



Ricerca di Sistema elettrico

L'uso della vegetazione per aumentare l'efficienza energetica degli edifici e l'impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile: estensione dei risultati

Campiotti C.A., Giagnacovo, G. Latini A., Margiotta F., Nencini L.,
Pazzola L., Scoccianti M.

L'uso della vegetazione per aumentare l'efficienza energetica degli edifici e l'impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile

Analisi microclimatiche per il quadrimestre 1 settembre 2018 – 31 dicembre 2018

Campiotti C.A., Giagnacovo G., Latini A., Margiotta F., Nencini L., Pazzola L., Scoccianti M.
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: D1 - Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: C. Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Indice

| | |
|---|----|
| SOMMARIO..... | 4 |
| 1 INTRODUZIONE..... | 5 |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI..... | 5 |
| 2.1 SERRA BIOCLIMATICA..... | 5 |
| 2.1.1 <i>Calcolo flusso energetico solare</i> | 5 |
| 2.1.2 <i>Captazione solare superficie opaca</i> | 5 |
| 2.1.3 <i>Captazione solare effettiva di un componente trasparente</i> | 6 |
| 2.1.4 <i>Calcolo degli apporti energetici derivanti dalla serra solare</i> | 7 |
| 2.2 PARETE VERDE..... | 9 |
| 2.2.1 <i>Analisi parametro CO₂</i> | 9 |
| 2.2.2 <i>Interazione tra temperatura e umidità</i> | 9 |
| 2.2.3 <i>Analisi parete verde: correlazioni</i> | 10 |
| 2.2.4 <i>Analisi radiazione solare nel periodo settembre 2018-31 dicembre 2018</i> | 14 |
| 2.2.5 <i>Analisi del flusso termico non entrante (periodo: ottobre 2017 - settembre 2018)</i> | 18 |
| 2.2.5.1 <i>Valutazione della costante verde (K_v)</i> | 27 |
| 2.2.5.2 <i>Valutazione del coefficiente di scambio convettivo (H_e)</i> | 31 |
| 2.2.6 <i>Analisi temperature superficiali del tetto verde periodo settembre 2018-31 dicembre 2018</i> | 39 |
| 3 CONCLUSIONI..... | 40 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | 41 |

Sommario

Si riportano i dati raccolti durante il periodo temporale 1 ottobre 2018 - 31 dicembre 2018, in accordo con la configurazione sperimentale e di monitoraggio climatico riportata nel Report 2018-PAR 2017. L'attività di ricerca che ha caratterizzato il trimestre è stata principalmente focalizzata sull'analisi dei dati relativi alle interazioni tra i parametri: radiazione solare, temperatura e umidità dell'aria esterna ed interna al "gap" tra la parete vegetale e l'edificio, temperatura superficiale delle pareti dell'edificio dimostrativo. Inoltre, l'analisi ha preso in considerazione anche le variazioni di CO₂ in funzione della crescita vegetale del verde parietale e sia i profili di temperatura nei confronti del terrazzo dell'edificio rispetto alla misura della temperatura superficiale della vegetazione e rispettivamente del terrazzo sia inverdito che privo di vegetazione. Sono riportati anche i dati nei confronti dei parametri di temperatura e del comportamento termico del prototipo di serra bioclimatica disposto sulla facciata di sud ovest dell'edificio dimostrativo.

1 Introduzione

I risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione riferiti all'integrazione di vegetazione sugli edifici ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica, sviluppata sulla piattaforma dimostrativa del Centro Casaccia dell'ENEA, nel periodo 1 ottobre 2018-31 dicembre 2018, sono stati focalizzati principalmente sull'approfondimento dei rilievi e delle considerazioni scientifiche già riportate nel precedente Report 2018-PAR 2017 [1]. In particolare, accanto al rilevamento dei parametri microclimatici nei confronti dei sistemi-prototipo costituiti dalla parete vegetale e dal terrazzo verde, l'attività di ricerca e sperimentazione ha previsto durante il trimestre l'analisi dei risultati microclimatici ed energetici sul prototipo di serra bioclimatica inserita sulla facciata di sud ovest dell'edificio dimostrativo. L'analisi microclimatica ha previsto anche l'esame dei parametri di radiazione solare, temperatura dell'aria, temperatura superficiale dei muri esterni, umidità relativa del "gap" tra la parete verde e le pareti dell'edificio. Sotto il profilo biologico sono stati analizzati i risultati dei livelli di CO₂ (anidride carbonica) associati alla vegetazione, tenuto conto della capacità di sequestro della CO₂ durante il periodo di crescita delle essenze vegetali [2]. Sono state svolte anche una serie di correlazioni che hanno confermato i risultati già ottenuti con il Report 2018-PAR 2017 sulle potenzialità della vegetazione rispetto al microclima esterno all'edificio dimostrativo. I dati rilevati sono stati, inoltre, utilizzati per effettuare una serie di analisi energetiche da parte dell'Università di Pisa.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Serra bioclimatica

Sono stati calcolati gli apporti solari che penetrano nell'ufficio adiacente alla serra solare. Da sottolineare che l'analisi degli apporti solari sulla temperatura interna dell'ufficio non hanno tenuto conto dell'effetto dei ponti termici della muratura e del coefficiente di accoppiamento termico per trasmissione tra ambiente interno ed esterno in relazione alla serra solare. Il risultato di calcolo per i giorni rappresentativi del mese di novembre e dicembre è un valore indicativo per dare l'ordine di grandezza degli apporti termici dovuti alla serra e sono basati su dati di input rilevati dalla nostra stazione di monitoraggio. L'analisi ha previsto un calcolo dinamico per analizzare l'andamento degli apporti termici durante un giorno di riferimento.

2.1.1 Calcolo flusso energetico solare

Ciascun componente edilizio che delimita verso l'esterno l'ambiente climatizzato (pedice k) è investito da un flusso di calore di origine solare, che è stato calcolato in accordo con la seguente equazione:

$$\phi_{sol,k} = F_{sh,k} * A_{sol} * I_{sol,k} \quad (W)$$

$F_{sh,k}$: fattore di riduzione per ombreggiatura = 1

$A_{sol,k}$: area captazione solare effettiva.

$I_{sol,k}$ = radiazione solare rilevata rispetto all'orientamento della superficie trasparente.

2.1.2 Captazione solare superficie opaca

Area di captazione solare effettiva di un componente opaco:

$$A_{sol,op} = \alpha_{sol,c} * R_{se} * U_c * A_c$$

$\alpha_{sol,c}$: fattore di assorbimento solare del componente opaco, che può essere assunto pari a 0.3 per colore chiaro della superficie esterna = 0.3 .

R_{se} : resistenza termica superficiale esterna del componente edilizio, per la quale, secondo la norma UNI EN

ISO 6946:2008, si può assumere il valore di 0.04 m²K/W, qualunque sia l'angolo di inclinazione della superficie sul piano orizzontale.

Uc: è la trasmittanza termica del componente edilizio opaco [W/(m²K)] = 0.63 .

Ac è l'area proiettata del componente edilizio opaco [m²].

Tabella 1 Captazione solare effettiva superficie opaca

Tabella 1

Captazione solare effettiva Superficie opaca

| <i>αsol,c</i> | <i>Rse</i> | <i>Uc</i> | <i>Ac</i> | <i>A sol opaco</i> |
|---------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| | <i>m²K/w</i> | <i>m²K/w</i> | <i>m²</i> | |
| 0,3 | 0,04 | 0,63 | 15 | 0,1134 |

Flusso di calore di origine solare opaca:

$$\phi_{sol, op, k} = F_{sh, k} * A_{sol, op} * I_{sol, k} \quad (W)$$

2.1.3 Captazione solare effettiva di un componente trasparente

$$A_{sol, tr} = F_{sh} * g_{gl} * (1 - F_f) * A_{w, p}$$

Fsh è il fattore di riduzione degli apporti solari per ombreggiamento relativo all'utilizzo di schermature mobili quali tende o veneziane.

ggl è la trasmittanza di energia solare totale della parte trasparente del componente .

Ff è la frazione di area relativa al telaio, data dal rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato, il cui complemento a 1 è detto fattore di correzione dovuto al telaio.

Aw,p è l'area proiettata totale del componente trasparente, cioè l'area del vano finestra [m²].

Tabella 2 Captazione solare effettiva Superficie policarbonato:

Tabella 2

Captazione solare effettiva superficie policarbonato

| <i>Fsh</i> | <i>ggl</i> | <i>Ff</i> | <i>Awp</i> | <i>Asol, tr</i> |
|------------|------------|-----------|------------|-----------------|
| 1 | 0,8 | 0,1 | 1,112 | 0,80064 |

Flusso di calore di origine solare trasparente:

$$\phi_{sol, op, k} = F_{sh, k} * A_{sol, tr} * I_{sol, k} \quad (W)$$

2.1.4 Calcolo degli apporti energetici derivanti dalla serra solare

Gli apporti solari che penetrano nell'ambiente climatizzato attraverso la serra solare (Q_{st}) sono stati considerati come la somma di due contributi:

$$Q_{stot} = Q_{sdir} + Q_{sindir}$$

dove Q_{sdir} sono gli apporti solari diretti attraverso la parete divisoria e Q_{sindir} sono gli apporti solari indiretti. L'energia solare diretta Q_{sdir} è la somma degli apporti solari entranti in ambiente climatizzato attraverso gli elementi di partizione trasparenti (tr) e opachi (op):

$$Q_{sdir, tr} = (1 - F_{ts}) * g_e * A_{sol(vetro)} * I_p$$

$$Q_{sdir, op} = (1 - F_{ts}) * g_e * A_{sol(opaco)} * I_p$$

- F_{ts} fattore telaio dei serramenti della serra [-] .
- g_e trasmittanza solare totale del policarbonato compatto della serra .
- I_p irradianza solare totale incidente sulla parete di partizione tra ambiente interno e serra solare [W/m²] .

$$Q_{s, indir} = (1 - b_{temp}) * ((1 - F_{ts}) * g_e * A_{sol(vetro)} - (1 - F_{ts}) * g_e * A_{sol(opaco)})$$

b_{temp} = fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente interno (climatizzato) e serra solare:

$$b_{temp} = \frac{(\partial_{int} - \partial_{serra})}{(\partial_{int} - \partial_{est})}$$

con :

∂_{int} = temperature ambiente interna (18°C).

∂_{serra} = temperatura interna serra solare.

∂_{est} = temperature esterne.

Di seguito si riportano i grafici relativi agli apporti solari registrati con il prototipo di serra bioclimatica (Figura 1., Figura 2., Figura 3.). Le tabelle riportate evidenziano i valori dei parametri energetici (Tabella 3, Tabella 4.).

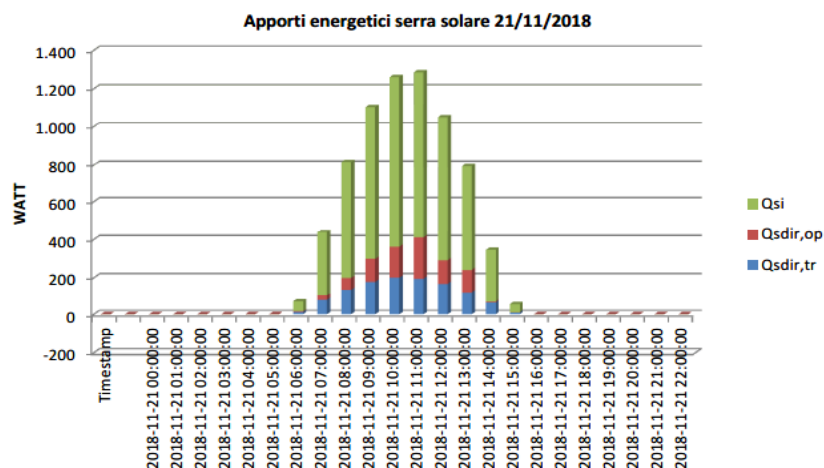


Figura 1.
Apporti energetici serra solare 4/12/2018

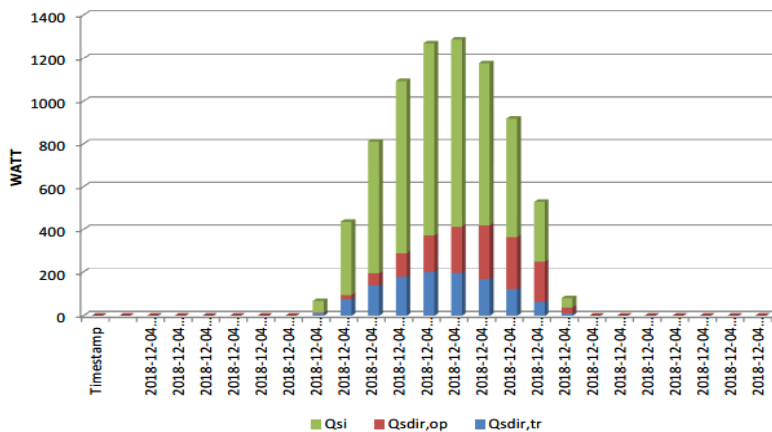


Figura 2.

Confronto apporto solare novembre dicembre 2018

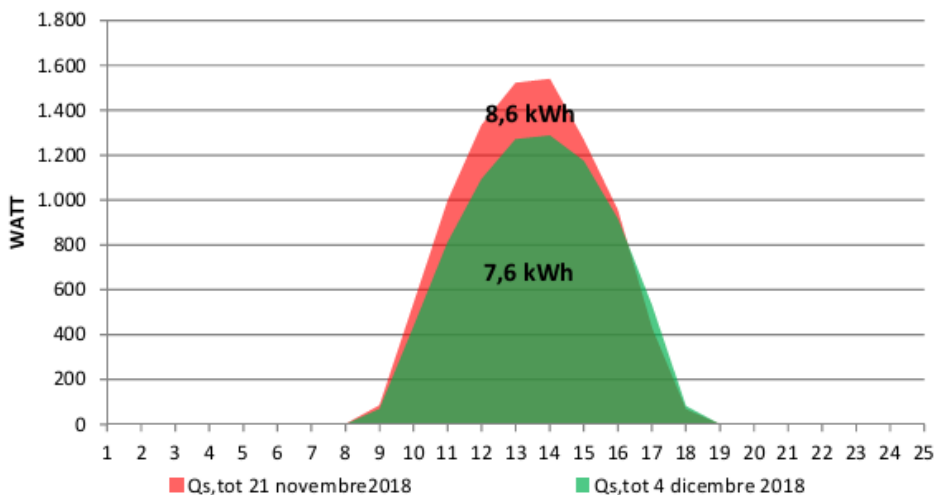


Figura 3.

Tabella 3. Valori energetici serra bioclimatica

| | Qsdir,tr | Qsdir,op | Qsdir | Qsind | Qs,tot |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Watt | Watt | Watt | Watt | Watt |
| 21/11/2018 | 1152,820 | 836,743 | 1989,563 | 6674,007 | 8663,570 |
| 4/12/ 2018 | 1162,1 | 1284,2 | 2446,4 | 5216,5 | 7662,0 |

Tabella 4. Percentuale di apporto energetico nell'ufficio rispetto all'energia entrante nella serra

| | Energia entrante serra solare | Qs, tot | % |
|------------|-------------------------------|---------|------|
| | kWh | Kwh | |
| 21/11/2018 | 60,7 | 8,7 | 14,3 |
| 04/12/2018 | 67, | 7,6 | 11,2 |

2.2 Parete verde

2.2.1 Analisi parametro CO2

La vegetazione, pertanto, se razionalmente utilizzata può rappresentare uno strumento valido per regolare, sebbene parzialmente, in modo naturale la temperatura dell'aria esterna all'edificio, come si evidenzia dalle variazioni della quantità di CO2 mostrata dalle

Figura 5.. I dati risultano sostanzialmente coerenti per la parete sud est e di sud ovest, per quanto riguarda i livelli di CO2 in funzione della crescita vegetale.

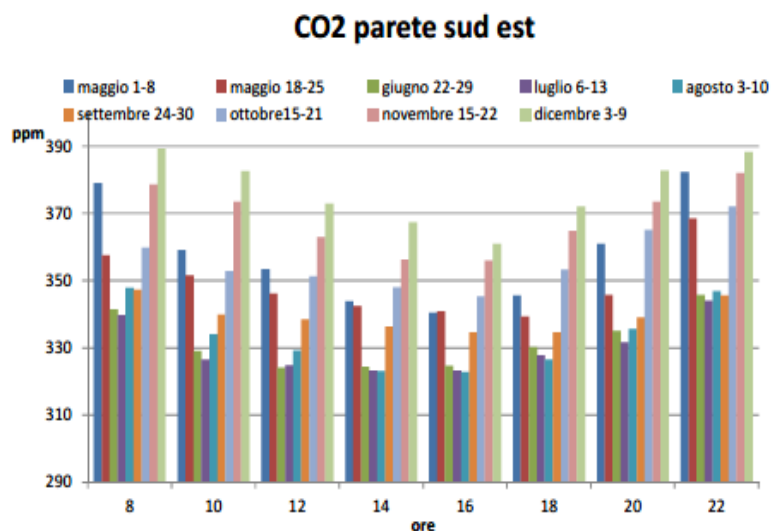


Figura 4.

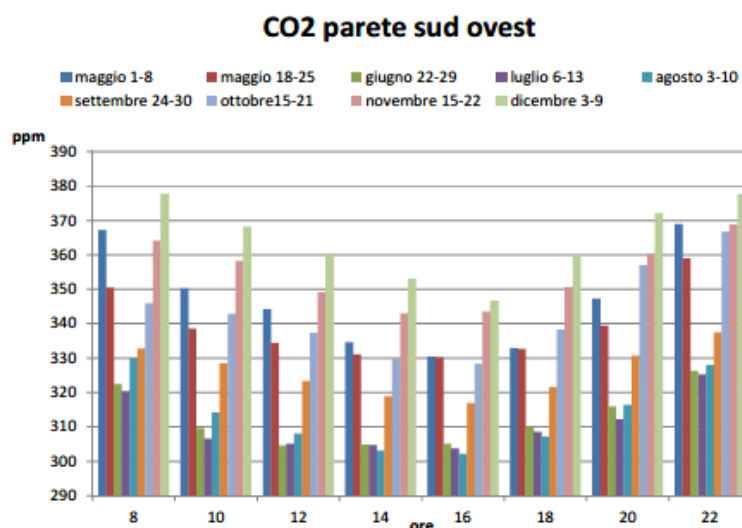


Figura 5.

Dai grafici (Figura 4.,Figura 5.) si osserva che nei mesi autunnali, con la vegetazione priva di foglie e quindi con ridotta o nulla attività fotosintetica, la concentrazione di CO2 risulta più elevata rispetto ai mesi primaverili ed estivi. Il dato si evidenzia per entrambe le esposizioni delle pareti dell'edificio dimostrativo.

2.2.2 Interazione tra temperatura e umidità

Negli istogrammi sotto riportati si evidenzia che la temperatura (AT03) nell'intercapedine (gap) è sempre inferiore a quella esterna alla parete (AT02), sia di giorno che di notte, mentre l'umidità relativa all'interno della intercapedine (RH03) è più alta, rispetto a quella esterna, sia nelle prime ore notturne che nelle ore diurne. nelle ore pomeridiane e serali non si evidenziano differenza tra l'umidità esterna e quella interna alla parete verde (gap). Per quanto riguarda la temperatura dell'aria, quella rilevata nel gap (AT03) è sempre inferiore a quella esterna (AT02) sia di notte che di giorno. Il comportamento si evidenzia sia per la parete esposta a sud est che per quella esposta a sud ovest (Figura 6.,Figura 7.).

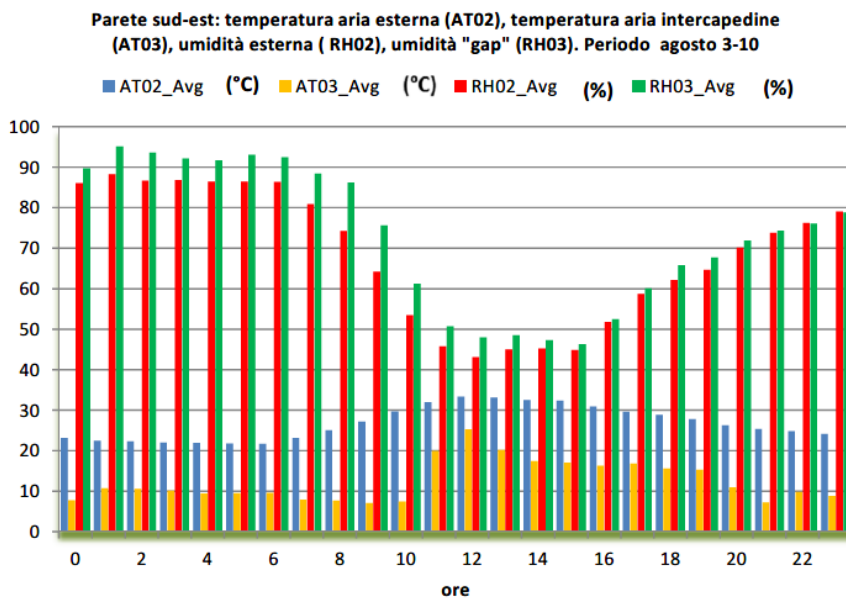


Figura 6.

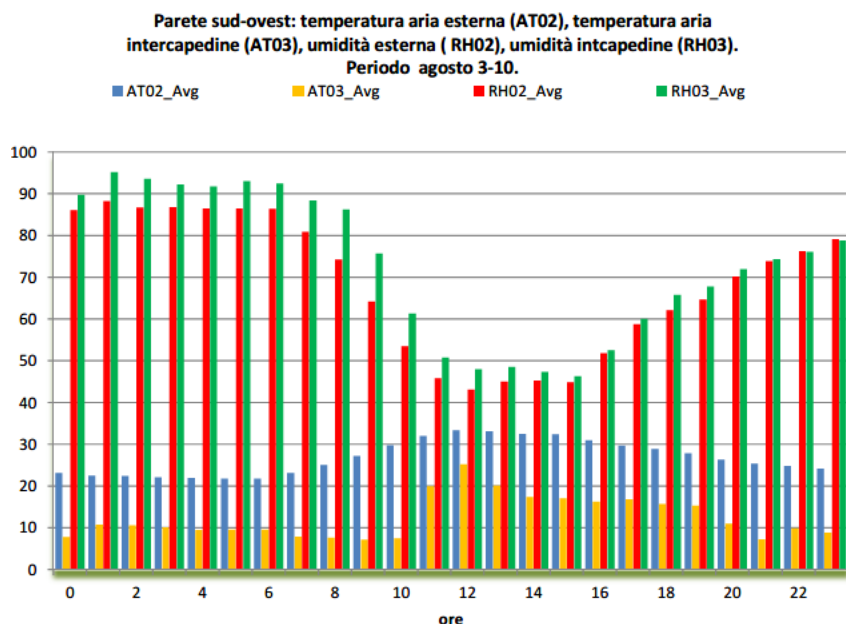


Figura 7.

2.2.3 Analisi parete verde: correlazioni

Per un quadro più completo dell'impiego dell'elemento vegetale ai fini del miglioramento del microclima degli edifici, sono state effettuate una serie di correlazioni che hanno confermato e rafforzato le valutazioni già sviluppate con il precedente Report 2018-PAR 2017 [1]. I dati riportati nei grafici, sia per la parete sud-est che per la parete sud-ovest, evidenziano chiaramente l'influenza della coltre vegetale sulla riduzione della

radiazione solare che, in ultima analisi, si traduce in una riduzione del flusso di calore che penetra nell'ambiente interno e conseguentemente in una diminuzione della temperatura superficiale dei muri della piattaforma dimostrativa, soprattutto durante i periodi di caldo intenso (Figura 8.,Figura 9.,Figura 10.,Figura 11.,Figura 12.,Figura 13.Figura 14.Figura 15.) Nella parete esposta a sud ovest si rileva che la differenza di temperatura tra la parete schermata e non schermata dalla parete verde, in settembre, raggiunge circa 15°C con una radiazione su piano verticale di circa 650 W/m² con valore R2= 0,97; in dicembre invece, quando la parete vegetale è priva di vegetazione, la differenza tra le temperature superficiali è di circa 4 °C con una radiazione solare, su piano verticale, di circa 850 W/m² e il valore di R2 = 0,54 (Figura 8.Figura 11.)

Sulla parete di sud est, in settembre la differenza delle temperature, tra parete schermata e non schermata dalla vegetazione è di 16 °C con una radiazione solare di circa 800 W/m² e un valore di R2 = 0,87 mentre a dicembre la differenza è di circa 7°C con una radiazione di 800 W/m² (Figura 12.Figura 15.). Osservando i grafici, si nota come tra settembre e dicembre la retta di tendenza "y" diminuisce il coefficiente angolare, ovvero all'aumentare della radiazione solare diminuisce la differenza delle temperature superficiali del muro.

Correlazioni per la parete sud ovest

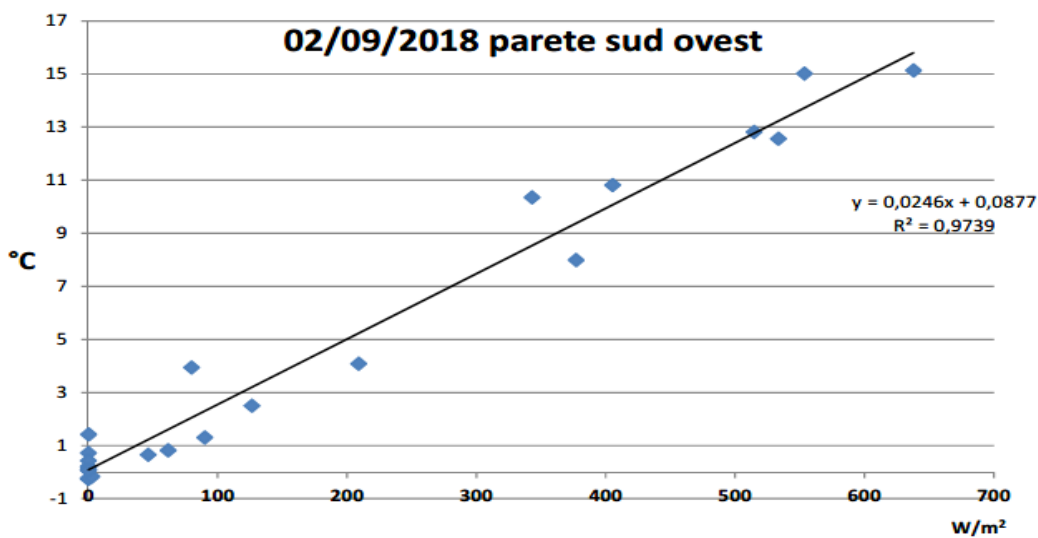
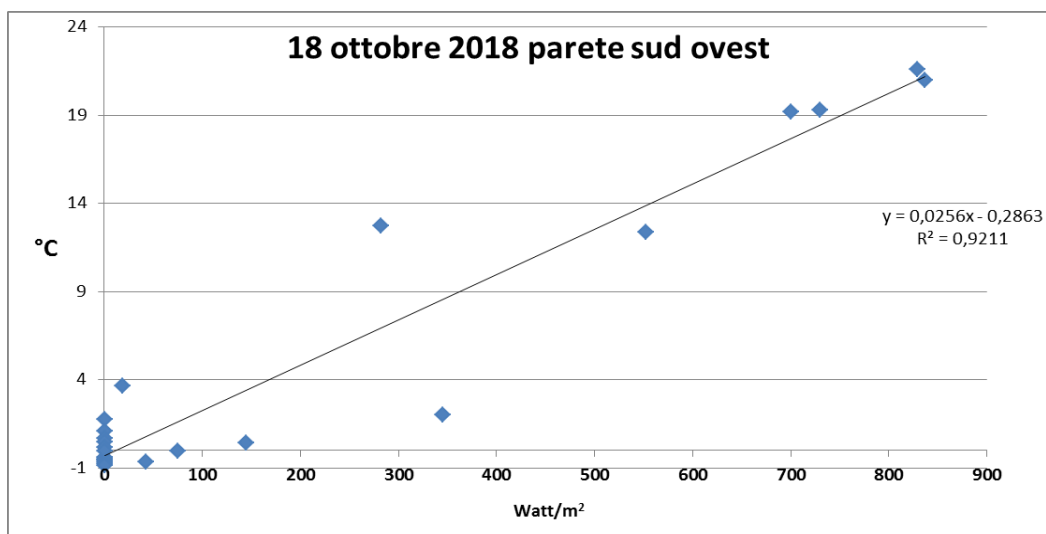
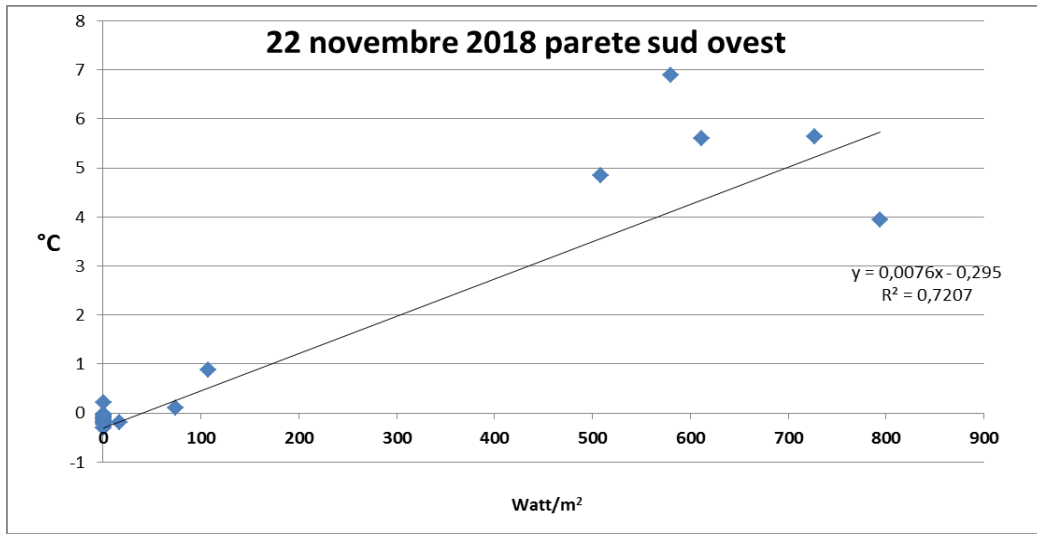


Figura 8.





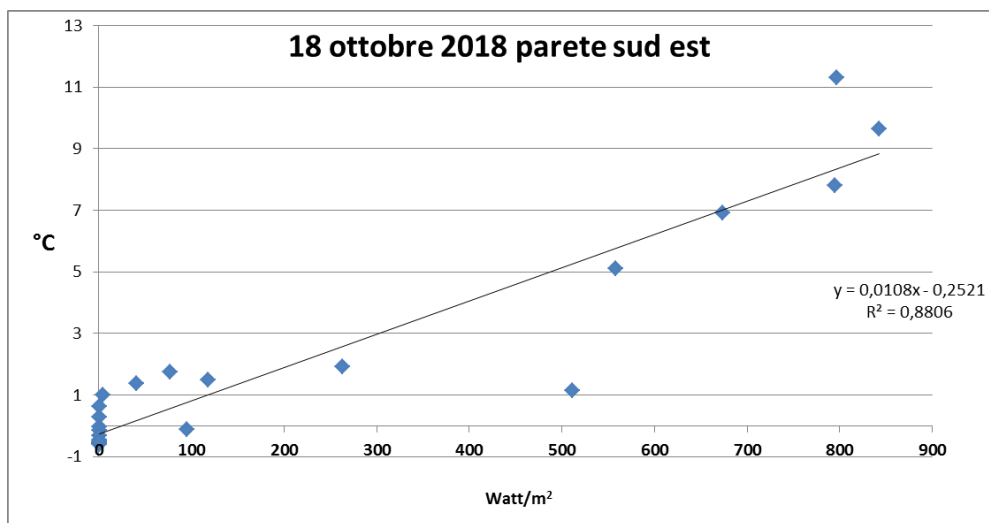


Figura 13.

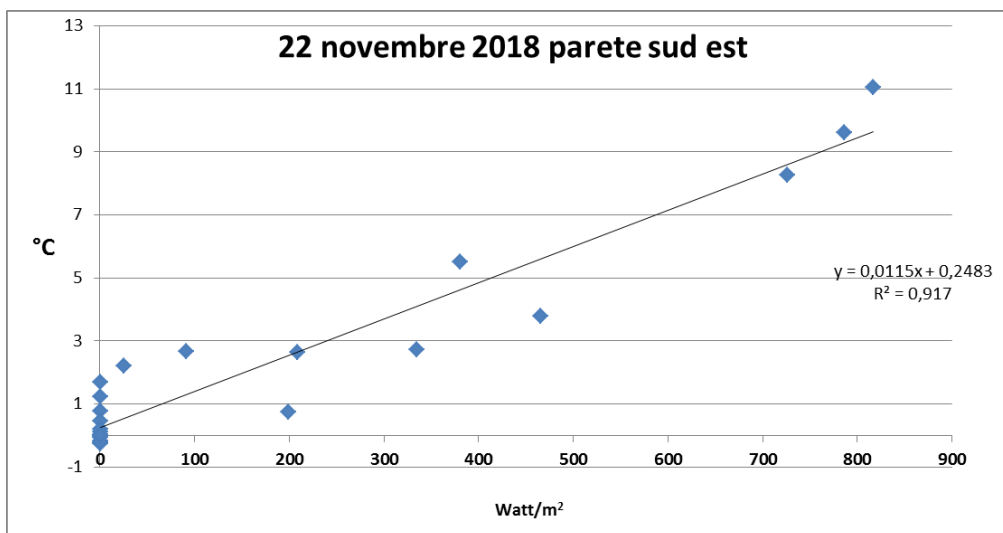


Figura 14.

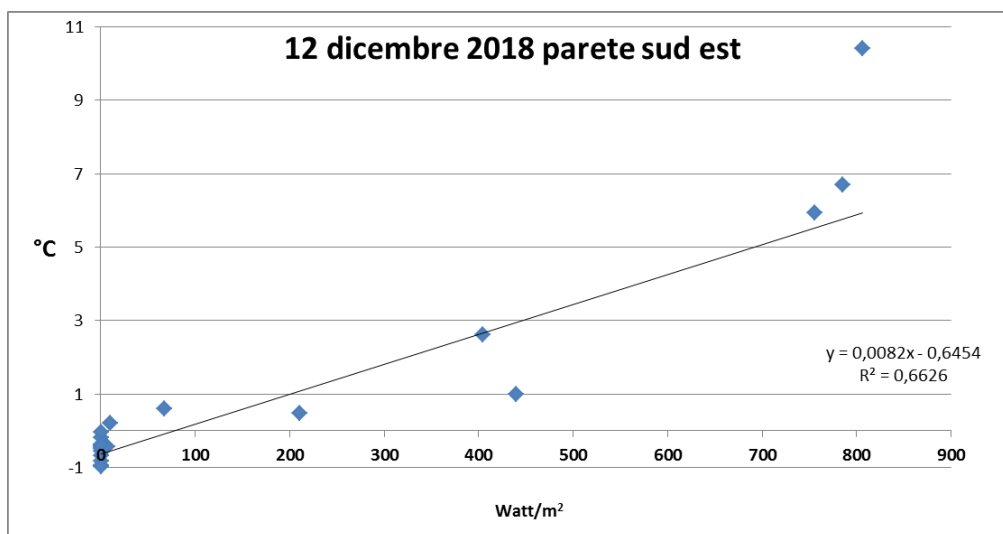


Figura 15.

2.2.4 Analisi radiazione solare nel periodo settembre 2018-31 dicembre 2018

Il periodo autunno-inverno coincide con il periodo in cui essenze vegetali caducifoglie perdono le foglie. Questo fenomeno fisiologico della pianta modifica la composizione fogliare della parete verde, in particolare rispetto alla schermatura della radiazione solare incidente e conseguentemente sui flussi di calore che caratterizzano l'edificio. Risulta evidente come la riduzione della massa fogliare, causata dalla perdita fogliare, riduce le differenze relative ai valori della radiazione incidente e conseguentemente gli effetti di schermo sulle facciate murali dell'edificio. I grafici sono riferiti a una settimana rappresentativa per ogni mese e, nello specifico, i periodi considerati sono stati i seguenti:

- 24-30 settembre 2018
- 15-21 ottobre 2018
- 19-25 novembre 2018
- 3-9 dicembre 2018

I grafici analizzano la radiazione solare, su piano verticale, davanti e dietro la parete verde, rispettivamente per la parete di sud-ovest (sensori GR02,GR03) e per la parete di sud-est (sensori GR04,GR05), le temperature superficiali del muro schermato dalla parete verde (TS03) e non schermato dalla parete verde (TS05) e per quella di sud-ovest (TS02 e TSO4) rispettivamente per il muro schermato (Figura 17.,Figura 19.,Figura 21.,Figura 23.) e non coperto dalla parete verde per quella di sud-est (Figura 16.,Figura 18.Figura 20., Figura 22.). Le sigle riportate fanno riferimento ai sensori disposti per lo studio della parete verde, già riportati nel Report 2018-PAR 2017 [1].

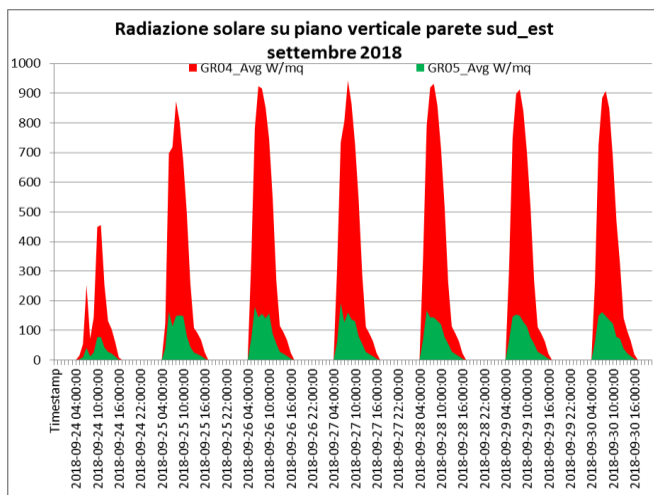


Figura 16.

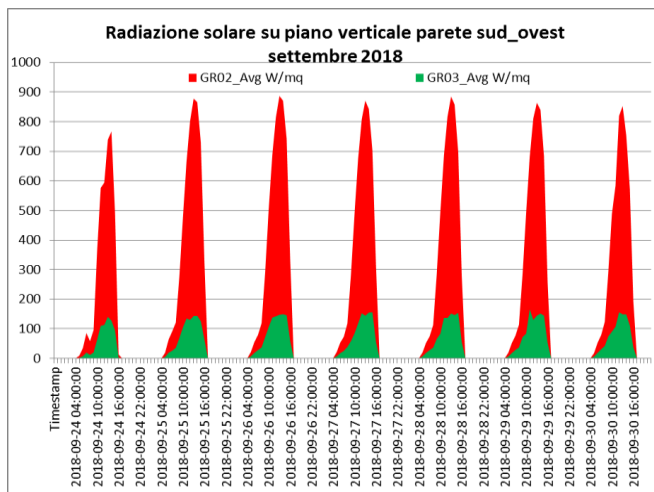


Figura 17.

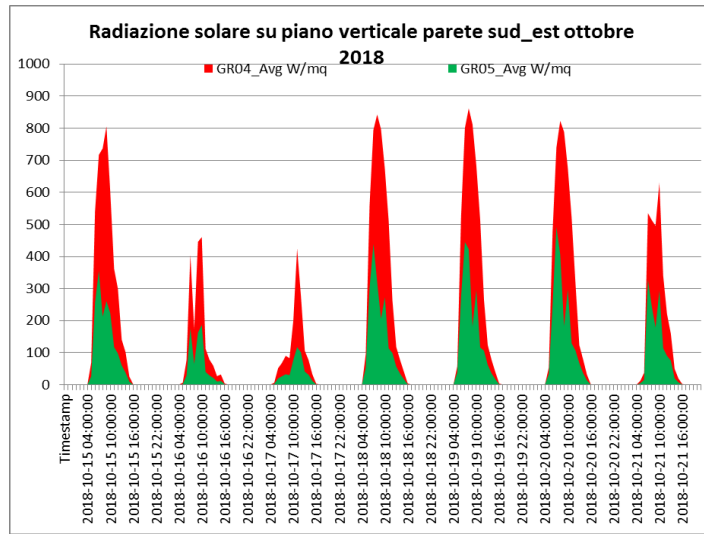


Figura 18.

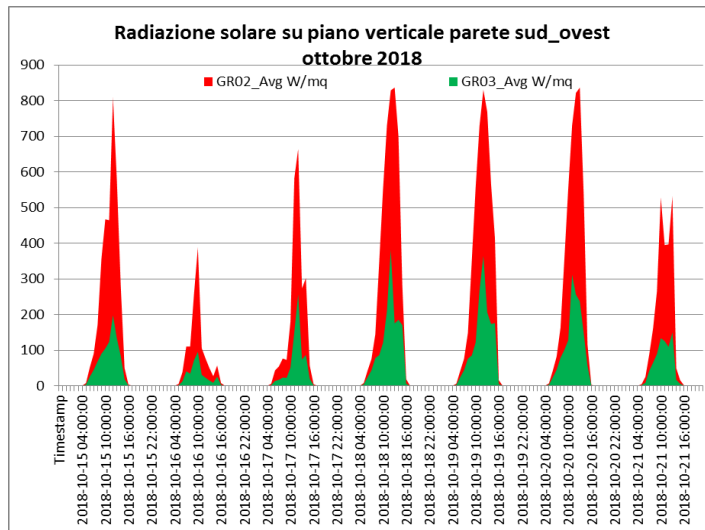


Figura 19.

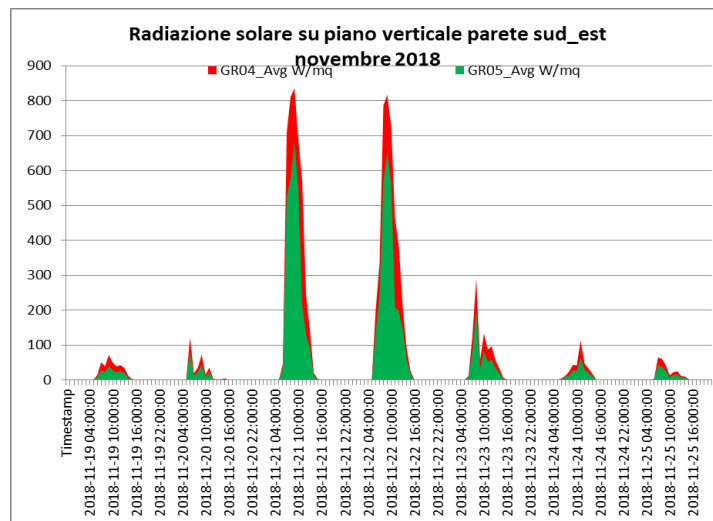


Figura 20.

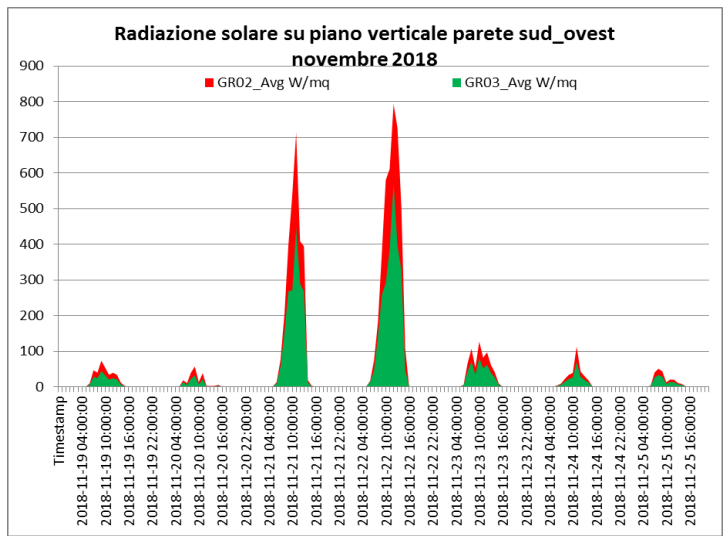


Figura 21.

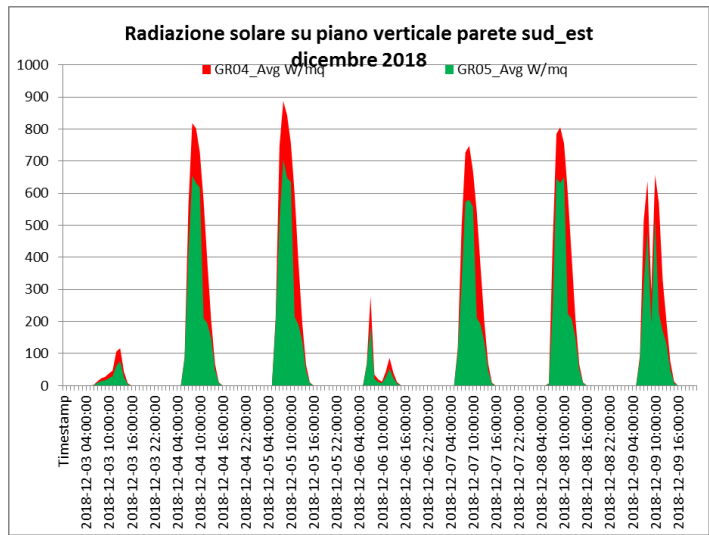


Figura 22.

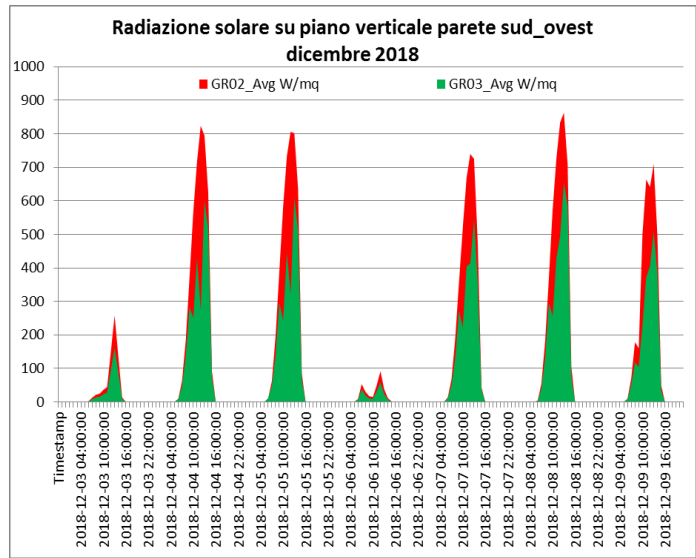


Figura 23.

Dall'analisi degli andamenti della radiazione solare nei periodi considerati risulta evidente che nei periodi in cui è presente la massa fogliare, la schermatura solare è responsabile di una riduzione di circa l'80% della radiazione solare. Nei periodi ottobre e novembre invece, la schermatura solare da parte della massa fogliare si riduce fino a raggiungere il 15% a dicembre, con le piante ormai prive della massa fogliare. Questo dato sottolinea che la riduzione della schermatura solare da parte delle piante, utile durante il periodo estivo per la riduzione della temperatura dell'edificio, risulta ancora presente nel periodo invernale presente, sebbene in misura ridotta, per la presenza delle ramificazioni vegetali. Pertanto, la vegetazione presente sulle pareti consente anche nei periodi in cui non è presente una forte massa fogliare (dicembre), una leggera schermatura che, tuttavia, è sufficiente a mantenere una temperatura superficiale (TS04) delle pareti dell'edificio superiore a quella delle pareti prive di vegetazione (TS02) (Figura 24. Figura 25., Figura 26., Figura 27.). Tale rilevamento mette in evidenza l'importanza di selezionare delle essenze vegetali in grado di favorire il passaggio della radiazione solare sia nel periodo estivo che nel periodo invernale.

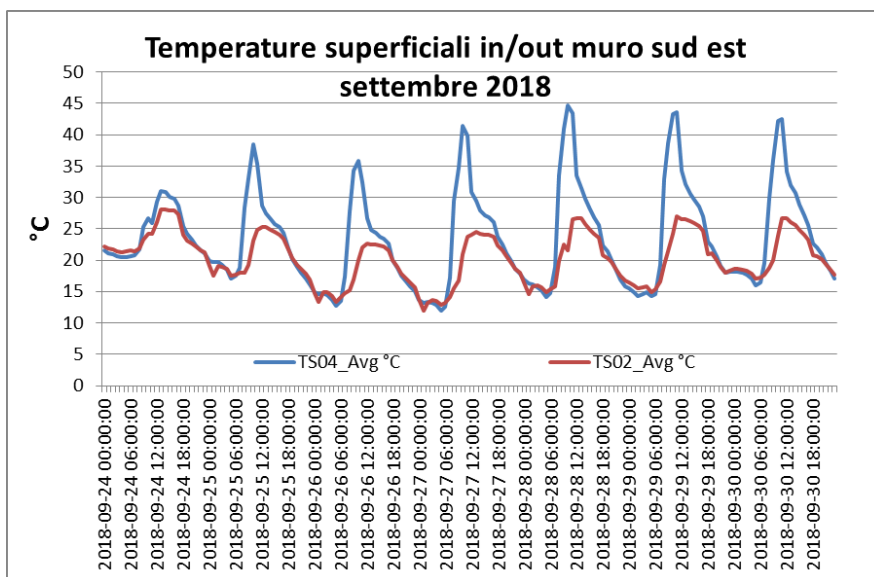


Figura 24.

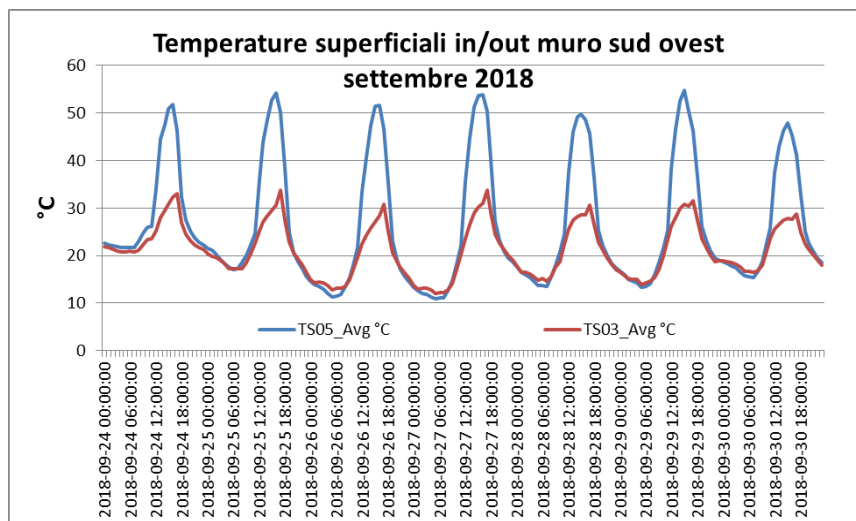


Figura 25.

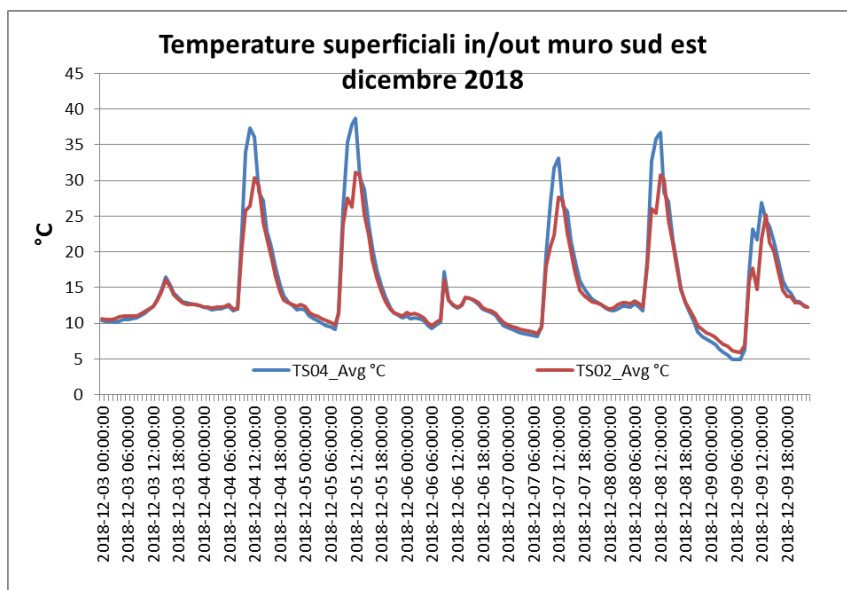


Figura 26.

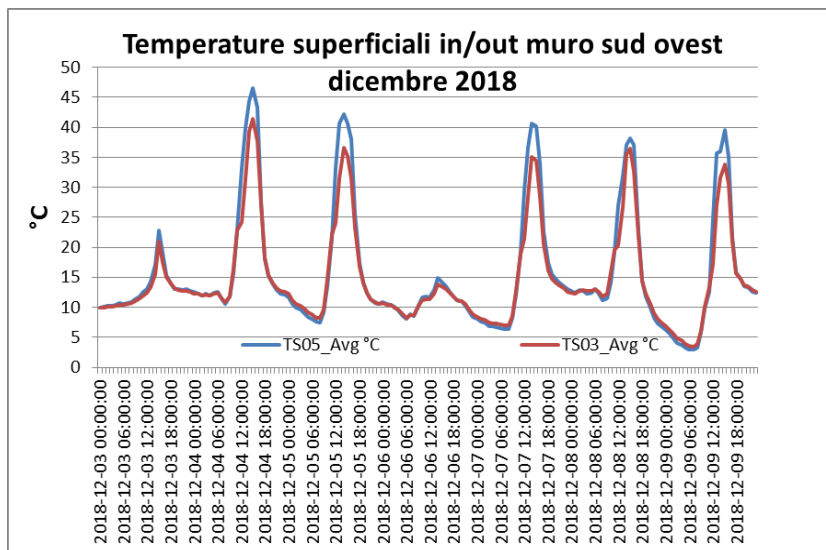


Figura 27.

2.2.5 Analisi del flusso termico non entrante (periodo: ottobre 2017 - settembre 2018)

Considerando che le pareti verdi sono intese come un complesso sistema in perenne mutamento, dal momento che il verde stesso è un elemento vivo e dinamico e si sottrae alle regole di un’analisi prestazionale pensata e normalizzata per involucri tradizionali, e vista la variabilità delle sue prestazioni in relazione alle diverse stagionalità, anche le caratteristiche termo-fisiche ed ambientali dell’edificio devono essere considerate e valutate in funzione delle variabilità del verde insieme a quelle delle condizioni climatiche esterne e dei parametri ambientali che caratterizzano il sito.

Per questi motivi lo studio di ricerca è stato condotto procedendo con analisi combinate di tutti i fattori, in modo da capire le relazioni che possono intercorrere tra i diversi parametri termici, agronomici e tecnologici e per comprendere in che modo le superfici verdi in questione siano in grado di fornire un contributo in termini energetici all’edificio su cui vengono collocate.

Infatti, già durante la scorsa annualità è stato possibile analizzare gli andamenti delle temperature superficiali interne, con delle termocoppie non appartenenti allo stesso sistema di monitoraggio di tutti gli altri sensori, e quelle esterne dell’edificio, considerando sia superfici interessate dall’effetto della coltre vegetale che

quelle nude; l'equazione del *flusso termico non entrante* (ϕ) è stata valutata tenendo conto, per quanto riguardava la velocità del vento v , dei dati relativi alla velocità del vento di tipo ambientale (WS_Mean) e non di quella all'interno dell'intercapedine tra la parete verde e l'edificio, vista l'assenza di anemometri.

Avendo quindi, in questa annualità, potuto disporre di ulteriori dati di monitoraggio rispetto alla scorsa è stato possibile riconsiderare l'equazione del *flusso termico non entrante* (ϕ) oltre che per la parete esposta a Sud-Ovest, anche per quella esposta a Sud-Est, entrambe soggette agli effetti della parete verde, tenendo conto però degli effettivi moti convettivi che si potrebbero generare all'interno dell'intercapedine tra la parete verde e l'edificio; ciò è dovuto alle differenti velocità del vento rilevate nella stessa intercapedine e misurate con quattro anemometri, WS02 e WS04 e WS03 e WS05 installati rispettivamente due al primo e due al secondo piano sulle pareti esposte a Sud-Ovest e a Sud-Est, e in considerazione del fatto che anche sulla parete esposta a Sud-Est è stata installata una stazione di monitoraggio equivalente all'altra, che ci ha consentito di avere tutti i dati necessari ai calcoli dei parametri che entrano in gioco nell'equazione del flusso termico.

È stato inoltre simulato, come si evince nella Figura 28 sotto riportata, il "calcolo dei parametri termici dinamici dei componenti edilizi secondo la norma UNI EN ISO 13786:2008" per poter stimare i valori di attenuazione e sfasamento e valutarne la coerenza o meno con gli andamenti delle temperature dell'aria e superficiali.

| Tipo di componente | | Chiusura verticale | | | | | | |
|-------------------------|--------|-----------------------------|-----------|------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|--|
| Stratigrafia (int-est) | s [cm] | ρ [kg/m ³] | μ [-] | c [J/kg°C] | λ [W/m°C] | R [m ² C/W] | opz. $\lambda \rightarrow R$ | |
| Strato liminare interno | | | | | | | 0.13 | |
| I Intonaco | 2.0 | 1200 | 18 | 1000 | 0.350 | | <input type="checkbox"/> | |
| II porotherm | 8.0 | 700 | 69 | 840 | 0.265 | | <input type="checkbox"/> | |
| III sugherite | 6.0 | 145 | 8 | 180 | 0.040 | | <input type="checkbox"/> | |
| IV aria | 2.0 | 1 | 200 | 1000 | | 0.16 | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| V porotherm | 12.0 | 700 | 69 | 840 | 0.265 | | <input type="checkbox"/> | |
| VI Intonaco | 3.0 | 280 | 24 | 1000 | 0.050 | | <input type="checkbox"/> | |
| VII | | | | | | | <input type="checkbox"/> | |
| VIII | | | | | | | <input type="checkbox"/> | |
| IX | | | | | | | <input type="checkbox"/> | |
| X | | | | | | | <input type="checkbox"/> | |
| Strato liminare esterno | | | | | | | 0.04 | |

| Parametro | Modulo |
|--|----------------------------|
| Ammettenza termica interna (γ_{ii}) | 3.211 W/(m ² K) |
| Ammettenza termica esterna (γ_{ee}) | 1.354 W/(m ² K) |
| Trasmittanza termica periodica (γ_{ie}) | 0.066 W/(m ² K) |
| Capacità termica areica interna (κ_i) | 45.0 kJ/(m ² K) |
| Capacità termica areica esterna (κ_e) | 19.5 kJ/(m ² K) |
| Resistenza termica (R) | 3.242 (m ² K)/W |
| Trasmittanza termica (U) | 0.308 W/(m ² K) |
| Fattore di attenuazione (f) | 0.214 |

| | |
|------------------------|-----------------------|
| Spessore (s) | 33.0 cm |
| Massa superficiale (m) | 181 kg/m ² |
| Sfasamento (ϕ) | 10.53 h |

Figura 28: Parametri termici dinamici del componente edilizio verticale

Essendo il *flusso termico non entrante per effetto della parete verde* dato dall'equazione:

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

dove:

U è la trasmittanza termica dell'elemento opaco,

K_v è la costante verde,

I è la radiazione solare incidente sulla superficie esterna,

h_e è il coefficiente di scambio convettivo,

sono stati ripetuti i calcoli sia della costante verde K_v che del coefficiente di scambio convettivo H_e sulla base dei nuovi e differenti valori della velocità del vento misurata all'interno dell'intercapedine che influenzano sia il valore del coefficiente dato dalla somma dei due coefficienti h_c e h_r , rispettivamente coefficiente di convezione e coefficiente di irraggiamento, che i valori delle Temperature Superficiali esterne dell'edificio, soggette e non agli effetti della parete verde, che determinano il valore di K_v dato dal rapporto delle due differenze tra la (T_{se}) temperatura superficiale della parete opaca non soggetta agli effetti della coltre vegetale e la (T_{sev}) temperatura superficiale della parete opaca soggetta agli effetti della coltre vegetale e tra la (T_{se}) temperatura superficiale della parete opaca non soggetta agli effetti della coltre vegetale e la (T_{ae}) temperatura dell'ambiente esterno. In particolare, per quanto riguarda il periodo compreso tra Ottobre 2017 e il 24 Aprile 2018, si è proceduto con l'analisi e la valutazione delle stesse tipologie di dati prelevati durante la prima annualità relativamente ai sensori installati sulla parete esposta a Sud-Ovest; nel periodo tra fine Aprile 2018 e fine Settembre 2018 è stato possibile analizzare e valutare dati anche per quanto riguarda l'orientamento Sud-Est.

Più nello specifico l'avanzamento dell'installazione dei punti di monitoraggio in base ai sensori che di volta in volta sono stati aggiunti fino ad ottenere la configurazione finale, nell'ultimo periodo, nel quale si è completata la piattaforma di sperimentazione necessaria all'attività di ricerca è relativo ai periodi così come indicati nella Tabella 5 di seguito riportata:

Tabella 5: Configurazioni relative all'avanzamento dell'installazione dei sensori

| 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 |

Facendo riferimento alla disposizione dei sensori secondo la *Prima Configurazione* si nota come la differenza tra la Temperatura Superficiale esterna No_PV (TS05 in rosso) e la Temperatura Superficiale esterna PV (TS01 e TS03 rispettivamente in verde ed in blu), relative alla parete esposta a Sud-Ovest, con il susseguirsi dei mesi, dal 1 ottobre fino al 24 aprile, diminuisca (vedi Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32), significando quindi che diminuendo il fogliame che filtra, i valori dei due parametri misurati sono sempre più vicini.

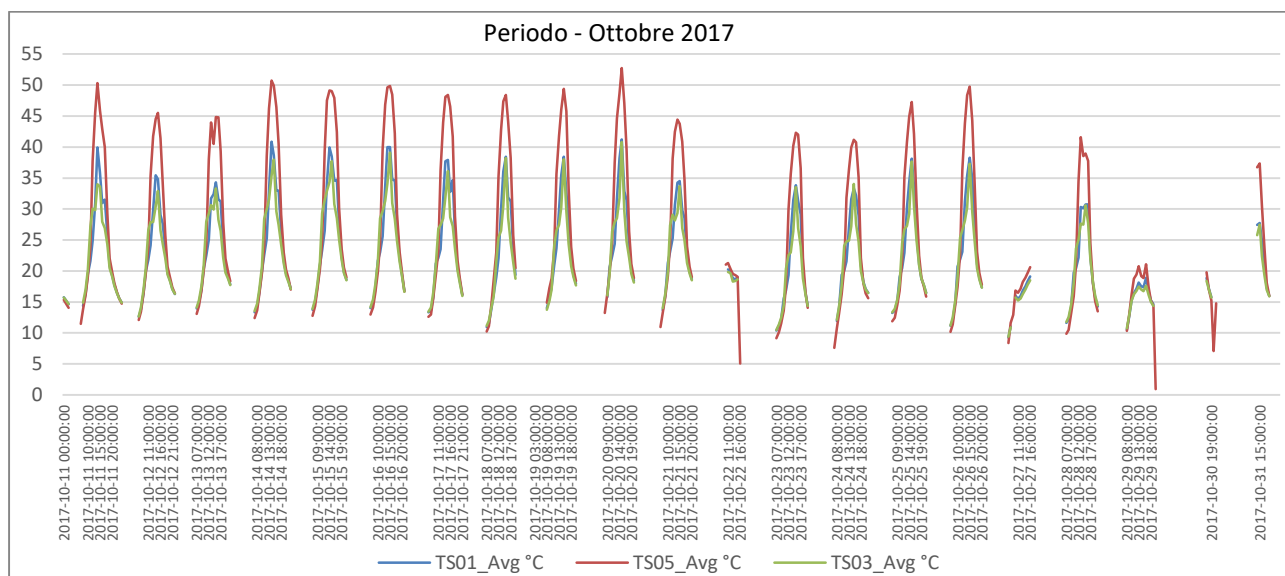


Figura 29: Temperature Superficiali esterne - SW - Ottobre 2017

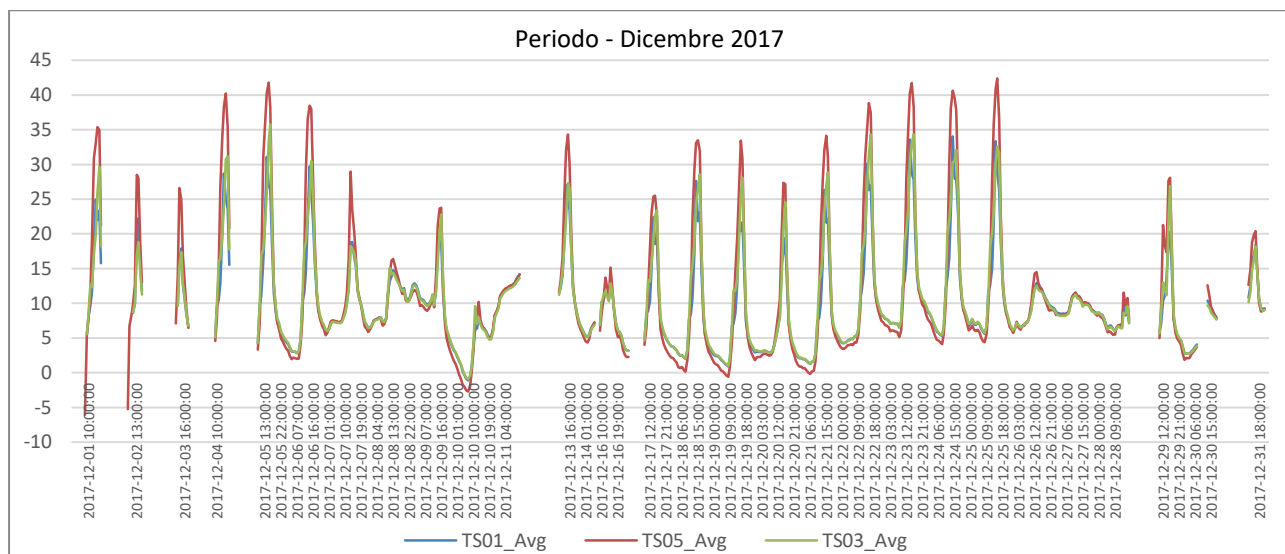


Figura 30: Temperature Superficiali esterne - SW - Dicembre 2017

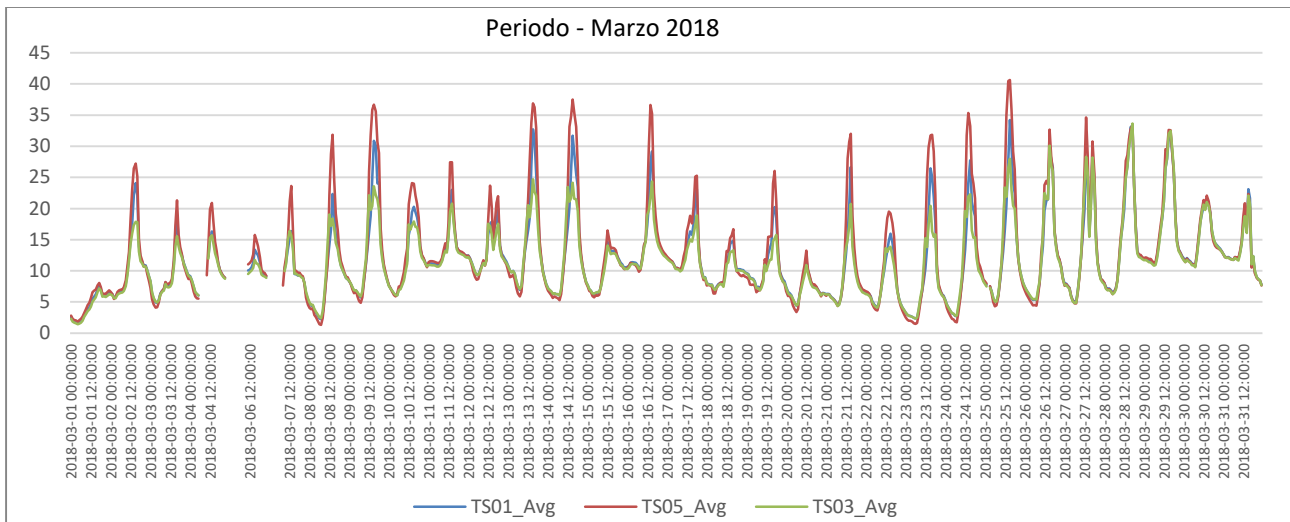


Figura 31: Temperature Superficiali esterne - SW - Marzo 2018

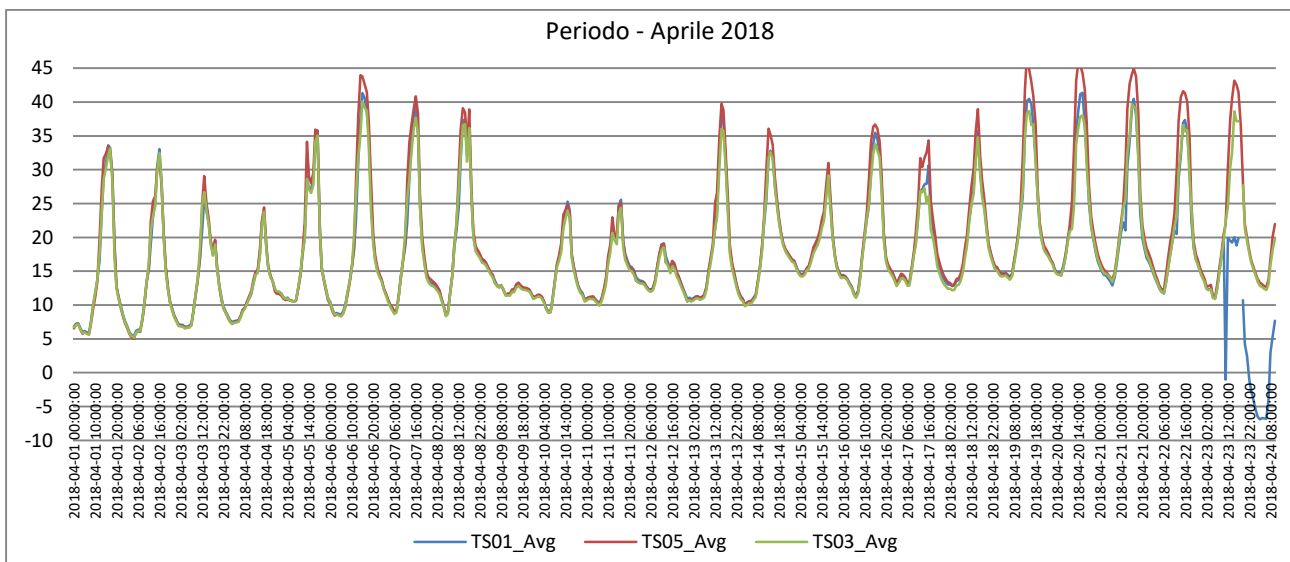


Figura 32: Temperature Superficiali esterne - SW - Aprile 2018

La disposizione dei sensori relativa alla *Seconda Configurazione*, dal 25 aprile al 19 giugno, ci consente di analizzare gli andamenti delle Temperature Superficiali esterne dell’edificio, soggette e non agli effetti della parete verde, sia per l’esposizione a Sud-Ovest che per quella a Sud-Est.

Gli andamenti delle temperature nelle Figura 33 e Figura 35 per i mesi di maggio e di giugno riferiti alla parete esposta a Sud-Ovest e quelli nelle Figura 34 e Figura 36 per i mesi di maggio e di giugno riferiti alla parete esposta a Sud-Est evidenziano come per entrambi gli orientamenti la differenza tra la Temperatura Superficiale esterna No_PV (TS05 in rosso) e la Temperatura Superficiale esterna PV (TS01 e TS03 rispettivamente in verde ed in blu) relativa a SW e la differenza tra la Temperatura Superficiale esterna No_PV (TS04 in blu) e la Temperatura Superficiale esterna PV (TS02 e TS06 rispettivamente in rosso e in verde) relativa a SE ricominci ad aumentare, in linea con la ricrescita della coltre vegetale.

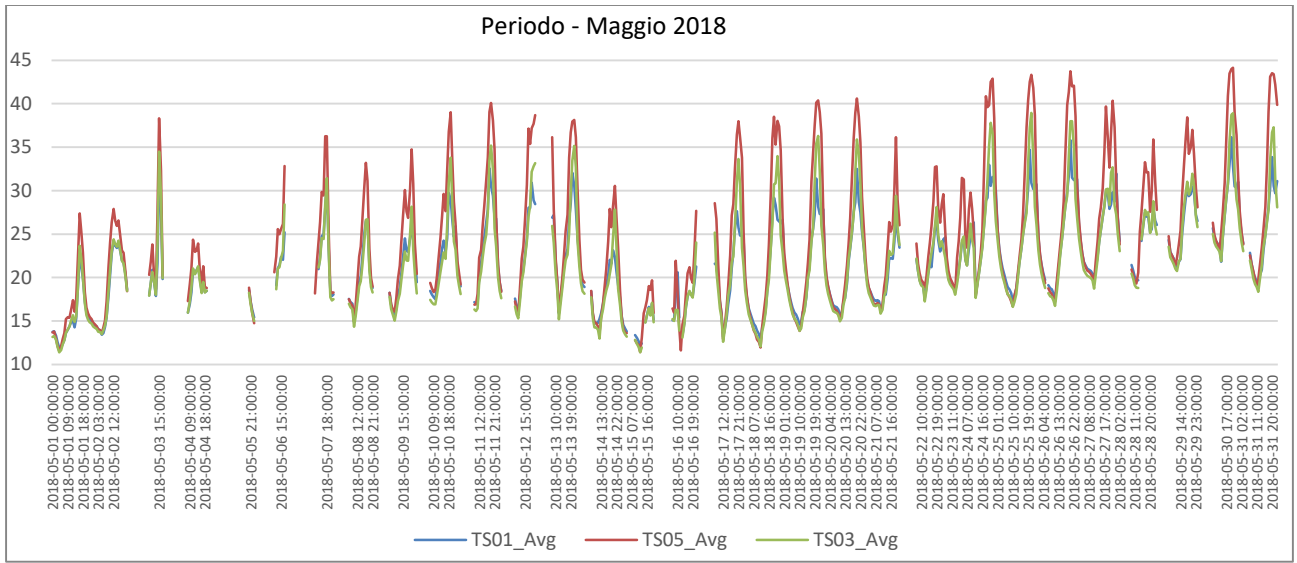


Figura 33: Temperature Superficiali esterne - SW - Maggio 2018

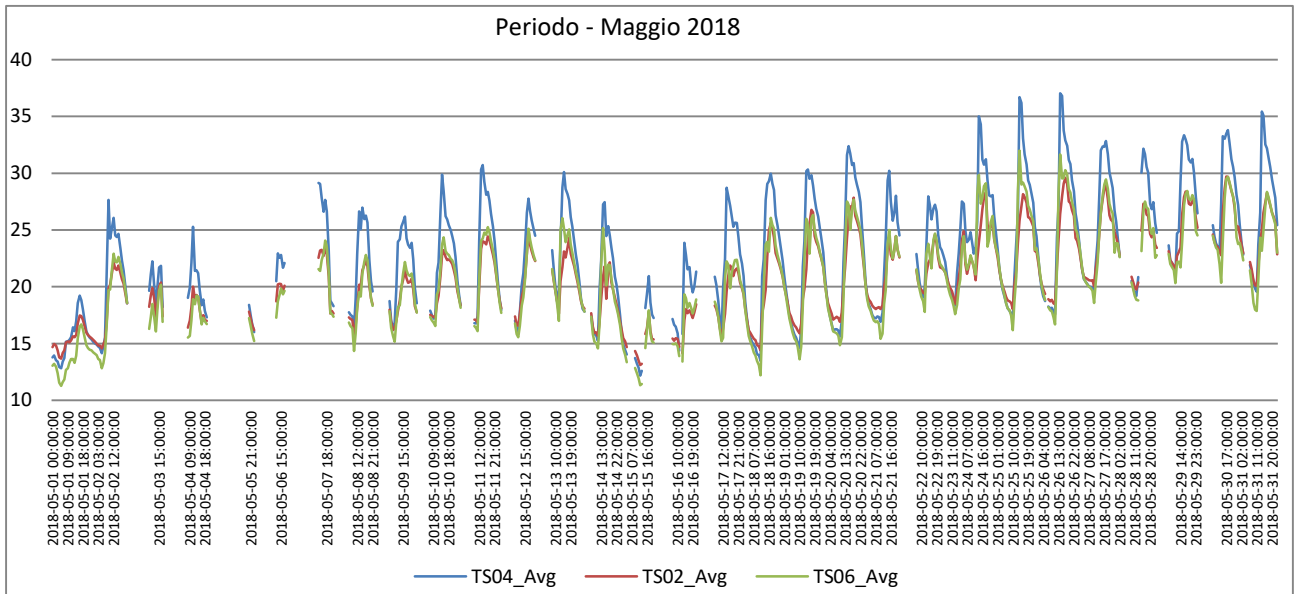


Figura 34: Temperature Superficiali esterne - SE - Maggio 2018

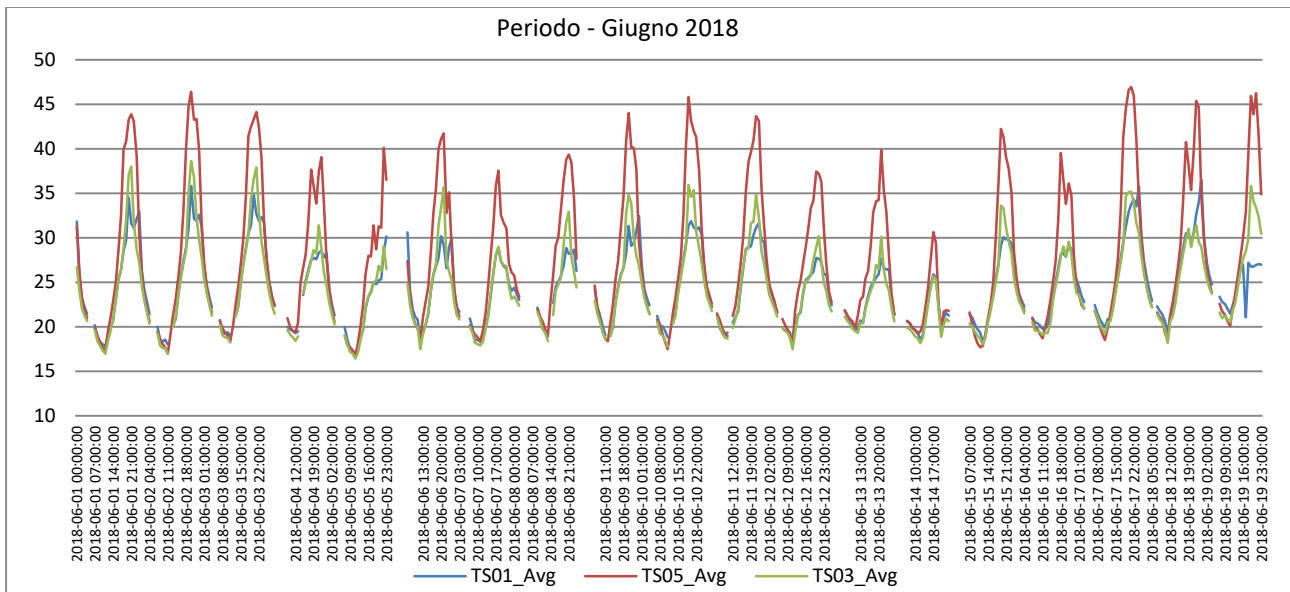


Figura 35: Temperature Superficiali esterne - SW - Giugno 2018

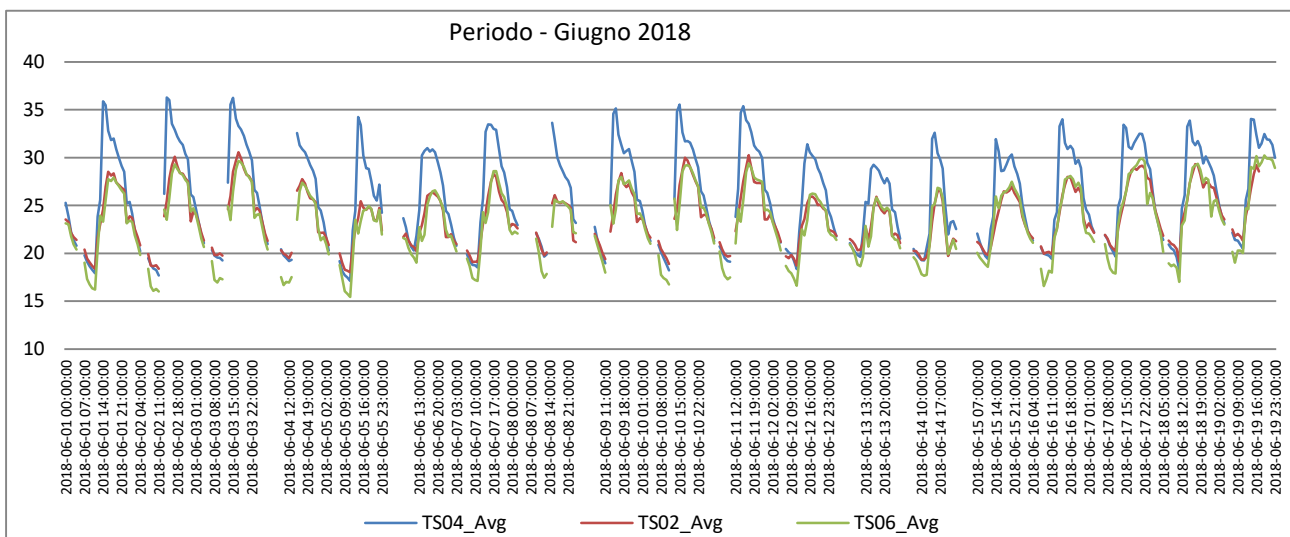


Figura 36: Temperature Superficiali esterne - SE - Giugno 2018

Inoltre, anche la disposizione dei sensori della *Terza Configurazione*, dal 22 giugno fino a fine settembre, ci ha consentito di analizzare gli andamenti delle Temperature Superficiali esterne dell'edificio, soggette e non agli effetti della parete verde, per entrambe le esposizioni.

Si nota che sia gli andamenti delle temperature nelle Figura 37 e Figura 39 per i mesi di luglio e di settembre riferiti alla parete esposta a Sud-Ovest che quelli nelle Figura 38 e Figura 40 sempre per i mesi di luglio e di settembre riferiti alla parete esposta a Sud-Est evidenziano come per entrambi gli orientamenti la differenza tra la Temperatura Superficiale esterna No_PV (TS05 in rosso) e la Temperatura Superficiale esterna PV (TS03 in verde) relativa a SW e la differenza tra la Temperatura Superficiale esterna No_PV (TS04 in blu) e la Temperatura Superficiale esterna PV (TS02 e TS06 rispettivamente in rosso e in verde) relativa a SE sia evidentemente la maggiore registrata fino ad oggi, vista la condizione di quasi completa copertura delle due pareti dell'edificio dalla coltre vegetale.

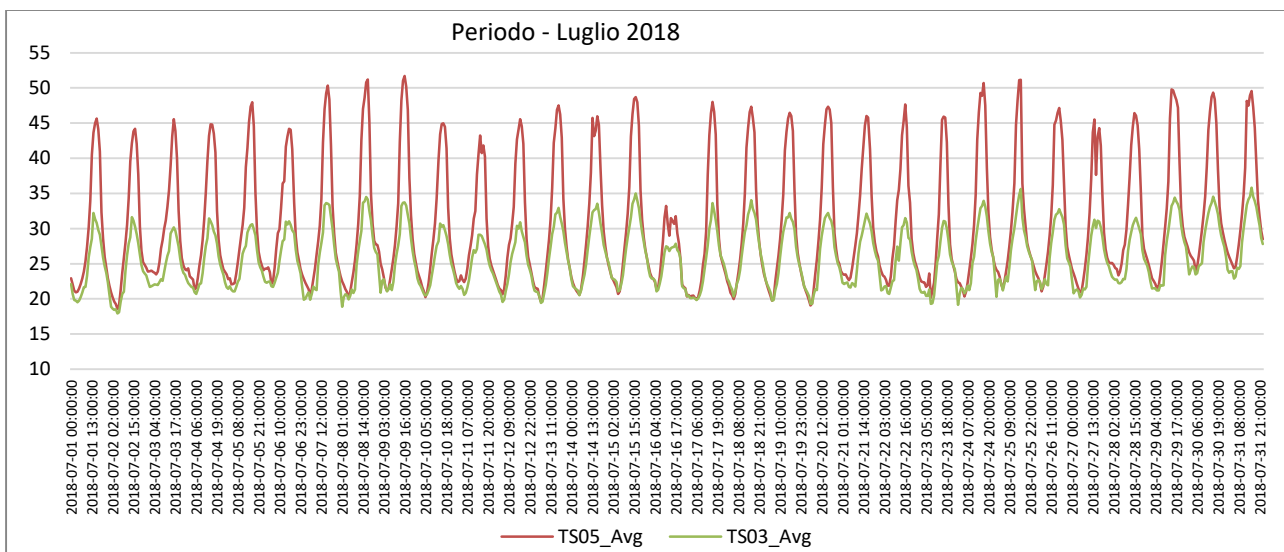


Figura 37: Temperature Superficiali esterne - SW - Luglio 2018

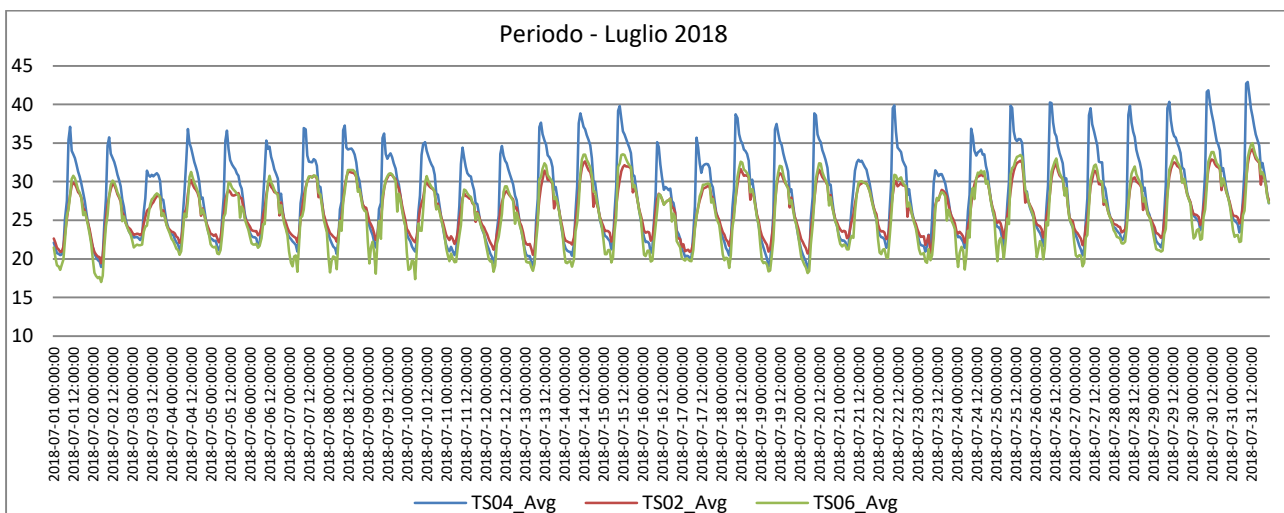


Figura 38: Temperature Superficiali esterne - SE - Luglio 2018

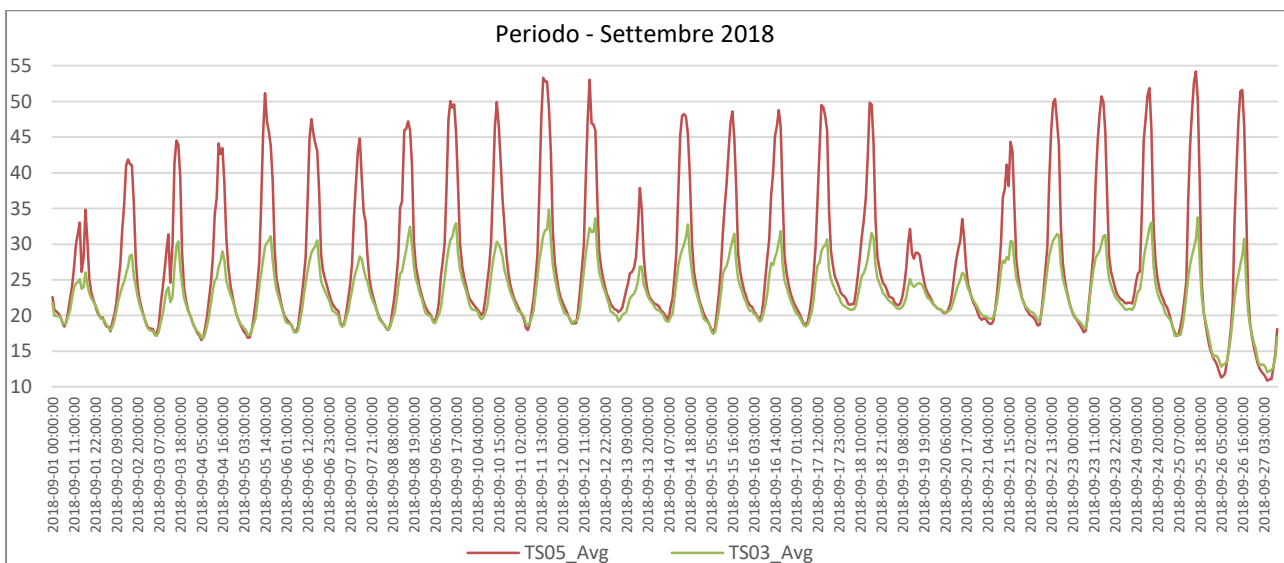


Figura 39: Temperature Superficiali esterne - SW - Settembre 2018

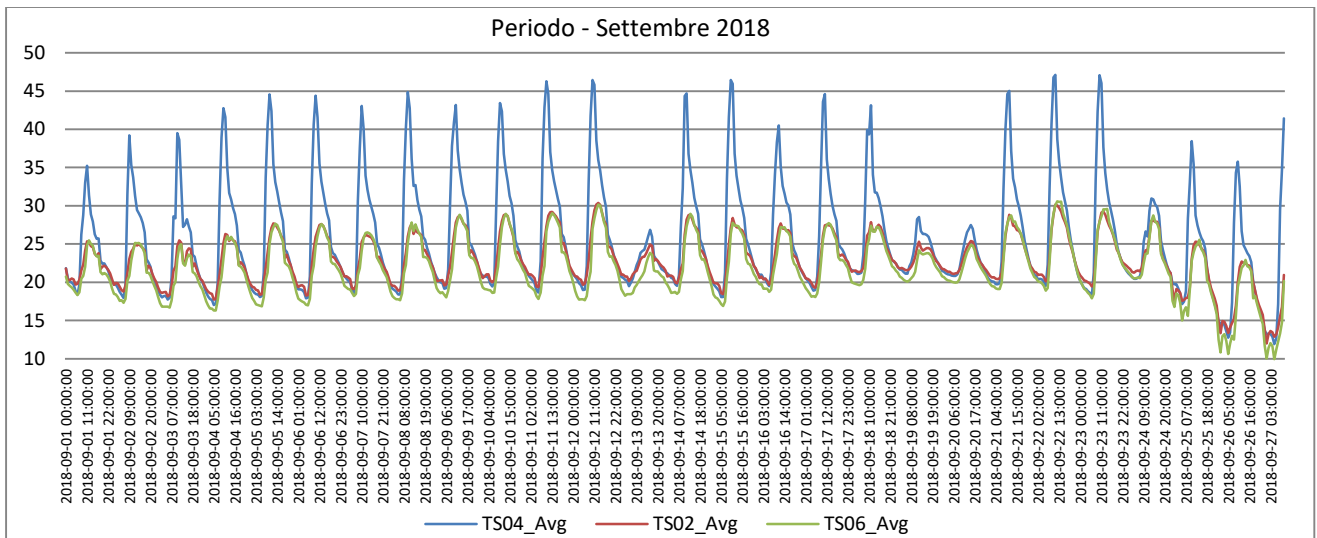


Figura 40: Temperature Superficiali esterne - SE - Settembre 2018

Sempre attraverso la disposizione dei sensori relativi alla *Terza Configurazione*, oltre ad analizzare gli andamenti delle Temperature Superficiali esterne dell'edificio, soggette e non agli effetti della parete verde, per entrambe le esposizioni sulle quali insiste l'installazione del verde verticale, si è potuto verificare che, data la presenza dei quattro anemometri, il *flusso termico non entrante* (Φ), aumenta al diminuire del valore del coefficiente convettivo H_e , determinato in funzione della velocità del vento all'interno dell'intercapedine, che risulta inferiore per l'effetto di protezione che genera la parete verde.

Infatti dall'analisi dell'equazione del *flusso termico non entrante* (Φ) dato da:

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

dove:

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

si è notato quanto rilevanti possano essere sia l'intensità del verde a copertura della parete dell'edificio per la valutazione del K_v che il valore del coefficiente di scambio convettivo H_e dato dalla combinazione degli effetti radiativi e convettivi che si generano nell'intercapedine.

Infatti essendo la costante verde K_v data dall'equazione:

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

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,

e H_e 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

$$h_r = \epsilon * h_{r0} \tag{5}$$

dove:

- ϵ è l'emissività della superficie,
- h_{r0} è il coefficiente di irraggiamento di un corpo nero:

$$h_{r0} = 4 * \sigma * T_m^3 \tag{6}$$

- σ 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
-

risulta chiaro come, in base all'orientamento della parete dell'edificio in esame e all'intensità della coltre vegetale che varia al succedersi delle stagionalità, il suo valore dipenda dall'incidenza della radiazione solare e dalla velocità dell'aria che si manifesta all'interno dell'intercapedine tra la superficie esterna della muratura e la parete verde.

Più precisamente, in relazione all'incidenza che potrebbe avere la velocità dell'aria si fa riferimento al coefficiente di scambio convettivo H_e e si può osservare che, poiché dall'elaborazione dei dati misurati delle Temperature Superficiali esterne delle pareti dell'edificio nude e coperte dalla coltre vegetale, il valore della T_m^3 , moltiplicato per il valore della "ε" (nel nostro caso pari a 0.96) e della "σ" pari a $5.67 * 10^{-8}$ ci restituisce un valore che, come si può notare in Figura 41 si mantiene all'interno di un *range* ristretto, il valore su cui sono state avanzate delle attenzioni in più è quello relativo al coefficiente di convezione h_c , che come risulta dall'equazione al punto (4) è funzione della velocità del vento. Inoltre, per quanto riguarda l'incidenza della radiazione solare si può affermare che, visti gli andamenti delle Temperature Superficiali esterne delle pareti dell'edificio soggette e non all'influenza del verde verticale, l'"irraggiamento" (GR) è parametro fondamentale per la determinazione del valore della costante verde K_v .

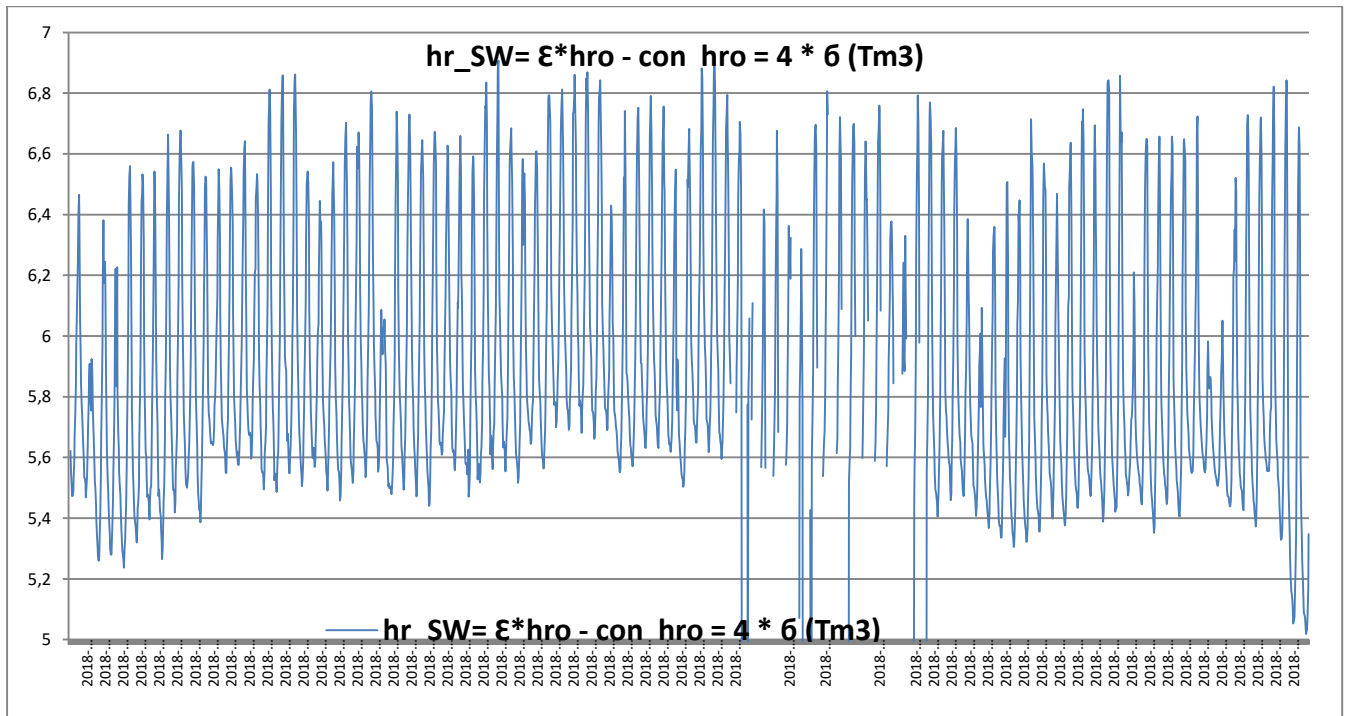


Figura 41: Andamento del coefficiente h_r relativo alla parete esposta a Sud-Ovest

2.2.5.1 Valutazione della costante verde (K_v)

L'analisi dei dati relativi alla determinazione del valore della costante verde K_v è finalizzata alla verifica, secondo la normativa vigente, che detto valore rientri nel *range* tra 0 e 1, intervallo che garantisce il corretto ed efficace svolgimento della funzione propria della coltre vegetale installata sulle pareti esterne, esposte a Sud-Ovest e a Sud-Est, dell'edificio oggetto di studio.

Nel periodo compreso tra ottobre 2017 e giugno 2018 i valori del *flusso termico non entrante* (Φ) sono considerati in relazione alla costante verde K_v , che è stata calcolata con tutti dati monitorati, e in relazione al coefficiente di scambio convettivo H_e , che invece, come per la scorsa annualità e fino all'installazione degli anemometri, avvenuta dal 25 aprile 2018 in poi, è stato calcolato con la velocità del vento WS01, il cui sensore è posizionato sul tetto dell'edificio e non nell'intercapedine. Va precisato inoltre che nel periodo relativo alla *Prima Configurazione* i risultati riguardano la parete esposta a SUD-OVEST, mentre quelli che fanno riferimento alla *Seconda Configurazione* riguardano entrambe le esposizioni su cui è installata la parete verde. Nel periodo relativo alla *Terza Configurazione*, invece, il coefficiente di scambio convettivo H_e è stato calcolato tenendo conto dei valori della velocità del vento dati dai sensori WS02 e WS03 per l'orientamento Sud-Ovest e WS04 e WS05 per l'orientamento Sud-Est.

Come si può notare nelle successive Figura 42 e Figura 43 l'andamento della costante verde K_v , relativamente all'esposizione Sud-Ovest e rispettivamente per la *Prima* e la *Seconda Configurazione*, per il cui calcolo si tiene conto delle stesse tipologie di parametri, risulta in linea con quanto detto precedentemente, e cioè che finché la parete resta coperta, la " K_v " continua a svolgere la sua funzione di "*filtro*" mantenendosi nel range compreso tra 0 e 1, poi essendo parzialmente spoglia, fino a maggio, momento in cui comincia a rinfoltirsi, la " K_v " risulta meno fitta.

Considerazione questa che, come si può notare nella Figura 44, vale anche per quanto riguarda la parete esposta a Sud-Est e relativa alla *Seconda Configurazione*.

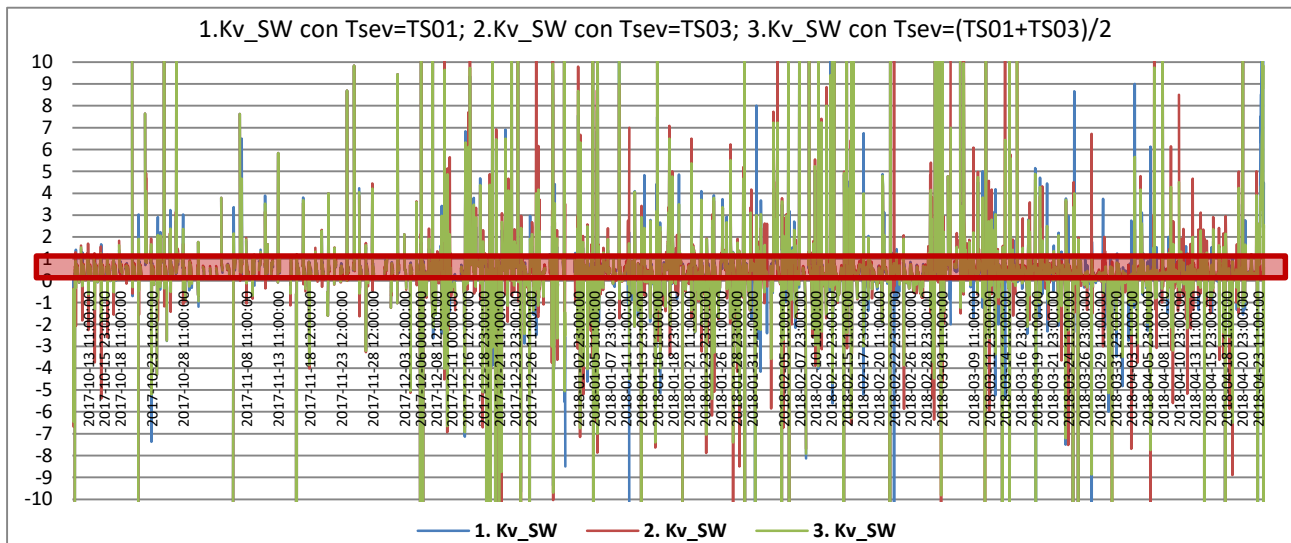


Figura 42: *Prima Configurazione* – Calcolo costante verde K_v – parete Sud-Ovest

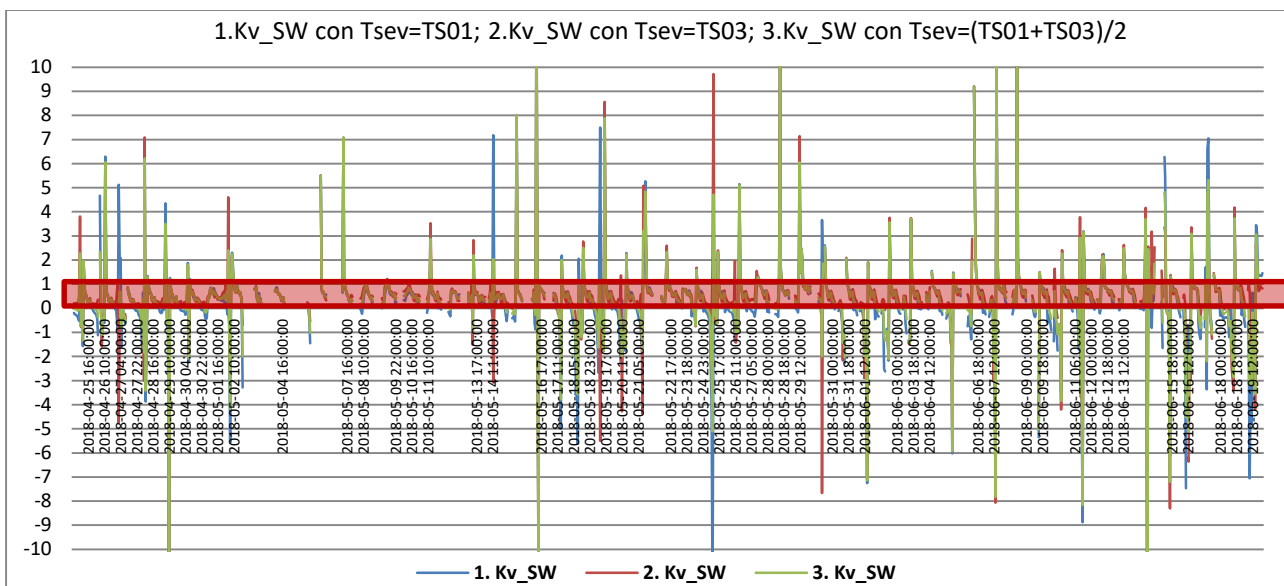


Figura 43: Seconda Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete Sud-Ovest

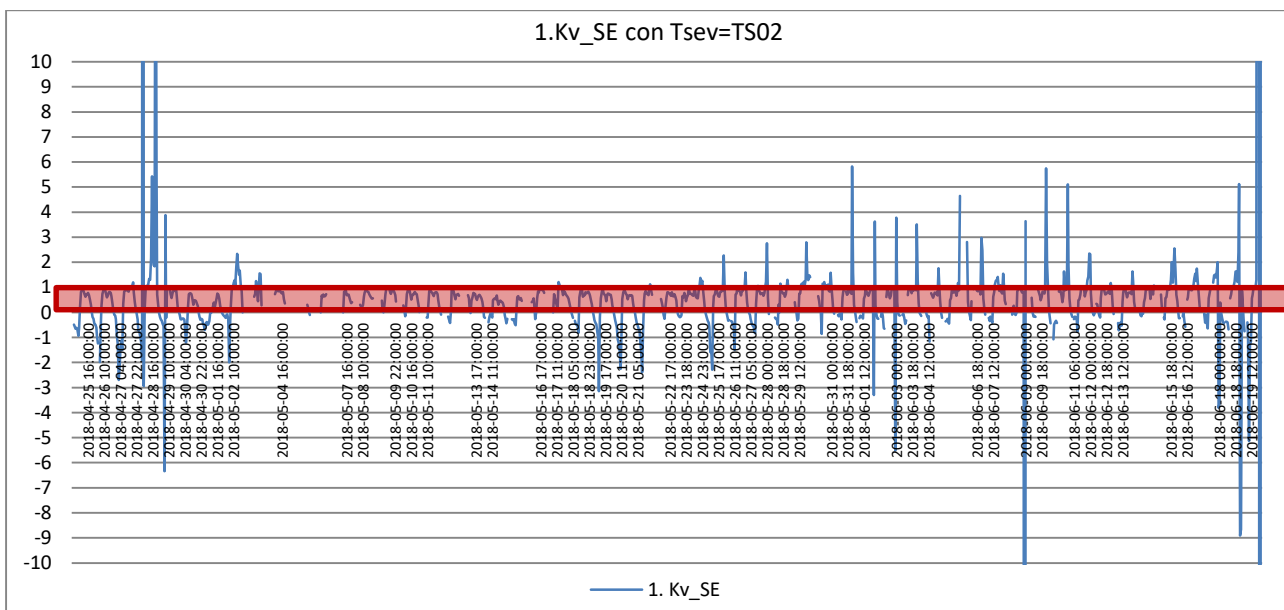


Figura 44: Seconda Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete Sud-Est

Nei grafici riportati nelle Figura 45 e Figura 46, relative alla *Terza Configurazione*, si può leggere come l’andamento della costante verde Kv sia maggiormente vicina al limite superiore del range suindicato (1), secondo cui se il valore è più vicino allo 0 vuol dire che la coltre vegetale non esercita una buona schermatura verso la radiazione solare e, in condizioni estive, la temperatura della parete esterna potrebbe essere addirittura superiore sia a quella dell’aria esterna che a quella dell’interno dell’edificio; ma se la costante verde (Kv) è più vicina a 1, allora vuol dire che la vegetazione esercita la sua funzione di “schermatura” riuscendo a far diminuire la temperatura superficiale esterna dell’edificio, e di conseguenza anche quella superficiale interna.

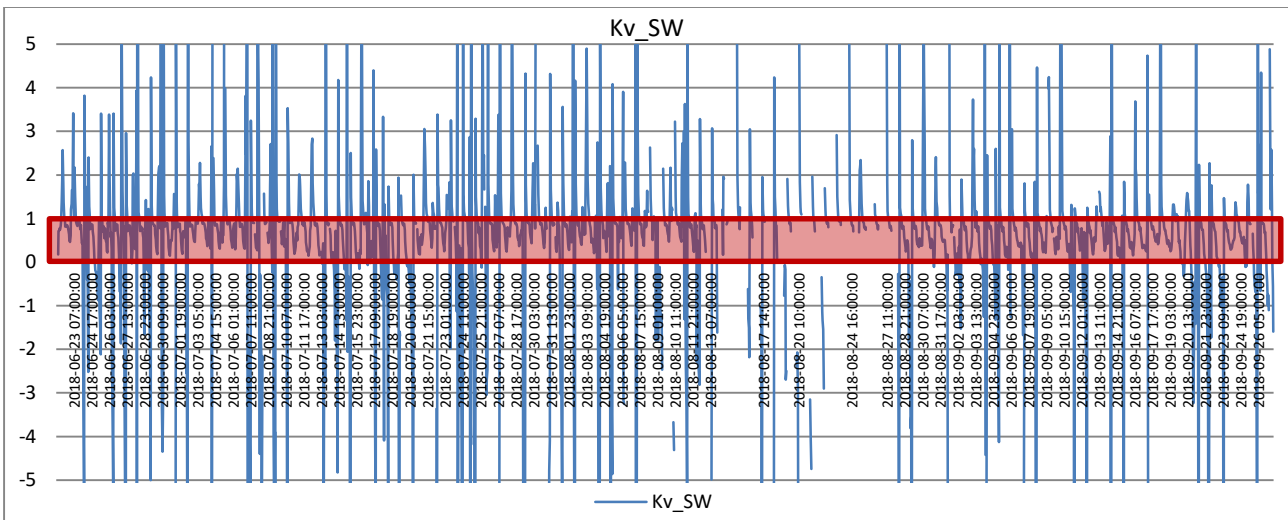


Figura 45: Terza Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete Sud-Ovest

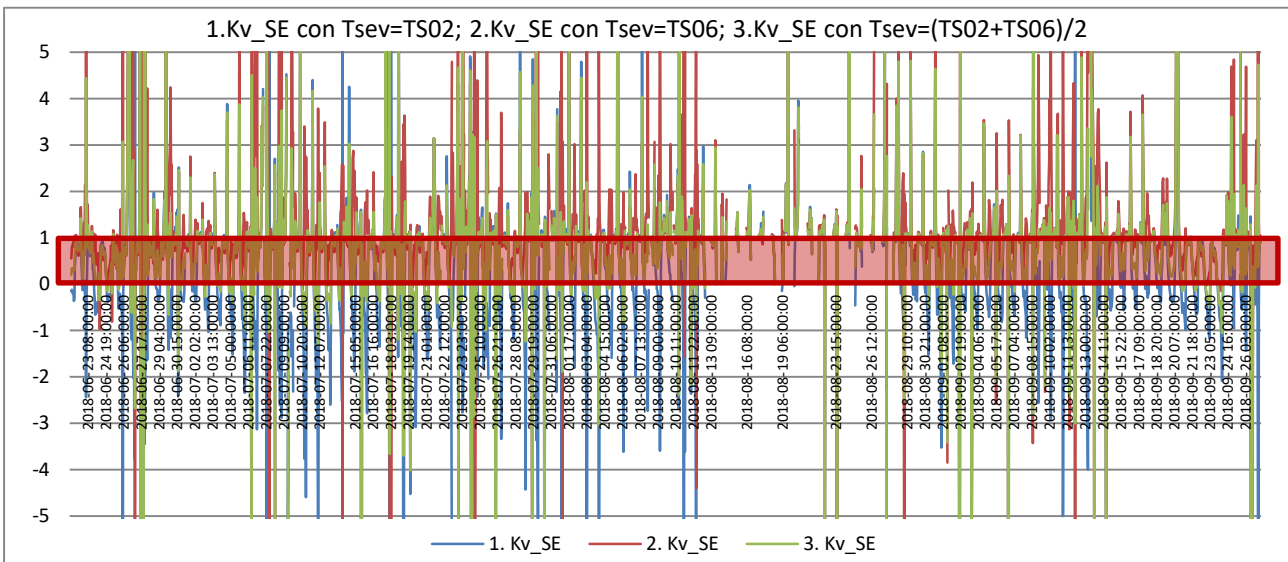


Figura 46: Terza Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete Sud-Est

Per meglio evidenziare l'efficacia della parete verde, nelle Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50 sono riportati i grafici relativi all'andamento della costante verde Kv per entrambi gli orientamenti e per ognuna delle quattro settimane rappresentative della Terza Configurazione (22-29 giugno 2018; 13-20 luglio 2018; 3-10 agosto 2018; 14-21 settembre 2018) in cui sono evidenziate le ore entro le quali il valore di Kv risulta prossimo a 1.

In verde chiaro è evidenziato che il suddetto range di ore, in cui il valore Kv è prossimo a 1, poiché derivante dagli effetti dell'irraggiamento incidente sulle pareti, corrisponde a quelle diurne.

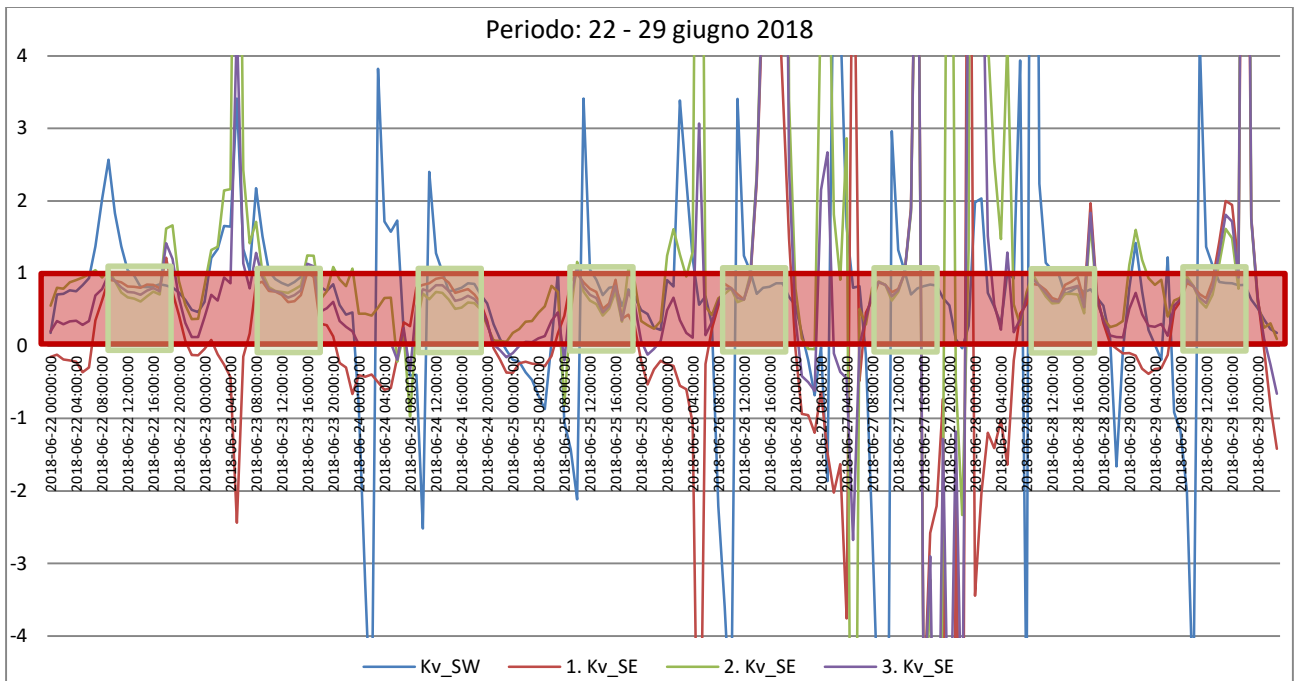


Figura 47: Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

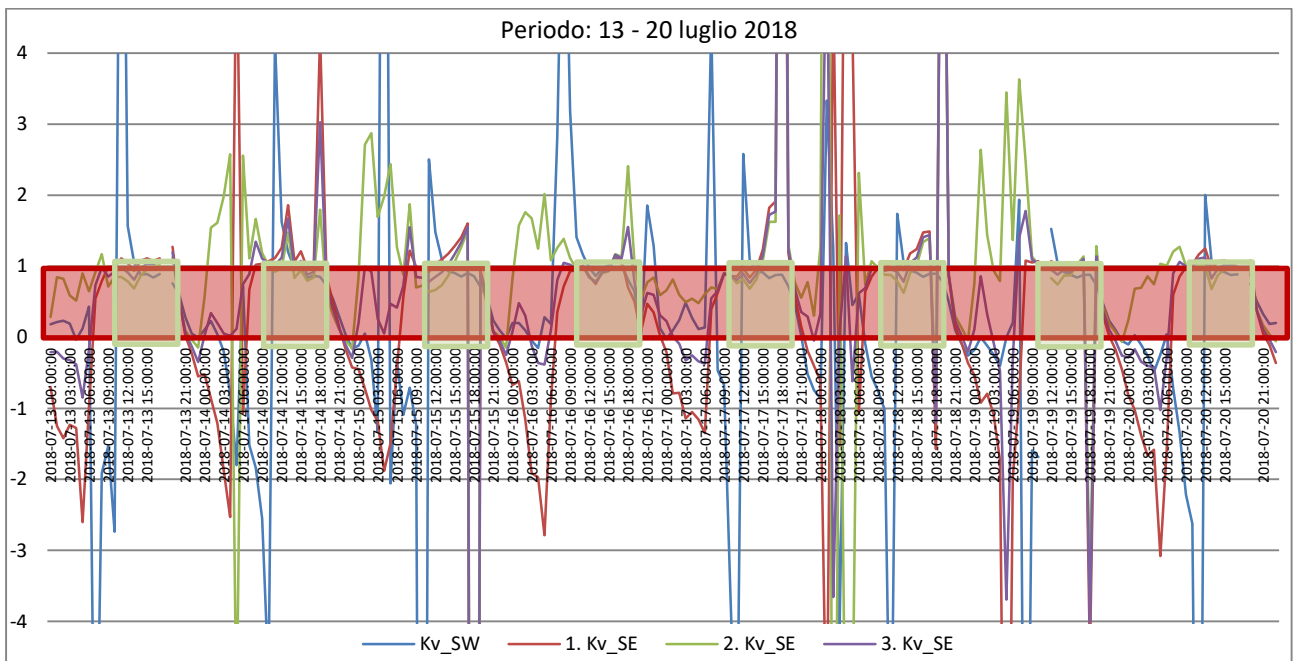


Figura 48: Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

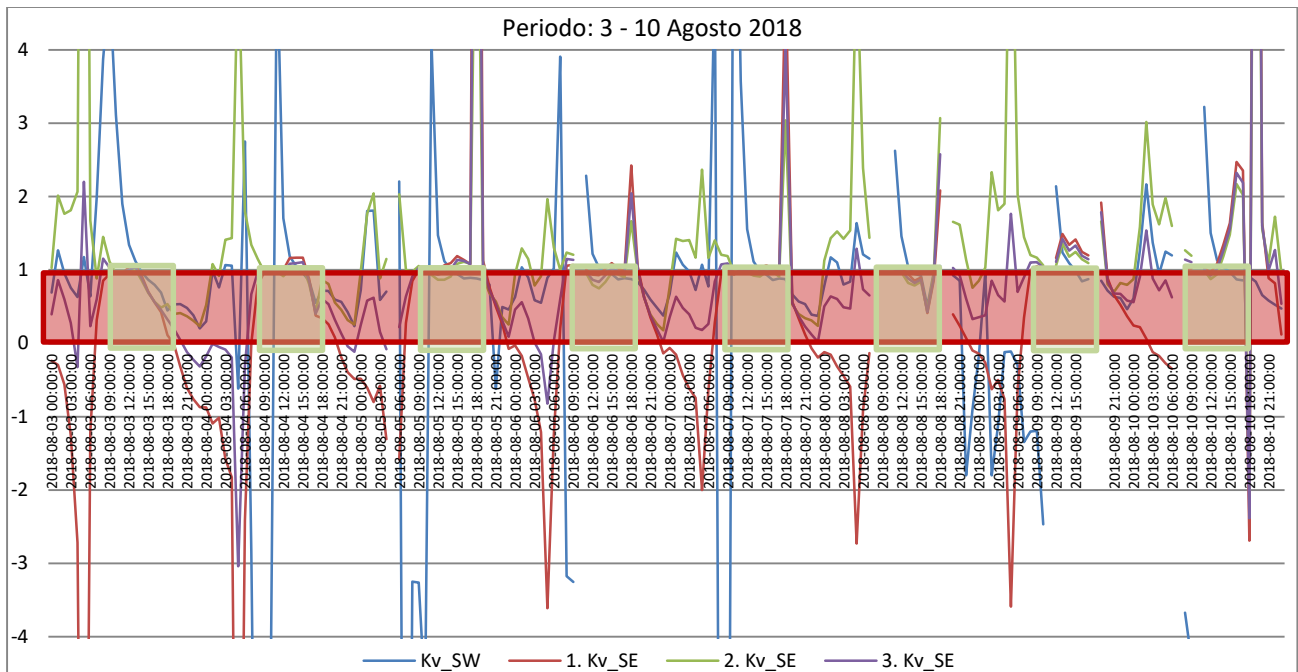


Figura 49: Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

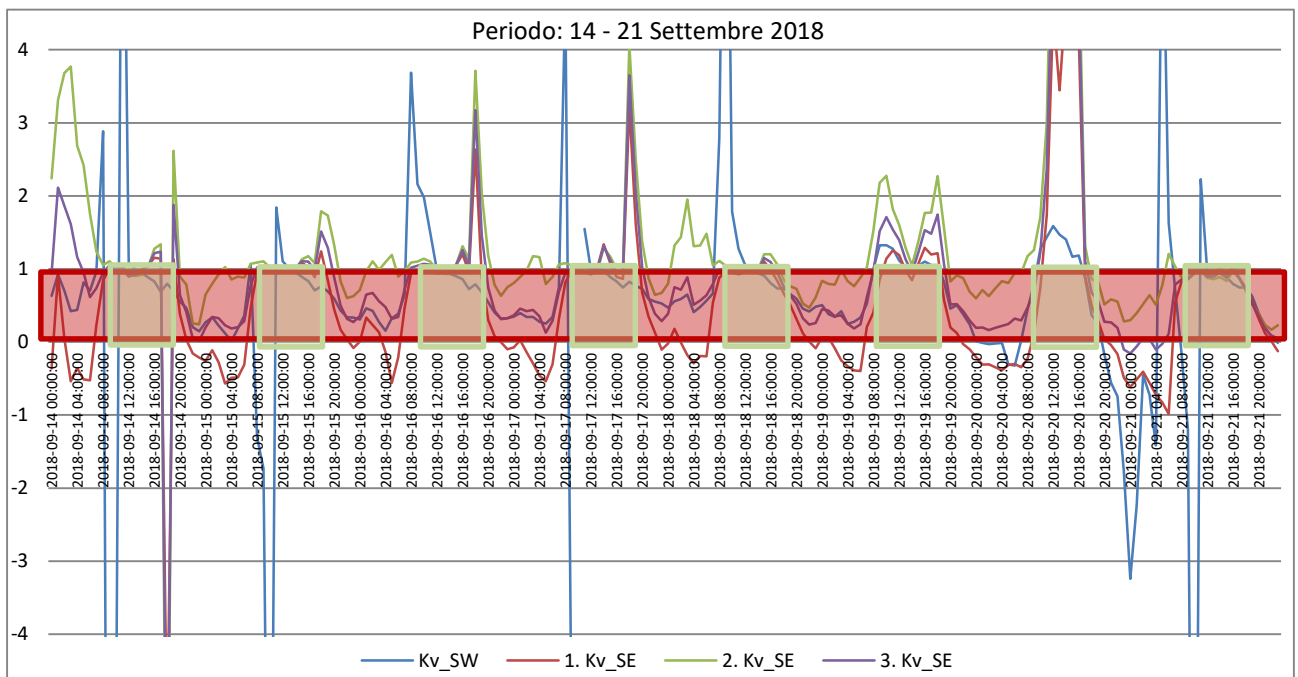


Figura 50: Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

2.2.5.2 Valutazione del coefficiente di scambio convettivo (h_e)

Già dalle analisi effettuate nella precedente annualità si era riscontrato che il coefficiente liminare esterno, in presenza del manto vegetale, influiva sullo scambio convettivo tra la parete e l'ambiente, diventando un parametro efficace per valutare il comportamento del sistema parete quando il rivestimento esterno è costituito da una coltre vegetale.

Quest'anno, come riportato nella descrizione della disposizione dei sensori delle tre Configurazioni, sia nella *Prima Configurazione* che nella *Seconda Configurazione*, l'unico valore relativo alla velocità del vento a disposizione risulta quello corrispondente a WS01 e di conseguenza, poiché h_r , come precedentemente

spiegato, mantiene un andamento costante intorno al valore 5, il coefficiente di scambio convettivo H_e è stimato in funzione di WS01. Ciò è chiaramente leggibile dai grafici riportati nelle Figura 51, Figura 52 e Figura 53, nelle quali le due curve relative a WS01_Mean (in azzurro) e $H_{e_SW_hr+h_e}$ (in lilla) e WS01_Mean (in azzurro) e $H_{e_SE_hr+h_e}$ (in lilla) risultano parallele con un delta di differenza che tiene conto del coefficiente h_e dato da $(4+4v)$.

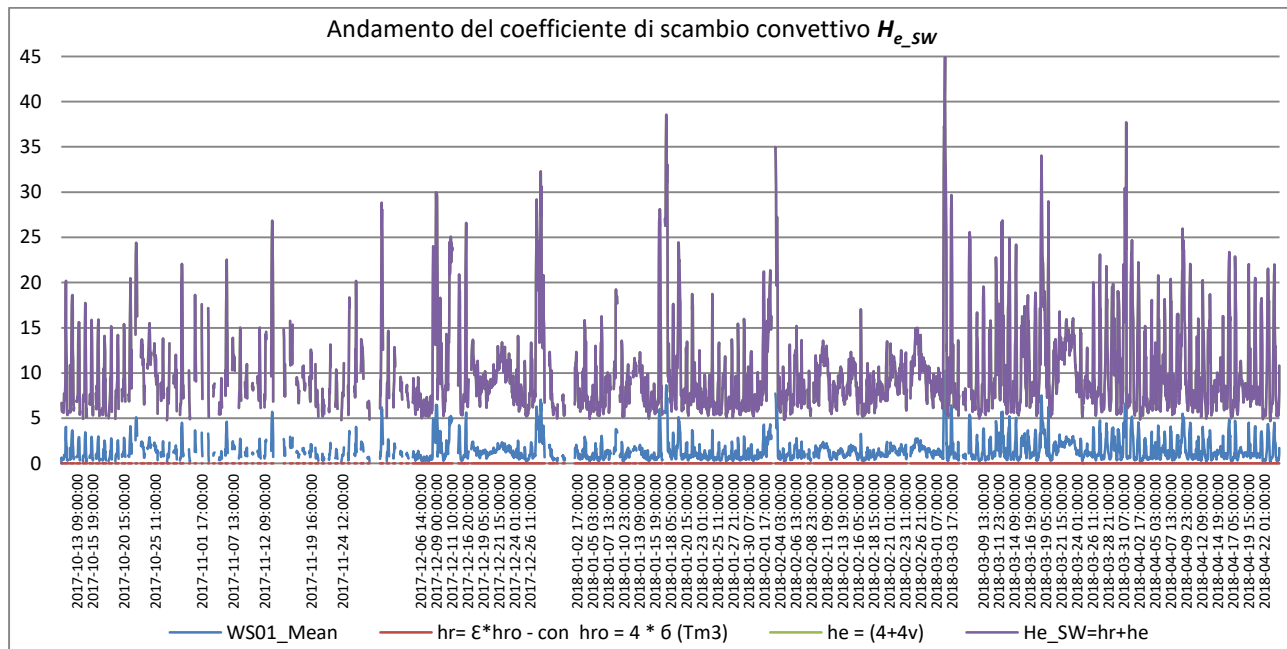


Figura 51: Prima Configurazione: $H_{e_sw}=h_r+h_e$ con WS01 (ambientale)

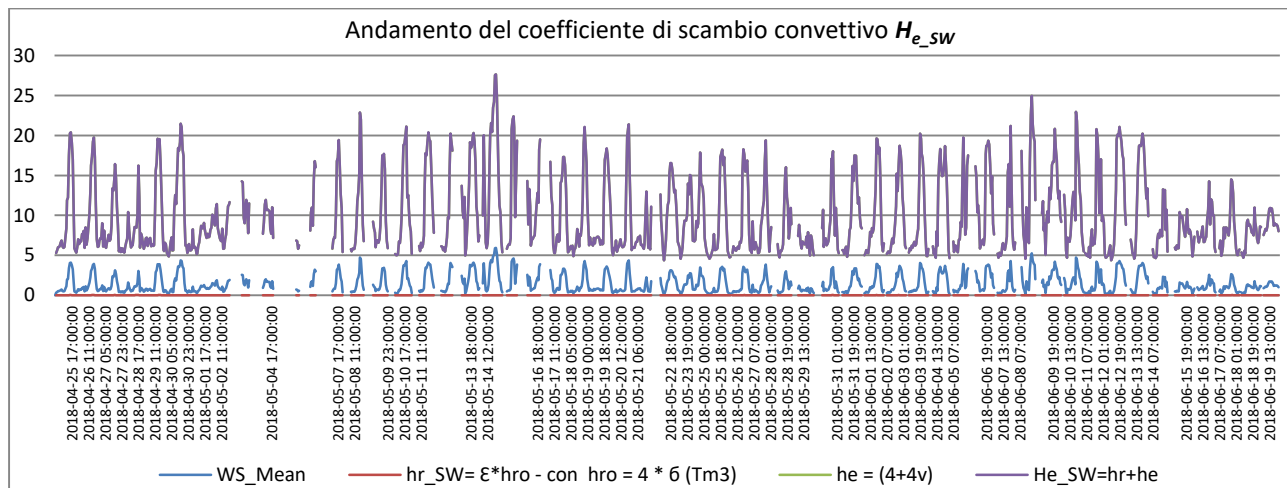


Figura 52: Seconda Configurazione: $H_{e_sw}=h_r+h_e$ con WS01 (ambientale)

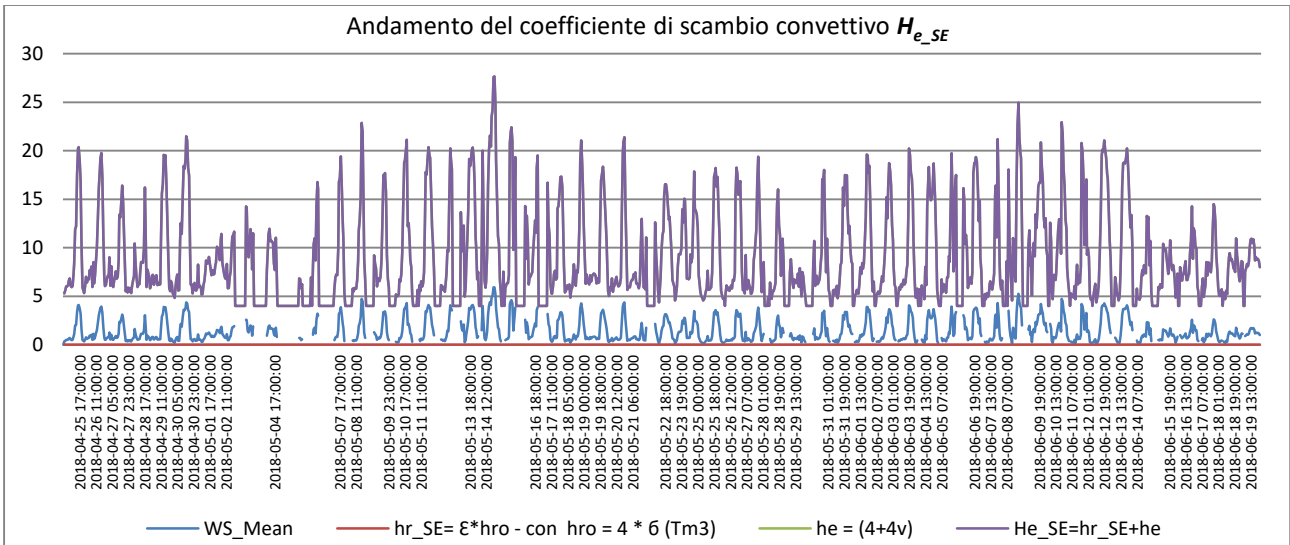


Figura 53: Seconda Configurazione: $H_{e_SE} = h_r + h_e$ con WS01 (ambientale)

Nella *Terza Configurazione*, invece, grazie all'installazione dei quattro anemometri, posizionati due per orientamento (Sud-Ovest e Sud-Est), uno per ogni piano, all'interno dell'intercapedine tra la parete verde ed il muro esterno dell'edificio, è stato possibile analizzare e confrontare gli andamenti della velocità del vento all'interno dell'intercapedine (WS02 e WS03 per SW, WS04 e WS05 per SE) con quelli della velocità del vento rilevata sul tetto dell'edificio (WS01).

Come evidenziano i grafici riportati nelle Figura 54 e Figura 55, la velocità del vento nell'intercapedine per ognuno dei due orientamenti SW e SE, rispettivamente $[Media_SW (WS02+WS03)/2]$ e $[Media_SE (WS04+WS05)/2]$, segue l'andamento della curva relativa alla velocità del vento rilevata sul tetto dell'edificio (WS01_Mean), disegnando una curva parallela, ma con una notevole attenuazione dei picchi, e comunque senza un rilevante cambiamento di direzione della velocità dell'aria. Nella Figura 56 sono riportati gli andamenti della velocità del vento all'interno dell'intercapedine per entrambi gli orientamenti confrontati con la velocità del vento ambientale.

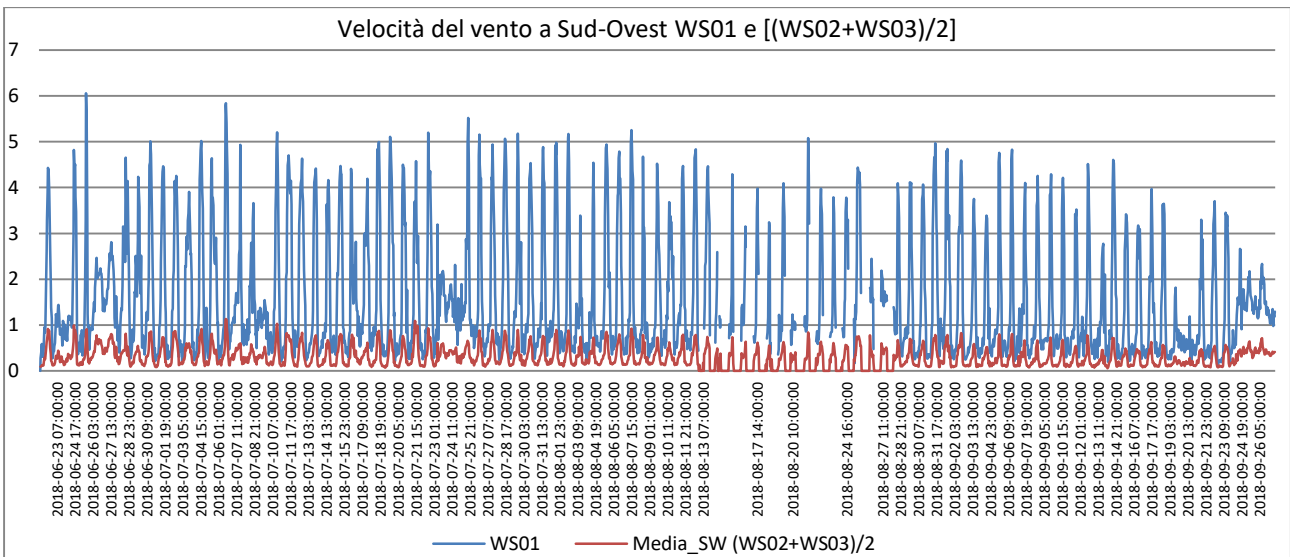


Figura 54: Terza Configurazione: Andamento della differenza della velocità del vento fuori (WS01) e dentro $[(WS02+WS03)/2]$ l'intercapedine relativa a Sud - Ovest

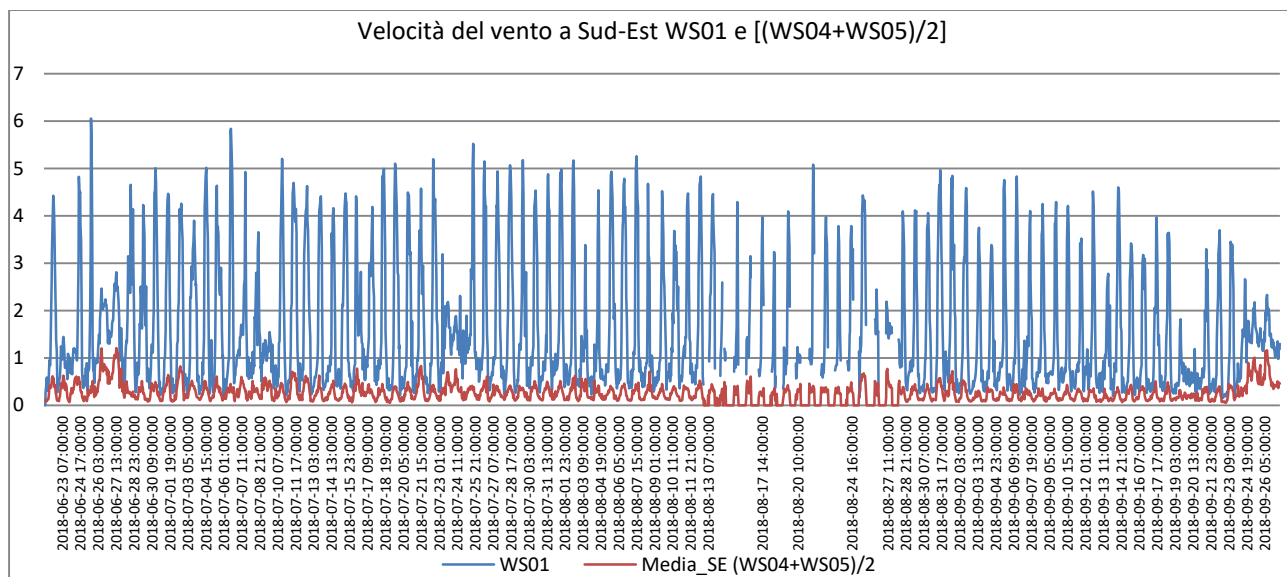


Figura 55: Terza Configurazione: Andamento della differenza della velocità del vento fuori (WS01) e dentro [(WS04+WS05)/2] l’intercapedine relativa a Sud-Est

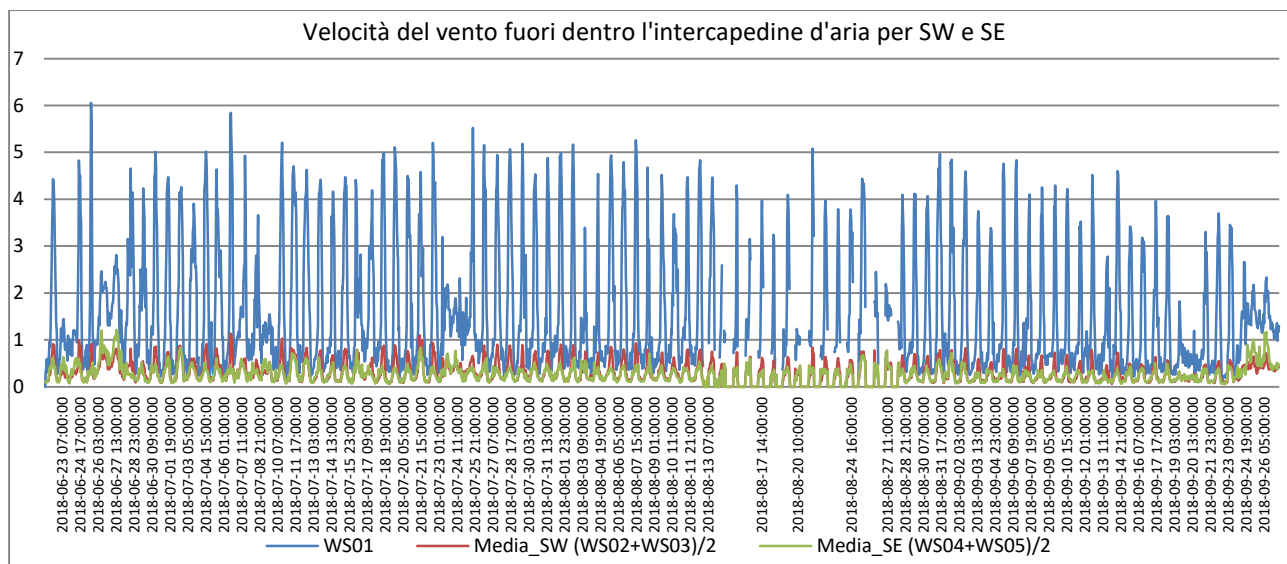


Figura 56: Terza Configurazione: Andamento della velocità del vento fuori (WS01) e dentro l’intercapedine relativa a Sud-Ovest [(WS02+WS03)/2] e a Sud-Est [(WS04+WS05)/2]

Sulla base del confronto degli andamenti delle velocità del vento, riportato in Figura 56, tra quella di tipo ambientale (WS01) e le due all’interno dell’intercapedine tra l’edificio e la parete verde orientate a SW e a SE, rispettivamente [(WS02+WS03)/2] e [(WS04+WS05)/2], sono stati confrontati i valori del coefficiente di scambio convettivo H_e calcolato, una volta secondo la velocità del vento di tipo ambientale (WS01) e poi calcolato secondo le medie delle velocità del vento all’interno dell’intercapedine; come si evince dai grafici riportati nelle Figura 57 e Figura 58, rispettivamente per la parete esposta a Sud-Ovest e per quella esposta a Sud-Est, il valore degli H_e calcolati in funzione di [(WS02+WS03)/2] e [(WS04+WS05)/2], risultano circa tre volte inferiori rispetto a quelli calcolati relativamente alla velocità del vento di tipo ambientale (WS01).

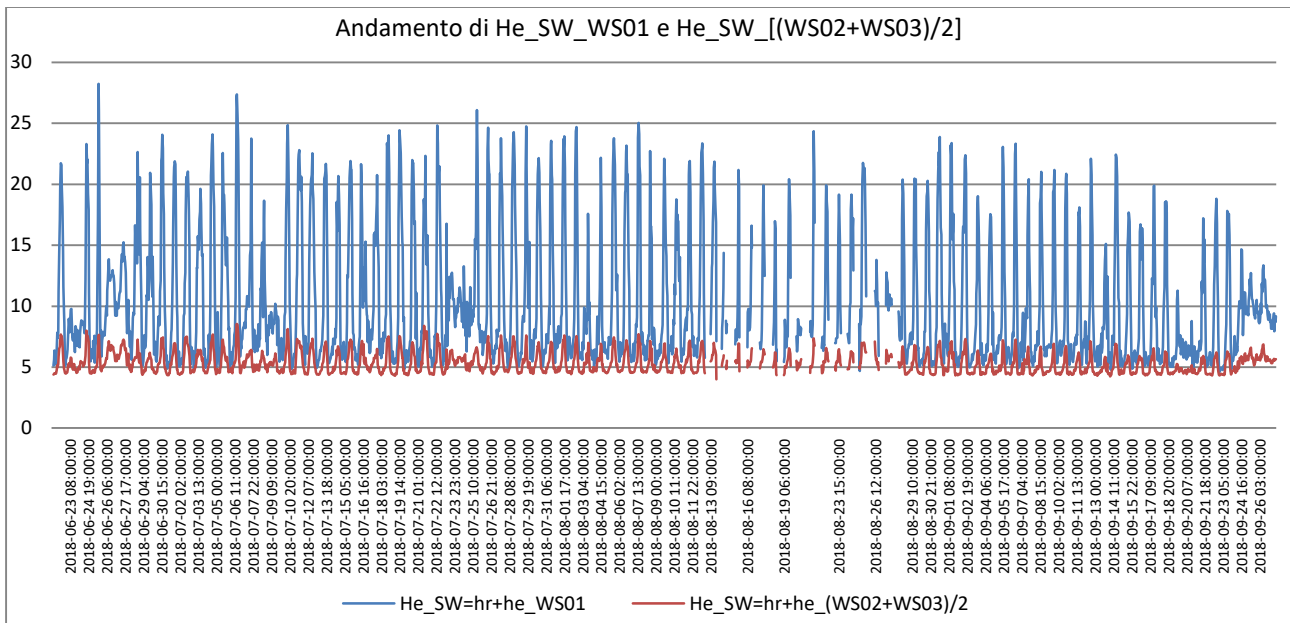


Figura 57: Confronto dei valori di H_e tra He_{SW_WS01} e $He_{SW_[(WS02+WS03)/2]}$

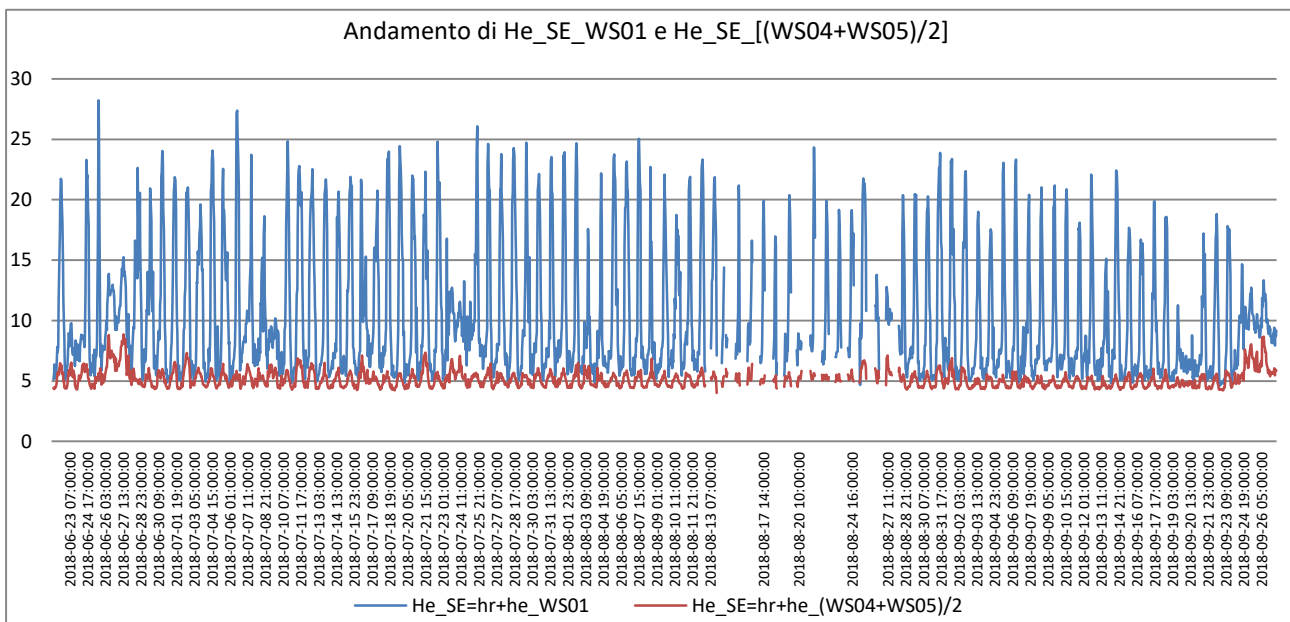


Figura 58: Confronto dei valori di H_e tra He_{SW_WS01} e $He_{SE_[(WS04+WS05)/2]}$

Le Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62, contenenti i grafici relativi agli andamenti degli H_e calcolati in entrambi i modi sopra descritti, mostrano più da vicino come, in linea con quanto già detto, per entrambi gli orientamenti e per ognuna delle quattro settimane rappresentative della Terza Configurazione (22-29 giugno 2018; 13-20 luglio 2018; 3-10 agosto 2018; 14-21 settembre 2018) le curve relative al calcolo secondo i parametri misurati con gli anemometri installati durante il periodo relativo alla Terza Configurazione siano di gran lunga inferiori a quelle il cui calcolo fa riferimento alla velocità WS01.

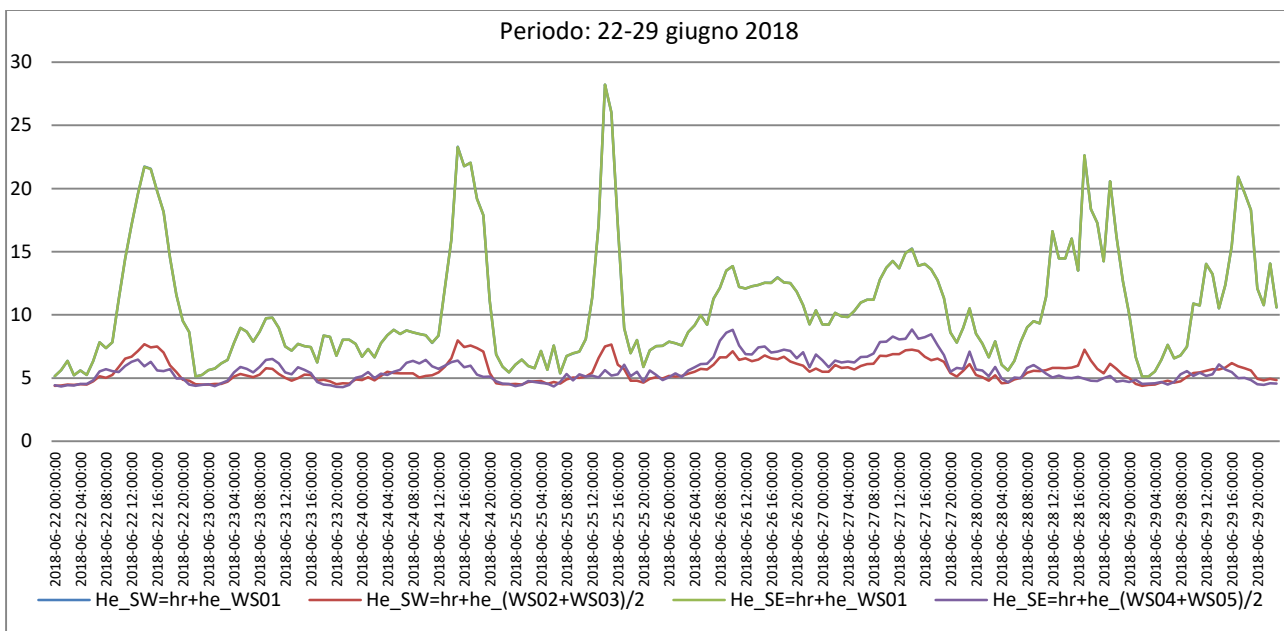


Figura 59: Andamento di He_SW_WS01 e He_SW_[WS04+WS05]/2]; He_SE_WS01 e He_SE_[WS04+WS05]/2]

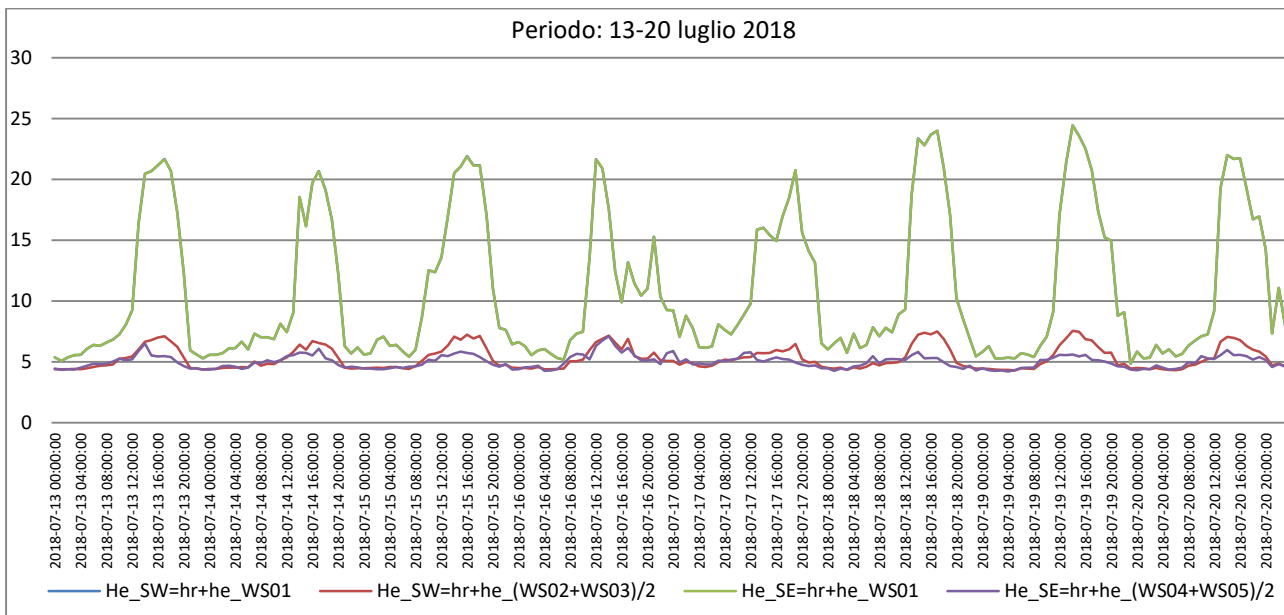


Figura 60: Andamento di He_SW_WS01 e He_SW_[WS04+WS05]/2]; He_SE_WS01 e He_SE_[WS04+WS05]/2]

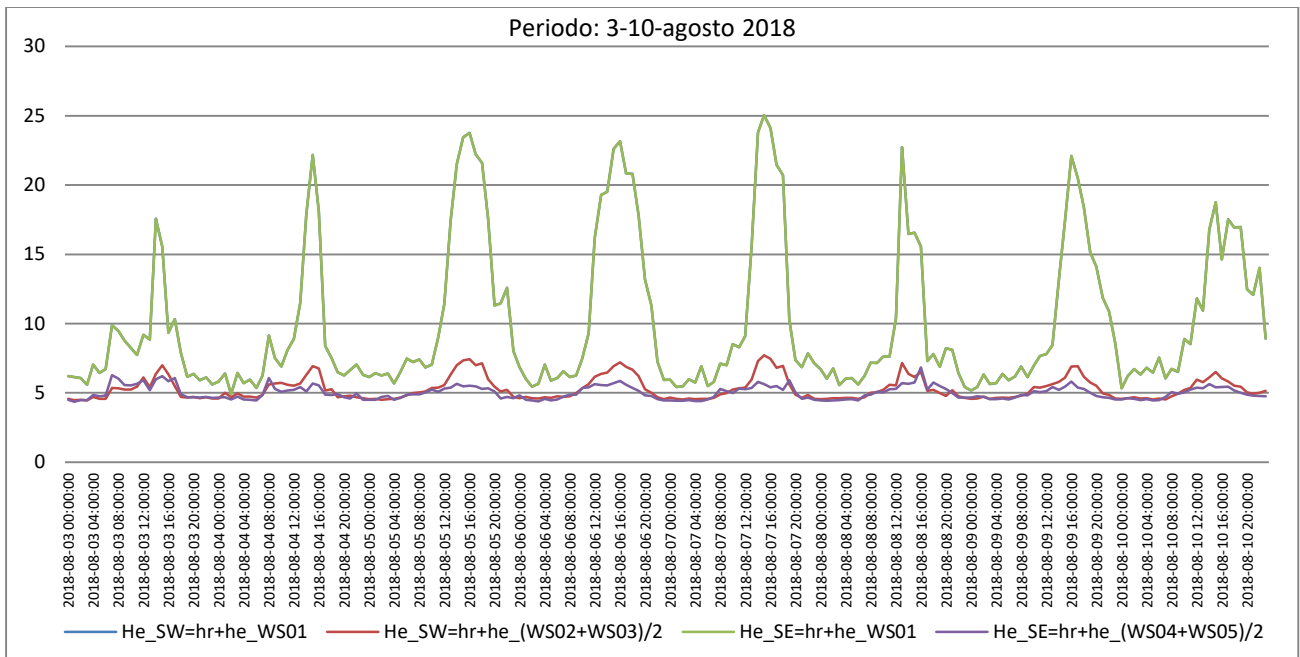


Figura 61: Andamento di He_SW_WS01 e He_SW_[WS04+WS05]/2]; He_SE_WS01 e He_SE_[WS04+WS05]/2]

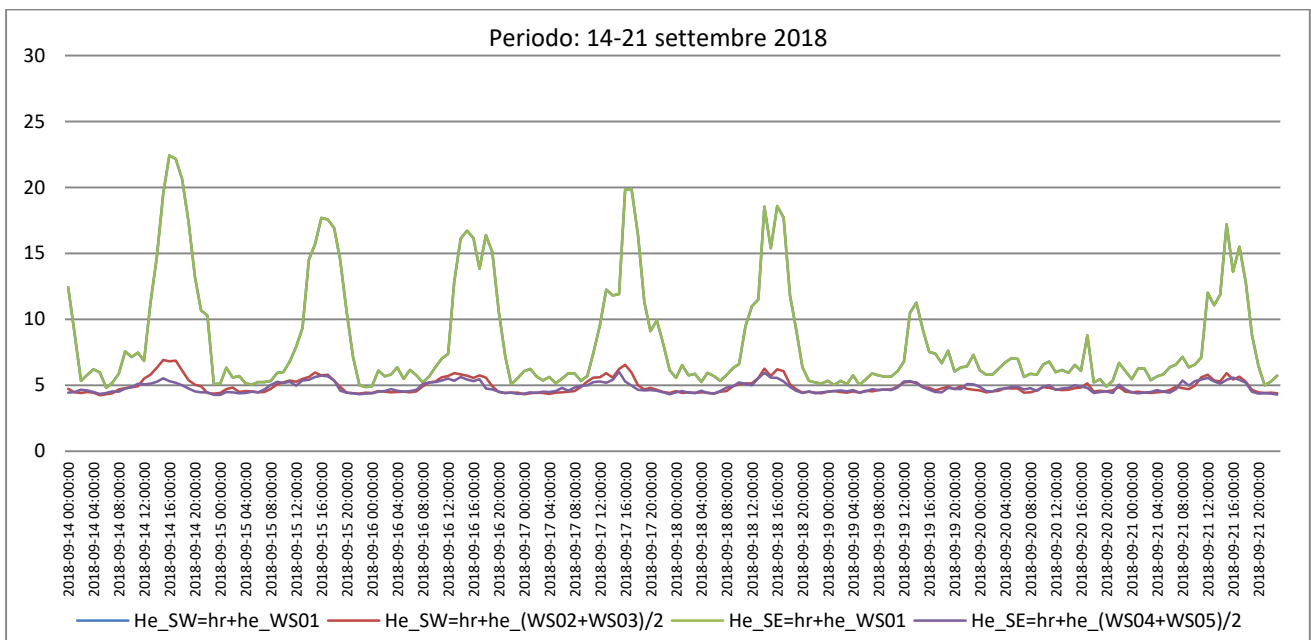


Figura 62: Andamento di He_SW_WS01 e He_SW_[WS04+WS05]/2]; He_SE_WS01 e He_SE_[WS04+WS05]/2]

In conclusione, dall'analisi effettuata si evince che all'interno dell'intercapedine, per effetto della parete verde che funge da "protezione", la velocità del vento si riduce, determinando una proporzionale riduzione del valore del coefficiente di scambio convettivo H_e , per le ragioni illustrate precedentemente.

Facendo riferimento all'equazione del *flusso termico non entrante* (Φ) dato da:

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

si evince come, alla diminuzione del valore H_e , posto al denominatore dell'equazione, il flusso termico aumenti.

Dai grafici sopra riportati nelle Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62 si nota come nei vari periodi l'andamento del coefficiente He dato dai valori restituiti dal sensore WS01 risulta sempre circa tre volte maggiore rispetto agli andamenti dello stesso coefficiente He dato però dai valori restituiti dai sensori WS04 e WS05 per quanto riguarda la parete esposta a Sud-Ovest e dai sensori WS02 e WS03 per quanto riguarda la parete esposta a Sud-Est. Per quanto suddetto, ne deriva che al diminuire dell'He aumenti proporzionalmente il *flusso termico non entrante* (Φ). (Figura 63 e Figura 64)

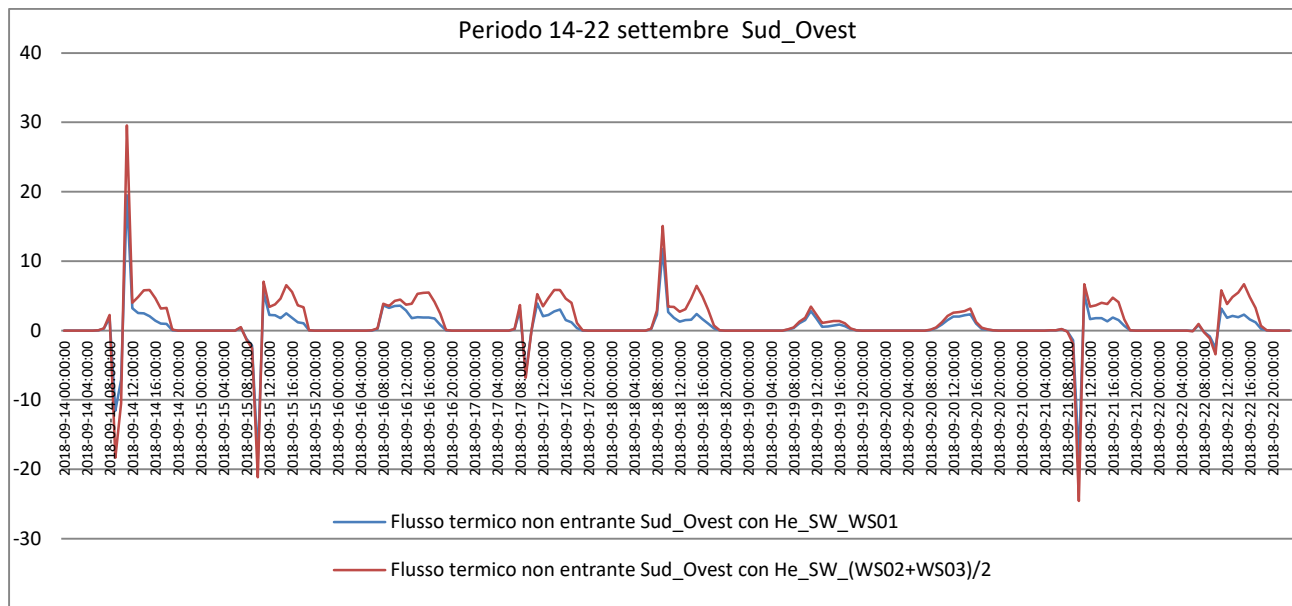


Figura 63: Flusso termico non entrante secondo WS01 e $[(WS02+WS03)/2]$

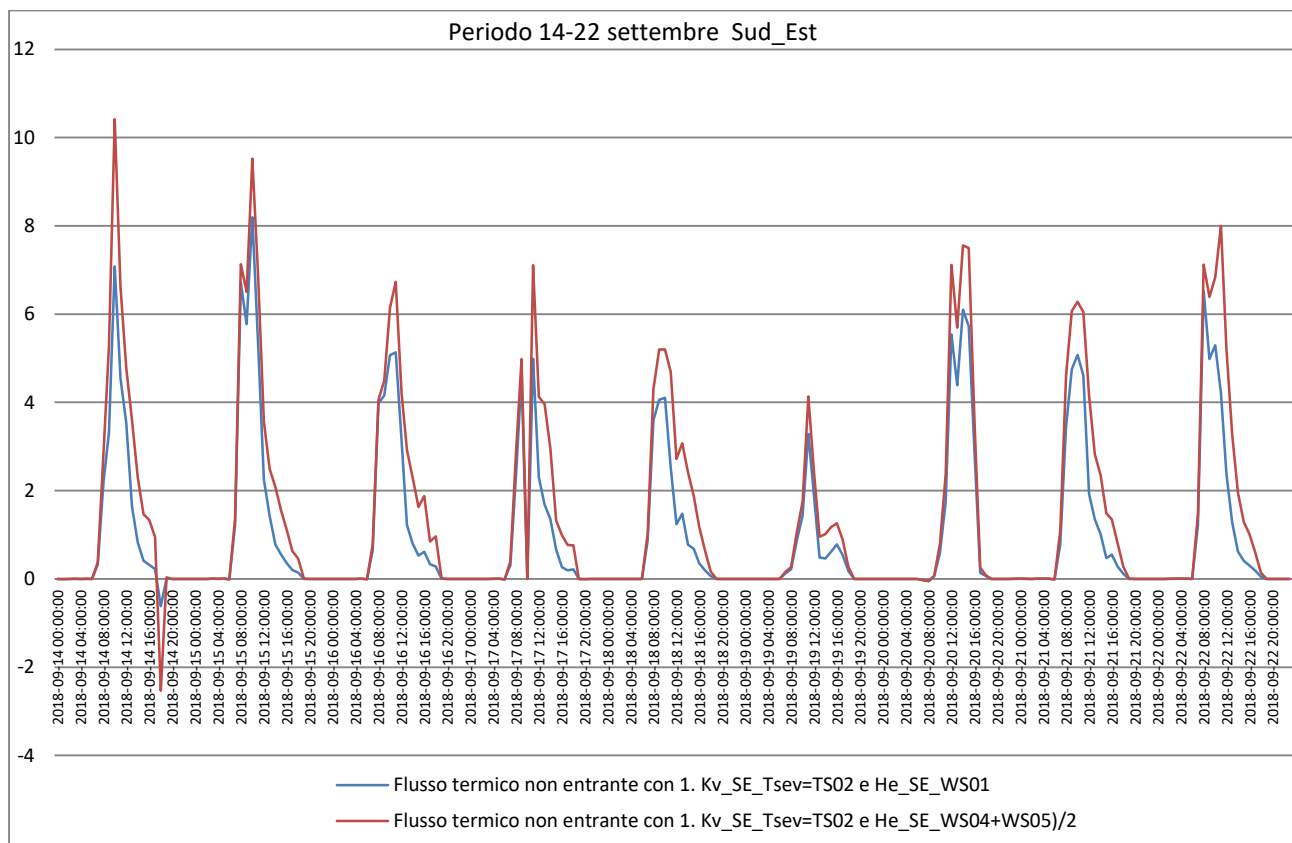


Figura 64: Flusso termico non entrante secondo WS01 e $[(WS04+WS05)/2]$

2.2.6 Analisi temperature superficiali del tetto verde periodo settembre 2018-31 dicembre 2018

Un'ulteriore analisi importante per valutare l'effetto della vegetazione rispetto alla riduzione del consumo energetico dell'edificio è stata riferita ai parametri relativi alla temperatura superficiale degli elementi che compongono il sistema tetto verde. I periodi di riferimento considerati prendono in esame una settimana rappresentativa dei mesi di settembre, ottobre, novembre e dicembre 2018. I grafici di seguito riportati mostrano le temperature superficiali della pavimentazione rispetto al sistema vegetazione/substrato (sonda TS11), temperatura della pavimentazione in assenza di vegetazione (TS12) e la temperatura superficiale del manto erboso (TF03) rilevata con termometro ad infrarosso Figura 65.,Figura 66.,Figura 67.Figura 68.

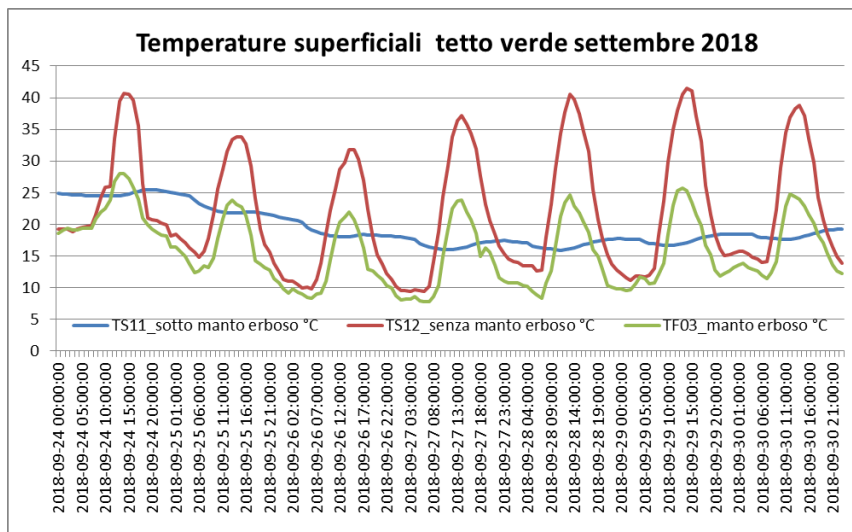


Figura 65.

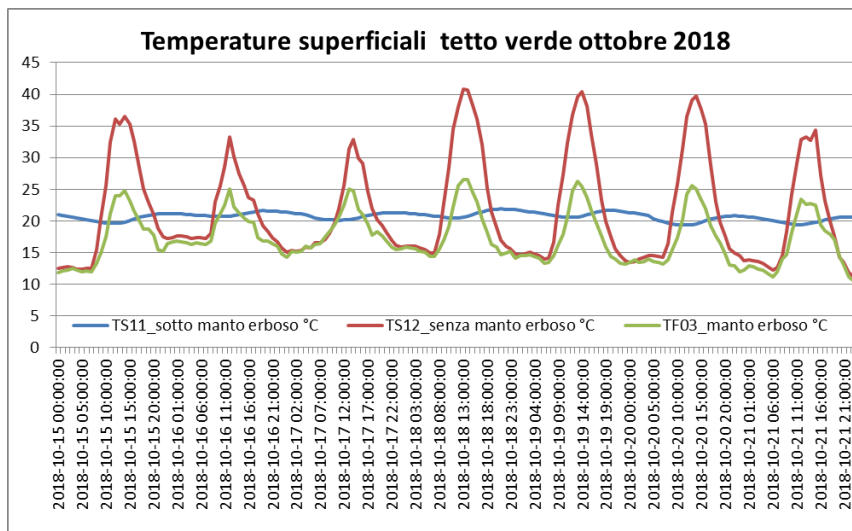


Figura 66.

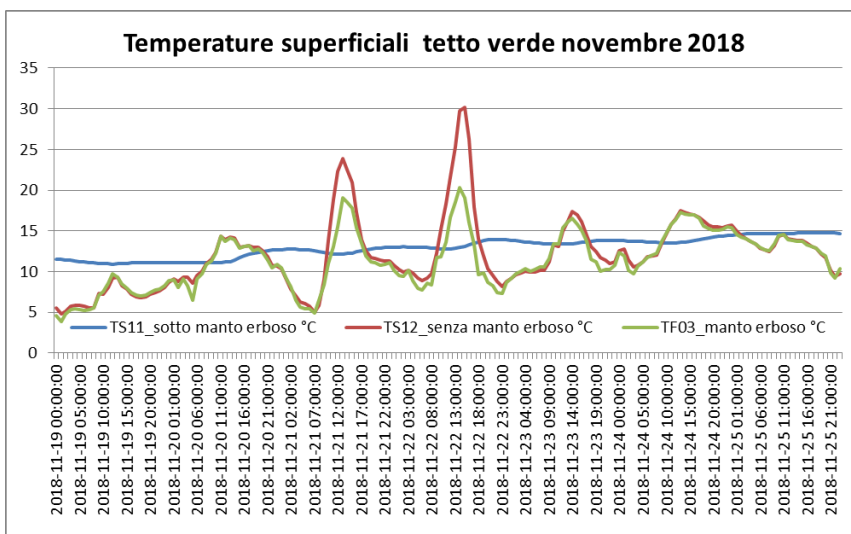


Figura 67.

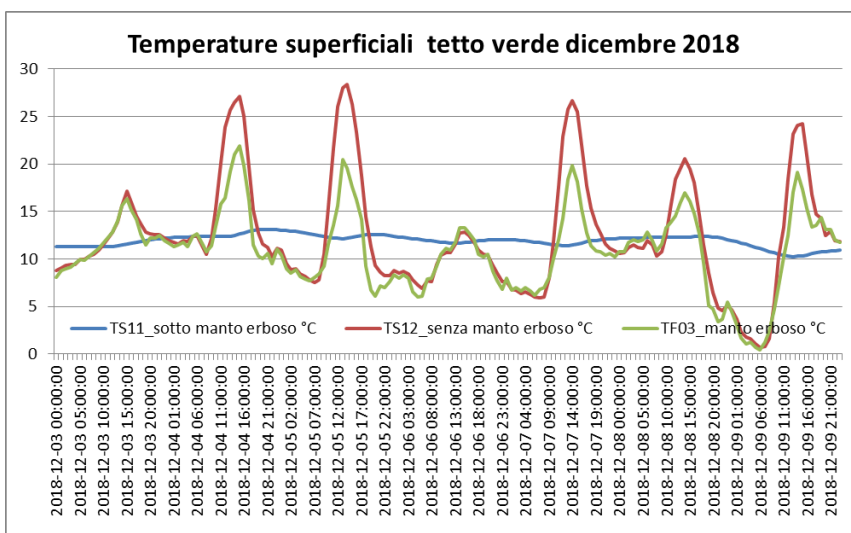


Figura 68.

L’analisi dei grafici evidenzia come nel periodo autunnale, caratterizzato da una riduzione dell’irraggiamento sul piano orizzontale, la temperatura del manto erboso superficiale, rilevata con sensore ad infrarosso (TF03), si avvicina a quella della pavimentazione priva di vegetazione (TS12). Questo effetto è dovuto al fatto che la minore radiazione solare diminuisce il delta di differenza di temperatura tra il manto erboso e la pavimentazione scoperta. In altre parole, nel periodo estivo, la vegetazione per i fenomeni biologici di fotosintesi e traspirazione favoriscono una temperatura superficiale fino a 25 °C inferiore rispetto alla pavimentazione priva dal manto erboso. Nel periodo invernale (dicembre) invece, la differenza di temperatura, tra prato e pavimentazione priva di vegetazione, non mostra differenze importanti. Analizzando la temperatura della sonda posta sotto la vegetazione (TS11) risulta un andamento del profilo termico con una limitata oscillazione. Tale dato è confermato anche nel periodo autunnale, a dimostrazione della capacità della vegetazione di generare un effetto isolante del tetto verde sia in entrata che in uscita del calore/energia tra l’esterno (vegetazione) e l’interno (ambiente interno sottostante il tetto verde). Si nota anche uno sfasamento delle temperature tra sopra e sotto la vegetazione, probabilmente dovuto all’inerzia termica generata dal prato e dal substrato sul quale insiste la vegetazione.

3 Conclusioni

L'analisi dei valori della radiazione solare incidente sull'edificio ha confermato le potenzialità di isolamento della vegetazione parietale nei confronti delle temperature superficiali delle facciate esterne ed interne dell'edificio dimostrativo. Per quanto riguarda l'integrazione di una serra bioclimatica sull'edificio dimostrativo, le attività di monitoraggio hanno evidenziato un effetto di "polmone termico" associato al prototipo di serra bioclimatica. Il comportamento termico del tetto verde, mostra un profilo con oscillazione limitata della curva di temperatura del solaio esterno dotato di vegetazione, che conferma come anche nel periodo autunnale rimane l'effetto isolante del tetto verde, ovvero la capacità di generare una barriera in entrata e in uscita del calore/energia sia dall'esterno che dall'interno. L'effetto è confermato anche da un leggero sfasamento delle temperature sopra e sotto la vegetazione, probabilmente dovuto all'inerzia termica generata dal prato e dal substrato sul quale insiste la vegetazione. Rimane ovviamente necessario analizzare in regime dinamico i fenomeni di scambio termico tra l'edificio e la vegetazione sia parietale che orizzontale per trarre considerazioni finali sulla validità tecnico-scientifica.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Campiotti C., Consorti L., Giagnacovo G., Margiotta F., Nencini L., Pazzola L., Puglisi G., Scoccianti M. L'uso della vegetazione per aumentare l'efficienza energetica degli edifici e l'impiego di sistemi di climatizzazione rinnovabile Report RdS/PAR2017/084.
- [2] Campiotti C.A., Giagnacovo G., Nencini L., Scoccianti M., Consorti L., Bibbiani C.,. Le coltri vegetali nel settore residenziale. Energia, ambiente e innovazione | 2/2018.