Il numero e la tipologia di sensori installati è cresciuto quindi progressivamente a partire dall'autunno 2017, periodo della prima installazione ed inizio della prima campagna di monitoraggio, al settembre 2018, periodo di conclusione della terza fase di monitoraggio.

**Tabella 2: suddivisione dei periodi**

PRIMA CONFIGURAZIONE	SECONDA CONFIGURAZIONE	TERZA CONFIGURAZIONE
dal 01/10/17 al 24/04/18	dal 24/04/18 al 19/06/18	dal 19/06/18 al 30/09/18

I periodi ai cui alla Tabella 2 si riferiscono all'avanzamento della stazione meteo in base ai sensori che di volta in volta sono stati aggiunti fino ad ottenere la configurazione finale, nell'ultimo periodo, nel quale si ha la piattaforma di sperimentazione necessaria all'attività di ricerca.

I sensori complessivamente installati nell'edificio sono numerosi, come di seguito elencati:

#### sulla parete SUD-OVEST

- temperatura dell'aria e dell'umidità relativa (AT02/RH02)
- temperatura dell'aria e dell'umidità relativa (AT03/RH03)
- temperatura fogliare (TF01)
- temperatura superficiale esterna (TS03, TS05)
- radiazione fogliare per fotosintesi (PAR02/03)
- radiazione solare globale sulla superficie esterna della parete verde (GR02)
- radiazione solare globale sulla superficie esterna della parete schermata (GR03)
- velocità del vento (WS02/WS03) e della direzione del vento (WD02/WD03)

#### sulla parete SUD-EST

- radiazione fogliare per fotosintesi (PAR04)
- radiazione solare globale (GR04)
- umidità relativa (AT04/RH04)
- radiazione fogliare per fotosintesi (PAR05)

- radiazione solare globale (GR05)
- temperatura dell'aria e umidità relativa (AT05/RH05 e AT06/RH06)
- della temperatura superficiale esterna (TS02, TS06, TS04)
- velocità del vento (WS04/WS05) e della direzione del vento (WD04/WD05)

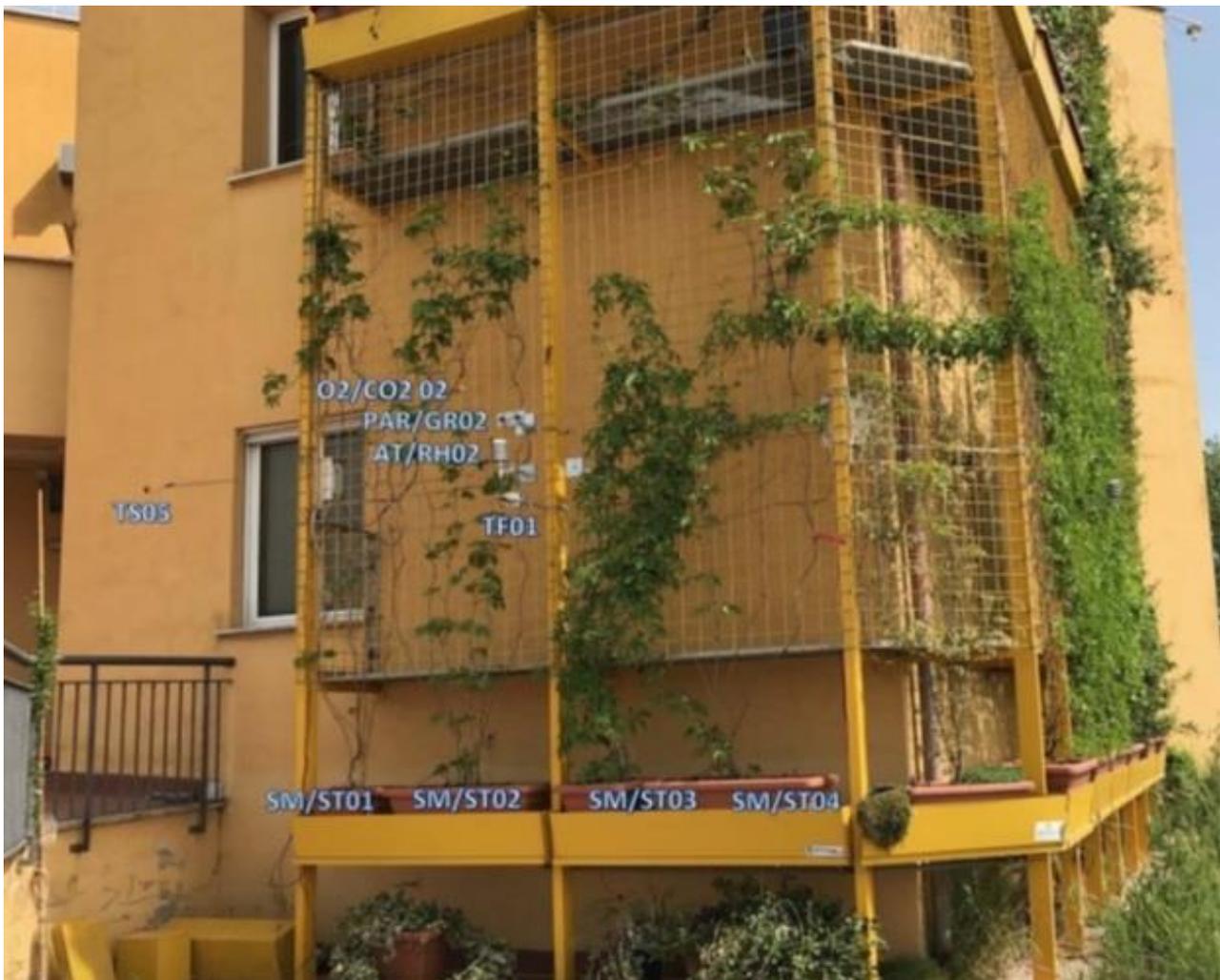
**In copertura sul tetto verde**

- temperatura dell'aria e umidità relativa (AT01/RH01)
- radiazione fogliare per fotosintesi (PAR01)
- radiazione solare globale (GR01)
- velocità del vento (WS01) e direzione del vento (WD01)

**Negli ambienti interni**

- Temperatura radiante (TaG01, TaG02)
- temperatura dell'aria e umidità relativa (AT07/RH07 e AT08/RH08)
- temperatura superficiale interna (TS01, TS07, TS08, TS09)

La disposizione dei diversi sensori è rappresentata alle Figure 1-10.



**Figura 1** Disposizione dei sensori sulla parete Sud-Ovest



Figura 2 disposizione dei sensori all'interno dell'intercapedine verde della parete Sud-Ovest



Figura 3 disposizione dei sensori all'interno dell'intercapedine verde della parete Sud-Ovest – piano secondo

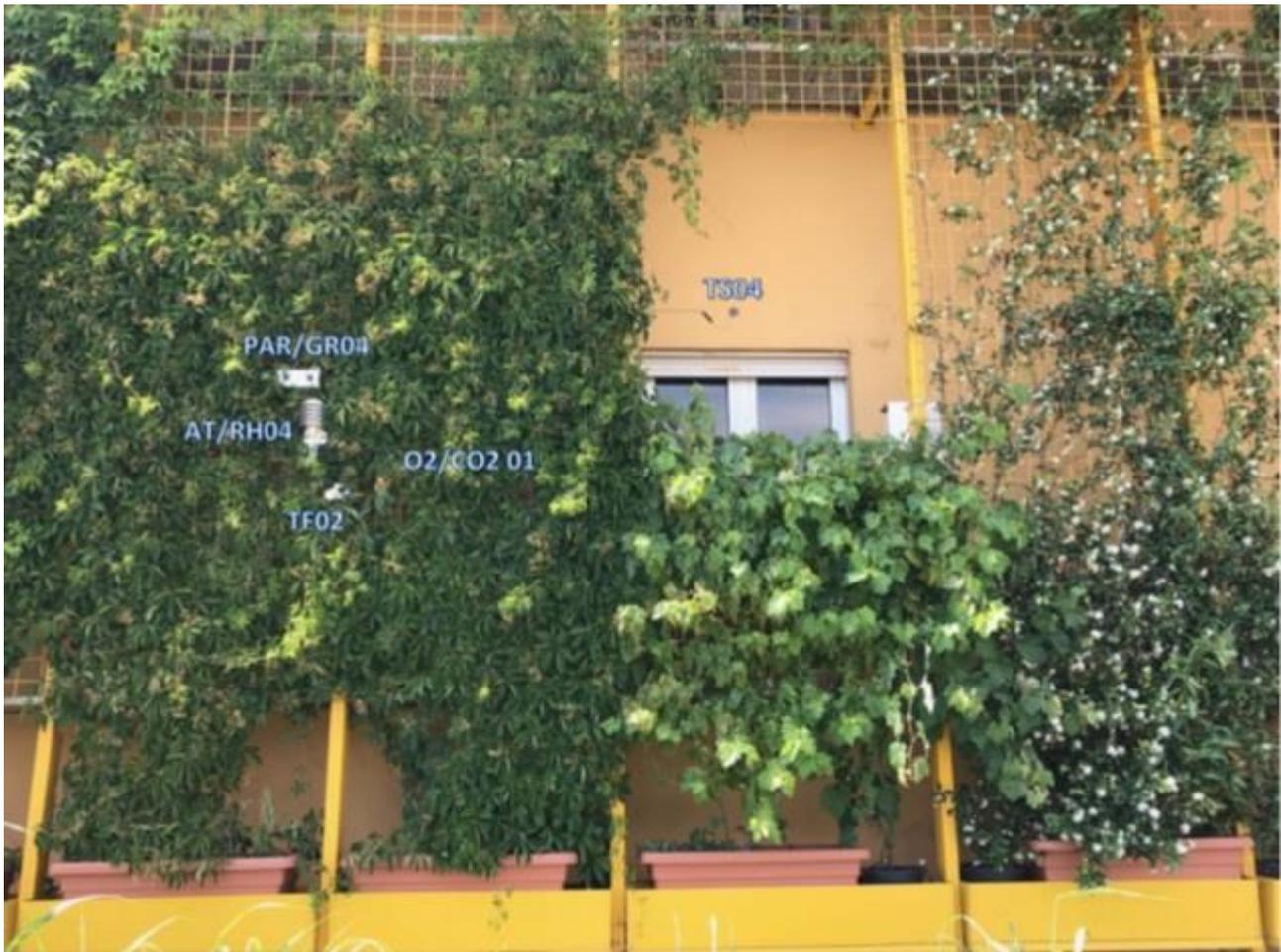


Figura 4 disposizione dei sensori all'interno dell'intercapedine verde della parete Sud-Est



Figura 5 disposizione dei sensori all'interno dell'intercapedine verde della parete Sud-Est



Figura 6 disposizione dei sensori all'interno dell'intercapedine verde della parete Sud-Ovest – piano secondo



Figura 7 Disposizione dei sensori interni Parete Sud-Ovest



Figura 8 Disposizione dei sensori interni Parete Sud-Ovest



Figura 9 Disposizione dei sensori interni - piano secondo



**Figura 10** Disposizione sensori sulla copertura a verde

L'alto numero di sensori consente la raccolta di una molteplicità di dati.

La ricerca si è concentrata in particolare sulla analisi dei dati estrapolati dalle letture delle misurazioni dei sensori collocati sulla parete Sud-Ovest, ritenendo le coppie di sensori più significative per gli obiettivi dello studio.

La parete Sud-Ovest è infatti dotata di una doppia coppia di sensori di T° interno-esterno, collocate la prima sul lato della parete completamente esposta, l'altro all'interno dell'intercapedine sulla porzione di parete schermata dalla superficie a verde.

Analoga coppia è presente anche sulla parete Sud-Est, ma il sensore T04, come si evince dalla documentazione fotografica, è collocato al di sopra della finestratura, al centro di un'area esclusa dalla copertura vegetale che, da un lato, in relazione all'andamento del sole, risente di periodi di ombreggiamento alternati a periodi di soleggiamento, dall'altro, è posizionato nell'area potenzialmente interessata dai ponti termici causati dalla presenza del cassonetto dell'avvolgibile, al di sopra della finestra.

Si segnala che, per una più ampia lettura dell'andamento dei fenomeni termici, sarebbe utile avere installati anche flussimetri in grado di rilevare puntualmente il flusso termico attraverso la parete.

### 3 Analisi dei dati di monitoraggio.

#### 3.1 Analisi e ordinamento dei dati

Come detto, l'attività è volta alla analisi e ordinamento della mole di dati acquisiti dai sensori installati nell'edificio F92, aventi come ultima finalità una possibile caratterizzazione della 'resistenza equivalente' fra parete dell'edificio e parete verticale verde.

La ricerca ha preso in esame i dati registrati dai sensori nel corso del terzo periodo di monitoraggio, di cui alla Tabella 2 e nello specifico durante il periodo Giugno-Ottobre 2018.

I dati sono stati scaricati dal server web Olinda e sono relativi all'impianto ENEA3349.

La tabella dei dati completi scaricati dal sistema è riportata in Allegato A

La disposizione dei sensori relativi alla *Terza Configurazione*, consente di valutare sia i flussi termici entranti ( $\Phi_s$ ) e ( $\Phi_v$ ) delle parti di muratura rispettivamente esposte al sole e schermate dalla parete verde, sia il fattore di attenuazione della radiazione solare ' $\tau$ ', ed infine ' $K_v$ ' la costante verde.

L'equazione che fornisce il valore della differenza fra i flussi termici entranti ( $\Phi_s$ ) e ( $\Phi_v$ ), definita come ( $\Delta\Phi$ ) può essere scritta:

$$\frac{\Delta\phi}{A} = U \frac{K_v a I}{h_e} \quad (1)$$

dove:

- $U$  è la trasmittanza termica dell'elemento opaco,
- $K_v$  è la costante verde,
- $a$  è il coefficiente di assorbimento della parete opaca
- $I$  è la radiazione solare incidente sulla superficie esterna,
- $h_e$  è il coefficiente di scambio convettivo,

La costante verde  $K_v$  data è dall'equazione:

$$K_{v1} = \frac{T_{se} - T_{sev}}{T_{se} - T_{ae}} \quad (2)$$

in cui:

- $T_{se}$  è la temperatura superficiale della parete opaca non soggetta agli effetti della coltre vegetale,
- $T_{sev}$  è la temperatura superficiale della parete opaca soggetta agli effetti della coltre vegetale,
- $T_{ae}$  è la temperatura dell'ambiente esterno,

$h_e$  viene data dall'equazione:

$$h_e = h_c + h_r \quad (3)$$

dove:

- $h_c$  è il coefficiente di convezione
- $h_r$  è il coefficiente di irraggiamento

e sono rispettivamente:

$$h_c = 4 + 4v \quad (4)$$

dove:

- $v$  è la velocità del vento in prossimità delle superfici (m/s)

e

$$h_r = \varepsilon * h_{ro} \quad (5)$$

dove:

- $\varepsilon$  è l'emissività della superficie,
- $h_{ro}$  è il coefficiente di irraggiamento di un corpo nero:

$$h_{ro} = 4 * \sigma * T_m^3 \quad (6)$$

- $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann pari a  $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- $T_m$  è la temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe, che verrà assunta pari alla temperatura dello strato fogliare.
- $\tau$  è la frazione di radiazione che filtra attraverso la parete verde

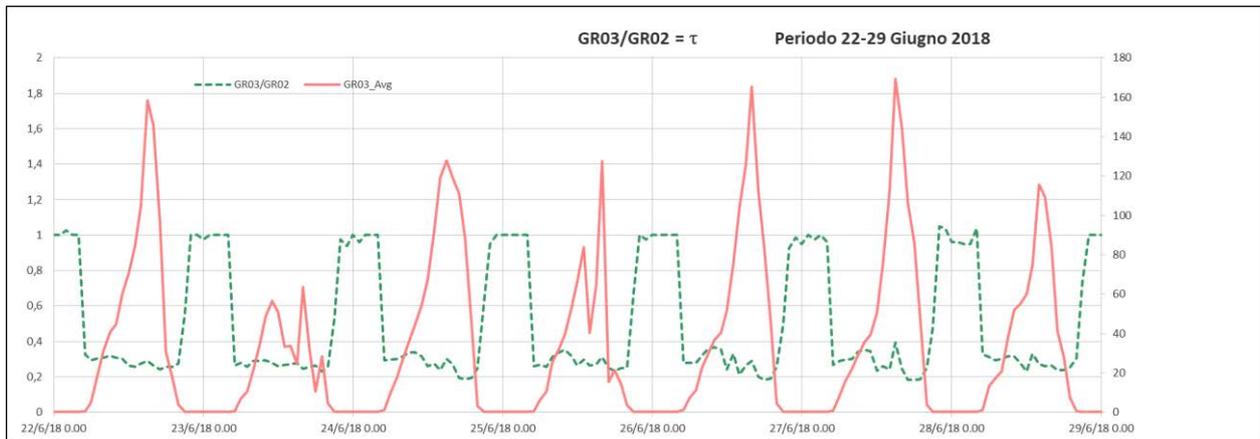
Partendo dalla eq.(1), di può ricavare un valore  $Kv$ , che denomineremo  $Kv2$ , da misurazioni in parte indipendenti da quelle utilizzate per ricavare  $Kv1$ . Infatti, si ricava che:

$$Kv2 = \frac{\Delta\phi}{AU_{al}} h_e \quad (7)$$

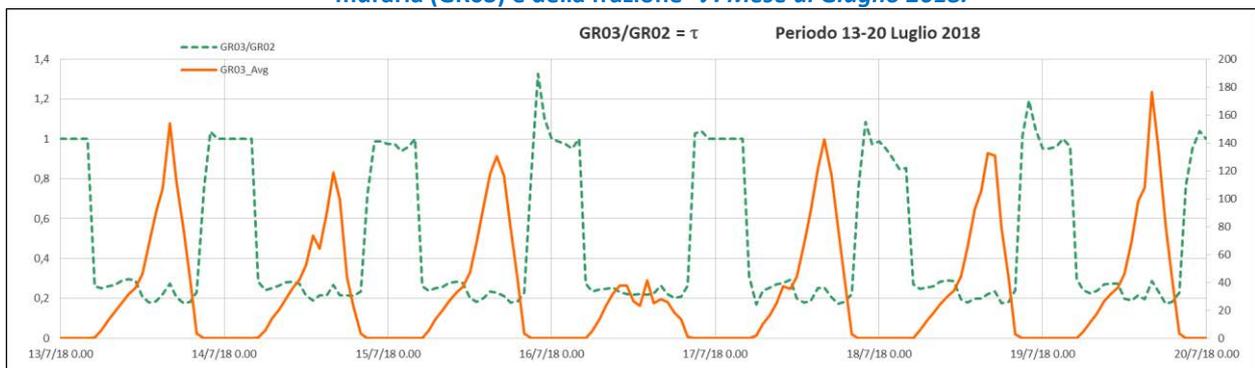
Dunque, il problema si sposta sulla valutazione sia della differenza  $\Delta\Phi$  fra i flussi termici entranti ( $\Phi_s$ ) e ( $\Phi_v$ ), sia il coefficiente di scambio convettivo ' $h_e$ '.

Sono stati analizzati i mesi che vanno da Giugno a Ottobre 2018, prendendo in considerazione 4 settimane (una in ciascun mese).

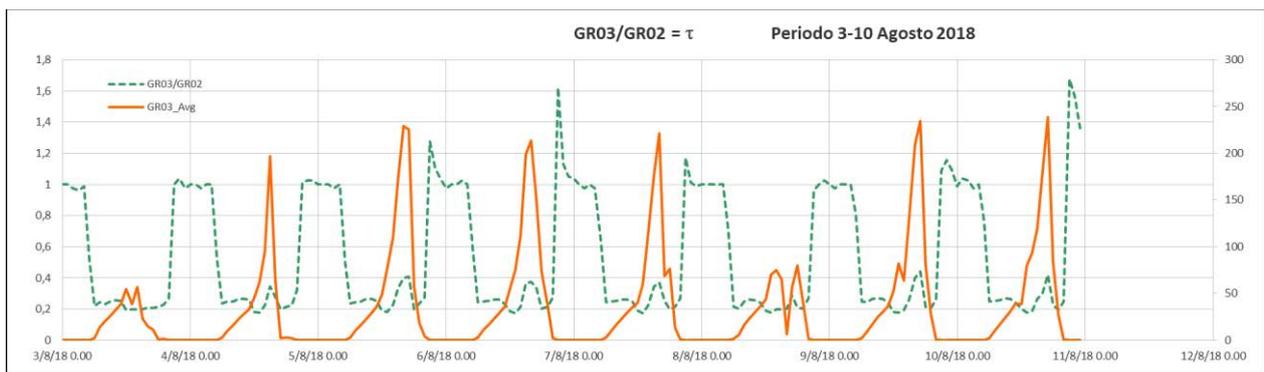
Come prima valutazione della correttezza dei dati dei sensori di radiazione GR02 e GR03, sono stati calcolati i rapporti ' $\tau$ ' relativi a ciascun mese e sono riportati nei Grafici 1-5.



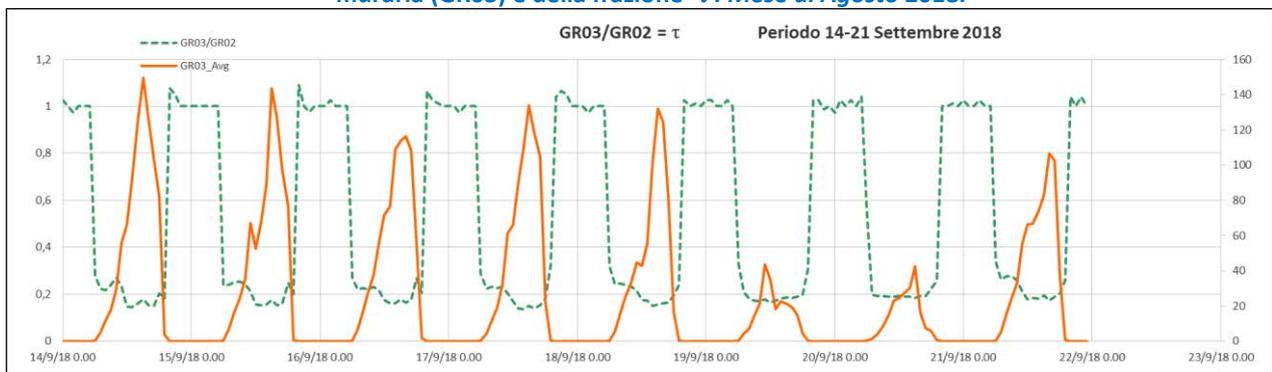
**Grafico 1. Parete SW- Andamento della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03) e della frazione ' $\tau$ '. Mese di Giugno 2018.**



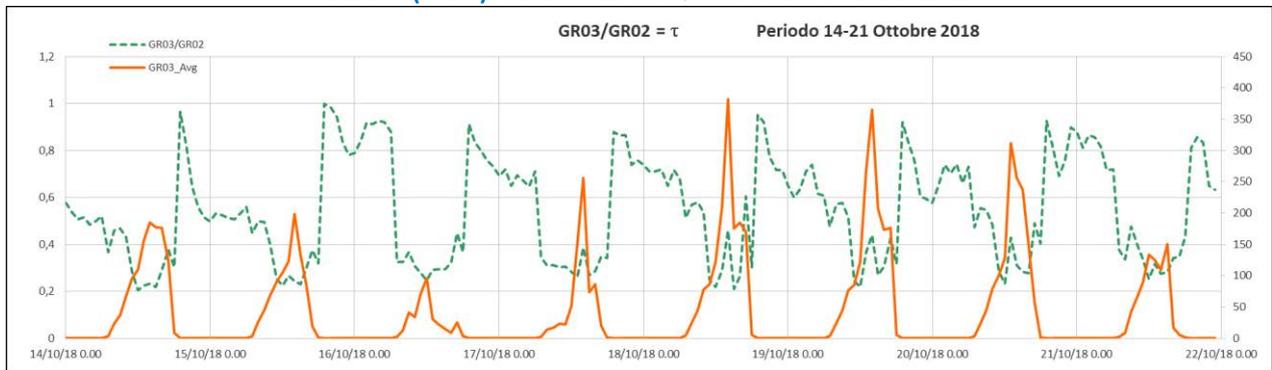
**Grafico 2. Parete SW- Andamento della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03) e della frazione ' $\tau$ '. Mese di Luglio 2018.**



**Grafico 3. Parete SW- Andamento della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03) e della frazione  $\tau$ . Mese di Agosto 2018.**



**Grafico 4. Parete SW- Andamento della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03) e della frazione  $\tau$ . Mese di Settembre 2018.**



**Grafico 5. Parete SW- Andamento della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03) e della frazione  $\tau$ . Mese di Ottobre 2018.**

Dall'analisi dei grafici si può vedere come il fattore  $\tau$ , che varia in funzione della copertura fogliare ovvero dell'indice LAI (Leaf Area Index), mostri valori che vanno a diminuire per i mesi da Giugno a Settembre (valore medi da 0.3 a 0.2), per poi ri-aumentare a Ottobre in concomitanza della caduta di una parte dello strato fogliare (valore  $>0.3$ ), come si può notare anche dal valore della radiazione GR03 dello stesso mese.

Per quanto riguarda la valutazione del  $(\Delta\Phi)$ , essa può essere condotta a partire dalle misure delle coppie di sensori di temperature superficiali posti all'esterno ed all'interno della parete muraria SW. Sono i sensori:

- Esposti al sole: coppia TS05-TS01, rispettivamente all'esterno ed all'interno del locale;
- Protetti dalla parete verde: coppia TS03-TS08, rispettivamente all'esterno ed all'interno del locale.

Il valore del  $(\Delta\Phi)$  può essere approssimato dalla seguente formula:

$$\frac{\Delta\phi}{A} = U [(TS05 - TS01) - (TS03 - TS08)] \quad (8)$$

Il rapporto tra i flussi termici entranti ( $\Phi_S$ ) e ( $\Phi_V$ ) delle parti di muratura rispettivamente esposte al sole e schermate dalla parete verde, rappresentato nei Grafici 6-11, deve essere valutato essenzialmente durante le ore dal mezzogiorno in poi (quindi dalla cuspide della radiazione GR03 in poi); quindi, se limitiamo la analisi a questa parte pomeridiana, il rapporto mostra un andamento costante all'interno di ciascun mese, a parte alcuni giorni della settimana analizzata nel mese di Giugno, ed ha un valore all'incirca pari a 4. Questo significa che il flusso termico attenuato dalla parete verde è all'incirca il 25% di quello normalmente entrante dalla parete nuda.

Una nota importante da chiarire per la applicazione di questa metodologia di calcolo, è rappresentata dal fatto che per valutare correttamente il valore dei due flussi termici, le temperature interne (TS01 e TS08) vanno ricavate considerando lo sfasamento della onda termica che attraversa la parete, che è stato calcolato essere pari a 10,48 ore (Figura 11).

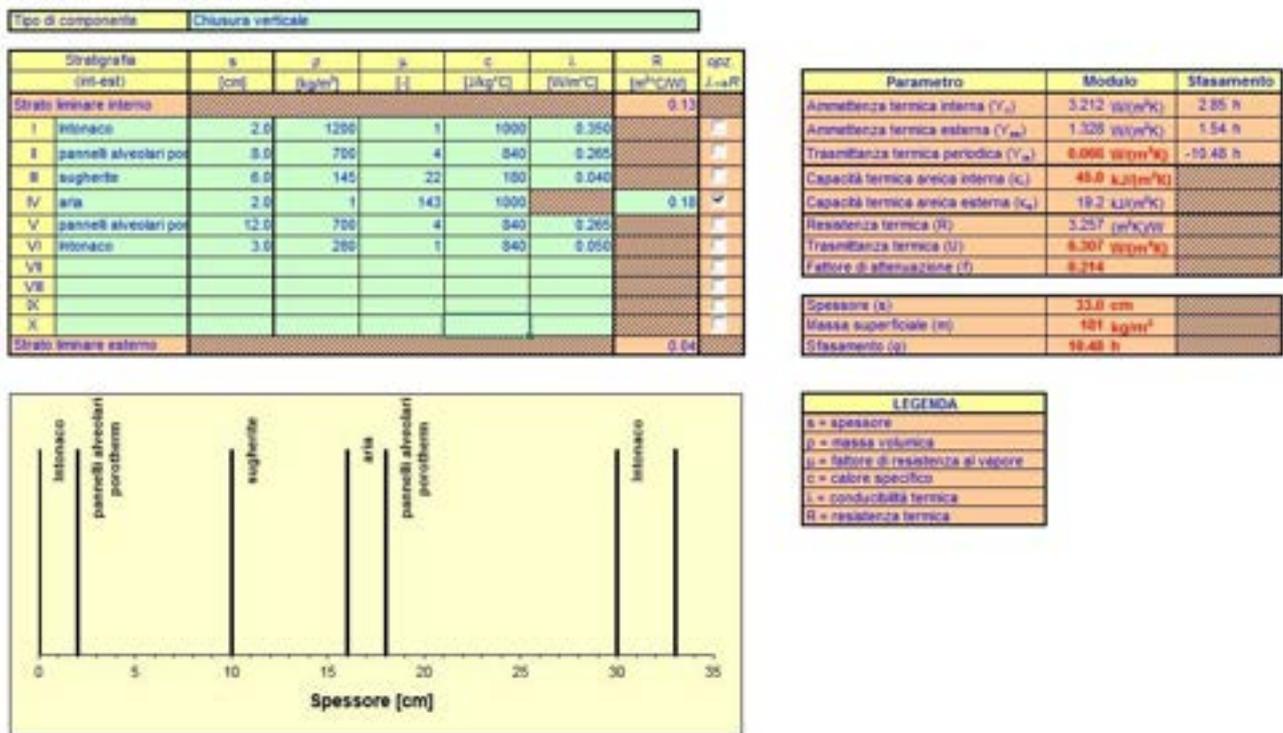
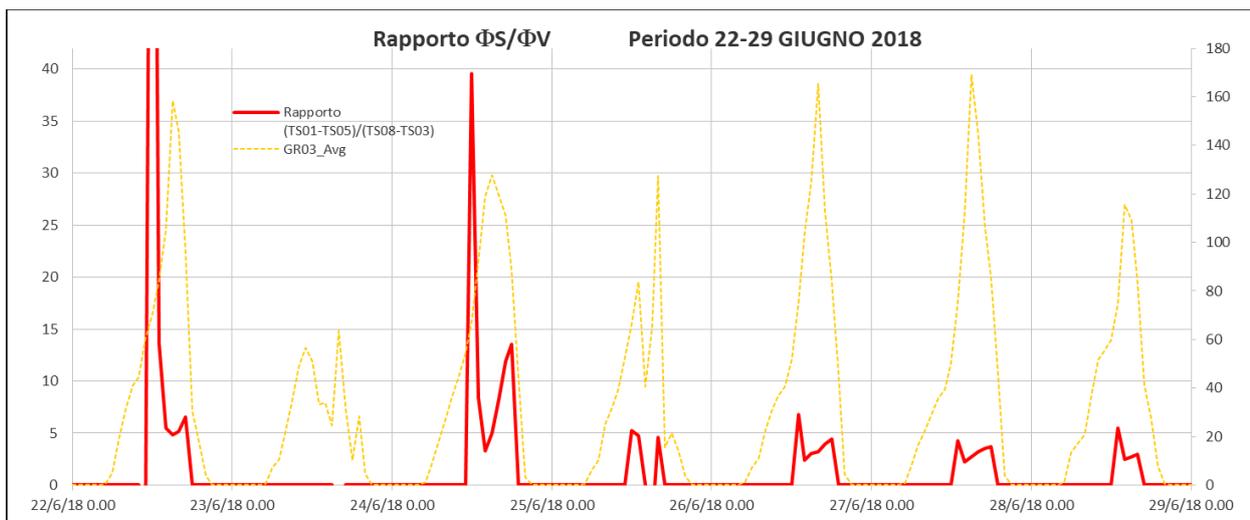
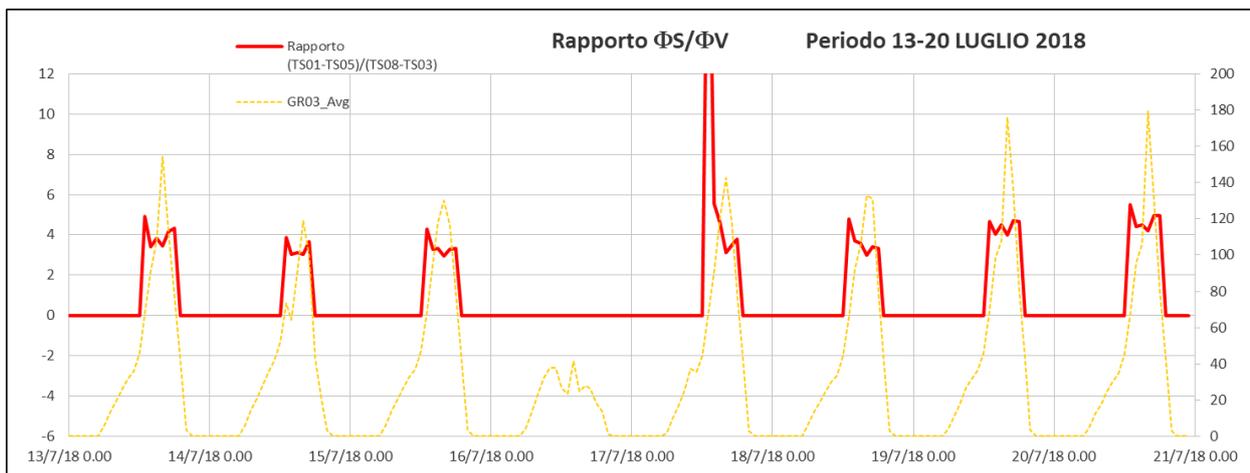


Figura 11. Stratigrafia e proprietà fisiche della parete opaca.

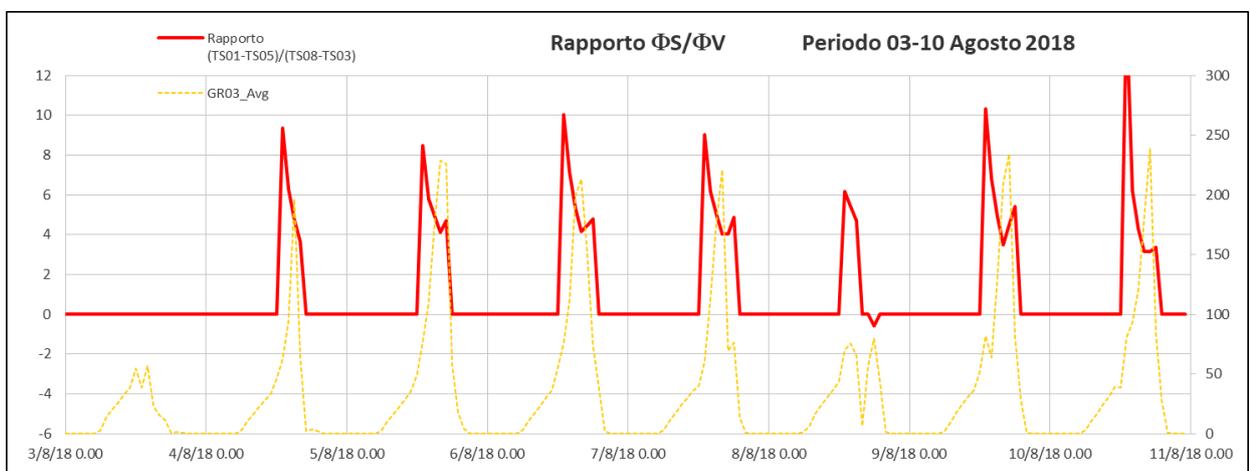
Pertanto, è stata seguita questa indicazione per calcolare le relative differenze di temperatura fra le coppie suddette.



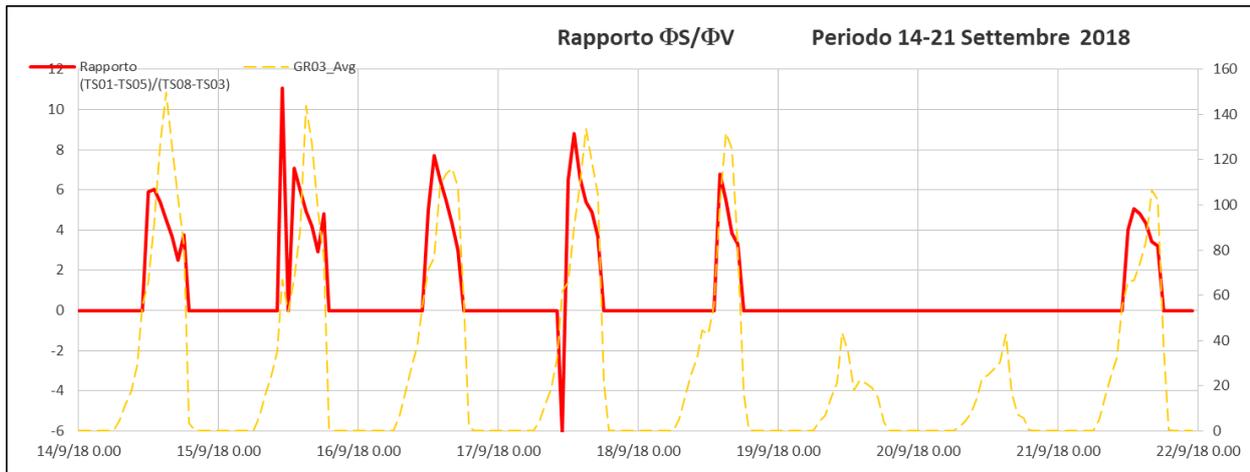
**Grafico 6. Parete SW- Andamento rapporto tra  $(\Phi_s)$  e  $(\Phi_v)$  e della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Giugno 2018.**



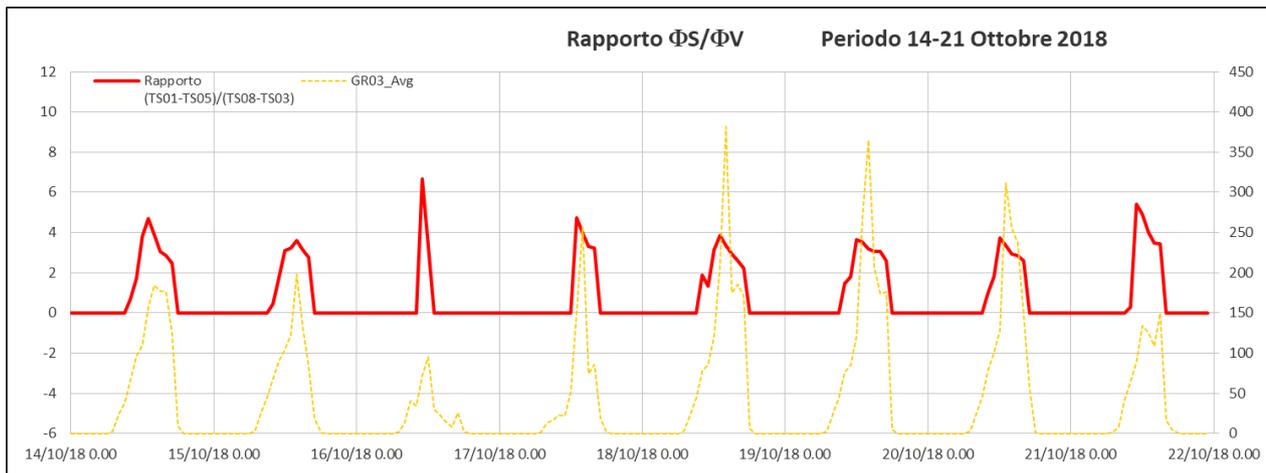
**Grafico 7. Parete SW- Andamento rapporto tra  $(\Phi_s)$  e  $(\Phi_v)$  e della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Luglio 2018.**



**Grafico 8. Parete SW- Andamento rapporto tra  $(\Phi_s)$  e  $(\Phi_v)$  e della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Agosto 2018.**



**Grafico 9. Parete SW- Andamento rapporto tra  $(\Phi_s)$  e  $(\Phi_v)$  e della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Settembre 2018.**



**Grafico 10. Parete SW- Andamento rapporto tra  $(\Phi_s)$  e  $(\Phi_v)$  e della radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Ottobre 2018.**

Il coefficiente di scambio convettivo  $h_e$  viene calcolato dalle equazioni (3-6), come sopra specificato, prendendo i dati misurati dai sensori di velocità del vento ( $WS02=v$ ) e dal sensore di temperatura fogliare ( $TF01= T_m$ ).

Una volta verificato quindi la congruenza dei dati misurati dai sensori, si è proceduto con una ulteriore elaborazione che ha consentito di confrontare il valore della costante verde  $K_v$  calcolato con le due metodologie date dalle eq.(2) ed eq.(7).

La validità della eq. (7) è assunta dalla teoria che individua il momento esatto in cui calcolare il valore di  $K_v$ . Si deve infatti valutare il momento in cui la temperatura superficiale della parete opaca soggetta agli effetti della coltre vegetale ( $TS03=T_{sev}$ ) raggiunge il suo massimo. In corrispondenza di tale istante si può dunque calcolare il valore  $K_{v2}$ . Pertanto, si è proceduto alla visualizzazione dei valori ricavati per ciascun giorno di ogni mese esaminato.

I risultati delle elaborazioni mostrano che i valori massimi di  $T_{sev}$  sono generalmente sincroni con i picchi della radiazione ' $\tau$ ' (GR03) misurata sulla parete opaca soggetta agli effetti della coltre vegetale.

I Grafici 11-15 riportano i valori della costante verde 'Kv1' e 'Kv2', riportati nella tabella sottostante (Tabella 1), assieme all'andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole 'Tse' e la temperatura dell'aria esterna 'Tae'.

Valore Kv1	Valore Kv2	Data_corrispondente	Rapporto Kv1/Kv2 Media settimanale	Rapporto Kv1/Kv2
0,82	0,74	22/6/18	GIUGNO	1.11
1,02	0,67	23/6/18		1.52
0,75	0,55	24/6/18		1.38
0,82	0,69	25/6/18		1.18
0,72	0,43	26/6/18		1.67
0,71	0,48	27/6/18		1.48
0,71	0,63	28/6/18		1.14
0,86	0,64	29/6/18	<b>1,36</b>	1.36
0,84	0,80	13/7/18	LUGLIO	1.05
0,83	0,82	14/7/18		1.02
0,85	0,77	15/7/18		1.10
1,02	0,67	16/7/18		1.52
0,83	0,63	17/7/18		1.32
0,85	0,75	18/7/18		1.13
0,84	0,76	19/7/18		1.12
0,88	0,79	20/7/18	<b>1,17</b>	1.11
1,12	0,82	3/8/18	AGOSTO	1.37
0,96	0,93	4/8/18		1.03
0,88	0,90	5/8/18		0.98
0,87	0,90	6/8/18		0.96
0,86	0,85	7/8/18		1.01
0,95	0,82	8/8/18		1.16
0,85	0,79	9/8/18		1.07
0,87	0,59	10/8/18	<b>1,13</b>	1.47
0,69	0,58	14/9/18	SETTEMBRE	1.19
0,70	0,57	15/9/18		1.23
0,73	0,52	16/9/18		1.38
0,75	0,65	17/9/18		1.16
0,81	0,65	18/9/18		1.23
1,12	0,46	19/9/18		2.45
1,17	0,45	20/9/18		2.58
0,79	0,50	21/9/18	<b>1,60</b>	1.57
0,79	0,40	14/10/18	OTTOBRE	2.00
0,80	0,50	15/10/18		1.59
0,87	0,43	16/10/18		2.00
0,89	0,42	17/10/18		2.13

0,74	0,42	18/10/18		1.78
0,74	0,61	19/10/18		1.22
0,74	0,44	20/10/18		1.70
0,78	0,51	21/10/18	<b>1,74</b>	1.54

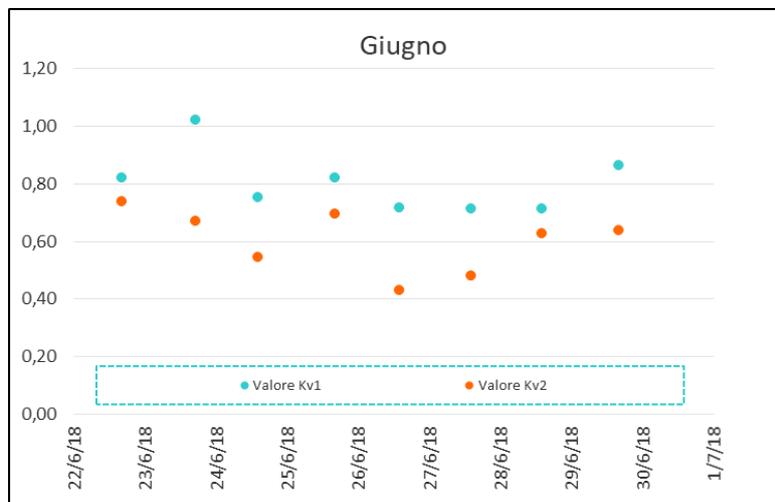
**Tabella 1. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2. Mesi da Giugno ad Ottobre 2018.**

La Tabella 1 contiene alcune incongruenze poiché in alcuni casi il valore del  $K_{v1}$  è  $>1$ , cosa non compatibile con la teoria esposta in precedenza. Infatti, vale anche la relazione:

$$Kv1 = 1 - \tau \frac{h_e}{h^*e} \quad (9)$$

ovviamente sempre minore di 1.

Tale fatto può essere dovuto sia al posizionamento del sensore della temperatura dell'aria esterna 'Tae' che è situato al di sopra della copertura e dunque non in prossimità della parete SW e che forse risente anche della presenza della copertura verde che ha un effetto evapotraspirativo di raffreddamento locale, sia alla non misurazione della velocità del vento in prossimità della parete nuda. Inoltre, da metà Settembre in poi, sia  $K_{v1}$  che  $K_{v2}$  sembrano discostarsi dalle medie dei mesi estivi, per motivi probabilmente legati alla non corretta valutazione del coefficiente 'h<sub>e</sub>' da chiarire con analisi dinamiche più approfondite a partire da misurazioni dei flussi termici da parte di eventuali flussimetri ed anche di un anemometro e di un sensore di temperatura dell'aria da installare in prossimità della parete nuda stessa.



**Grafico 11. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2 ; Andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole  $T_{se}$  e aria esterna  $T_{ae}$ . Mese di Giugno 2018.**

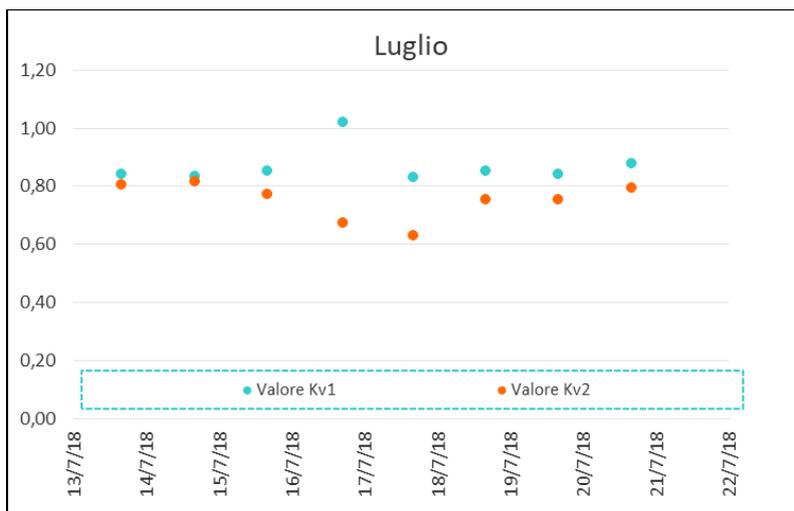


Grafico 12. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2 ; Andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole  $T_{se}$  e aria esterna  $T_{ae}$ . Mese di Luglio 2018.

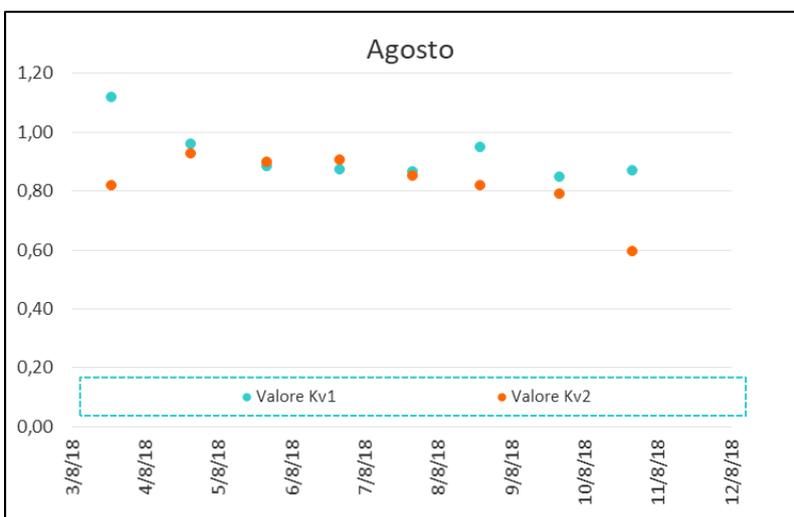


Grafico 13. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2 ; Andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole  $T_{se}$  e aria esterna  $T_{ae}$ . Mese di Agosto 2018.

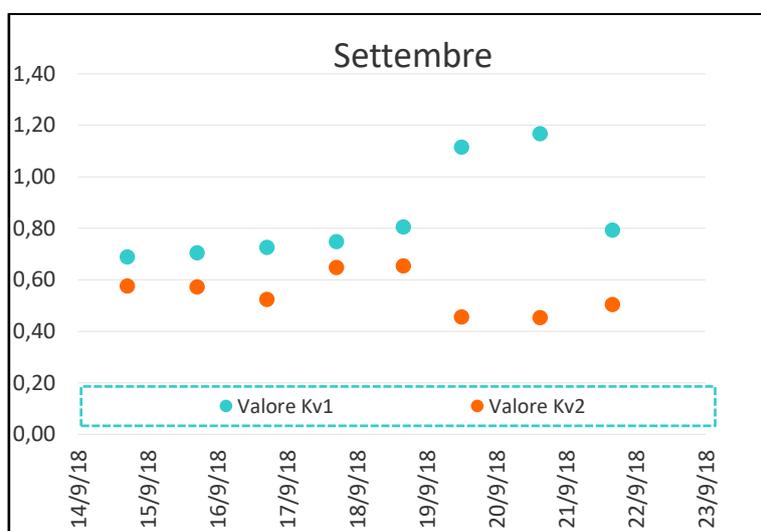
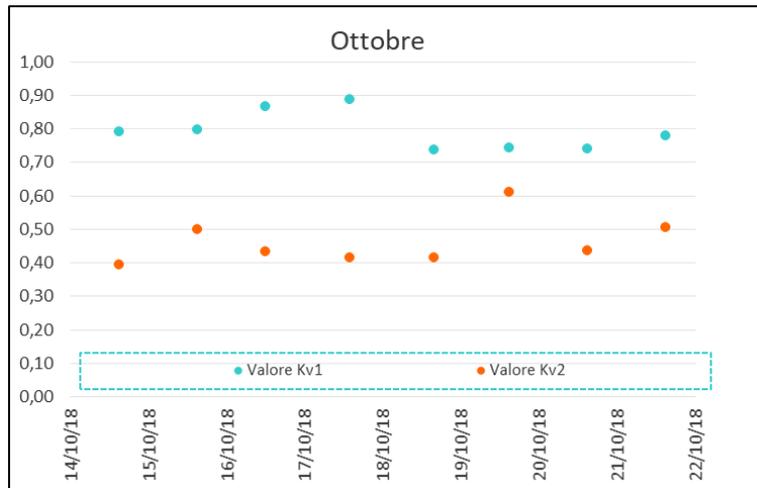
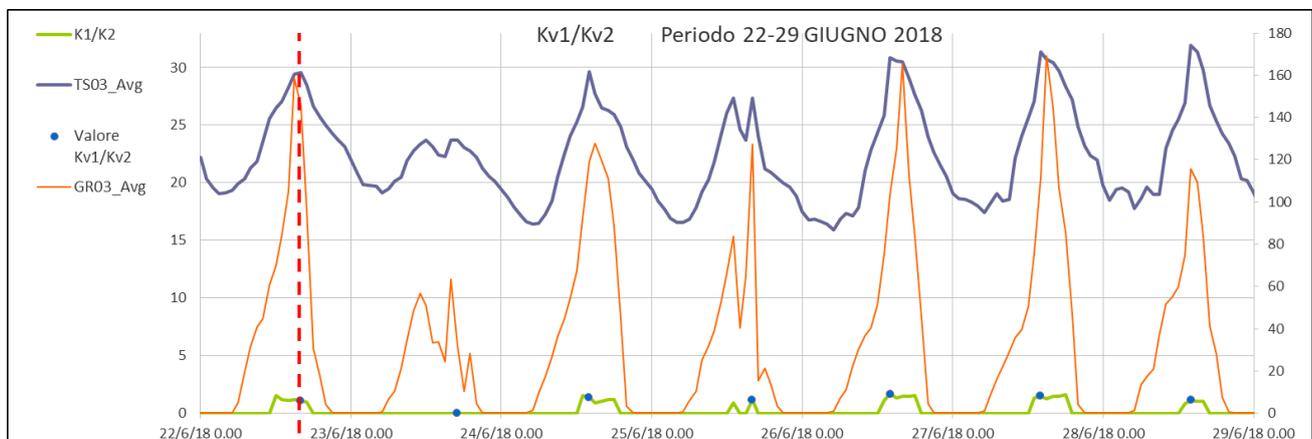


Grafico 14. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2 ; Andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole  $T_{se}$  e aria esterna  $T_{ae}$ . Mese di Settembre 2018.

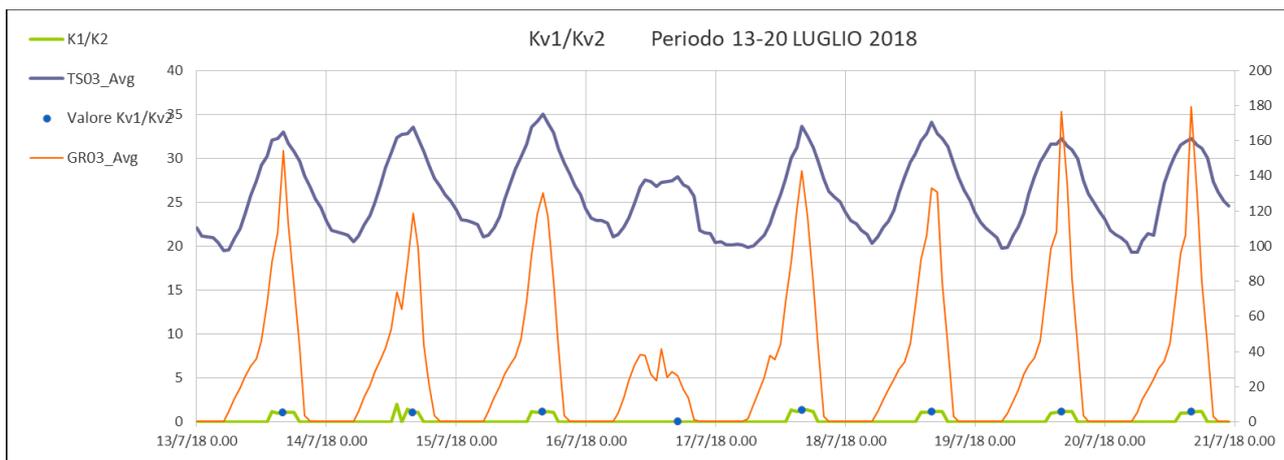


**Grafico 15. Parete SW- Andamento dei valori Kv1 e Kv2 ; Andamento della differenza di temperatura fra superficie muraria esterna esposta al sole  $T_{se}$  e aria esterna  $T_{ae}$ . Mese di Ottobre 2018.**

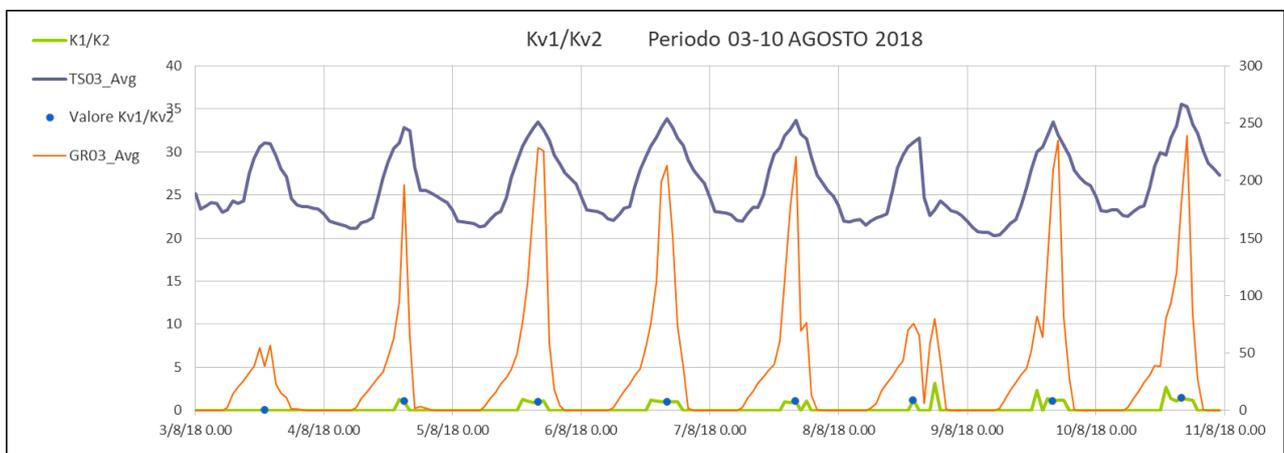
Il confronto fra i due valori della costante verde  $K_v$ , si può anche meglio apprezzare dai grafici 16-20 in cui è riportato l'andamento del rapporto  $K_{v1}/K_{v2}$ ; la temperatura della superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde ' $T_{sev}$ '; la radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Inoltre, è evidenziato il valore di  $K_{v1}/K_{v2}$  in corrispondenza del massimo della temperatura superficiale della parete opaca (punto cerchiato in azzurro) soggetta agli effetti della coltre vegetale.



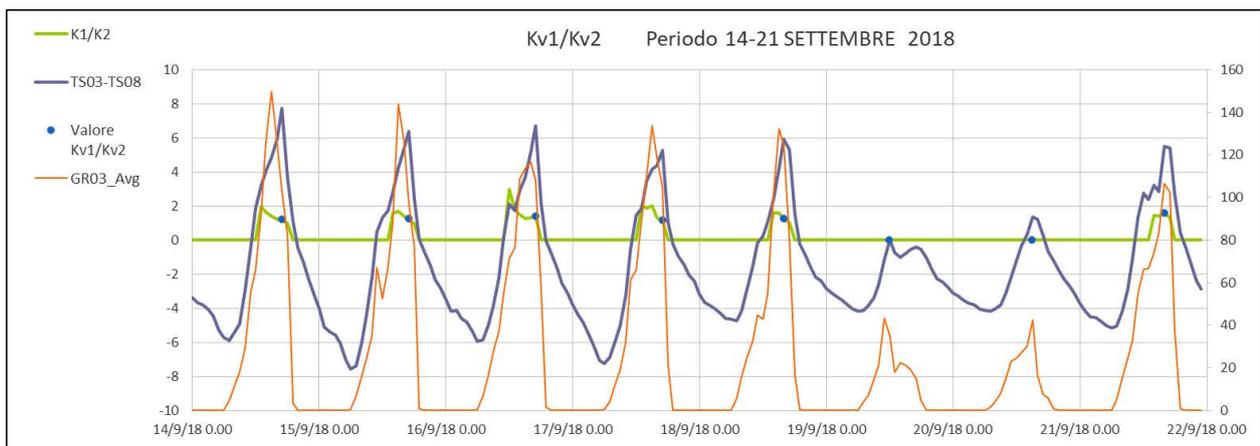
**Grafico 16. Parete SW- Andamento rapporto Kv1/Kv2 ; temperatura superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde; radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Giugno 2018.**



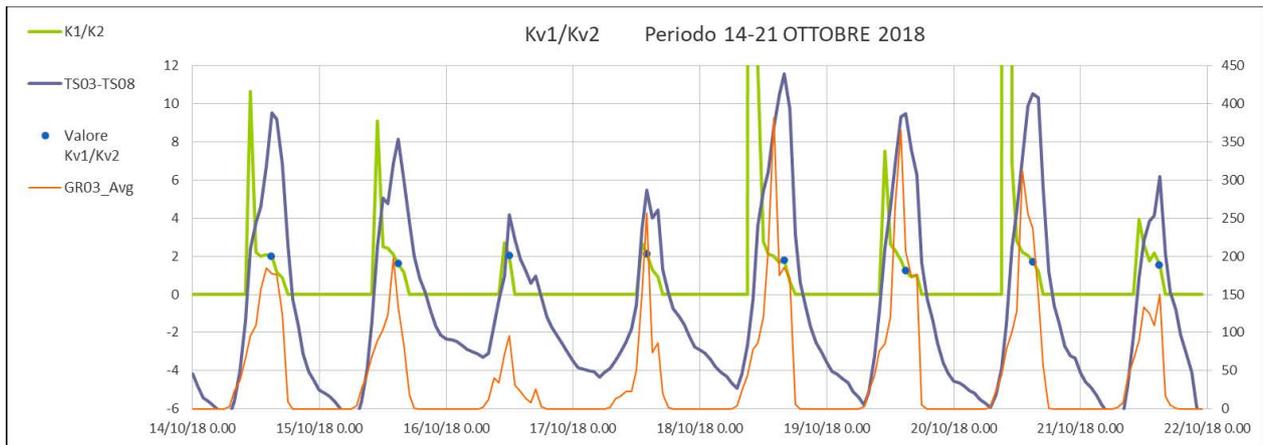
**Grafico 17. Parete SW- Andamento rapporto Kv1/Kv2 ; temperatura superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde; radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Luglio 2018.**



**Grafico 18. Parete SW- Andamento rapporto Kv1/Kv2 ; temperatura superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde; radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Agosto 2018.**



**Grafico 19. Parete SW- Andamento rapporto Kv1/Kv2 ; temperatura superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde; radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Settembre 2018.**



**Grafico 20. Parete SW- Andamento rapporto  $K_{v1}/K_{v2}$  ; temperatura superficie muraria esterna protetta dallo schermo verde; radiazione all'interno della intercapedine fra parete verde e parete muraria (GR03). Mese di Ottobre 2018.**

Dai valori del rapporto  $K_{v1}/K_{v2}$  si può notare che nei 3 mesi estivi una maggiore stabilità nell'intorno del punto di calcolo, ed inoltre che i due metodi di valutazione di  $K_v$  portano ad una buona corrispondenza delle due stime, dando implicitamente una verifica di molteplici misurazioni e fenomeni complessi quali la adduttanza liminare nell'intorno della parete verde.

Stante la non perfetta valutazione sia dei flussi termici, sia del coefficiente di scambio termico  $h_e$ , per la parete nuda, non è dunque possibile ricavare dalla eq. (1) una stima del coefficiente di scambio convettivo  $h^*_e$  in presenza della parete verde. Questa impossibilità si traduce di conseguenza nella mancata definizione di una resistenza equivalente  $R_{eq}'$ .

## 4 Conclusioni

L'analisi è stata limitata nel tempo a causa del completamento della coltre vegetale sulla parete di fatto, arrivata a piena copertura della superficie solo nel mese di giugno 2018.

Ciò premesso, l'analisi ha confermato l'attendibilità nell'applicazione delle due formule per il calcolo del "green factor -  $K_v$ ", adottate a rappresentare il contributo della parete verde nel controllo del flusso termico entrante sulla superficie schermata, con la grave limitazione della validità dell'analisi all'istante in cui la  $T$  superficiale della parete è massima.

Le due formule portano a valori sperimentali di  $K_v$  relativamente simili come andamento, nel periodo di analisi, e come oscillazione in riferimento alla variazione della  $T$  della parete.

I rapporti dei valori  $K_{v1}/K_{v2}$  rilevati oscillano mediamente tra 1,1 e 1,4 nel periodo estivo denotando una buona congruenza dei due calcoli basati sui rilevamenti sperimentali, mentre si alzano a circa 1,6-1,7 per i mesi autunnali quando l'incidenza del Sole è meno efficace.

È stato inoltre rilevato che per poter definire una resistenza equivalente  $R_{eq}'$  relativa alla parete verde è necessario analizzare in regime transitorio i complessi fenomeni di scambio termico che avvengono tra il fabbricato e la parete verde stessa.

## 5 Riferimenti bibliografici

1. F. Ariaudo, S. P. Corgnati, G. V. Fracastoro & D. Raimondo, "Cooling load reduction by green walls: results from an experimental campaign", Conference Paper IV International Building and Physics Conference, Istanbul, June 2009

2. C. Campiotti, C. Bibbiani, G. Alonzo, G. Giangiacovo, R. Ragona, C. Viola, "Green roofs and green façades for improving sustainability of towns, *Journal of Sustainable Energy*, Vol II n. 3 September 2011, pp 24-29
3. S. Flores Larsen, C.a Filippi'n, G. Lesino, "Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software", *Solar Energy Volume 121*, November 2015, Pages 56-67

## 6 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

*Ing. Carlo Bibbiani Curriculum Vitae*

Carlo Bibbiani, nato a Pisa nel 1962, consegue la Laurea in Ingegneria Civile, Sezione Idraulica, presso la Università degli Studi di Pisa. Successivamente consegue il titolo di Dottore di Ricerca in "Genio rurale" (IX° Ciclo, 1996) presso l'Università di Pisa. Dal 2001 è Ricercatore universitario presso il Dipartimento di Scienze Veterinarie (DSV) dell'Università di Pisa. Ha svolto ricerche nei seguenti settori: Energia rinnovabile applicata ai sistemi serra; Compilazione di software volto alla simulazione climatica nelle serre; Studio delle proprietà fisiche ed idrauliche dei substrati per le colture fuori suolo; Simulazione della relazione suolo-acqua nelle colture fuori suolo.

Ha partecipato come relatore a diversi Convegni, in materia energia rinnovabili applicate alla agricoltura, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di una sessantina di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

*Prof. Ing. Fabio Fantozzi Curriculum Vitae*

Fabio Fantozzi, nato a Pontedera (Pi) nel 1954, laureato in Ingegneria Meccanica con tesi sperimentale dal titolo "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche" presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica (1° ciclo- Curriculum: Termofluidodinamica, è attualmente Professore Associato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC).

Oltre ad un'intensa attività didattica, ha partecipato, in qualità di relatore, a circa 100 tesi di laurea nell'ambito dei Corsi di Laurea in Ing. Meccanica, Chimica, Civile ed Edile. Questa attività, in qualche caso, lo ha portato non solo a fare da correlatore di studenti di altre Facoltà (Architettura di Firenze e C.L. in Conservazione e Beni Culturali dell'Università di Parma) ma anche ad intraprendere importanti collaborazioni di ricerca con Enti e Università straniere.

L'attività scientifica si è svolta inizialmente su diverse applicazioni di tubi di calore, su cui aveva lavorato anche durante la tesi (Titolo: "Progetto di un corpo nero sul principio del tubo di calore per applicazioni termometriche").

In particolare, i tubi di calore erano costituiti da termosifoni bifase con applicazioni previste nei campi:

- a) della geotermia
- b) del raffreddamento dell'elettronica, soprattutto di potenza.

Tale attività è stata a lungo svolta in collaborazione con il Moscow Power Engineering Institute di Mosca.

Successivamente, ha cominciato ad interessarsi all'influenza che i parametri termometrici e l'inquinamento esterno hanno sugli ambienti in cui si voglia garantire una corretta conservazione dei manufatti di interesse storico ed artistico, facendo anche parte di gruppi di lavoro, nell'ambito del CTI (Comitato Termotecnico Italiano) per la stesura di progetti di norme sull'argomento

Attualmente, con riferimento alle Direttive Europee sul rendimento energetico in edilizia, svolge la sua attività, principalmente su tematiche di diagnosi energetica, risparmio energetico e riqualificazione di edifici esistenti, tema sul quale è stato chiamato a fare da relatore in diverse occasioni.

Ha lavorato sul tema della "Certificazione Energetica degli edifici", anche nell'ambito del Comitato Termotecnico Italiano (CTI) in cui ha fatto parte di due specifici Gruppi di Lavoro del SottoComitato 1

riguardanti: a) Norme tecniche a supporto della legislazione energetica degli edifici, b) Caratteristiche termiche dei materiali.

L'attività si è poi definitivamente spostata su temi più tipici della Fisica Tecnica Ambientale, in particolare sullo studio di pareti multistrato e ventilate in edilizia, tema con cui ha fatto parte anche di diversi PRIN di ricerca a livello nazionale.

Ha lavorato su tematiche acustiche, con particolare riferimento a barriere acustiche autostradali.

Ha condotto, in qualità di Responsabile, diversi contratti di ricerca con aziende, su tematiche energetiche e ha partecipato come relatore a diversi Convegni e Corsi, sempre in materia energetica, sia in Italia che all'estero.

L'attività di ricerca svolta è documentata dalla produzione di un centinaio di lavori scientifici pubblicati su riviste internazionali e italiane e su atti di convegni.

*Arch. Caterina Gargari      Curriculum Vitae*

Caterina Gargari, Laureata in Architettura presso la facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze, dottore di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, svolge attività di ricerca presso il Dipartimento DESTEC dell'Università di Pisa sulle tematiche della progettazione sostenibile con particolare riguardo alla qualificazione energetica e alla valutazione di impatto ambientale di materiali e edifici. Ha iniziato la sua attività di ricerca partecipando a numerosi progetti europei sulla progettazione ambientale, il risparmio e l'efficienza energetica, l'utilizzo di energie rinnovabili, con particolare riferimento alla progettazione in clima mediterraneo. Dal 2004 si occupa nello specifico di Valutazione delle prestazioni ambientali dei materiali da costruzione secondo la metodologia LCA e dal 2006 è membro stabile, nominato da UNI, del tavolo di lavoro CEN TC 350 "Sustainability of Construction Works".