



Ricerca di Sistema elettrico

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

Campiotti C., Cancellara A., Consorti L., Giagnacovo G., Marani S.,
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

Campiotti C., Cancellara A., Consorti L., Giagnacovo G., Marani S., Margiotta F., Nencini L., Pazzola L., Puglisi G., Scoccianti M. (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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: B. Tecnologie "green" per gli edifici

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 INTEGRAZIONE STAZIONE DI MONITORAGGIO.....	6
2.2 INTEGRAZIONE STAZIONE DI MONITORAGGIO NEGLI AMBIENTI INTERNI.....	9
2.3 OTTIMIZZAZIONE IMPIANTO IRRIGAZIONE	10
2.4 CONSUMI D'ACQUA DELLA PARETE VERDE	10
2.5 CONSUMI D'ACQUA DEL TETTO VERDE	12
3 TETTO VERDE	13
3.1 RILEVAMENTO DATI TERMICI.....	15
4 VERDE PARIETALE	18
4.1 OSSERVAZIONI SULLE ESSENZE VEGETALI	21
4.2 DATI BIO-AGRONOMICI.....	21
5 IL SISTEMA EDIFICIO	25
5.1 CALCOLO DEI FLUSSI DI CALORE.....	25
5.2 CALCOLO DELLA COSTANTE VERDE (Kv).....	26
5.3 COSTANTE VERDE (Kv)	28
5.4 VALUTAZIONE DELLA COSTANTE VERDE (Kv).....	34
6 CRESCITA DELLE PIANTE: METODOLOGIA UTILIZZATA PER LA VALUTAZIONE DI CRESCITA	39
6.1 CRESCITA DELLE PIANTE SULLA PARETE SUD EST	39
6.2 CRESCITA DELLE PIANTE SULLA PARETE SUD OVEST	44
6.3 RELAZIONE TRA TEMPERATURA FOGLIARE, TEMPERATURA ARIA E RADIAZIONE GLOBALE	49
7 COMFORT MICROCLIMATICO DEGLI AMBIENTI INTERNI.....	51
8 SERRA BIOCLIMATICA.....	61
8.1 CARATTERISTICHE TECNICHE.....	62
8.2 CARATTERISTICHE ESTERNE	63
8.3 CARATTERISTICHE INTERNE	63
9 CLIMATIZZAZIONE MICROCLIMATICA CON SISTEMI SOLAR COOLING	65
9.1 ANALISI DELLE PRESTAZIONI DELL'IMPIANTO	65
9.2 CAMPAGNA SPERIMENTALE 2018	65
9.3 GIORNI CAMPIONE DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE DI SETTEMBRE 2018.....	72
10 CONCLUSIONI	83
11 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	84
12 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	85

Sommario

Il ruolo del verde si configura ormai un elemento di estremo interesse per il settore dell'edilizia e, più in generale per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici, delle città e dei territori. Considerando che i sistemi vegetali costituiscono un elemento vivo e dinamico che si sottrae alle regole di un'analisi prestazionale pensata e normalizzata per involucri tradizionali, e tenuto conto delle sue diverse prestazioni in relazione alle diverse essenze vegetali e alla stagionalità climatica, anche le caratteristiche termo-fisiche ed ambientali delle aree costruite devono essere considerate e valutate in funzione delle variabilità del verde e dei parametri ambientali che caratterizzano il sito. Lo sviluppo di linee guida per migliorare l'efficienza energetica degli edifici mediante la realizzazione di coltri vegetali disposte in orizzontale e/o in verticale rappresenta uno degli obiettivi prioritari del progetto in corso presso il Centro Ricerche Casaccia, anche nella prospettiva di sviluppare la progettazione di edifici "future proof" - a prova di futuro - per contrastare il cambiamento climatico. Le azioni di ricerca e sperimentazione del Dipartimento Unità Efficienza Energetica (DUEE) dell'ENEA, condotte attraverso il Programma RDS, si propongono di contribuire alla definizione di Piani di sviluppo nazionali, in linea con il position paper dell'Alliance to Save Energy "Energy Efficiency: A Tool for Climate Change Adaptation", oltre che di valorizzare i sistemi vegetali come tecnologia naturale e passiva in grado di contrastare i mutamenti climatici, di migliorare l'efficienza energetica degli edifici, nonché di favorire la resilienza e la sostenibilità ambientale delle città e dei territori.

1 Introduzione

Nell'Unione Europea il 40% dell'energia finale per il riscaldamento e il raffreddamento è consumata nel settore residenziale, il 37% nell'industria e il 18% nei servizi. I consumi energetici medi di un edificio sono mediamente stimati in circa 200.000 kJ/m³ per il riscaldamento nel periodo invernale (periodo sotto riscaldato) e in circa 150.000 kJ/m³ per la climatizzazione nei periodi estivi (periodo eccessivamente riscaldato). Nell'ultimo decennio, a causa dei mutamenti climatici, soprattutto in termini di innalzamento della temperatura durante il periodo primaverile-estivo, che sempre più spesso caratterizzano l'area mediterranea, dove ricade una buona parte del territorio italiano, il raffreddamento degli ambienti rappresenta una quota consistente del consumo di energia annuale degli edifici. In particolare, l'energia elettrica per la climatizzazione estiva, nelle diverse tipologie di edifici (pubblici, residenziali e commerciali) rappresenta ormai non meno del 30% dei consumi complessivi e le previsioni mostrano una tendenza in crescita (COM(2016) 51 final) [1]. A questo proposito, gli obiettivi dell'Unione Europea, espressi con il "Libro verde sull'Efficienza Energetica" già nel 2005 e successivamente con la Direttiva 2002/91/CE [2] sulle prestazioni energetiche degli edifici (Energy Performance of Building Directive), che ha previsto l'estensione della valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio anche al regime estivo come sottolineato dalla sostituzione del concetto di "prestazione termica invernale" con quello più ampio di "prestazione energetica globale", sono quelli di contenere i consumi energetici sia per il riscaldamento invernale che per la climatizzazione estiva. Un ulteriore avanzamento nella direzione di contenere i consumi energetici degli edifici, si è avuto con la Direttiva 2010/31/UE [3], che ha previsto che gli edifici costruiti dopo il 31 dicembre 2020 dovranno essere ad energia "quasi zero" (le pubbliche amministrazioni già dal 2018 dovranno attenersi alla costruzione di edifici ad energia "quasi zero"). Successivamente, con la Direttiva 2012/27/UE [4] sull'efficienza energetica, recepita dall'Italia con il Decreto legislativo 4 luglio 2014, l'Unione Europea (UE) ha stabilito un quadro comune di misure per una strategia a lungo termine per la ristrutturazione degli edifici residenziali e commerciali, sia pubblici che privati. In questo contesto, per quanto riguarda l'impiego dei sistemi vegetali ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica, UE, rispetto alla riduzione dei consumi di riscaldamento e di raffreddamento, con la COM(2013) 249 final "Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa", [5] e successivamente con la nuova Direttiva Efficienza Energetica» (UE) 2018/844, [6] ha ritenuto di sottolineare l'importanza per il settore dell'edilizia anche di soluzioni basate anche sul verde urbano, i.e.: coltri vegetali sugli edifici, giardini pensili, corridoi verdi, piantumazioni di siepi ed alberi, in quanto possono contribuire a migliorare l'efficienza energetica degli edifici ma anche diminuire le emissioni di gas a effetto serra nelle città (il settore delle costruzioni è responsabile del 36% di emissioni di CO₂). Pertanto, l'elemento verde che da sempre è stato considerato dagli amministratori e dai costruttori principalmente un elemento di decoro urbano, è venuto ad assumere un significato di elemento importante nell'ambito della progettazione nell'architettura e nella costruzione degli edifici. Le realizzazioni di coperture vegetali sugli edifici, definite tecnicamente "Green Roof" (Tetti Verdi), "Green Facades" (Pareti Verdi) e Green Walls (Muri Verdi), vengono ormai considerate nel settore delle costruzioni un vero e proprio componente edilizio. Gli effetti dei sistemi vegetali risulta particolarmente efficace soprattutto durante i periodi di caldo intenso poiché i sistemi vegetali (coperture verdi) agiscono sia da strato isolante per le superfici dell'edificio e sia ostacolando l'eccesso di radiazione solare incidente che agisce sulla superficie degli edifici. Infatti, parte della radiazione solare viene utilizzata dalle piante per il processo della fotosintesi clorofilliana mentre un'ulteriore quota di energia si disperde come calore latente per sostenere il fenomeno della traspirazione che caratterizza gli organismi vegetali superiori (la traspirazione di 1000 litri di acqua, associata a una superficie di essenze vegetali, consente di raggiungere dispersioni di energia di 700 kWh, in termini di calore latente). Entrambi i due fenomeni pertanto contribuiscono alla diminuzione dei flussi di energia sugli edifici e al raffrescamento dell'aria che delimita le superfici inverdite delle costruzioni sulle quali sono realizzate (Report RdS/2013/276 [7]; RdS/PAR2015/156 [8]) L'impiego di sistemi vegetali, al fine di incrementare l'efficienza energetica e la riqualificazione estetica degli edifici, si colloca all'interno degli obiettivi previsti dal Patto dei Sindaci del 2008 (The Covenant of Mayors) e in seguito tra quelli del Global Covenant of Mayors for Climate and Energy del 2017. Entrambi sostengono obiettivi mirati, in ultima analisi, alla rigenerazione energetica ed ambientale delle città e ad accelerare la decarbonizzazione dei territori dell'Unione Europea. Tra gli obiettivi, inoltre, rivestono particolare importanza anche lo sviluppo di misure per sensibilizzare gli enti locali, gli stakeholder, gli

amministratori, le associazioni e i cittadini nei confronti della necessità di fronteggiare gli effetti del Cambiamento Climatico nei confronti di fenomeni meteorologici estremi come precipitazioni violente e ondate di calore eccessivo, che ormai interessano tutte le regioni del mondo. L'Italia, inoltre, con la Strategia Energetica Nazionale 2017 (SEN) [9], ha ritenuto di integrare tali obiettivi ai fini di diminuire gli impatti sull'ambiente, sul clima e il consumo di energia, coerentemente anche con la COP 23 di Parigi, che ha proposto di mantenere l'aumento di temperatura al di sotto di 1,5 °C. Tutti i settori sono interessati: trasporti, agricoltura, industria e costruzioni, ma l'apporto maggiore è previsto soprattutto per il settore degli edifici residenziali. Per valutare l'influenza delle coltri vegetali ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica e del comfort microclimatico degli spazi interni e dell'ambiente esterno agli edifici l'ENEA, con il Programma RDS (Ricerca di Sistema Elettrico), sostenuto dal Ministero Sviluppo Economico, ha avviato un programma di ricerca per valutare sotto il profilo energetico, microclimatico, biologico ed ambientale, gli effetti della vegetazione nel settore delle costruzioni. A tal proposito, l'ENEA si è dotato di un edificio sperimentale, utilizzato come piattaforma dimostrativa, presso il Centro Ricerche Casaccia (Report RdS/PAR2015/141) [10].

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

I sistemi vegetali nelle aree urbane, recentemente, hanno trovato sempre maggiore considerazione non soltanto quale elemento decorativo ed ornamentale, ma soprattutto come elemento naturale in grado di migliorare e/o riequilibrare il microclima e l'ambiente delle città, in particolare di quelle densamente edificate. I vantaggi di una maggiore vegetazione in ambito urbano, oltre agli aspetti prettamente ecologici, includono anche quelli che si riferiscono al miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici. L'obiettivo principale di questa ricerca è rappresentato dalla "valutazione degli effetti del verde parietale e l'influenza che la vegetazione esercita sul miglioramento del microclima degli edifici, in particolare nel periodo estivo". Le attività progettuali, inoltre, considerano anche i seguenti sub-obiettivi:

- Rilevazione, mediante specifici sensori, di parametri microclimatici quali: temperatura ed umidità relativa dell'aria, temperature superficiali delle pareti schermate e non schermate dalla coltre vegetale, radiazione solare incidente, CO₂ assorbita dalle essenze vegetali;
- Analisi e valutazione della crescita vegetale in relazione alla potenzialità di ombreggiamento nei confronti della radiazione solare incidente sull'edificio dimostrativo;
- Impiego di un indicatore bioclimatico, definito "costante verde" (Kv), rappresentato da un valore adimensionale, compreso tra 0 e 1, che indica la diminuzione del flusso di calore all'interno dell'edificio per mezzo dell'inverdimento parietale;
- Calcolo e valutazioni generali del flusso di calore che si trasmette all'interno dell'edificio in rapporto al Kv;
- Considerazioni generali sui risultati sperimentali in relazione alla crescita delle essenze vegetali sia in verticale (parete vegetale) che in orizzontale (tetto verde).

2.1 Integrazione stazione di monitoraggio

Sulla base dei risultati delle precedenti attività progettuali, si è proceduto alla implementazione del sistema di monitoraggio impiegato nella precedente sperimentazione (Report RdS/PAR2015/141) [10]. In particolare, è stata integrata la sensoristica sulle pareti di sud-ovest e di sud-est e si è provveduto, inoltre, alla installazione di sensori specifici per il "tetto verde" e per il microclima degli ambienti interni dell'edificio. Di seguito si riportano i risultati dell'attività di ricerca e sperimentazione presso il Centro ENEA Casaccia nel periodo 1 ottobre 2017 - 30 settembre 2018.

Le pareti dell'edificio prototipo, oggetto di studio, sono state dotate di un sistema di monitoraggio composto da numerosi sensori specifici per la rilevazione dei parametri microclimatici di seguito elencati:

- velocità e direzione del vento (m/s);

- precipitazioni, (mm);
- temperatura e umidità relativa dell'aria (°C) e (%);
- radiazione globale (W/m²), (300-1100 nm);
- radiazione visibile (PAR), (μmol/m² s⁻¹);
- temperatura della superficie vegetale (°C) mediante sensori di temperatura a contatto (cat.TT-600);
- temperatura suolo del substrato di coltivazione delle piante(°C);
- contenuto idrico del suolo (m³/m³);
- temperatura superficiale delle pareti (°C) schermate e non schermate dai sistemi vegetali mediante sensore di temperatura a contatto (cat.TT-600);
- CO2 (ppm); O2 (%);
- temperatura fogliare delle essenze vegetali (°C);
- anemometri per la misurazione della velocità del vento (WS02) e della direzione del vento (WD02);
- 2 globotermometri e 2 termoigrometri posizionati al primo e secondo piano dell'edificio prototipo, oggetto di analisi, per valutare il comfort microclimatico interno confrontando i valori interni monitorati delle temperature medie radianti, della temperature dell'aria e dell'umidità relativa rispetto a quelli riportati nella Norma UNI EN ISO 7730:2006.

La frequenza di acquisizione delle misure è stata differenziata tra i vari sensori e la memorizzazione del dato dà luogo a una sequenza di record nella memoria di massa del data-logger, che alimenta un database in un server remoto. I dati sono stati quindi resi disponibili nel front del software di gestione Olinda fornito da TECNO-El srl (Formello), Roma. Per quanto riguarda la misura della radiazione globale, sono stati utilizzati tre sensori: uno collocato nella capannina meteo disposta sul lastrico solare, uno sul lato sud-ovest all'interno della parte verde e uno sul lato sud-est tra la parete verde e l'edificio. Per il rilevamento della radiazione solare e delle temperature relative alle pareti dell'edificio non si è tenuto conto della influenza delle ombre causate dalla struttura metallica della parete.

In questa sezione, organizzata in uno o più capitoli, si descrive il lavoro svolto (teoria, metodologie sperimentali utilizzate, tecnologie sviluppate, ecc.) e s'illustrano i risultati ottenuti ed eventuali prodotti realizzati.

Nell'annualità, PAR 2017, si è suddiviso il periodo di misurazione dei dati in tre macro-periodi (Tabella 1).

Tabella 1. 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 si riferiscono all'avanzamento 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. Nel primo periodo, per il primo piano dell'edificio esposto a sud-ovest, sono stati disposti i seguenti sensori: misurazione della temperatura superficiale esterna (TS05), fuori dalla parete verde e dietro la parete verde (gap), della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa (AT02/RH02), della temperatura fogliare (TF01), della radiazione fogliare (PAR02/03), della radiazione solare globale (GR02); misurazioni della direzione e velocità del vento (WS/WD), della temperatura dell'aria e umidità relativa (AT01/RH01), della radiazione fogliare (PAR01), della radiazione solare globale (GR01) posizionati sul tetto verde dell'edificio (Figura 1).



Figura 1. Disposizione sensori-primo periodo

Nel secondo periodo, si è provveduto ad alimentare il sistema di acquisizione dati alla rete elettrica dell'edificio, in quanto nel periodo precedente (dal 01 ottobre 2017 al 24 aprile 2018) si era evidenziato che il pannello solare di alimentazione del sistema di monitoraggio era insufficiente a mantenere l'alimentazione elettrica dei numerosi sensori in tutte le ore del giorno. Questa limitata capacità di alimentazione, si è resa responsabile della mancanza di dati, soprattutto nel periodo invernale quando l'irraggiamento solare era meno intenso o assente. La collocazione del sensore di radiazione solare globale (GR02), è stato affiancato al sensore della radiazione fogliare (PAR02), entrambi collocati esternamente alla parete verde. Al primo piano della parete sud-ovest, tra la parete fogliare e la parete dell'edificio (gap), sono stati inoltre aggiunti i sensori della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa (AT03/RH03), il sensore della radiazione solare globale (GR03) e della radiazione fogliare (PAR03) (Figura 2. Integrazione della sensoristica

2).



Figura 2. Integrazione della sensoristica

E' stata aggiunta una nuova stazione di monitoraggio per la parete esposta a sud-est che ha previsto i sensori: della radiazione fogliare (PAR04), della radiazione solare globale (GR04), della temperatura dell'aria e umidità relativa (AT04/RH04), della temperatura superficiale esterna in assenza della coltre vegetale (TS04), sensori all'interno del gap per la temperatura dell'aria e umidità relativa (AT05/RH05), della radiazione fogliare (PAR05), della radiazione solare globale (GR05), della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa (AT05/RH05 e (AT06/RH06), e anche tre sensori per il rilevamento della temperatura superficiale esterna (TS02, TS06, TS04) posti al primo piano dell'edificio (Figura 3).



Figura 3. Disposizione sensori nel "gap"

Nel terzo periodo al primo e secondo piano della parete di sud-ovest sono stati aggiunti gli anemometri per la misurazione della velocità del vento (WS02) e della direzione del vento (WD02). Sulla parete sud-est sono stati aggiunti i sensori per la misurazione della temperatura fogliare (TF02) e i due anemometri, rispettivamente al primo e al secondo piano per la misurazione della velocità del vento (WS04/WS05) e della direzione del vento (WD04/WD05) (Figura 4).



Figura 4. Immagine complessiva con disposizione anemometri

2.2 Integrazione stazione di monitoraggio negli ambienti interni

In questa nuova annualità, inoltre, sono stati installati appositi sensori per le misure di comfort e benessere ambientale degli spazi adiacenti alle coltri, in particolare: 2 globotermometri e 2 termoigrometri posizionati al primo e secondo piano dell'edificio prototipo. In questo modo sono stati raccolti dati microclimatici per una valutazione generale del microclima interno confrontando i valori monitorati delle temperature medie radianti, della temperatura dell'aria e dell'umidità relativa, rispetto ai valori di tali parametri previsti dalla Norma UNI EN ISO 7730:2006. All'interno dell'edificio nelle stanze in corrispondenza della parete verde al primo sulla parete sud-ovest sono stati installati i sensori TS01 e TS08 mentre sulla parete a sud-est il sensore TS07. Per il monitoraggio interno della temperatura media radiante è stato posizionato al centro della stanza un cavalletto sul quale è stato posizionato un globotermometro (TaG01) e un termoigrometro per la misurazione dell'umidità e della temperatura ambiente (AT/RH07). All'interno dell'ambiente corrispondente al secondo piano sono stati posizionati un globotermometro (TaG02) e un termoigrometro per la misurazione interna dell'umidità e della temperatura dell'aria (AT/RH08) oltre a una termocoppia per la misurazione della temperatura superficiale al soffitto (TS09) (Figura 5).



Figura 5. Misurazioni interne al secondo piano dell'edificio

2.3 Ottimizzazione impianto irrigazione

Il processo di irrigazione è un aspetto molto importante nella gestione economica e di crescita di un sistema vegetale predisposto su un edificio. Impianti d'irrigazione opportunamente progettati e realizzati sono essenziali, infatti, per ottimizzare il processo di irrigazione in funzione della crescita vegetale e in funzione di una irrigazione razionale finalizzata a ridurre degli sprechi d'acqua. Durante l'attività sperimentale sono stati rilevati i consumi di acqua dell'impianto nel periodo 1 maggio 2017 - 30 settembre 2018 sia per la parete verde che per il tetto verde, sulla base degli orari e della durata di irrigazione, del quantitativo di acqua recuperata e rispetto alla pressione d'esercizio. Per quanto riguarda la parete verde, si è usufruito di sensori in grado effettuare un monitoraggio continuo ed in tempo reale del contenuto d'acqua nei vasi del sistema, interfacciandosi con i sistemi di irrigazione, al fine di attivare/disattivare automaticamente i gocciolatoi, in funzione del contenuto idrico rilevato nel terreno e, in questo modo, consentendo di settorializzare l'irrigazione solo alle "aree vegetali" che richiedevano di essere irrigate.

2.4 Consumi d'acqua della parete verde

Il quantitativo d'acqua giornaliero complessivo per l'intera parete (130 m²) è stato, nel periodo estivo 2018, di 756 litri suddivisi in due irrigazioni al giorno con orario di partenza alle 21:00 e alle 7:00, sulla base di una durata d'irrigazione di 20 minuti. Praticamente, sono stati consumati circa 16 litri/pianta, per un totale di 42 piante, distribuite su 21 portavasi collocati orizzontalmente sulla griglia metallica esterna all'edificio. Nella Tabella 2 sono riportati i quantitativi d'acqua somministrata ad ogni irrigazione.

Tabella 2

Litri per gocciolatoio/minuto	Litri per Gocciolatoio/20minuti	Litri vaso (3 gocciolatoi vaso)	Litri per piano (7 vasi)	Litri parete
0,3	6	18	126	378

Sono state effettuate prove di recupero dell'acqua d'irrigazione mediante il serbatoio di recupero collocato a terra e in questo modo è stato possibile effettuare prime valutazioni sui quantitativi d'acqua necessari alle piante ai fini della razionalizzazione del tempo di funzionamento dell'impianto idrico in funzione del numero di attivazioni dell'irrigazione. Nello specifico, si è notato come ad ogni irrigazione il quantitativo d'acqua recuperato corrispondesse a circa il 20% del quantitativo d'acqua distribuito, in parte dovuto anche al substrato, non perfettamente compatto, all'interno dei vasi e alla non perfetta omogeneità di distribuzione da parte dei gocciolatoi. Infatti, si sono registrati, sebbene poco frequentemente, difetti dei gocciolatoi, distacchi delle testine rompigitto che hanno talvolta causato irrigazioni concentrate in superfici limitate e un lieve abbassamento della pressione dell'acqua dei getti a monte dello stesso. Il consumo energetico, dovuto al solo azionamento della pompa idrica è stato di 0.75 kWh/giorno. Di seguito si riportano una serie di grafici che illustrano le temperature del suolo rilevate durante il periodo maggio-agosto 2017, che coincide con il periodo di maggiore richiesta idrica delle essenze vegetali (Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9).

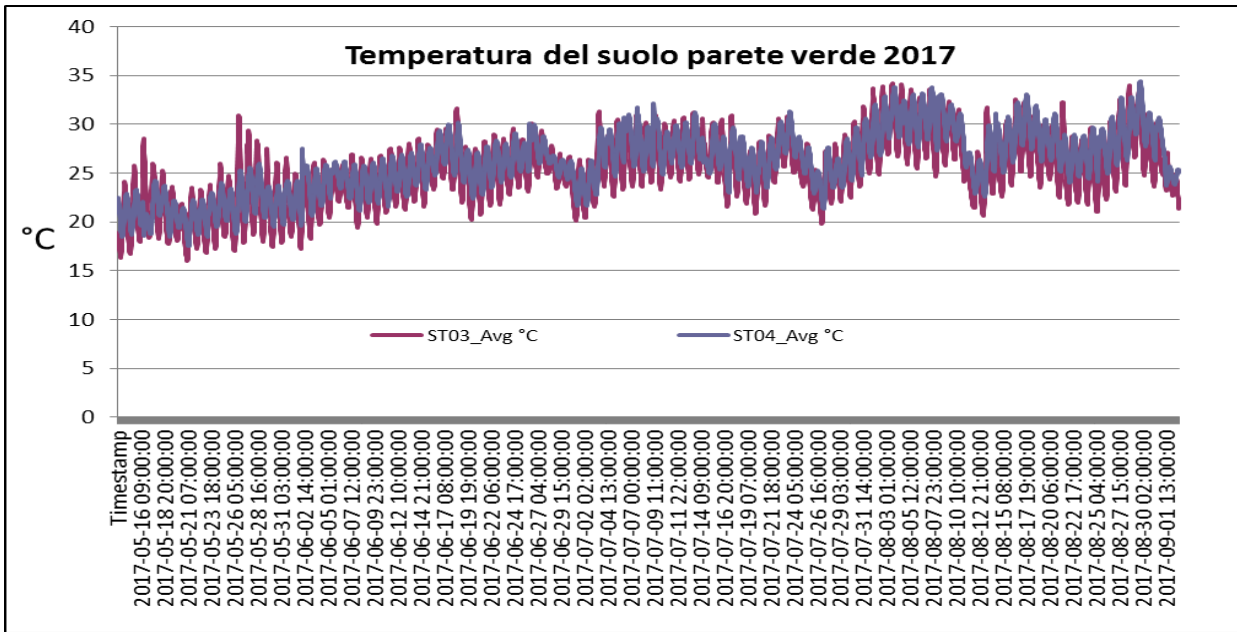


Figura 6.

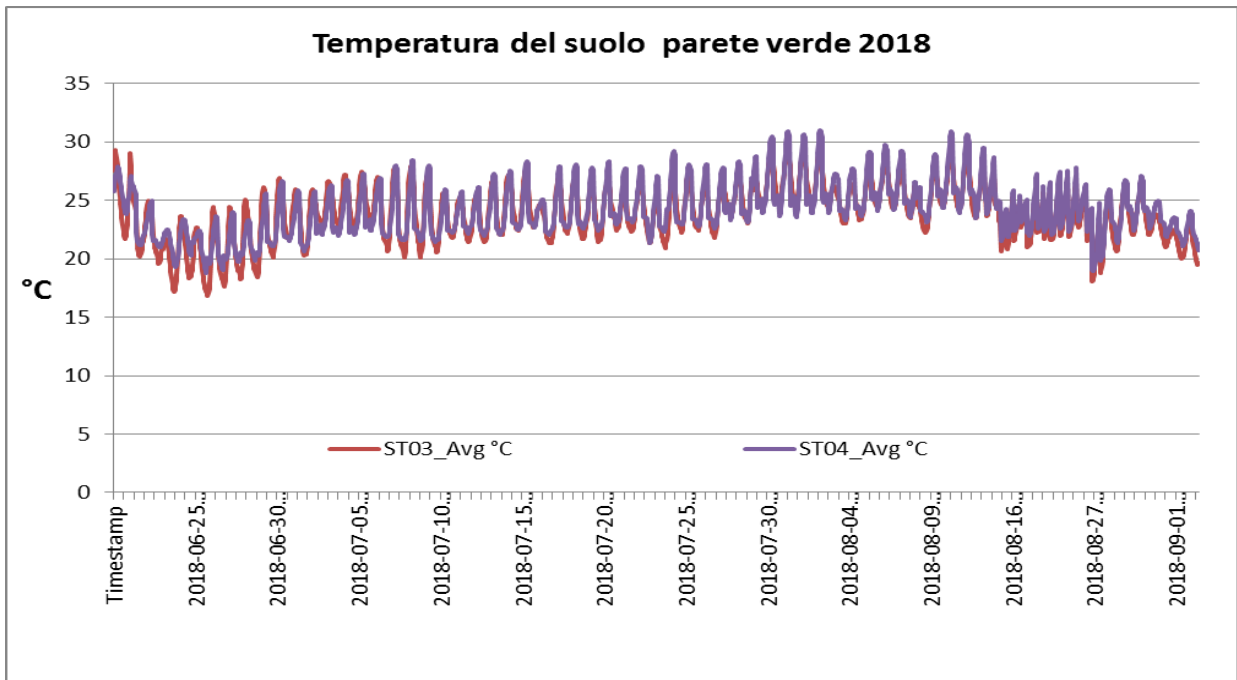


Figura 7

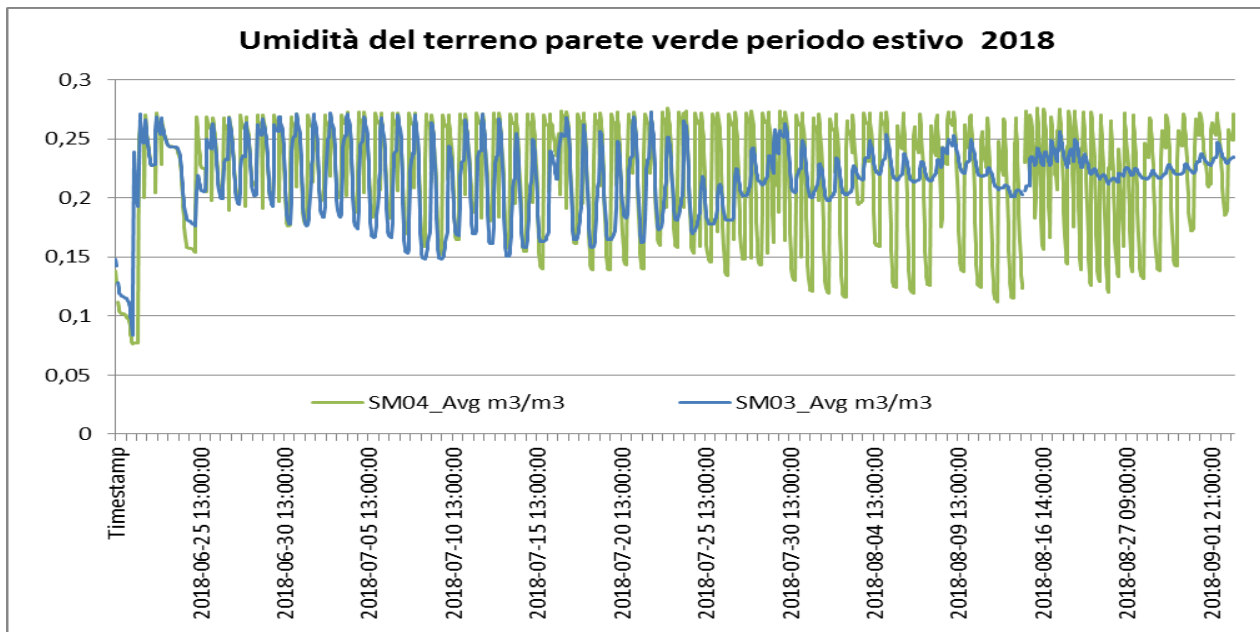


Figura 8

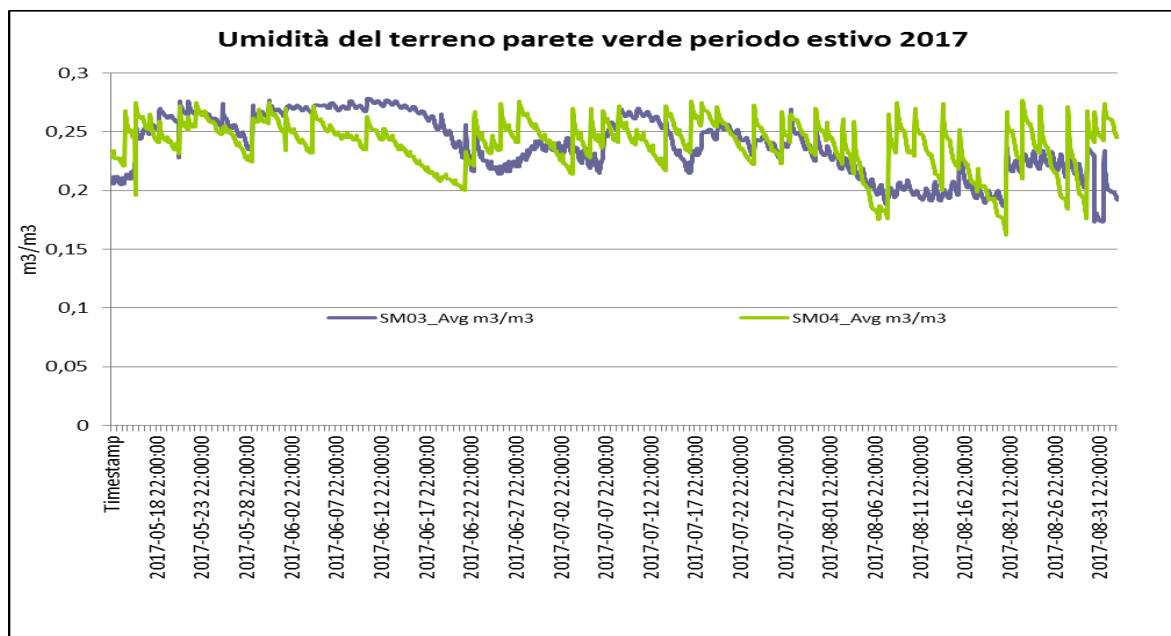


Figura 9

2.5 Consumi d'acqua del tetto verde

L'impianto d'irrigazione del prato (tetto verde), attivo dal 1 maggio 2018 al 30 settembre 2018, è stato diviso in due zone: zona 1 a servizio del prato costituito da un mix di piante erbacee (*Festuca arundinacea* Schreb e *Poa pratensis* L.) e zona 2 a servizio della superficie interessata da una vegetazione di *Sedum*. La zona 1, irrigata con irrigatori a turbina dotati di ugello intercambiabile, ha richiesto un quantitativo d'acqua giornaliero pari a 432 litri. La centralina era impostata per un funzionamento di 20 minuti alla pressione d'esercizio pari a 2,5 bar e ugelli da 1,5 mm. Nel periodo durante il quale si sono riscontrate le temperature maggiori dell'aria, dal 5 luglio al 20 agosto, il quantitativo d'acqua è stato raddoppiato facendo partire l'impianto idrico due volte durante l'arco della giornata, la prima rispettivamente alle 5,30 del mattino e la seconda alle 00:00, per una durata di 20 minuti ciascuna. La parte interessata dal *Sedum* (zona 2), bagnata nel periodo estivo da 5 irrigatori statici impostati con arco di gittata pari a 90° e pressione d'esercizio pari 1,5 bar, ha richiesto un quantitativo d'acqua giornaliero pari a 120,75 litri. La centralina idrica, impostata per un funzionamento di 15 minuti, ha garantito un quantitativo di precipitazione pari a 49 mm/ora. La superficie verde del terrazzo, di 90

m2, ha richiesto un consumo d'acqua pari a 6,14 litri/m2. Nelle Tabelle 3. e 4. si riportano i valori dei quantitativi d'acqua giornalieri somministrati alla vegetazione sul tetto verde.

Tabella 3. Irrigazione prato (irrigatori a turbina)

Quantitativo acqua zona 1			Quantitativo acqua zona 2			Totale
Litri/min per irrigatore a turbina	Litri/20 min	Litri /20 min (4 irrigatori)	Litri/min per irrigatore statico	Litri/15min	Litri/15 min (5 irrigatori statici)	(litri/giorno)
5,4	108	432	1,61	24,15	120,75	552,75

Dal 5 luglio al 20 agosto causa eccessivo caldo il quantitativo d'acqua somministrato è stato di 1105,5 litri/giorno (12,28 litri/m²). Il consumo energetico è stato di 0,75 kwh/giorno.

Tabella 4. Irrigazione prato (Dati finali)

Parametri	Parete verde	Prato	Totale
Litri/giorno	756	553	1309
Litri/anno (150 giorni)	113.400	99.517,5 (49747,5 dal 5/7 al 20/8)	212.917,5
Consumo specifico litri /m ² (150g)	872,3	1105,75	
Consumo litri/m ² giorno	5,81	12,2	
kWh/giorno	0.75	0.75	1,5
kWh/anno	75	75	150

3 Tetto verde

Questa tipologia di sistema vegetale comprende essenzialmente tre tipologie: tetti verdi estensivi, tetti verdi intensivi e tetti verdi semi-intensivi. Le tre tipologie sono basate essenzialmente sulle caratteristiche delle specie vegetali e della stratigrafia di costruzione (Figura 10). Quest'ultima rappresenta una serie di funzionalità, di cui le principali sono: elemento portante, lo strato di impermealizzazione e di drenaggio, il substrato di coltivazione e lo strato di vegetazione ovvero la "copertura verde". Particolare attenzione nella realizzazione di una copertura verde orizzontale posta sul lastrico solare di un edificio deve essere dedicata al peso della stratigrafia che costituisce il sistema verde. A questo proposito, la normativa italiana (UNI 11235) [11] descrive le caratteristiche dei materiali e dei componenti specifici per realizzare la copertura verde.



Figura 10. Caratteristiche del tetto verde riportato nella norma UNI 11235

Per gli edifici e, in generale, per l'ambiente urbano, le coperture verdi orizzontali (tetto verde) apportano una serie di benefici, dovuti essenzialmente alle caratteristiche della stratigrafia del soffitto e del lastrico solare nonché rispetto alla fisiologia delle essenze vegetali utilizzate per il coltivo verde. Tenuto conto di tali elementi, è opportuno sottolineare che il miglioramento microclimatico associato al tetto verde risulta assicurato soprattutto per gli spazi interni sottostanti al tetto verde. Tra i benefici più importanti abbiamo:

- contenimento della temperatura superficiale che, sotto lo strato verde, raggiunge valori notturni superiori a quelli esterni, dovuto ai minori effetti radiativi notturni della massa verde;
- diminuzione del calore apportato dalla radiazione solare grazie ai consumi di energia richiesti dai fenomeni di evapotraspirazione e dalla fotosintesi clorofilliana che caratterizzano gli organismi vegetali;
- aumento dell'isolamento dei materiali della stratigrafia del lastrico solare che attraverso la realizzazione di un tetto verde, nei periodi estivi contribuisce a mantenere una temperatura inferiore negli spazi interni sottostanti il tetto verde mentre nei periodi invernali contribuisce a mantenere una temperatura interna maggiore.

Tuttavia, il potenziale del tetto verde rispetto alla riduzione del potenziale termico che caratterizza il lastrico solare non sempre incide significativamente sulle proprietà di isolamento della stratigrafia del lastrico solare, soprattutto nel periodo estivo, in presenza di una copertura tradizionale con ottimo isolamento. In ultima sintesi, il valore aggiunto più evidente di un tetto verde consiste nel miglioramento microclimatico in relazione alle stesse proprietà delle piante verdi che si possono considerare "materiali freddi" e quindi in grado di mantenere una temperatura superficiale vicina a quella dell'aria esterna al contrario dei "materiali caldi" che nei mesi estivi raggiungono temperature di 60-70 °C. Questo vantaggio termico è sostanzialmente dovuto alla albedo dell'elemento verde ossia alla buona capacità di riflettere la radiazione solare incidente e alla scarsa emissività delle piante e quindi non riscaldano l'aria circostante (emettono meno radiazione infrarossa, ossia meno calore, che si traduce in una riduzione del surriscaldamento delle superfici adiacenti la vegetazione). Le considerazioni energetiche sulla vegetazione dei tetti verdi in relazione al periodo stagionale si possono, pertanto, sintetizzare in un maggiore isolamento termico della stratigrafia del tetto dell'edificio dovuto alle caratteristiche del coltivo vegetale (substrato) e delle caratteristiche fisiologiche delle piante (Tabella 5). Più in dettaglio:

- regime invernale - maggiore isolamento termico in condizioni di "asciutto" (non bagnato), infatti la capacità di isolamento del substrato diminuisce con la presenza di acqua;
- regime estivo - il verde agisce come isolamento termico in condizioni di "asciutto" oltre che come estrattore naturale di calore dall'ambiente sottostante il verde, poiché le piante accumulano calore che viene dissipato per evapotraspirazione e per fotosintesi.

Per il tetto verde è stato utilizzato un prato a *Festuca arundinacea* e *Poa pratensis*, entrambe graminaceae microterme e quindi con un optimum di temperature da 15-24 °C. Questa tipologia consente una totale copertura della struttura e presenta basse richieste idriche con irrigazioni ogni due o tre giorni, con impianto nei comuni prati, mentre per un tetto verde di tipo estensivo la richiesta idrica è maggiore. La scelta di specie vegetali del genere *Sedum*, piante rustiche con apparati radicali poco profondi e con basse esigenze idriche richiedono solo irrigazioni di supporto nei periodi estivi. I *Sedum* sono presenti come piante spontanee in tutta Italia dal nord al centro-sud e offrono una copertura totale oltre a presentare fioriture in primavera che valorizzano le caratteristiche visive del tetto verde. Sebbene il tetto a *Sedum* presenti vantaggi rispetto alla ridotta richiesta idrica, tuttavia presenta una ridotta traspirazione, non particolarmente adatta per raffrescare gli ambienti come altre specie vegetali non crassule. Il prototipo di tetto verde realizzato sull'edificio dell'Enea, "casa delle energie" ha ospitato anche una limitata area sperimentale (circa 2 m²) utilizzata per valutare l'impiego di piante autoctone quali *Echium vulgare* L. e *Echium planatagineum* L. (famiglia Borraginaceae) e la *Lippia nodiflora* L. (Verbenaceae). Le specie di *Echium* sono particolarmente importanti per l'impiego sui tetti verdi per le loro caratteristiche attrattive per le api e perché rischiano di scomparire. La sperimentazione effettuata nei confronti dei parametri di temperatura che determinano la stessa efficacia del sistema costruttivo

del tetto verde (Figura 11), ha finora consentito di rilevare i dati riportati nei grafici (Figura 12, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, Figura 14) e nelle tabelle 5 e 6 che seguono.



Figura 11. Tetto verde

3.1 Rilevamento dati termici

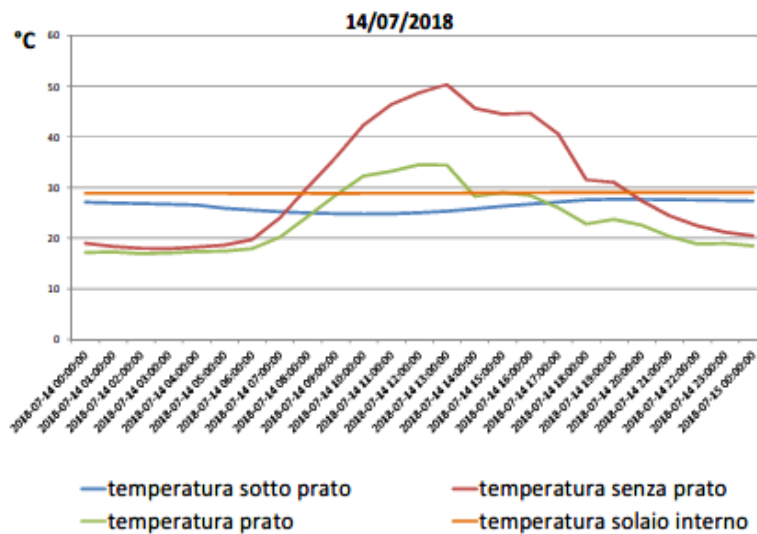


Figura 12

La Figura 13 evidenzia una maggiore coibentazione del solaio interno dovuto all'isolamento che il tetto verde riesce ad assicurare rispetto alla copertura del lastrico solare con il pavimento tradizionale. Le differenze di temperatura superficiale tra il pavimento "nudo" e rispettivamente inverdito risultano di 25 °C oltre a una maggiore stabilità termica che si evidenzia con la maggiore uniformità del pavimento inverdito. La Figura 13 mette in forte evidenza il minore riscaldamento del manto costituito dalla coltivazione vegetale rispetto al materiale che costituisce la pavimentazione tradizionale del lastrico solare e la stabilità termica del solaio interno sotto il profilo termico che mostra variazioni non superiori a 1,5 °C.

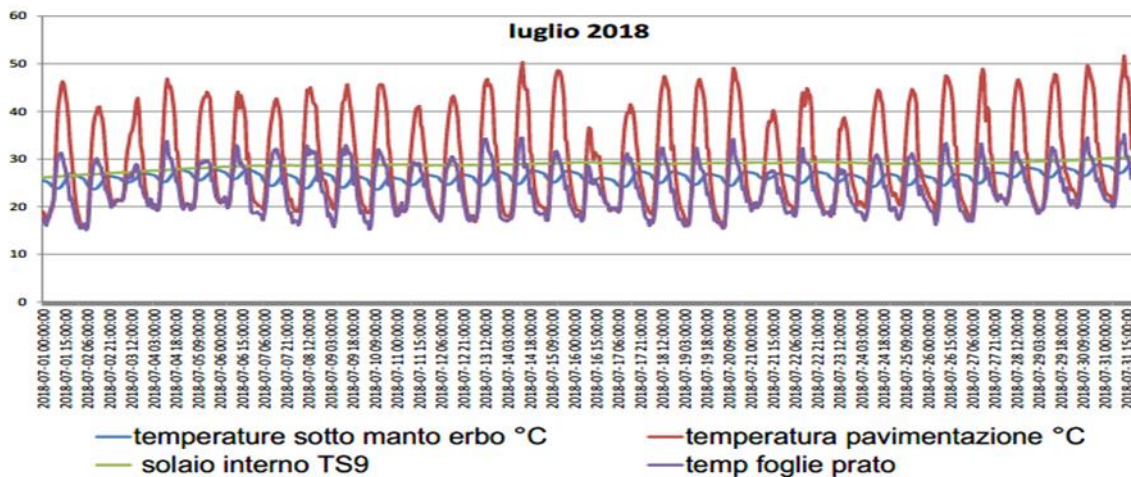


Figura 13

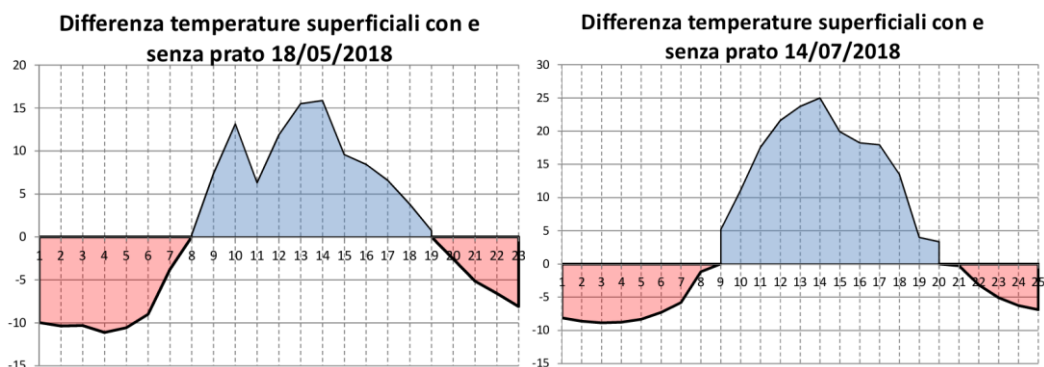


Figura 14

I dati nella Tabella 5 mostrano le caratteristiche termiche dei materiali più utilizzati per la realizzazione dei lastrici solari. I dati riportano una valutazione delle caratteristiche della stratigrafia inverdita che mostrano una trasmittanza termica superiore di circa il 43% rispetto alla stratigrafia priva del sistema verde. La Tabella 6 riporta i valori di trasmittanza termica per accedere agli incentivi ecobonus previsti per gli edifici.

Tabella 5. Valutazioni sul miglioramento della trasmittanza termica della stratigrafia dotata di tetto verde

	DESCRIZIONE	SPESSORE	CONDUTTIVITA' [λ]	RESISTENZA TERMICA [R]	TRASMITTANZA TERMICA [U]
		(m)	W/mK	m ² K/W	W/m ² K
Solaio	Resistenza termica interna			0,100	
	Intonaco interno	0,015	0,240	0,063	
	Pignatta *	0,180		0,300	
	Isolante termico	0,080	0,035	2,286	
	Massetto in cls	0,050	1,490	0,034	
	Guaina imp. bituminosa	0,004	0,150	0,027	
	Piastrelle	0,012	0,800	0,015	
RESISTENZA TERMICA STRUTTURA [R struttura]				2,823	
TRASMITTANZA TERMICA STRUTTURA [U struttura]					0,35
GREEN	Substrato **	0,100	0,280	0,357	
	Strato drenante	0,058	0,033	1,758	
RESISTENZA TERMICA GREEN [R green]				2,115	
TRASMITTANZA TERMICA GREEN [U green]					0,47
RESISTENZA TERMICA TOTALE [R totale]				4,938	
TRASMITTANZA TERMICA TOTALE [U totale]					0,20

* Pignatta - UNI 10355

** Sistema estensivo con spessore di sub strato medio pari a 10 cm

PERCENTUALE di guadagno

42,82%

Tabella 6. Criteri per l'ammissibilità agli ecobonus edifici

Allegato I

Criteri di ammissibilità degli interventi

1. Criteri di ammissibilità per interventi di piccole dimensioni di incremento dell'efficienza energetica di cui all'articolo 4, comma 1

Nelle tabelle sottostanti si riportano i requisiti di soglia per l'accesso agli incentivi di cui all'articolo 4, comma 1, del presente decreto.

Tabella 1 - Valori di trasmittanza massimi consentiti per l'accesso agli incentivi

Tipologia di intervento		Requisiti tecnici di soglia per la tecnologia	
Articolo 4, comma 1, lettera a)	i. Strutture opache orizzontali: isolamento coperture (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica B	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica C	$\leq 0,27 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica D	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica E	$\leq 0,20 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica F	$\leq 0,19 \text{ W/m}^2\text{*K}$
	ii. Strutture opache orizzontali: isolamento pavimenti (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A	$\leq 0,43 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica B	$\leq 0,40 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica D	$\leq 0,28 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica E	$\leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica F	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{*K}$
	iii. Strutture opache verticali: isolamento pareti perimetrali (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 6946)	Zona climatica A	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica B	$\leq 0,38 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica C	$\leq 0,30 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica D	$\leq 0,26 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica E	$\leq 0,23 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica F	$\leq 0,22 \text{ W/m}^2\text{*K}$
Articolo 4, comma 1, lettera b)	Sostituzione di chiusure trasparenti, comprensive di infissi (calcolo secondo le norme UNI EN ISO 10077-1), se installate congiuntamente a sistemi di termoregolazione o valvole termostatiche ovvero in presenza di detti sistemi al momento dell'intervento.	Zona climatica A	$\leq 2,60 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica B	$\leq 2,60 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica C	$\leq 1,75 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica D	$\leq 1,67 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica E	$\leq 1,30 \text{ W/m}^2\text{*K}$
		Zona climatica F	$\leq 1,00 \text{ W/m}^2\text{*K}$

L'integrazione della vegetazione orizzontale (tetto verde) nell'involucro edilizio, pertanto, consente l'incremento dell'efficienza energetica del lastrico solare nel periodo invernale ed estivo, attraverso l'incremento della resistenza termica e dell'inerzia termica. Da sottolineare che l'utilizzo di "sistemi verdi" orizzontali comprendono oltre alla vegetazione anche substrati solidi per la vegetazione che, in generale, sono in grado di migliorare le capacità isolanti delle strutture edilizie esterne (lastrici solari/tetto). Le prime analisi dei dati sul terrazzo verde, in situazione stazionaria, mostrano che il tetto verde, aumenta l'isolamento del lastrico solare di circa il 42,82%, che in prima approssimazione, si traduce in una riduzione del flusso di calore dall'ambiente interno all'esterno dell'edificio nel periodo invernale e in un flusso di radiazione solare minore nel periodo estivo, con benefici sui costi della climatizzazione ambientale.

4 Verde parietale

Il sistema di verde verticale è stato realizzato sulla base di un impianto costituito da due strutture d'acciaio auto-sostenibili, ancorate rispettivamente a terra e alle facciate sud-est (Figura 15) e sud-ovest (Figura 16), entrambe dotate di una rete metallica disposta a 60 cm dalle pareti d'appoggio. La struttura presenta dei passaggi metallici, disposti orizzontalmente su tre altezze differenti in modo tale da consentire agli operatori di accedervi per gestire la coltivazione delle piante ed effettuare i vari controlli e misurazioni.

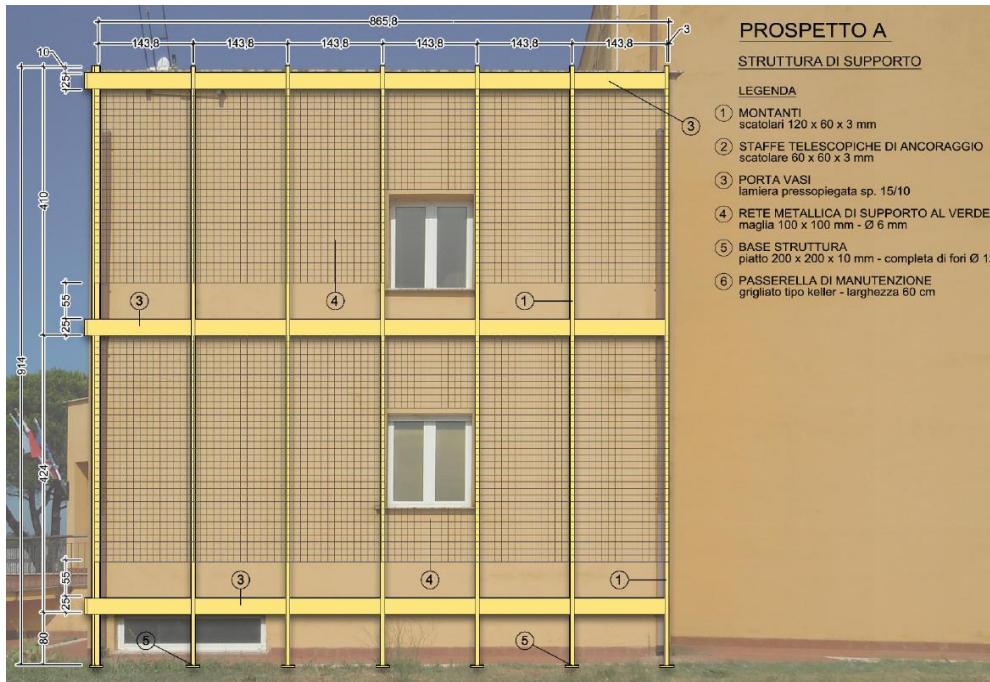


Figura 15 - Prospetto della parete di sud-est



Figura 16- Prospetto della parete di sud-ovest

L'effetto schermante della coltre vegetale si manifesta soprattutto in relazione con l'aumento della quantità di radiazione solare incidente. In particolare:

- La parete situata a sud est si trova esposta alla radiazione solare diretta durante l'intera mattinata, pertanto l'isolamento esercitato dalla coltre vegetale risulta aumentare fino alle ore 11 in cui tocca il picco di 14°C per poi iniziare a decrescere nelle ore successive.
- La parete di sud ovest, risulta ombreggiata durante la mattinata, quindi le sue pareti si riscaldano soprattutto tramite la radiazione diffusa.
- Dopo le ore 12, ed in particolare nell'orario compreso tra le 13 e le 14, il sole arriva a incidere in modo diretto sulla parete di sud ovest, che mostra un aumento di temperatura nel pomeriggio tra le 17 e le

18, quando si raggiunge la differenza massima tra il muro schermato e quello non schermato di circa 13°C.

La Figura 17 mostra l'andamento dell'irraggiamento incidente sulla parete verde, relativamente all'orientamento di sud ovest e rispettivamente di sud est.

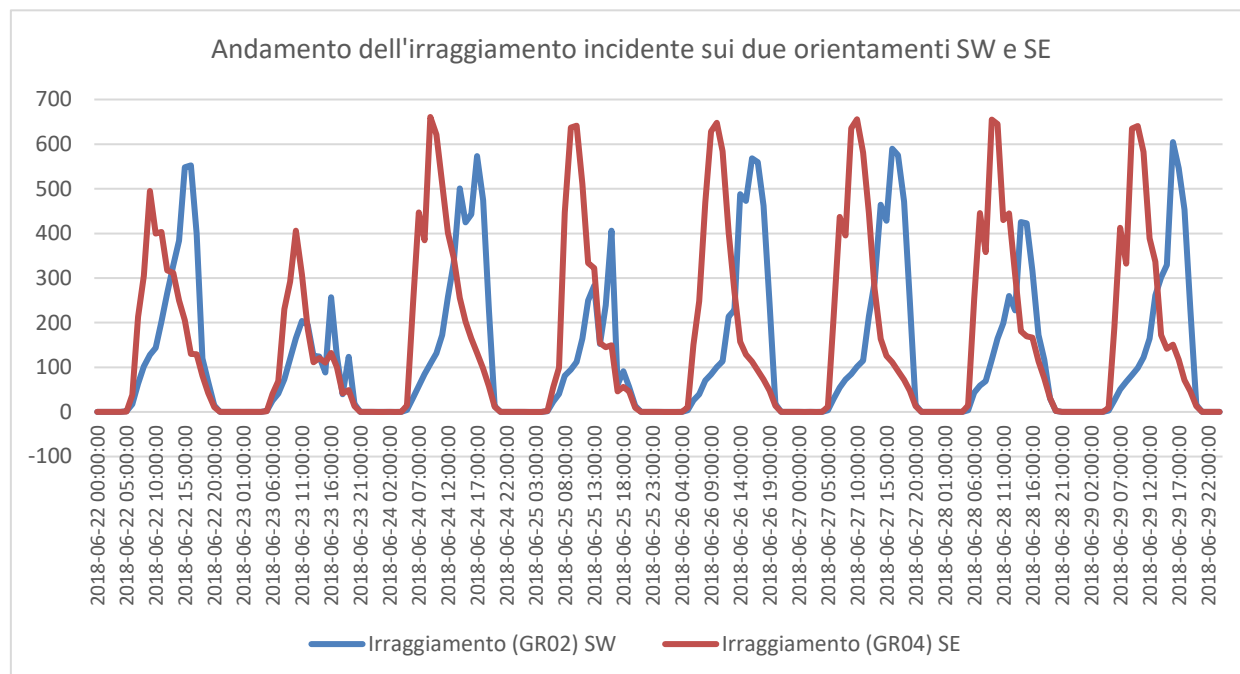


Figura 17 - Andamento dell'irraggiamento incidente sui due orientamenti SW e SE

Negli anni precedenti Par 2016 e Par 2017 sono state effettuate prove sia in relazione alla crescita sia rispetto all'isolamento termico degli edifici di più piante appartenenti a differenti specie vegetali. Sulla base dei risultati ottenuti nel precedente anno (PAR 2016) sono state scelte 2 specie di piante diverse e inserite sia sulla parete esposta ad est sia su quella esposta a sud ovest. Le specie scelte sono state il *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch appartenente alla famiglia delle Vitaceae e *Hedera helix* L. appartenente alla famiglia delle Araliaceae. In tal modo si è voluto valutare la performance di crescita coprente e isolamento termico della stessa specie nelle due differenti esposizioni. Il *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch è stato posizionato al primo piano dell'edificio mentre *Hedera helix* L. al secondo piano dell'edificio. Le elaborazioni dei dati termici e di quelli bioagronomici sono stati effettuati prevalentemente sulla coltura del *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch. Il *Parthenocissus quinquefolia* L. Planch è una specie naturalizzata in Italia e presente nel nostro paesaggio. E' specie rustica e si è ben acclimatata alla crescita nelle condizioni ambientali e di coltura in vaso con substrati ridotti, ha superato sia la stagione estiva sia quella invernale del 2017- 2018 e dalle curve di crescita effettuate lo scorso anno è risultato una crescita rapida e capacità di copertura interessante ai fini di una valutazione degli effetti della vegetazione sulla riduzione della temperatura sugli edifici. Il *Parthenocissus quinquefolia* è specie diffusa in Italia e come la maggior parte delle specie rampicanti è anche infestante ma nel caso della coltura in vaso, come effettuato nel progetto parete verde della casaccia non è richiesta particolare accortezza. Altre specie di piante inoltre, sono state inserite in punti della parete che non influenzano lo studio sull'aspetto termico ma che consentono una ulteriore valutazione della crescita di altre specie, arricchiscono la biodiversità e rendono la parete più gradevole alla vista. Sul parte laterale esposto a sud est-ovest sono state inserite due piante di *Wisteria sinensis* Sims, sia al primo che al secondo piano. La *Wisteria sinensis* Sims è pianta a foglie caduche appartenente alla famiglia delle Fabaceae, piuttosto resistente e a rapida crescita. Rispetto alla parete verde del 2017 sono state mantenute le colture di *Trachelospermum jasminoides* (Lindl.) Lem. al primo piano e secondo piano parte laterale della parete di sud est, *Vitis vinifera* L. varietà Regina, in corrispondenza della finestra del primo

piano e il *Solanum jasminoides* Paxton in corrispondenza della finestra del secondo piano. I vasi utilizzati per la messa in coltura delle essenze rampicanti e posti nei portavasi metallici sono vasi commerciali di dimensioni cm 100x46x40 realizzati con resine termoplastiche (PP) resistenti agli urti, al gelo (-20°), ai raggi U.V. e interamente riciclabili.

4.1 Osservazioni sulle essenze vegetali

- Il *Trachelospermum jasminoides* è una pianta appartenente alla famiglia delle Apocynaceae. Si tratta di una pianta ornamentale sempreverde, presente nel territorio come componente di siepi e delle divisioni di giardini. È pianta piuttosto resistente e ha superato le stagioni invernali. Presenta una crescita lenta nel primo anno della messa in coltura per poi crescere più velocemente una volta effettuato l'acclimatazione. Offre abbondanti e profumate fioriture che vanno da maggio a luglio ed è gradevole per il paesaggio. *Solanum jasminoides* Paxton famiglia Solanaceae è una pianta ornamentale, resistente e rampicante volubile, i cui fusti si attorcigliano spontaneamente al supporto scelto.
- La *Vitis vinifera* L., vite da uva è stata mantenuta nei pressi della finestra del primo piano anche a dimostrazione che sulle pareti verticali è possibile coltivare piante alimentari che possono essere produttive e supportare in tal modo un' "economia familiare" (Agricoltura urbana).
- I *Partenocissus quinquefolia* entrano in competizione con altre piante impedendone la crescita, perfino entrano in una competizione positiva con le piante di *Wisteria sinensis* che sono anche piante altamente competitive. Quindi non metterle vicine se non hanno spazi ben delimitati. Le edere, nonostante siano specie che arrampicandosi si attaccano con le loro radici aeree a qualsiasi superficie restano più contenute nel loro spazio, non invadendo con i loro rami l'area delle specie vicine.
- La coltura in vaso delle piante se da un lato consente il controllo delle caratteristiche fisiche e chimiche del suolo, dall'altro sottopone le radici delle piante ad essere esposte alle variazioni climatiche, al contrario di quelle che si sviluppano in pieno campo che sono più protette sia dalla maggiore profondità del suolo che dall'estensione di quello circostante. La possibilità che le radici vengano danneggiate e con conseguenze di morte della pianta riguarda sia le basse che le alte temperature, infatti il substrato nei contenitori si riscalda o si raffredda a secondo dei cambiamenti climatici che possono avvenire nel tempo ma anche giornalmente. Il maggiore o minore raffreddamento/riscaldamento del substrato dipende dalla dimensione, forma e colore del contenitore e dal volume del substrato. I contenitori di colore chiaro sono utili in estate, quando il carico termico può risultare un vero problema, mentre i contenitori scuri dovrebbero essere migliori durante l'inverno anche se un contenitore scuro esposto al sole diretto può determinare un aumento della temperatura del substrato anche durante un giorno invernale impedendo alle radici di adattarsi alla temperatura che al tramonto crolla bruscamente.
- Le piante utilizzate nell'esperienza parete verde della casaccia hanno dato buoni risultati sia di crescita che di schermatura, tuttavia poiché si tratta di piante rampicanti, che nonostante la coltura in vaso, tendono a crescere anche all'interno dell'intercapedine e raggiungere facilmente le pareti dell'edificio. Conviene inserire una rete metallica a maglie strette dietro la struttura reticolare in acciaio della grata sulla quale sono stati inseriti i portavasi. Infatti, l'edera per sua natura tende a crescere cercando l'ombra e quindi è facile che possa infiltrarsi nelle maglie della grata e aderire alle pareti dell'edificio. Il *Partenocissus*, da questo punto di vista, è più gestibile e comunque i suoi organi di adesione danneggiano meno gli intonaci. Almeno quattro interventi l'anno sono importanti per potature, guida dei rami sopra i supporti, trattamenti eventuali da parassiti, fertilizzazioni e aggiunta di terriccio o substrato perso a causa del vento.

4.2 Dati bio-agronomici

Le essenze vegetali sono state coltivate su una miscela formata da terriccio di alta qualità ottenuto dalla

miscelazione di torbe di sfagno e argilla bentonitica. La dotazione iniziale degli elementi nutritivi è stata assicurata dall'aggiunta di concimi a lenta cessione. E' stato utilizzato un terriccio con una struttura ad elevata porosità che ha assicurato un rapporto ottimale fra l'aerazione e la ritenzione idrica. Tali caratteristiche hanno favorito uno sviluppo delle piante rigoglioso durante l'attività di ricerca. Di seguito si riportano i parametri del terriccio determinati al confezionamento:

pH (in H₂O) = 6,2

conducibilità elettrica (dS/m) = 0,25

Densità apparente secca (kg/m³) = 100

Porosità totale (% v/v)

Volume commerciale all'origine (litri) = 80 (UNI EN 12580)

Componenti: torba acida, argilla espansa, concime minerale composto, correttivo calcareo.

I trattamenti nutritivi sono stati effettuati con concime minerale a lento rilascio avvenuti regolarmente a distanza di circa 30 giorni per i mesi, marzo, maggio giugno 2018 utilizzando il concime "Nitrophoska Gold" con un contenuto di azoto, fosforo e potassio alle concentrazioni NPK 15-9-15. I trattamenti sono stati sospesi nel periodo di luglio, agosto e settembre. I microelementi derivati da preparazioni algali e irrorabile direttamente su foglie sono stati aggiunti esclusivamente al *Trachelospermum jasminoides* mentre per le altre piante non si è reso necessario alcun trattamento. Nonostante le temperature estive che hanno raggiunto picchi elevati, non si sono verificati, attacchi parassitari. Alla base dei *Partenocissus quinquefolia* sono stati posti in coltura delle piante di *Tagetes patula* L. e *Tagetes erecta* L., note ai giardinieri e utilizzate nelle bordure per tenere lontano gli afidi da alcune piante. Le colture dei *Tagetes*, di norma, non disturbano altre colture dato il loro apparato radicale poco profondo. Durante il periodo estivo 2018, come può essere visibile dai grafici sotto riportati, la temperatura dell'aria ha raggiunto punte di 38°C influenzando la temperatura del substrato che ha raggiunto temperature di quasi 32°C, nella parte più superficiale. Nel caso delle piante coltivate sulla parete si è ricorso ad una pacciamatura naturale costituita da corteccia di pino, impiegata per impedire un aumento eccessivo della temperatura del substrato. Per le basse temperature non si è verificato, durante i cicli realizzati, danneggiamento delle radici. I grafici che seguono (Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23) riportano i risultati del monitoraggio relativo ai parametri microclimatici della radiazione solare globale e PAR e sia per i parametri energetici dell'edificio prototipo (temperature superficiali delle pareti esterne), mentre la Figura 24 mostra una ripresa con termocamera che evidenzia la differenza di temperatura tra la parete priva di coltre vegetale e l'ambiente esterno compreso nella gap.

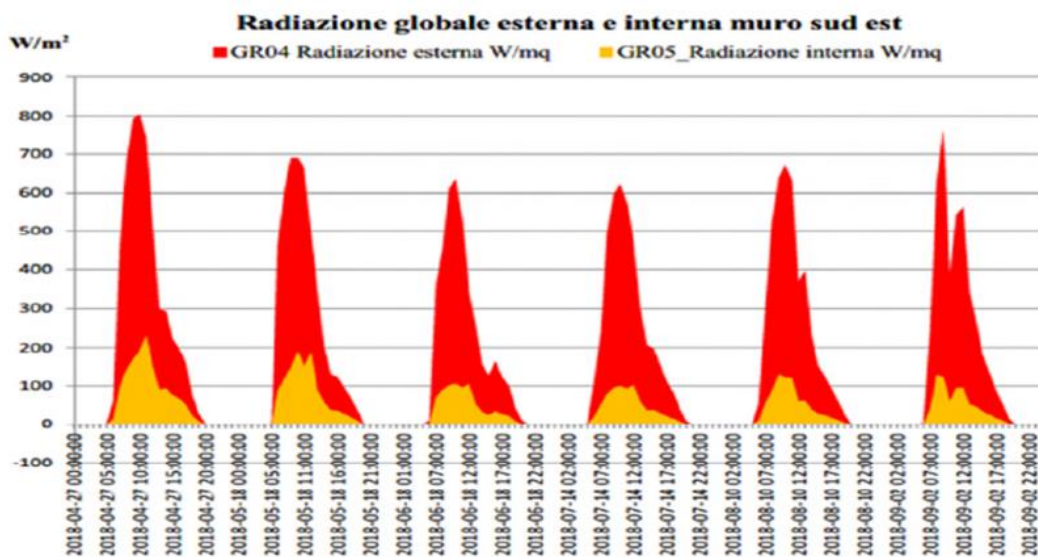


Figura 18

Temperature superficiali muro Sud Est nei giorni rappresentativi nei mesi di aprile maggio giugno luglio agosto e settembre

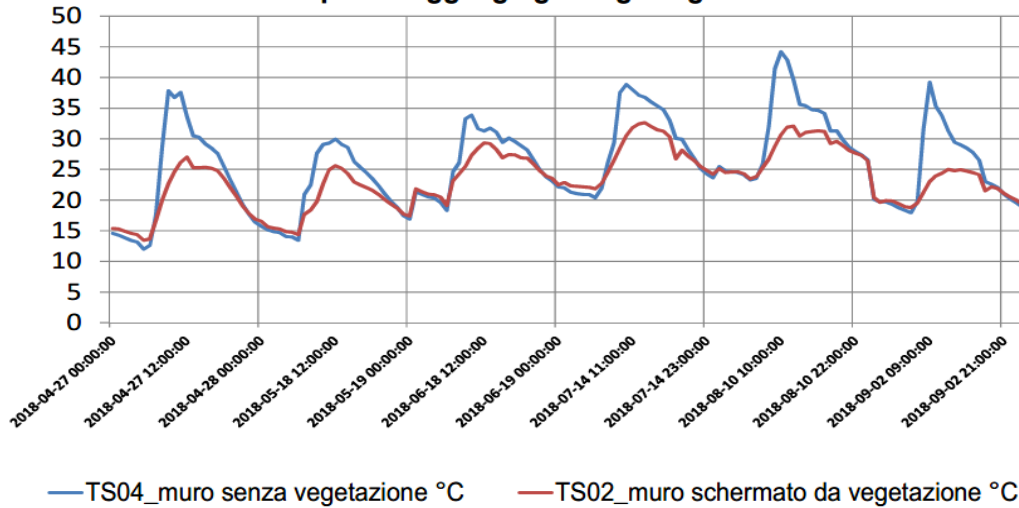


Figura 19

Radiazione globale esterna ed interna (muro sud-ovest)

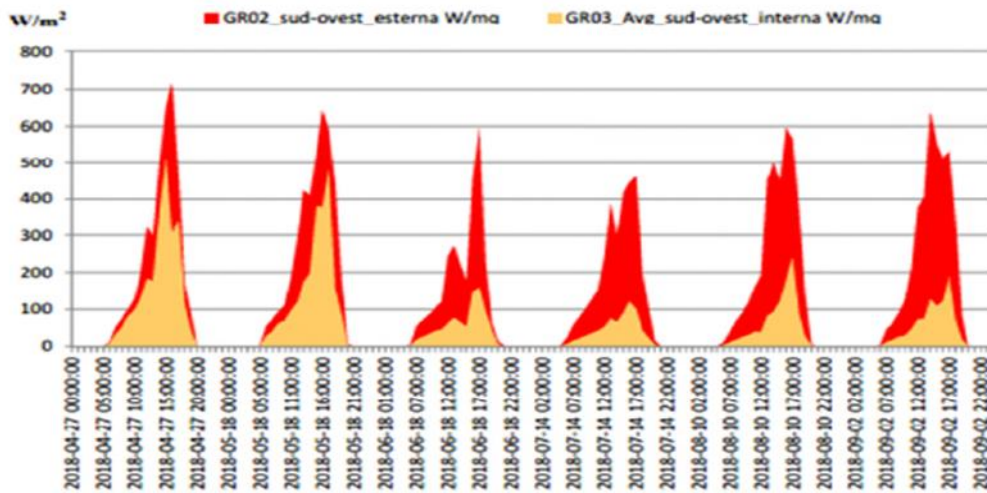


Figura 20

Temperature superficiali muro sud ovest (giorni rappresentativi nei mesi di aprile maggio, giugno, luglio, agosto, settembre)

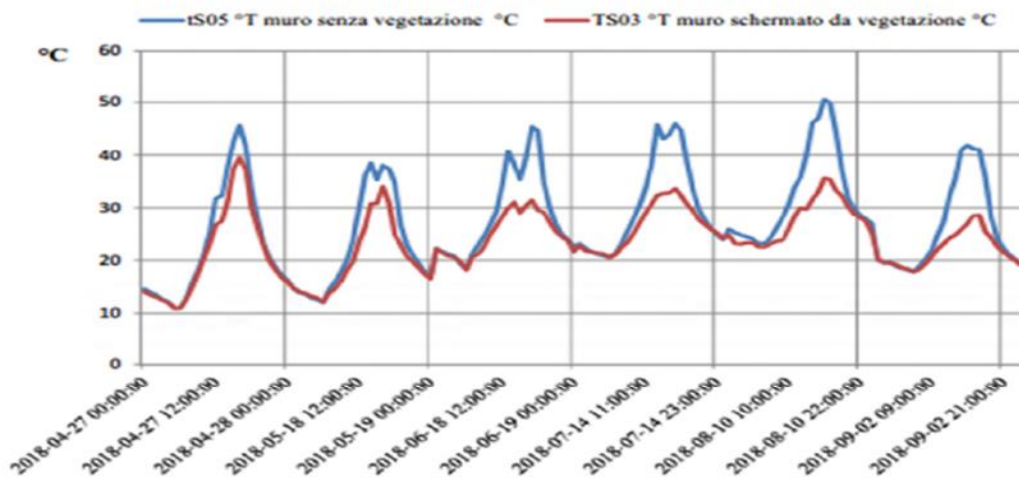


Figura 21

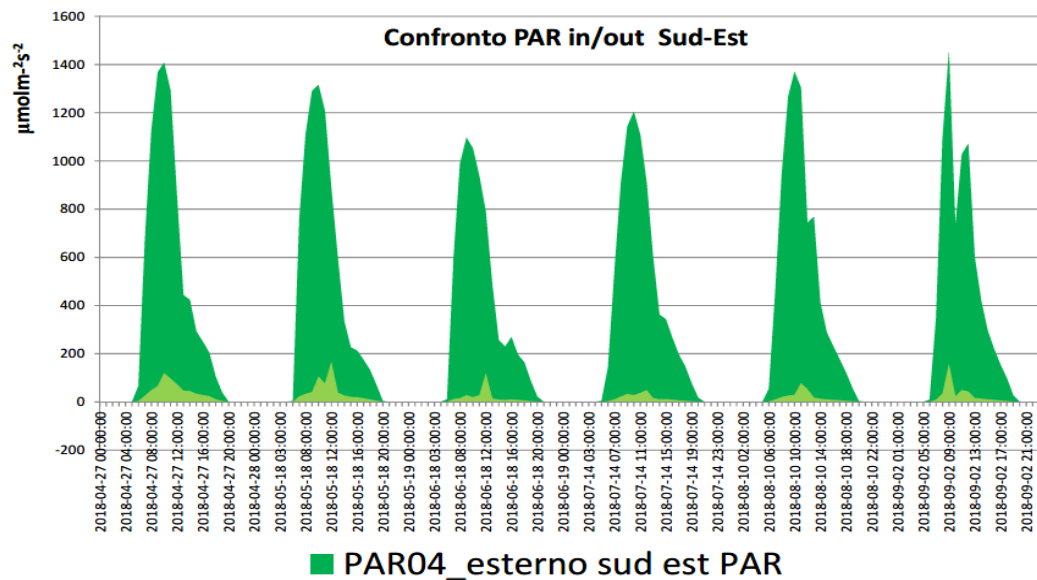


Figura 22

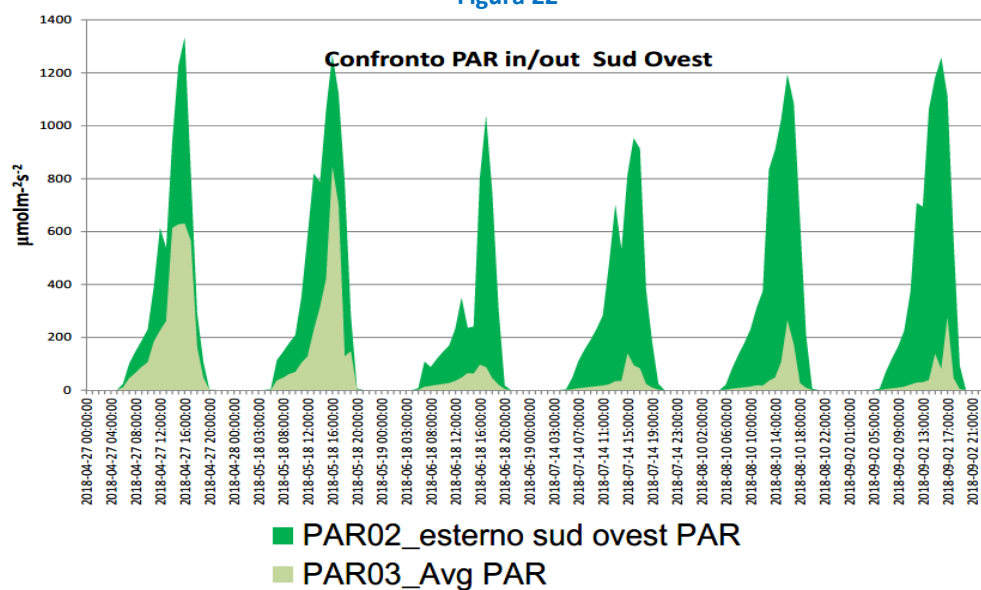


Figura 23

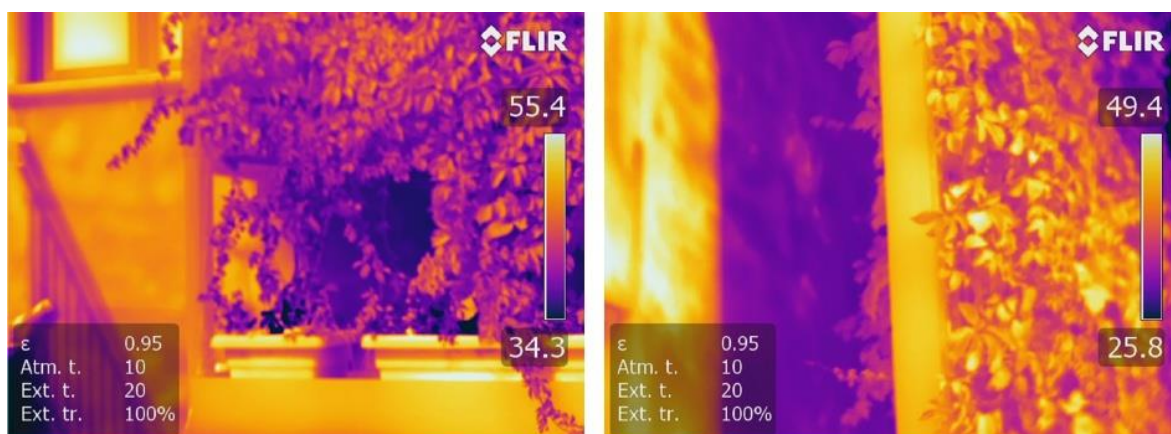


Figura 24.

I dati mettono in evidenza l'effetto delle coltri vegetali sulla riduzione della radiazione solare incidente alla quale corrisponde una riduzione dei flussi di calore verso l'interno dell'edificio prototipo. In generale, tale influenza si riflette su entrambe le pareti con un'a maggiore evidenza per la parete di sud ovest dovuta chiaramente alla relazione esistente tra l'angolo di incidenza della radiazione solare negli orari considerati.

5 Il sistema edificio

5.1 Calcolo dei flussi di calore

La parete di un edificio avente una faccia esposta direttamente al sole assorbe energia radiante solare che, in prima approssimazione, possiamo considerare non dipendente dalla temperatura dell'aria esterna. In condizioni di regime stazionario, la quantità di calore (flusso termico) assorbita nell'unità di tempo (t) attraverso l'unità di superficie (S) dalla parete viene in parte ceduta all'ambiente esterno per adduzione ed in parte trasmessa per conduzione attraverso la parete e, successivamente, ceduta per adduzione all'ambiente interno. La quantità di calore (Q_{tot}) che entra, dunque, in un ambiente attraverso una parete irraggiata dal sole è quindi data da quella che si trasmetterebbe se la parete non fosse sottoposta ad irraggiamento (q_1) più la parte dovuta a quest'ultimo (q_2), si ha pertanto che:

$$Q_{tot} = q_1 + q_2$$

Ove:

$$q_1 = U(t_e - t_i)$$

$$q_2 = U \left(\frac{a \cdot I}{h_e} \right)$$

$$Q_{tot} = \text{flusso termico totale} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$U = \text{trasmittanza} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$a^l = \text{assorbimento (UNI TS 11300-1)}$$

- $a = 0,3$ pareti chiare ;
- $a = 0,6$ pareti medie ;
- $a = 0,9$ pareti scure ;

$$I = \text{irraggiamento [W]}$$

$$h_e = \text{fattore di adduzione} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

In definitiva si ottiene:

$$Q_{tot} = U(t_{ae} - t_{ai}) + U \left(\frac{a \cdot I}{h_e} \right) \quad [1]$$

Per il computo della trasmissione totale di calore, (Q_{tot}) è invalso l'uso di indicare con il termine Δt_e la **differenza di temperatura equivalente** intesa come quella differenza di temperatura tra l'aria esterna e l'aria interna che si avrebbe in assenza di irraggiamento solare affinché si trasmetta attraverso la parete lo stesso flusso termico che si verifica quando essa è irraggiata. La quantità di calore (flusso termico) trasmessa attraverso una parete a facce piane e parallele ed in condizioni di regime stazionario e per unità di superficie, può calcolarsi mediante l'equazione della trasmissione di calore:

$$Q_{tot} = U \cdot \Delta t_e \quad [2]$$

Ove:

$$\Delta t_e = (T_{FS} - T_{AI})$$

T_{FS} – Temperatura fittizia al sole

T_{AI} – Temperatura aria interna

da cui

$$Q_{tot} = U \cdot (T_{FS} - T_{AI}) \quad [3]$$

Esempio:

Dati:

- Località - ROMA ;
- Mese - Luglio ;
- Parete esposta a Sud – Est ;
- Ore – 12.00 ;
- Muratura cassa vuota² ;
- Massa = 300 kg/m² ;
- Trasmittanza (U) = 1,10 W/m² K ;
- t_{ai}³ – Temperatura aria interna = 26 °C ;
- Δt_e⁴ = 16,7 K (valore tabellato) .

Calcolo del flusso termico:

$$Q_{tot} = U \cdot \Delta t_e = 1,10 \frac{W}{m^2 K} \cdot 16,7 K = \mathbf{18,37} \frac{W}{m^2}$$

5.2 Calcolo della costante verde (K_v)

La coltre vegetale svolge un effetto di schermatura nei confronti della radiazione solare, tale effetto è racchiuso nell'indice definito *costante verde* (K_v), con il quale è possibile quantificare la riduzione del flusso termico entrante nell'edificio. La costante verde K_v varia tra 0 ed 1 e, in prima approssimazione, se K_v:

- vale 0, la coltre non esercita alcuna schermatura, pertanto, in condizioni estive, la temperatura della faccia esterna (t_{se}), che assorbe completamente la radiazione solare, risulta essere maggiore sia della temperatura dell'aria esterna (t_{ae}) che della temperatura dell'aria interna (t_{ai});
- vale 1, la coltre esercita completa schermatura, pertanto, in condizioni estive, la temperatura della faccia esterna (t_{se}), risulta essere uguale alla temperatura dell'aria esterna (t_{ae}).

Possiamo allora scrivere la [1] nella forma:

$$Q_{tot} = U(t_{ae} - t_{ai}) + \left[(1 - K_v) \cdot U \left(\frac{a \cdot I}{h_e} \right) \right] \quad [4]$$

Ove si evince che se:

- K_v = 0 il flusso termico lo si calcola con la relazione [1], ovvero la [2];
- K_v = 1 il flusso termico è pari a: $Q_{tot} = U(t_{ae} - t_{ai})$.

Ricordando la definizione di K_v, possiamo scrivere:

$$K_v = \frac{T_{PN} - T_{PP}}{T_{PN} - T_{AE}}$$

2 UNI TS 11300-1/2014

3 UNI TS 11300 – 1/2014

4 Carlo Pizzetti - Condizionamento dell'aria e refrigerazione – Casa Editrice Ambrosiana

Da cui:

$$T_{PP} = T_{PN} - K_v(T_{PN} - T_{AE}) \quad [5]$$

Ove:

T_{PP} – Temperatura parete protetta

T_{PN} – Temperatura parete nuda

T_{AE} – Temperatura aria esterna

Sostituendo la [5] nella [3] si ottiene:

$$Q_{TOT} = U(T_F - T_{AI})$$

$$T_{FS} = T_{PP} = T_{PN} - K_v(T_{PN} - T_{AE})$$

Ove:

T_{FS} – Temperatura fittizia al sole

da cui:

$$Q'_{TOT} = U\{[T_{PN} - K_v(T_{PN} - T_{AE})] - T_{AI}\} \quad [6]$$

Sottraendo alla [3] la [6] si ottiene:

$$Q_{TOT} - Q'_{TOT} = U \cdot K_v \cdot (T_{PN} - T_{AE}) \quad [7]$$

Da cui:

$K_v=0$ $Q_{TOT} - Q'_{TOT} = 0$ non vi è alcun effetto di riduzione del flusso termico entrante,

$K_v=1$ $Q_{TOT} - Q'_{TOT} = U \cdot (T_{PN} - T_{AE})$ l'effetto della riduzione del flusso termico entrante è massimo.

In conclusione si evidenzia attraverso la lettura della [7] come la coltre vegetale abbatta proporzionalmente al fattore K_v il flusso termico entrante nelle pareti dell'edificio.

La *temperatura fittizia al sole* (T_{FS}) introdotta nella [3] può essere definita come:

$$T_{FS} = \frac{a \cdot I}{h_e} + T_{AE} \quad [8]$$

La [8] può essere applicata anche nel caso in cui il fenomeno non sia stazionario, ovvero, quando I e T_{AE} sono funzioni del tempo. Sostituendo nella [8] nella [7] si ottiene:

$$Q_{TOT} - Q'_{TOT} = U \cdot K_v \cdot \left(\frac{a \cdot I}{h_e}\right) \quad [9]$$

Esempio:

Riprendendo i dati dell'esempio precedente, ipotizzando un valore medio della costante verde pari a ($\overline{K_v} = 0,78$) si ottiene:

Temperatura parete nuda (T_{PN}) = 42,7 °C ;

Trasmittanza (U) = 1,10 W/m² K ;

Temperatura aria esterna (T_{AE}) = 33,5 °C .

Da cui:

$$Q_{TOT} - Q'_{TOT} = U \cdot K_v \cdot (T_{PN} - T_{AE}) = 1,10 \frac{W}{m^2 K} \cdot 0,78 \cdot (42,7 \text{ °C} - 33,5 \text{ °C}) = 7,89 \frac{W}{m^2}$$

La coltre vegetale, pertanto, avente in prima approssimazione, una costante verde K_v media pari a 0,78, abbatte di circa il 42% il flusso termico entrante.

5.3 Costante verde (K_v)

I sistemi vegetali sugli edifici costituiscono, oggi, una tecnica che sta dando sempre più concretezza operativa non soltanto come una quinta scenografica, ma cominciano ad avere un ruolo, come lo hanno gli altri componenti di un progetto. Considerando, inoltre, che si tratta di una tecnologia intesa 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 data 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 non soltanto delle variabilità naturali del verde ma anche delle condizioni climatiche esterne e dei parametri ambientali che caratterizzano il sito. Motivi, questi, che hanno portato lo studio di ricerca, già dalla precedente annualità (PAR 2016), a considerare un'analisi combinata di numerosi 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 orizzontali e verticali siano in grado di fornire un contributo in termini energetici all'edificio su cui vengono collocate. L'attività di ricerca e sperimentazione si è evoluta sulla base di tre periodi temporali in relazione all'inserimento e aggiornamento del sistema di monitoraggio: ottobre 2017 - 24 aprile 2018 (sensoristica sulla parete di sud ovest); fine aprile 2018 - metà giugno 2018 (sensoristica sulla parete di sud est) ed infine giugno 2018 - settembre 2018 (sensoristica per analisi ed elaborazioni dei dati sui parametri termofisici per valutare le condizioni del microclima interno). I tre periodi, rispetto al verde parietale, sono stati valutati anche in relazione alle caratteristiche bio-agronomiche della coltre vegetale, che nei periodi autunnali e soprattutto invernali, a causa della peculiarità fisiologica delle piante, si è concluso nel mese di marzo 2018. Agli inizi di aprile 2018 le piante caduciformi sono entrate nella fase di ripresa vegetativa, che a settembre 2018 ha visto le pareti completamente coperte dal verde (Figura 25).



Figura 25. Evoluzione della coltre vegetale da ottobre 2017 a settembre 2018

Facendo riferimento alla *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, diminuisce (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29), in relazione alla diminuzione della massa fogliare che, schermanto la radiazione, avvicina gradualmente i valori dei due parametri.

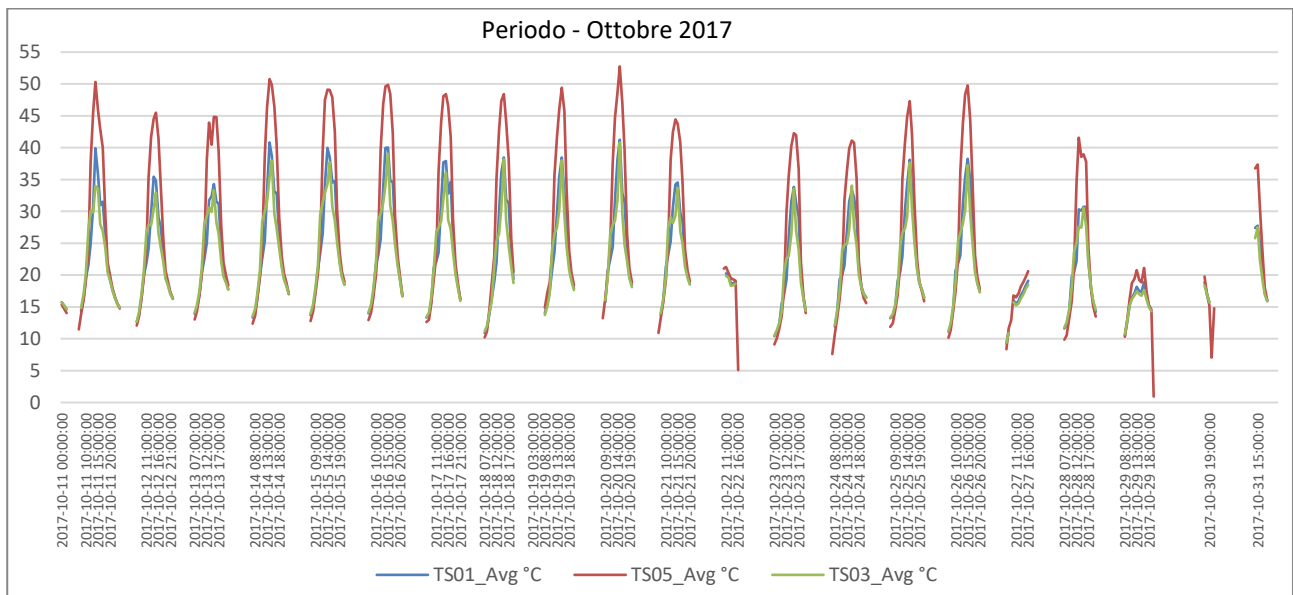


Figura 26: Temperature Superficiali esterne - SW - Ottobre 2017

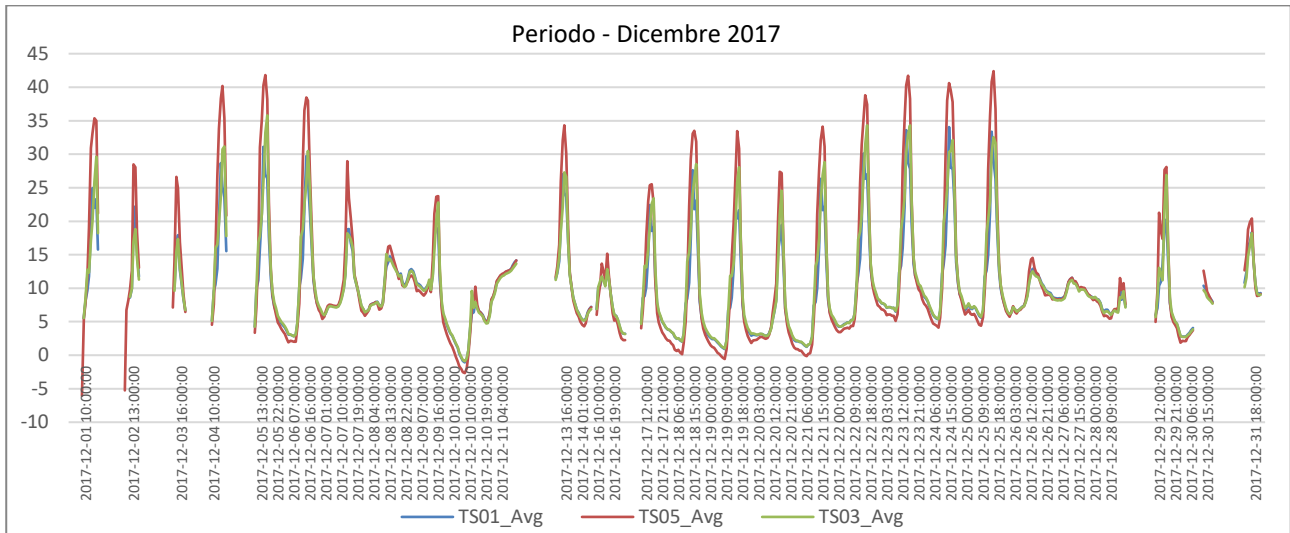


Figura 27. Temperature Superficiali esterne - SW - Dicembre 2017

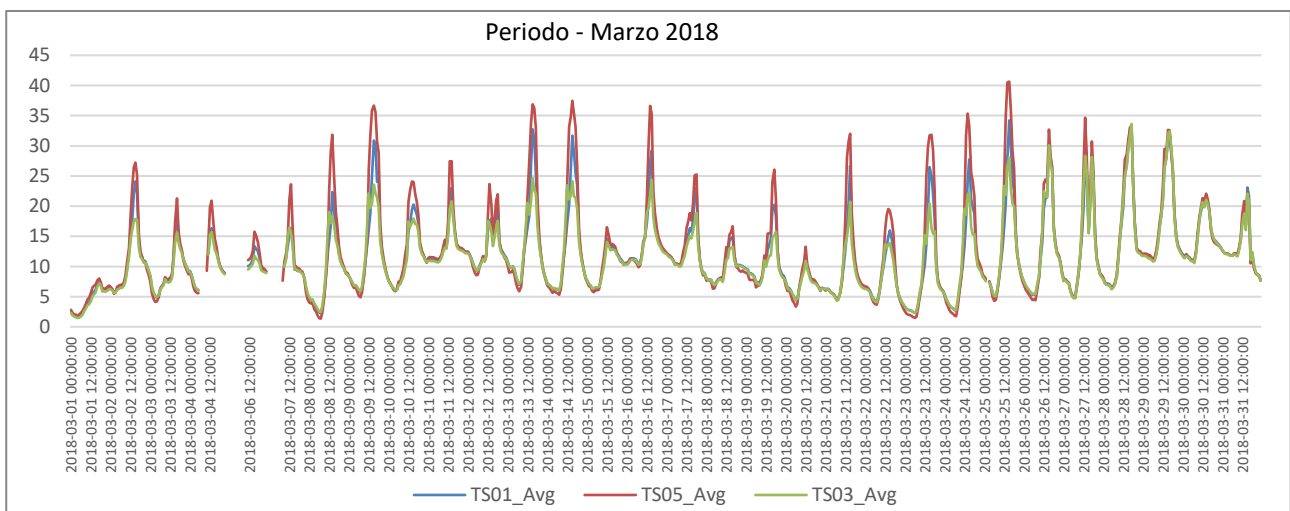


Figura 28: Temperature Superficiali esterne - SW - Marzo 2018

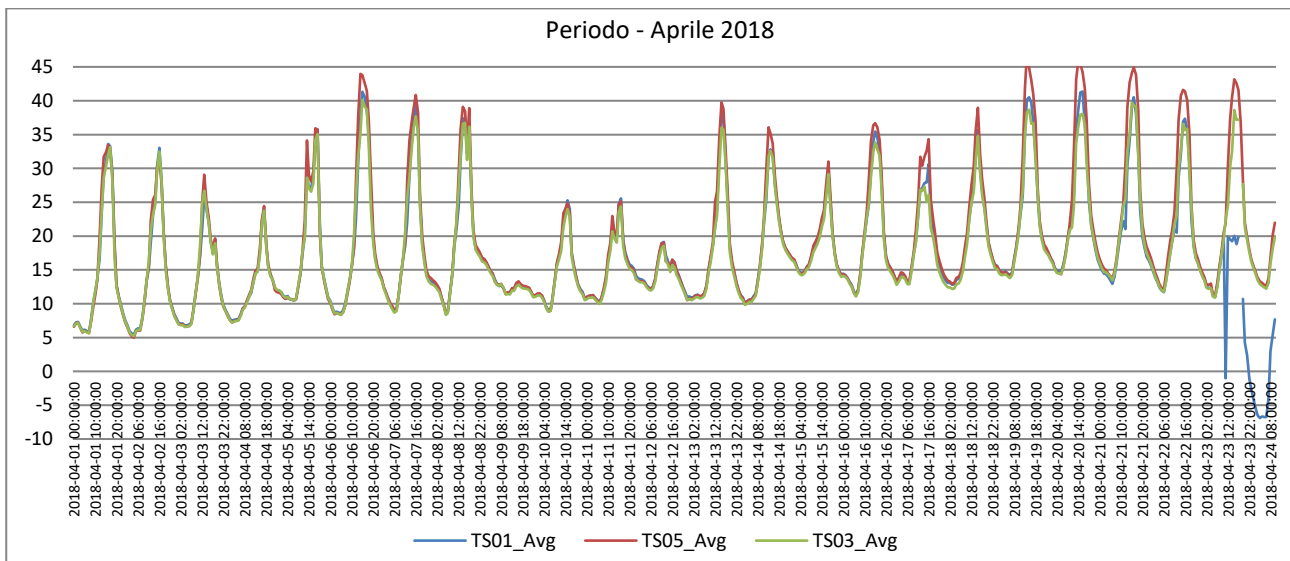


Figura 29: Temperature Superficiali esterne - SW - Aprile 2018

In accordo con la *Seconda Configurazione*, dal 25 aprile al 19 giugno, gli andamenti delle temperature sono riportati nelle [Figura 30](#) e [Figura 31](#) per i mesi di maggio e di giugno riferiti alla parete esposta a Sud-Ovest e quelli nelle [Figura 32](#) [Figura 33](#) per i mesi di maggio e di giugno riferiti alla parete esposta a

Sud-Est. Si evidenzia 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.

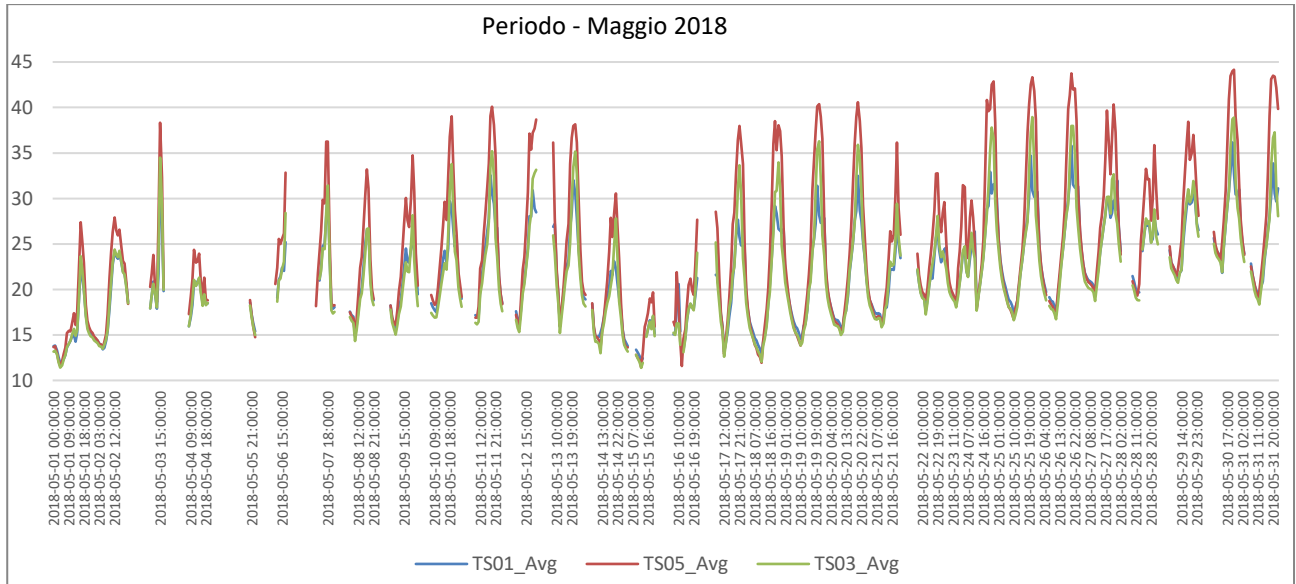


Figura 30: Temperature Superficiali esterne - SW - Maggio 2018

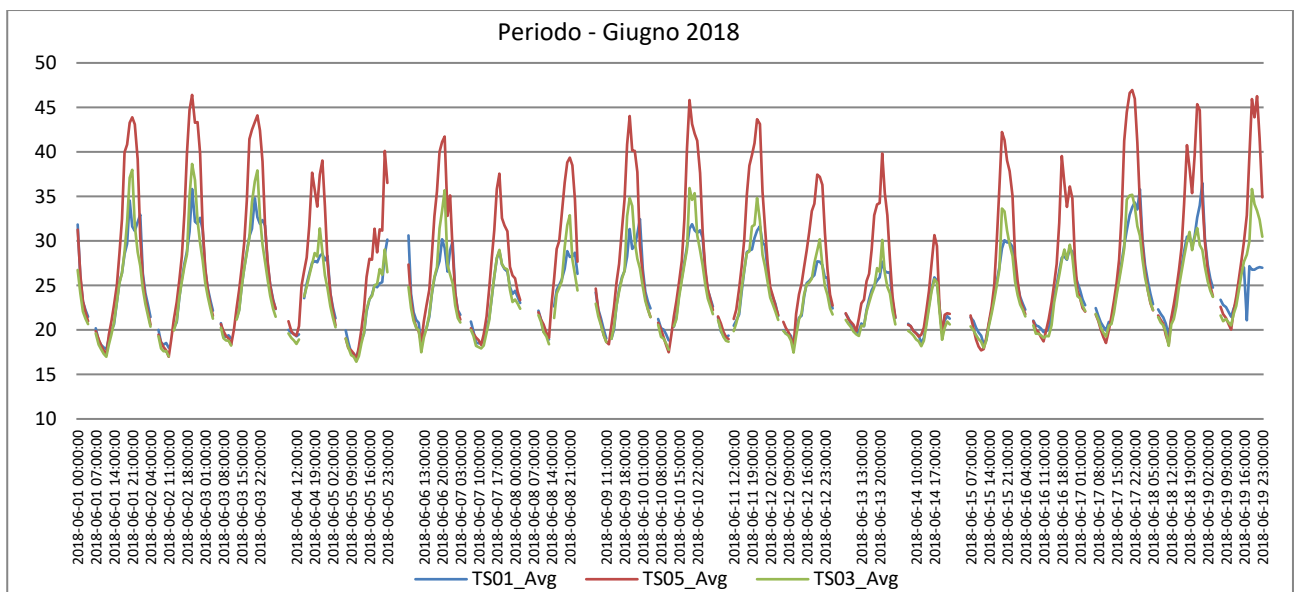


Figura 31. Temperature Superficiali esterne - SW - Giugno 2018

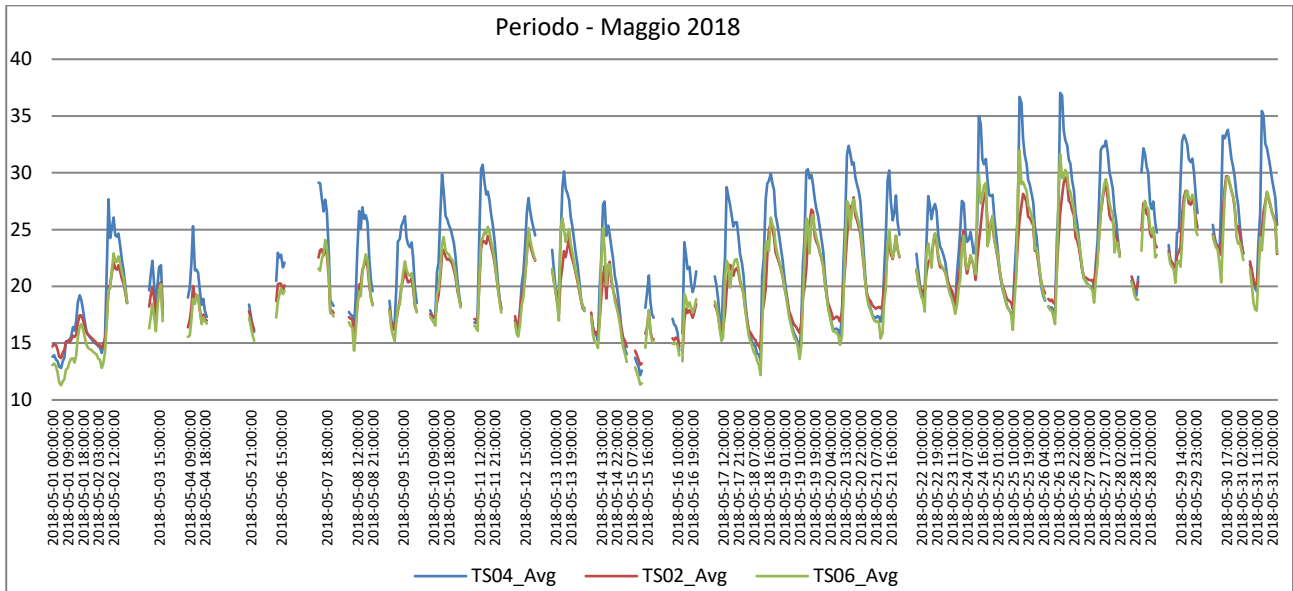


Figura 32. Temperature Superficiali esterne - SE - Maggio 2018

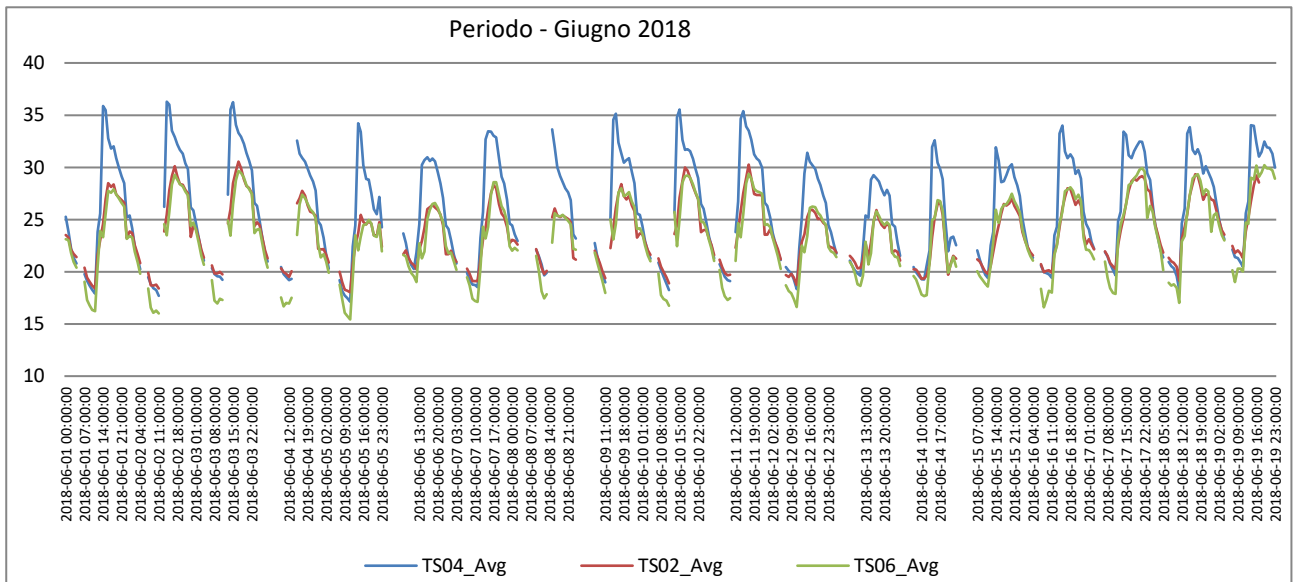


Figura 33. Temperature Superficiali esterne - SE - Giugno 2018

La Terza Configurazione, dal 22 giugno a fine settembre, mostra sia per gli andamenti delle temperature (Figura 34Figura 35), per i mesi di luglio e di settembre, riferiti alla parete esposta a sud ovest, che per quelli riferiti alla parete esposta a sud est, per i mesi di luglio e di settembre (Figura 36Figura 37), una differenza tra la temperatura superficiale esterna No_PV (TS05 in rosso) e la temperatura superficiale esterna PV (TS03 in verde) e una 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). Da sottolineare la completa copertura a verde delle due pareti per i suddetti mesi.

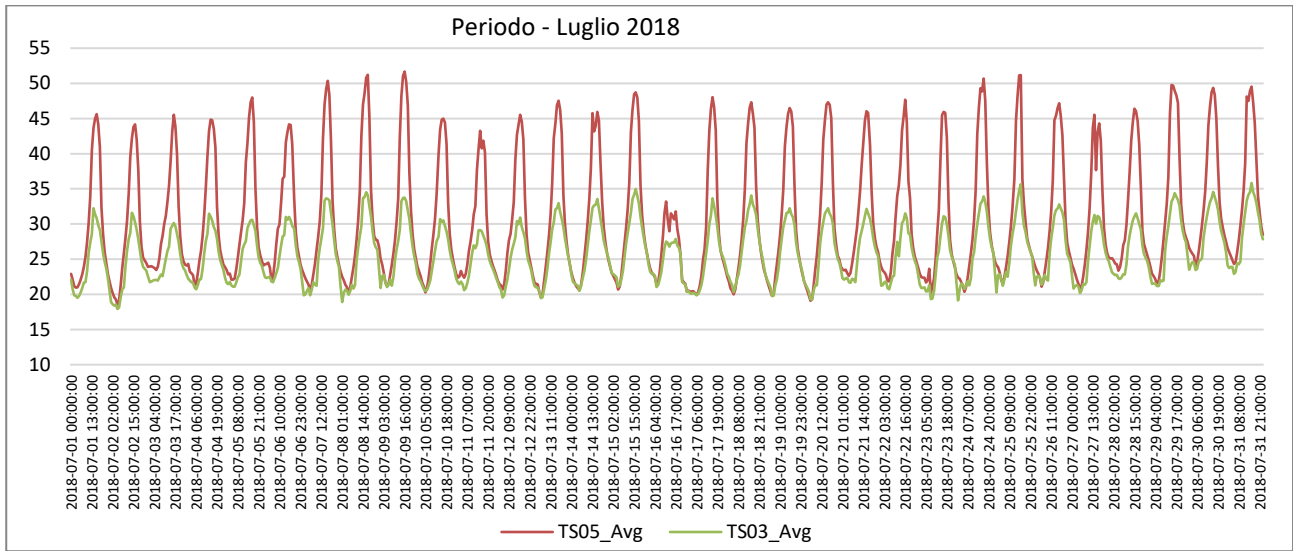


Figura 34. Temperature Superficiali esterne - SW - Luglio 2018

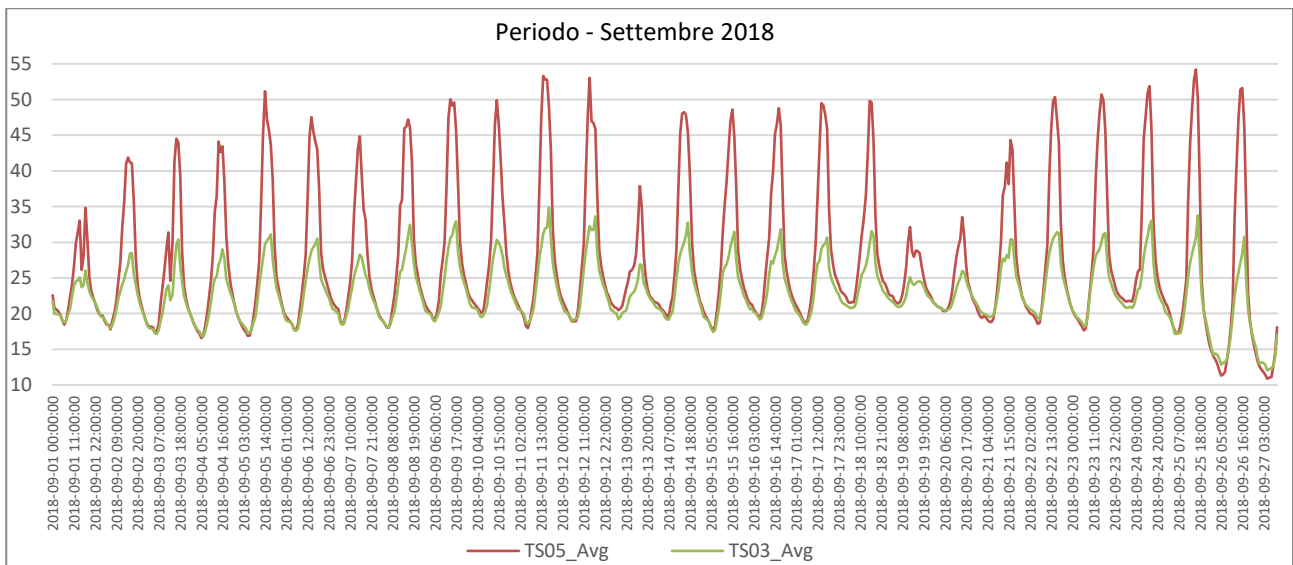


Figura 35. Temperature Superficiali esterne - SW - Settembre 2018

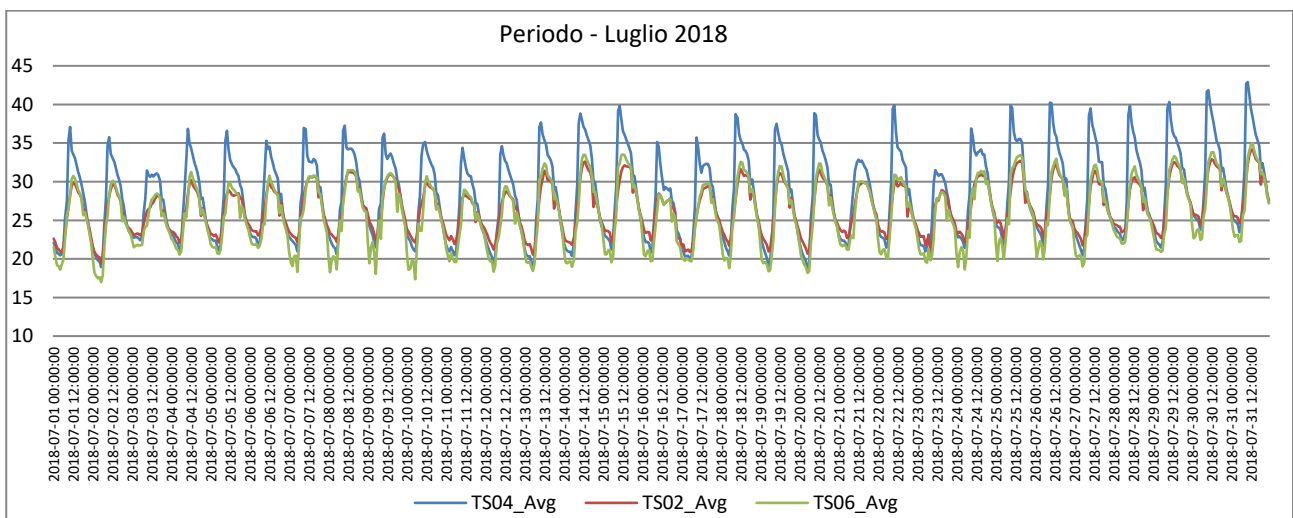


Figura 36. Temperature Superficiali esterne - SE - Luglio 2018

	(Tae)				Tse-Tsev	Tse-Tsev	Tse-Tsev		Kv_SE	Kv_SE	Kv_SE
	°C	°C	°C	°C	TS04-TS02	TS04-TS06	TS04-((TS02+TS06)/2)	TS05-AT01	Kv=(Tse-Tsev)/(Tse-Tae)		

Figura 42

Come si può notare dalle figure, relativamente all'esposizione sud ovest e rispettivamente per la *Prima* e la *Seconda Configurazione*, per il cui calcolo si è tenuto conto delle stesse tipologie di parametri, l'andamento della costante verde *Kv* risulta in linea con quanto detto precedentemente, e cioè che finché la parete resta coperta, la "*Kv*" continua a svolgere la sua funzione di "*filtro*" mantenendosi nel *range* compreso tra 0 e 1, mentre quando parzialmente spoglia il "*Kv*" risulta meno elevato. Considerazione questa che, vale anche per quanto riguarda la parete esposta a Sud-Est e relativa alla *Seconda Configurazione*.

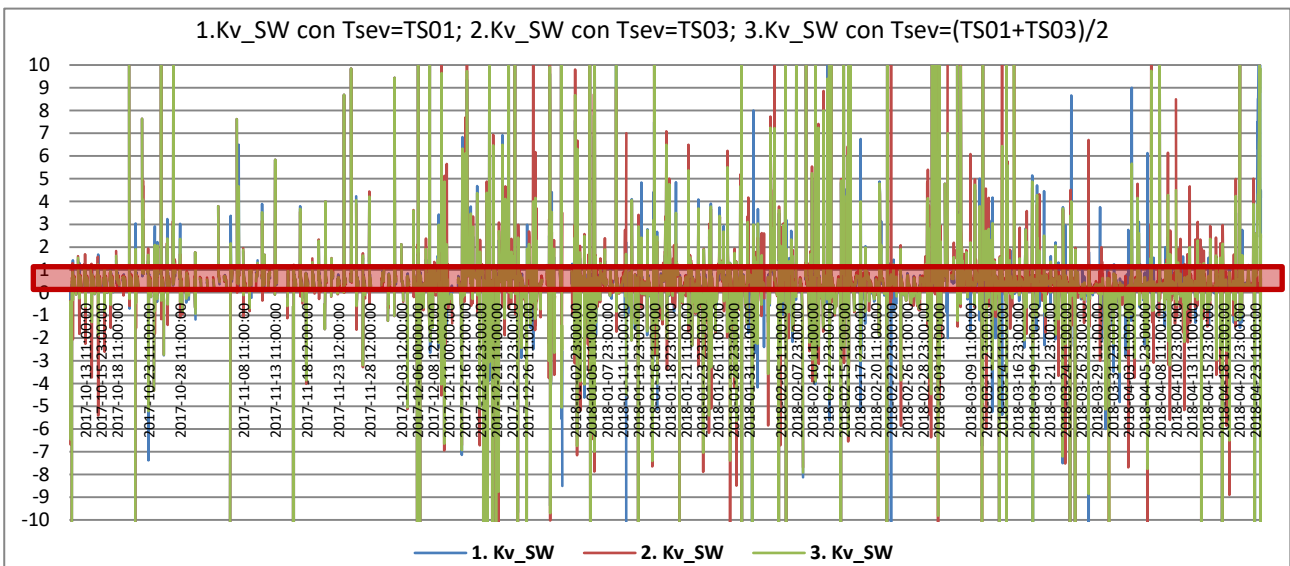


Figura 43. *Prima Configurazione* – Calcolo costante verde *Kv* – parete Sud-Ovest

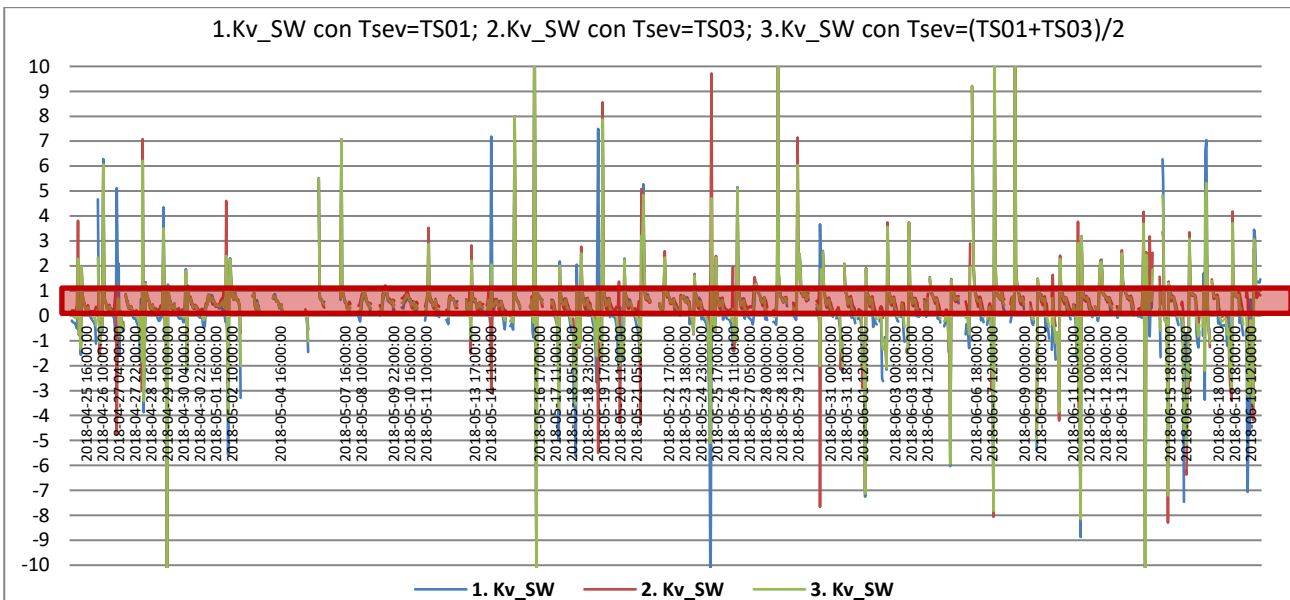


Figura 44. *Seconda Configurazione* – Calcolo costante verde *Kv* – parete sud ovest

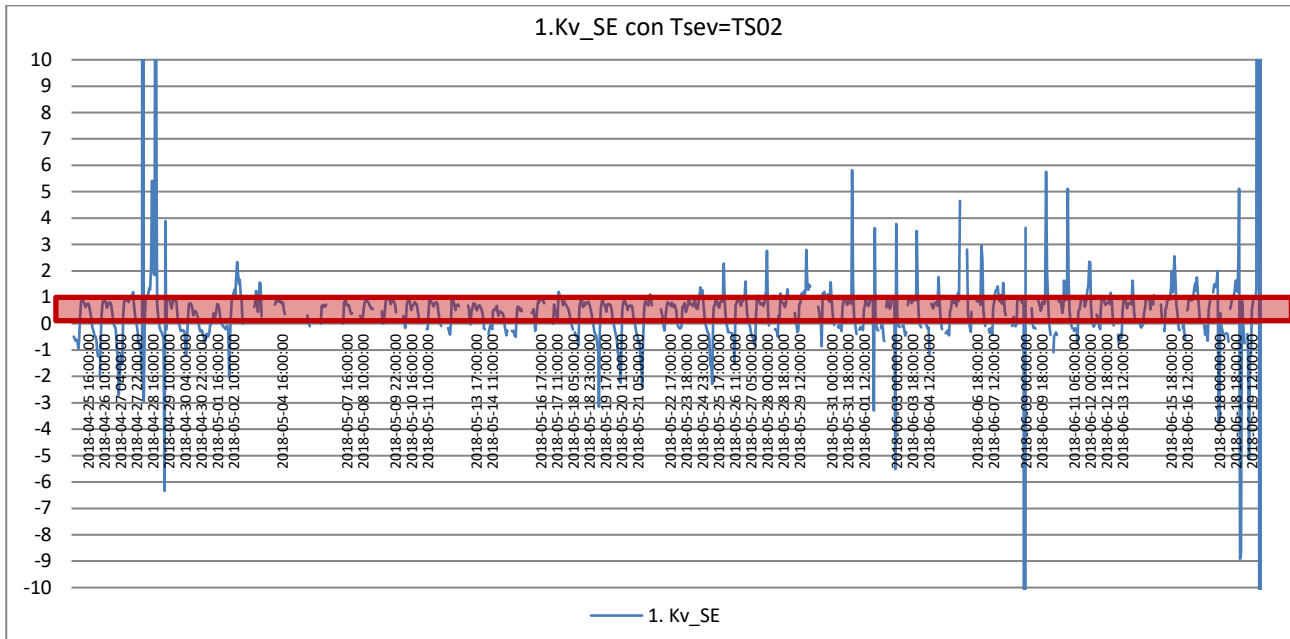


Figura 45. Seconda Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete sud est

Nei grafici riportati nelle [Figura 46](#)[Figura 47](#), relative alla *Terza Configurazione*, si evidenzia come l'andamento della costante verde Kv sia più vicina al limite superiore del *range* suindicato ($Kv=1$), 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 vicina a 1, allora la vegetazione esercita la sua funzione di "schermatura" e in questo modo di riduzione della temperatura superficiale esterna dell'edificio, e di conseguenza anche di quella superficiale interna.

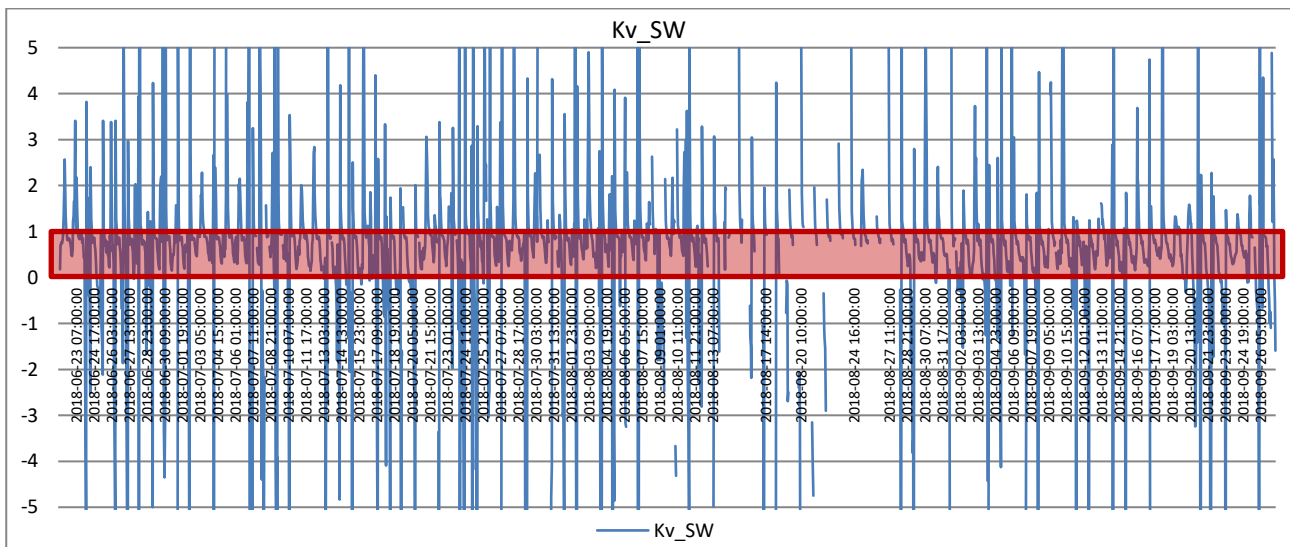


Figura 46. Terza Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete sud ovest

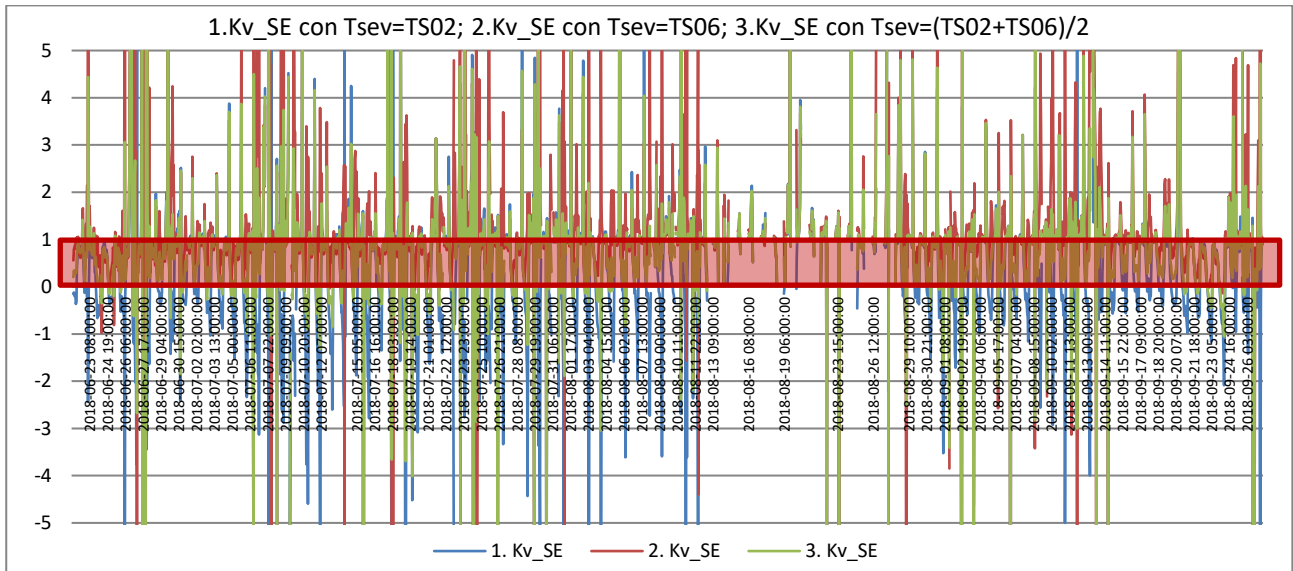


Figura 47. Terza Configurazione – Calcolo costante verde Kv – parete sud est

Per meglio evidenziare l'efficacia della parete verde, nelle [Figura 48](#)[Figura 49](#)[Figura 50](#)[Figura 51](#) sono riportati i grafici relativi all'andamento della costante verde Kv per entrambi gli orientamenti (sud est e sud ovest) 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 particolare, sono evidenziate le ore in cui il valore di Kv risulta prossimo a 1. In verde chiaro è evidenziato il range di ore in cui il valore Kv è prossimo a 1.

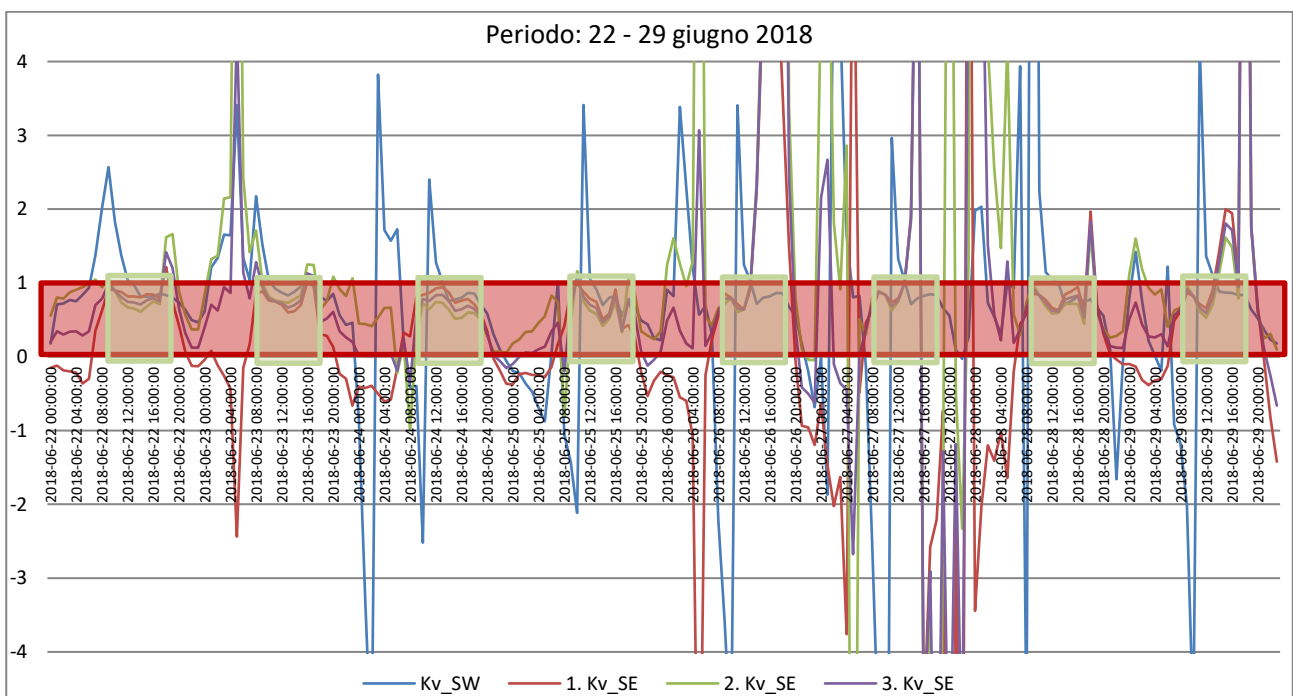


Figura 48. Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

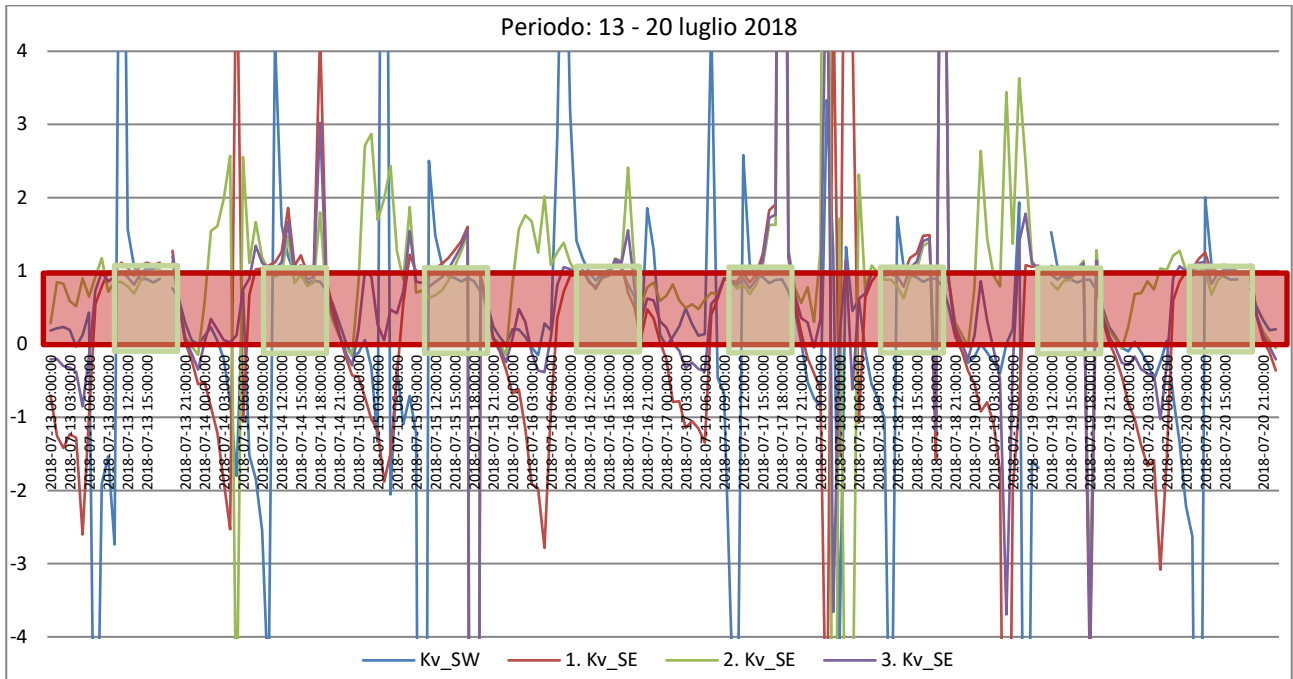


Figura 49. Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

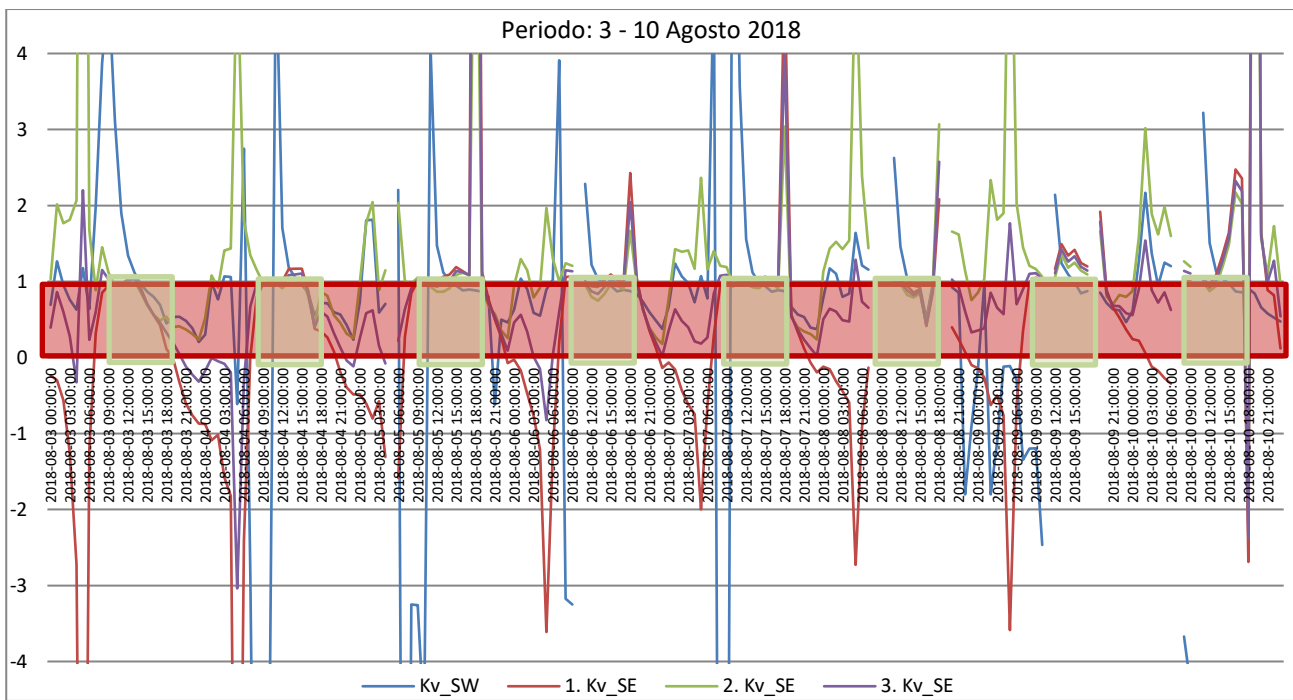


Figura 50. Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

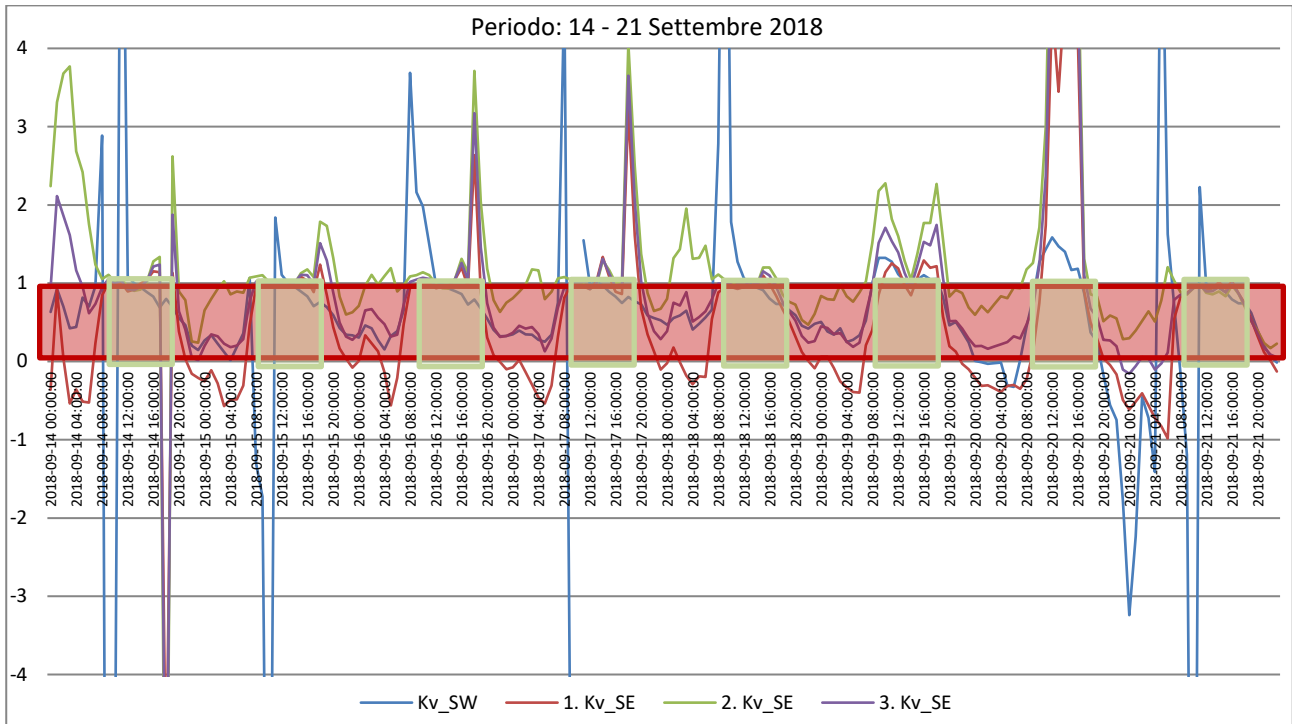


Figura 51. Terza Configurazione - Andamento della costante verde Kv

6 Crescita delle piante: metodologia utilizzata per la valutazione di crescita

L'analisi di crescita delle specie vegetali è stata effettuata sulla base dell'indagine fotografica mediante l'impiego di una comune apparecchiatura fotografica e di semplici codici di calcolo scritti nel linguaggio Octave. L'area coperta dalle foglie è stata valutata contando i pixel il cui colore rientra nelle sfumature del verde e calcolando il rapporto col numero totale di pixel corrispondenti all'area presa in considerazione. In questo modo è possibile ottenere la superficie coperta dalle varie piante, espressa sia in m², sia come percentuale rispetto all'area totale del riquadro considerato (Tabb. 6 e 7). È importante osservare che le quantità così calcolate non sono rappresentative del volume totale della pianta, nè del LAI, ma esclusivamente della superficie ricoperta, indipendentemente dallo spessore della canopia (*canopy*). Nelle Figg. 52-58 e Figg. 59-65 tale superficie è evidenziata nelle immagini contrastate, in cui il nero e il bianco rappresentano rispettivamente le zone coperte dalla superficie fogliare e quelle rimaste libere. Lo sviluppo delle piante avviene soprattutto nei mesi primaverili e, riportata su un grafico, assume a volte una forma sigmoide, con una crescita rapida racchiusa fra i due periodi di stasi invernale ed estivo (Tab. 7). È possibile dare una rappresentazione matematica empirica di tale crescita ricorrendo ad una funzione logistica:

$$C(t) = \frac{C_{max}}{1 + e^{-\frac{t-t_{0.5}}{\tau}}}$$

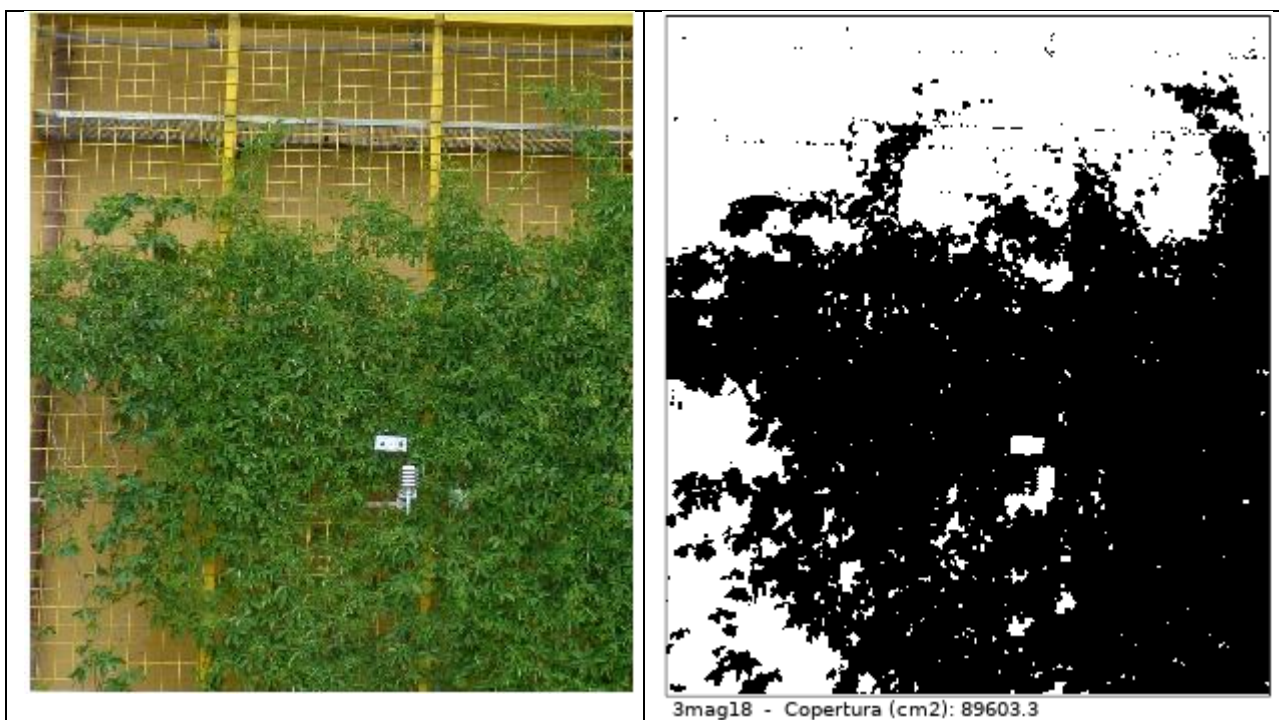
dove C_{max} rappresenta l'asintoto estivo, $t_{0.5}$ è il punto di flesso, corrispondente al momento di massima velocità della crescita, e τ è il tempo caratteristico di crescita.

6.1 Crescita delle piante sulla parete sud est

Nelle Figura 52 Figura 58, è riportata la crescita delle piante della parete sud est. La valutazione è stata

effettuata su 3 piante di *Partenocissus quinquefolia* L. Plank, famiglia delle Vitaceae. Ogni pianta è coltivata in un singolo vaso di dimensioni 100x40x45. La pianta, a sinistra, con meno foglie, è stata messa a dimora il 26 marzo 2018. Mentre le altre due piante sono state messe a dimora a dicembre 2016 quindi hanno già superato 2 stagioni invernali. Nelle [Figura 52](#)[Figura 53](#) si nota che in soli 19 giorni (dal 3 maggio al 22 maggio) c'è stato un aumento di 6480 cm², passando dal 62,6% al 70,8% di superficie coperta, con un aumento dell'8,2%. Dal 22 maggio al 25 giugno, si nota una maggiore crescita con allungamenti dei tralci e infoltimento fogliare. I *Partenocissus* dell'anno prima sono visibilmente in fioritura. La superficie coperta è passata dal 70,8 % all'88%; è in questo periodo che si ha il massimo aumento della superficie coperta e di conseguenza della crescita delle piante ([Figura 54](#)). Con la fioritura la crescita rallenta.

A fine agosto ([Figura 58](#)) la superficie coperta è più bassa passando dal 93,3% del 24 luglio ([Figura 56](#)) a 88,1% del 22 agosto ([Figura 58](#)) Da questi dati si rileva una diminuzione nella crescita dei *Partenocissus* in agosto. Riteniamo tuttavia che poiché le foglie della pianta, in questo periodo tendono a virare verso il giallo il metodo utilizzato possa comportare una leggera sottostima della crescita che invece potrebbe restare costante in agosto. Il *Partenocissus quinquefolia*, inoltre è un rampicante vigoroso e a crescita rapida, in grado di raggiungere, in natura, i 25 m di altezza, molti rami crescono pendenti in cerca del tutore a cui arrampicarsi, per cui se non vengono guidati nella struttura si può verificare che alcuni spazi restano non coperti dalla pianta e quindi possa risultare anche per questo comportamento della pianta una leggera sottostima della superficie di coperta. In seguito a quanto appena detto si capisce che in questo caso la crescita non può essere descritta da una funzione sigmoide. Infatti l'asintoto inferiore è mal definito, essendo la copertura fornita da due piante già sviluppate, perché messe a dimora l'anno precedente, e da una appena messa a dimora; inoltre manca anche l'asintoto estivo a causa di una diminuzione della superficie verde dovuta all'ingiallimento delle foglie.



[Figura 52](#). Parete sud est 3 maggio 2018

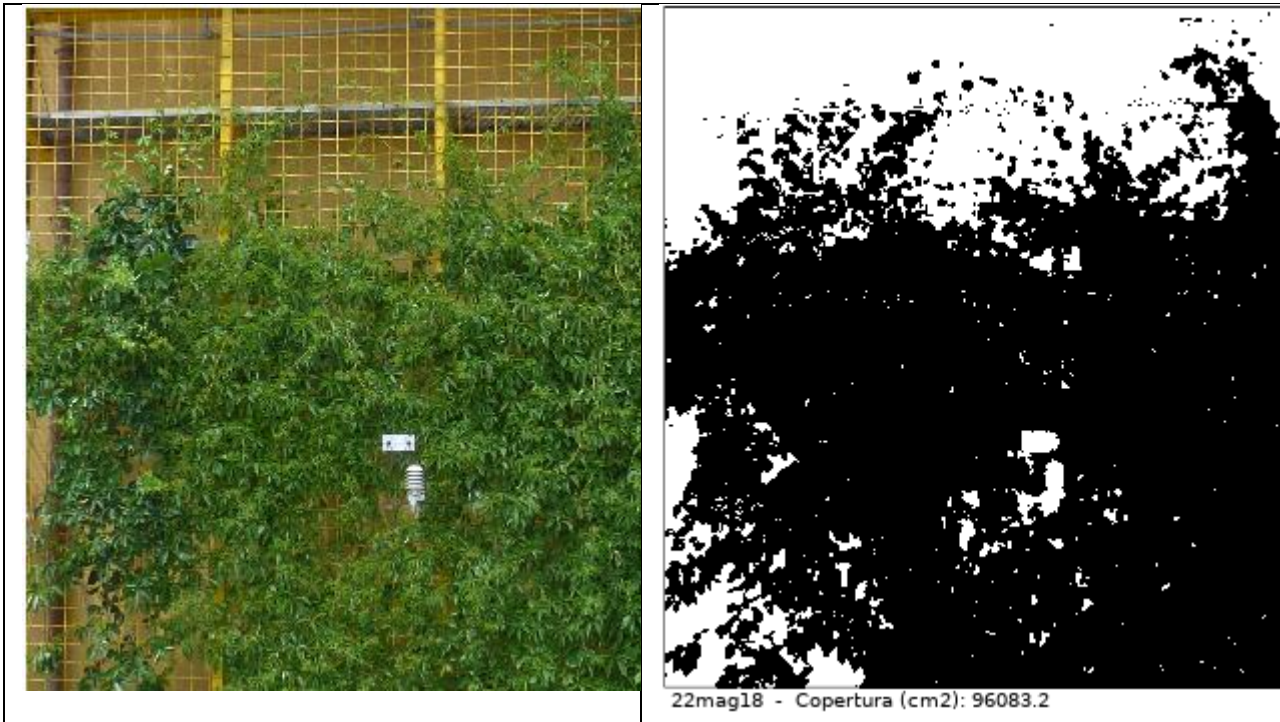


Figura 53. Parete- sud est 22 maggio 2018

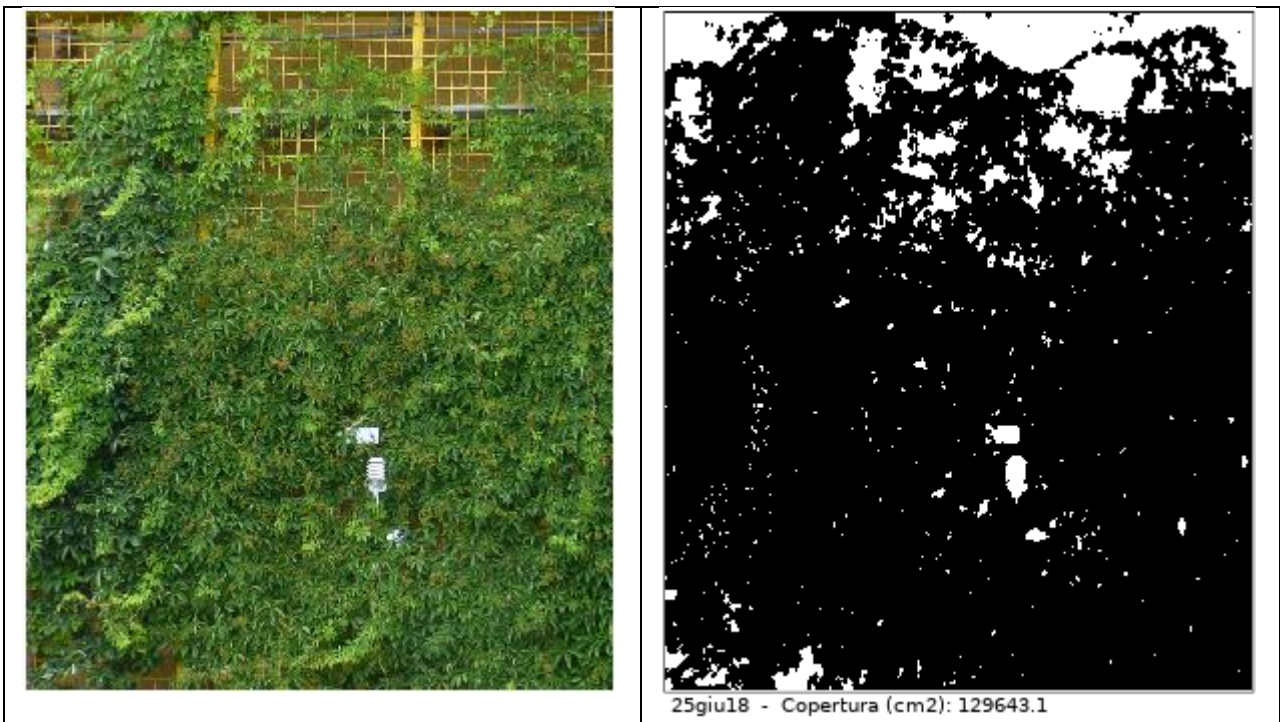


Figura 54. Parete sud est 25 giugno 2018

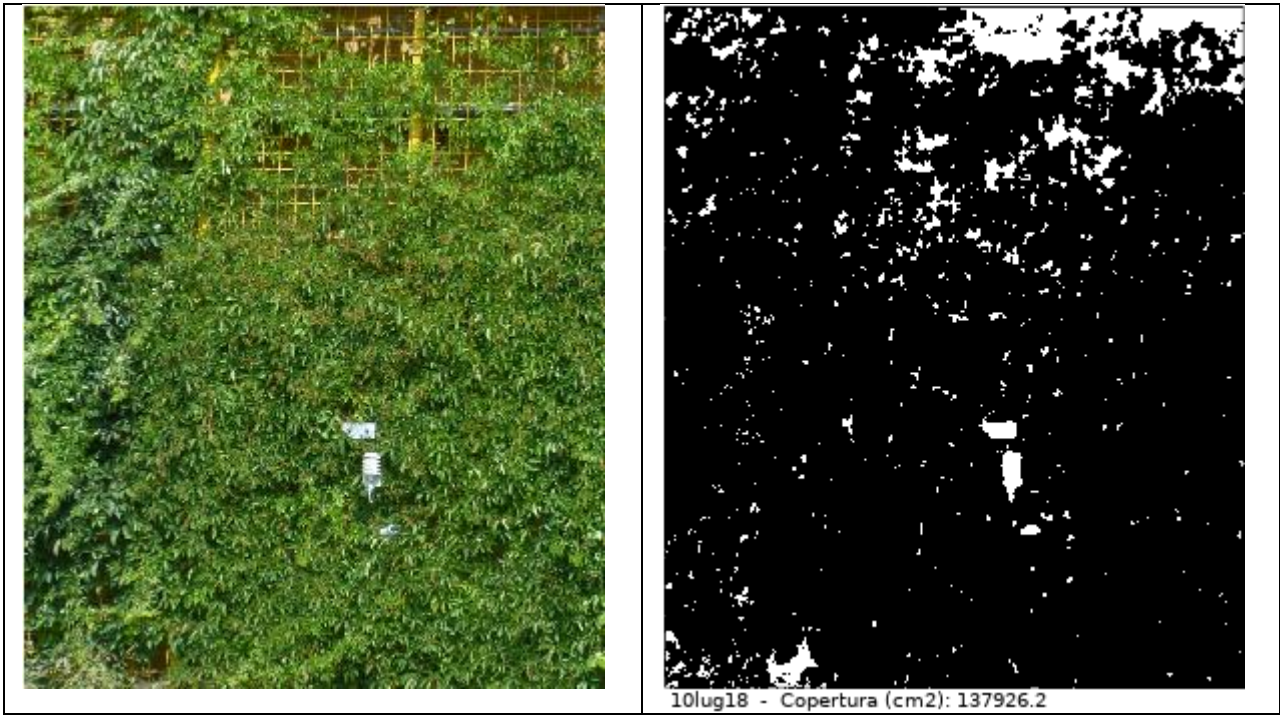


Figura 55. Parete sud est 10 luglio 2018

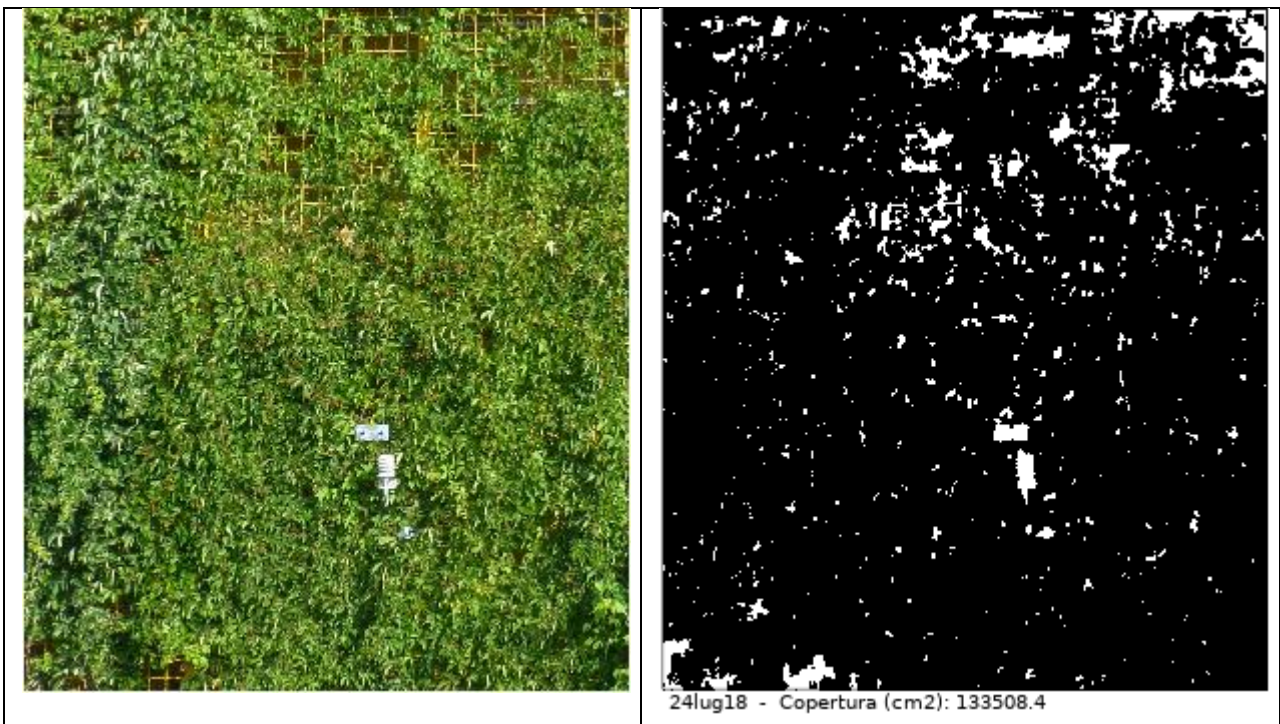


Figura 56. Parete – sud est 24 luglio 2018

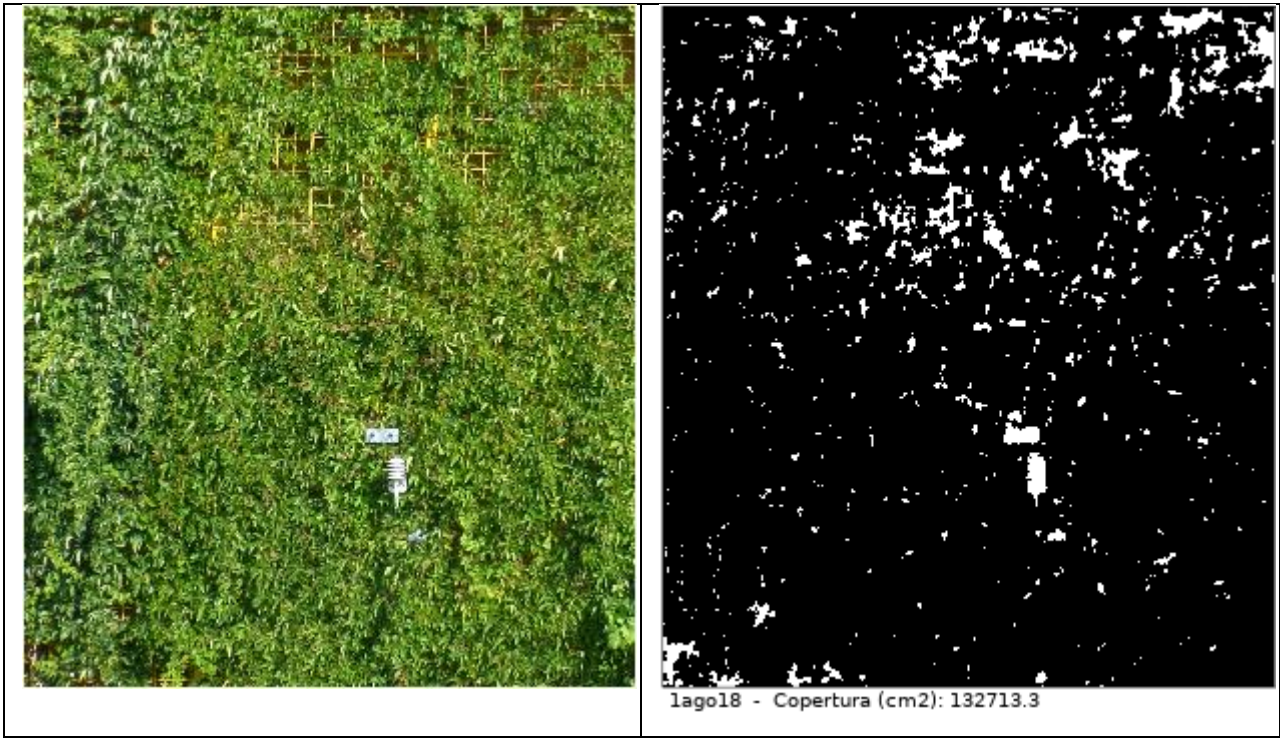


Figura 57. Parete sud est 1 agosto 2018

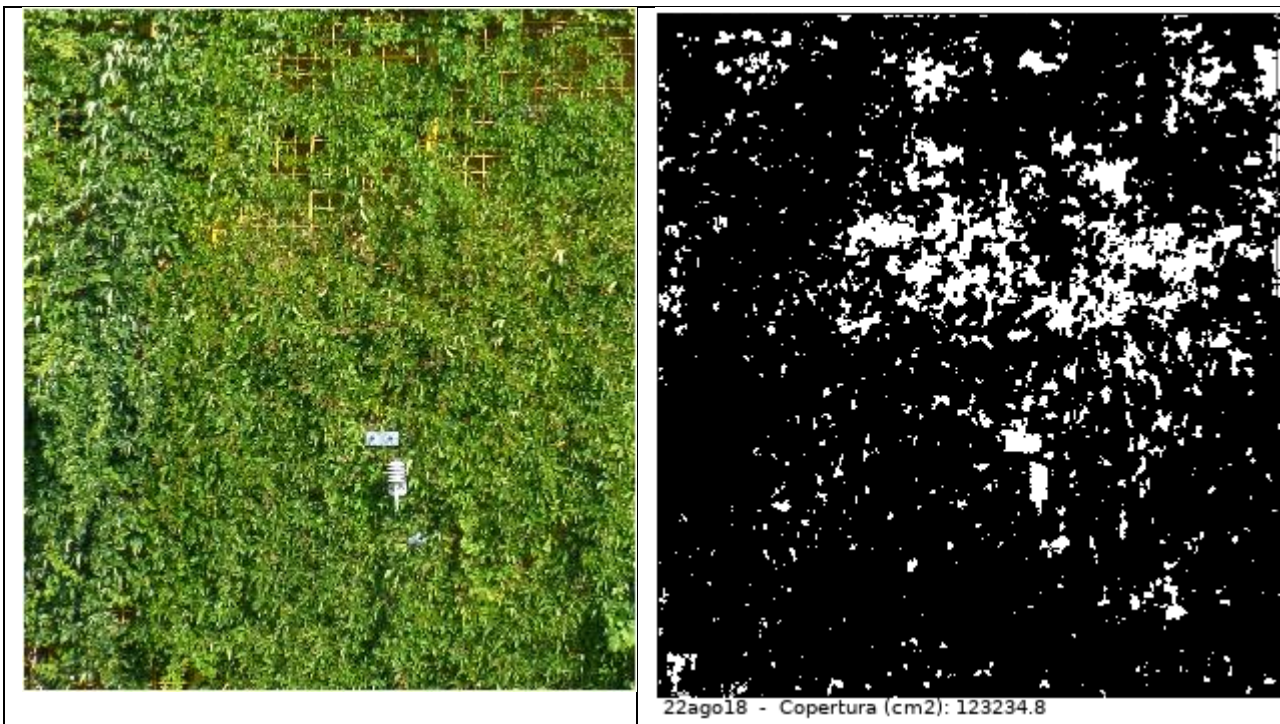
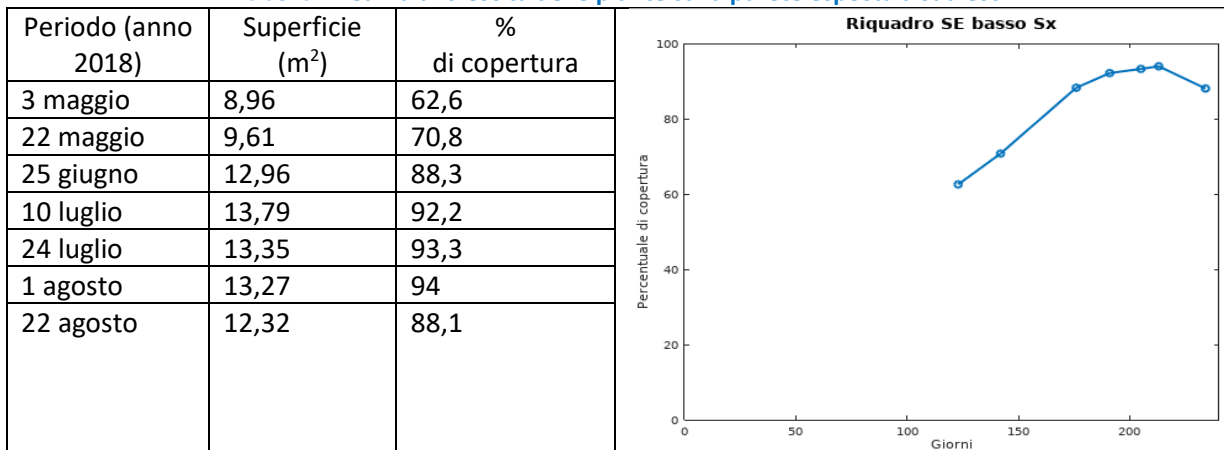


Figura 58. Parete – sud est 22 agosto 2018

Tabella 7- Curva di crescita delle piante sulla parete esposta a sud est



6.2 Crescita delle piante sulla parete sud ovest

La stima di crescita è stata effettuata sul un mix di 4 piante di *Partenocissus quinquefolia* L. Plank quindi 4 piante appartenenti alla stessa specie e coltivate in vaso di due diverse dimensioni. Partendo da sinistra: 1 pianta in vaso da 45 x 40 x 45 e 1 pianta in vaso da 100x40x45, entrambe le piante sono state poste a dimora il 26 marzo 2018; segue 1 pianta messa a dimora l'anno prima in vaso da 45 x 40 x 45 e 1 pianta messa a dimora il 26 marzo 2018 in vaso da 100x40x45 . Nelle figure che seguono (da [Figura 59](#) a [Figura 65](#)) è riportata la crescita delle piante. La superficie della parete coperta dalla vegetazione passa da m² 2,54 del 3 maggio a 5,54 m² del 22 maggio raddoppiando la % di superficie coperta che passa dal 18% al 40% . Dal 22 maggio al 25 giugno la % di superficie coperta arriva al 78%. Si può concludere che il periodo di massima crescita della pianta è compreso tra maggio e giugno, infatti anche se la crescita tra luglio e agosto non si arresta, il massimo aumento della superficie coperta si ha tra maggio e giugno. La % di superficie coperta a fine agosto raggiunge il 93%.



Figura 59– sud ovest 3 maggio 2018

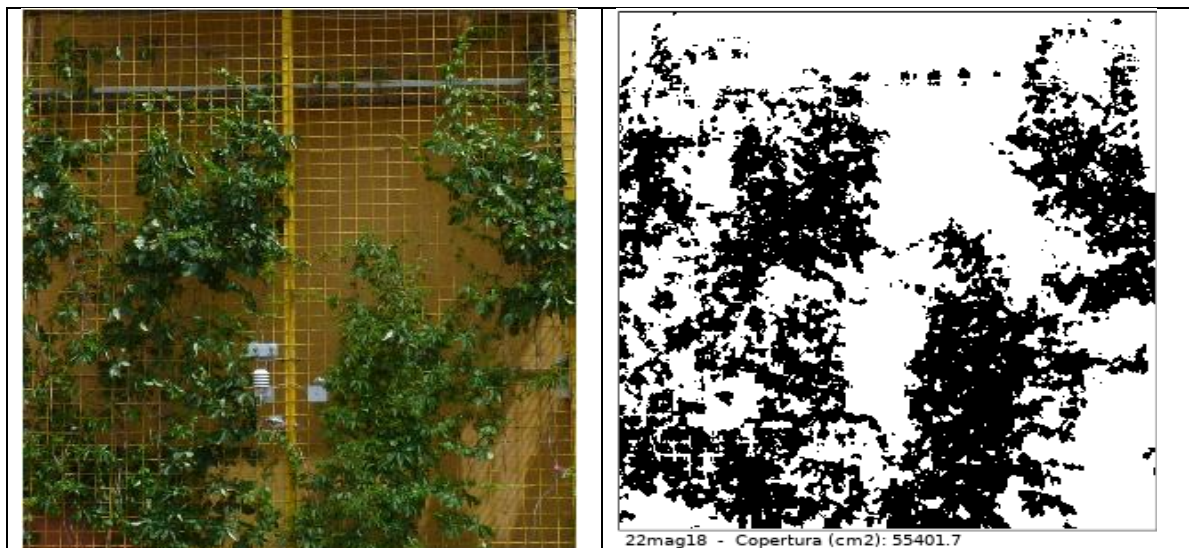


Figura 60– sud ovest 22 maggio 2018

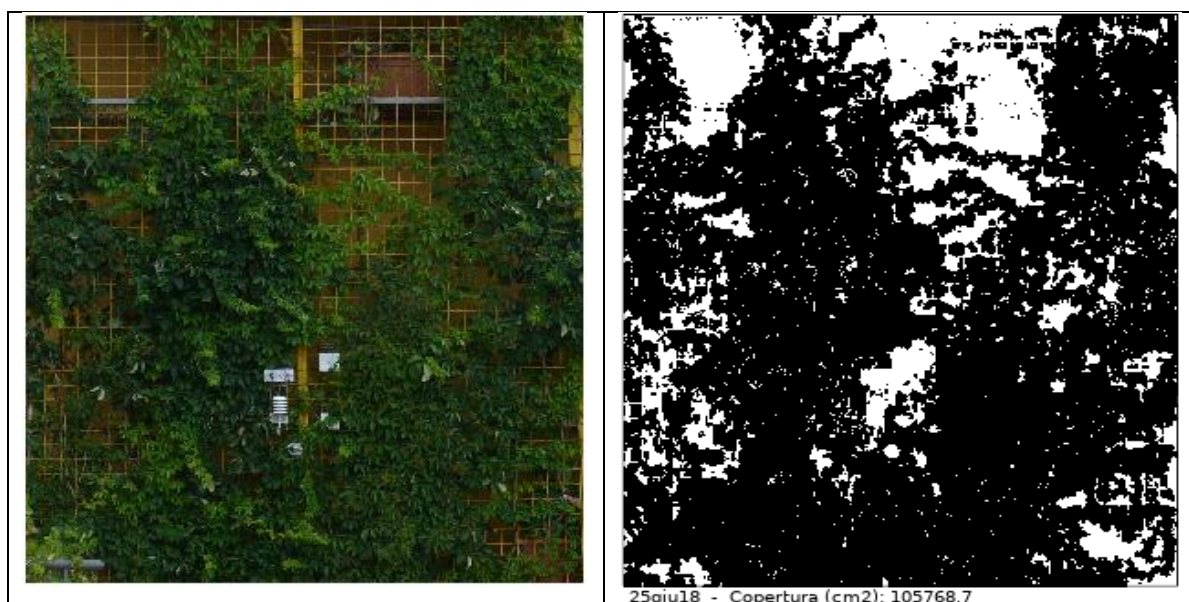


Figura 61. – sud ovest 25 giugno 2018

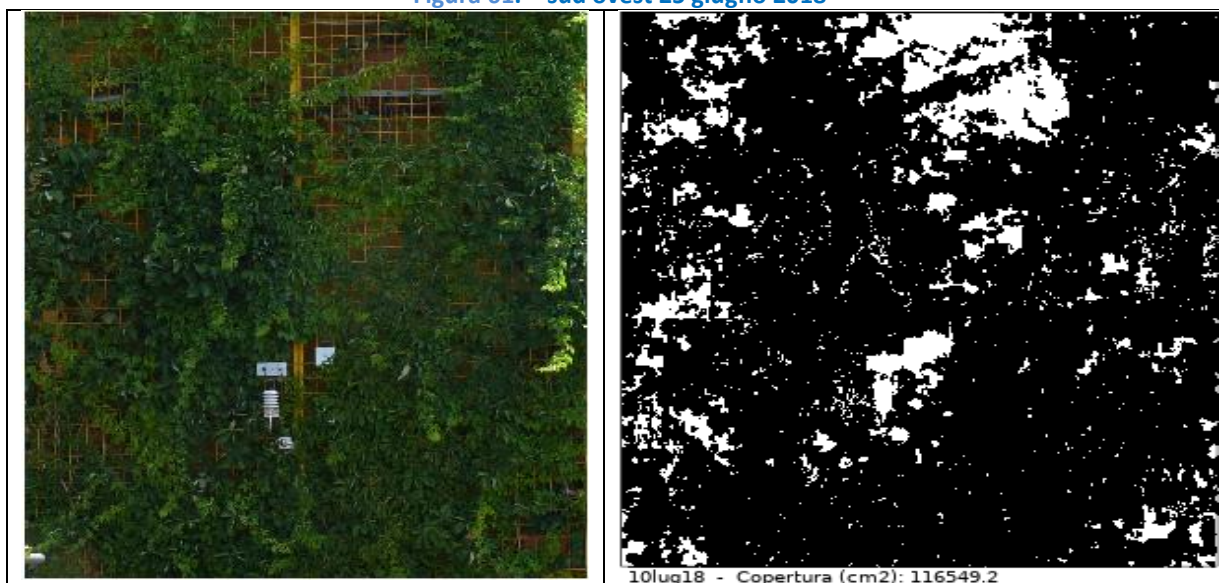


Figura 62– sud ovest 10 luglio 2018

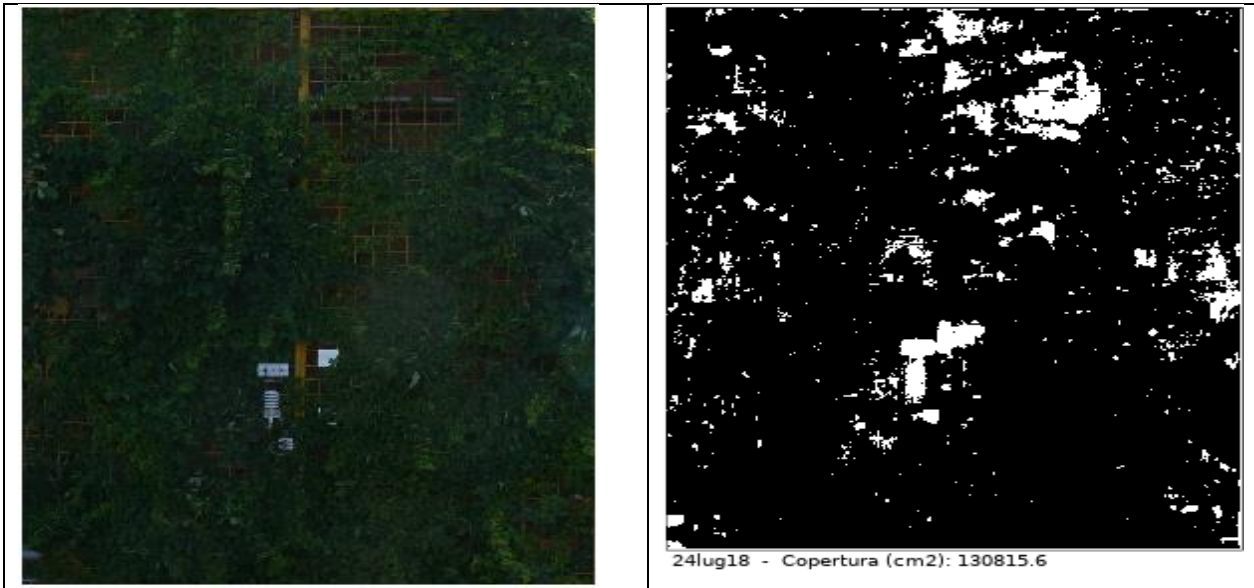


Figura 63– sud ovest 24 luglio 2018

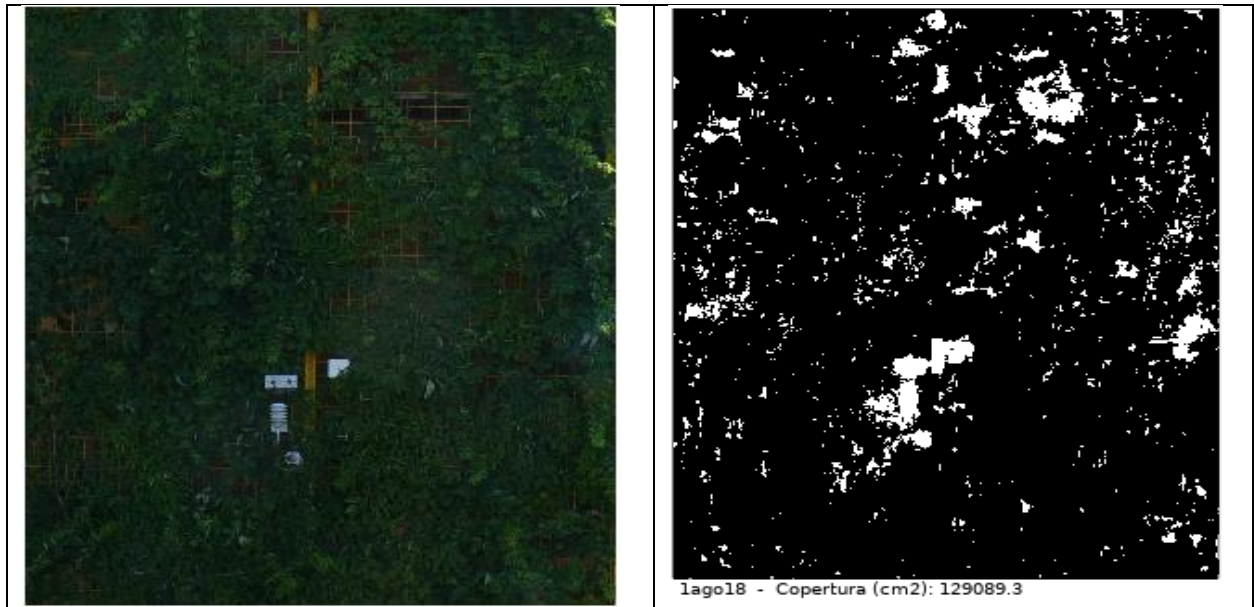


Figura 64– sud ovest 1 agosto 2018

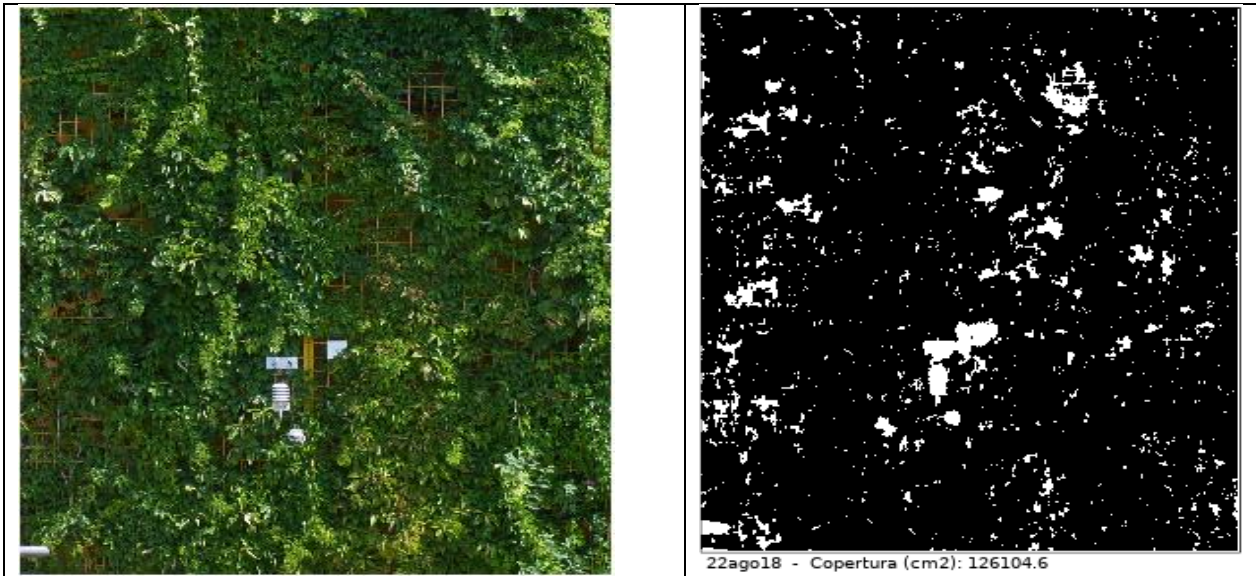
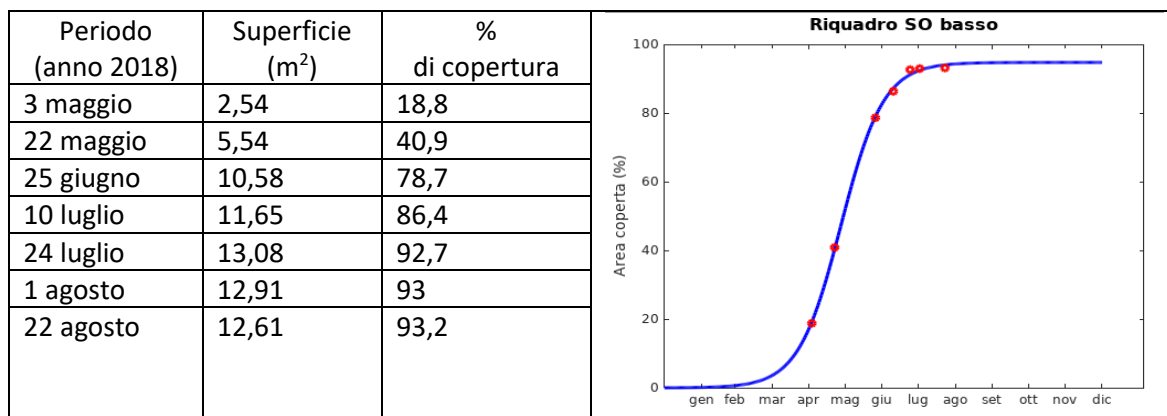


Figura 65– sud ovest 22 agosto 2018

Tabella 8 - Curva di crescita delle piante sulla parete esposta a sud ovest



L'aumento della superficie coperta assume in questo caso una forma sigmoide, come discusso in precedenza, ed è rappresentata nella figura annessa alla

6.3 Relazione tra temperatura fogliare, temperatura aria e radiazione globale

Grafici relativi alla parete di sud ovest: Relazione tra la temperatura dell'aria (AT02) e radiazione globale (GR02) rilevate con sensore posizionato all'esterno della parete verde con la temperatura fogliare (TF01).

Giugno, periodo 21-29

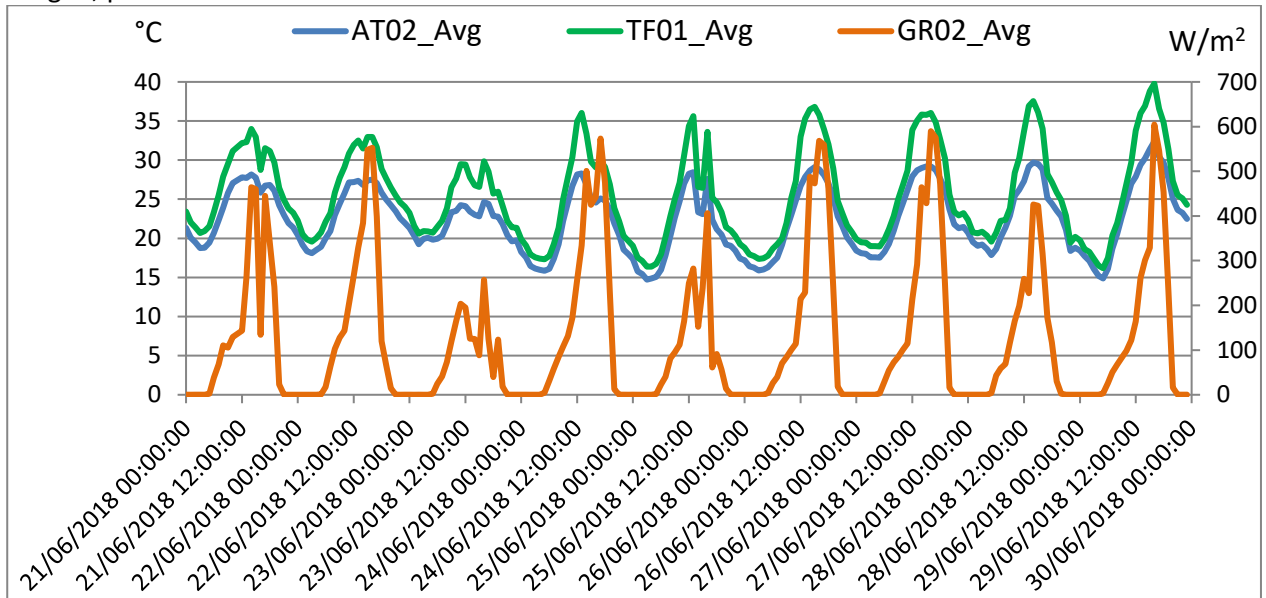


Figura 66: Parete sud ovest. Legenda: temperatura dell'aria (AT02), temperatura fogliare (TF01), radiazione globale (GR02).

La temperatura fogliare raggiunge valori elevati, con punte prossime ai 40 °C a fine giugno, intorno alle ore 16. Alla stessa ora, in media, la radiazione globale presenta il valore più alto (429,9 W/mq). La temperatura dell'aria intorno alle ore 16, in media è di 27,7 °C mentre la temperatura fogliare alle ore 16 è, in media, di 33 °C. Mediamente la massima temperatura fogliare si raggiunge alle ore 13 con 34°C .

Luglio: periodo 13-20

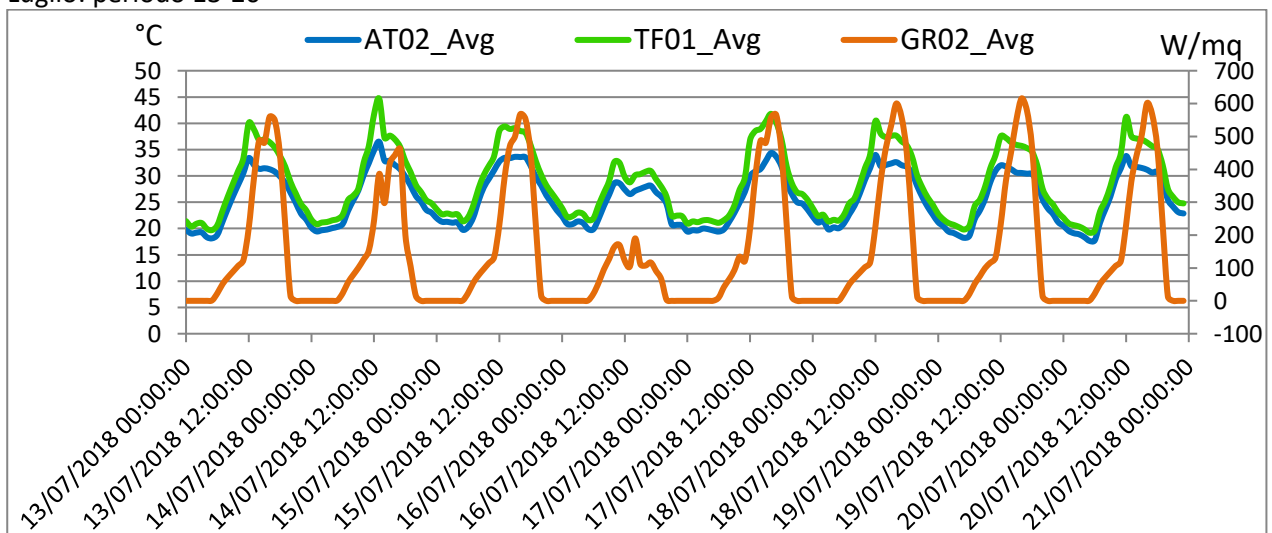


Figura 67: parete sud-ovest. Legenda: temperatura dell'aria (AT02) temperatura fogliare (TF01), radiazione globale (GR02).

La temperatura fogliare rimane elevata con punte prossime ai 45 °C alle ore 13. In media il valore più alto della temperatura fogliare si ha intorno alle ore 12 con una misura di 38,2 °C . La radiazione globale

raggiunge punte di oltre 600 W/mq intorno alle ore 16, mentre il valore medio più elevato si ha intorno alle ore 17 con un valore di 493,96 W/mq. La temperatura dell'aria presenta punte superiori a 36 °C intorno alle ore 14. Mediamente la temperatura più elevata dell'aria si raggiunge alle ore 13 con 32 °C .

Agosto: periodo 3-10

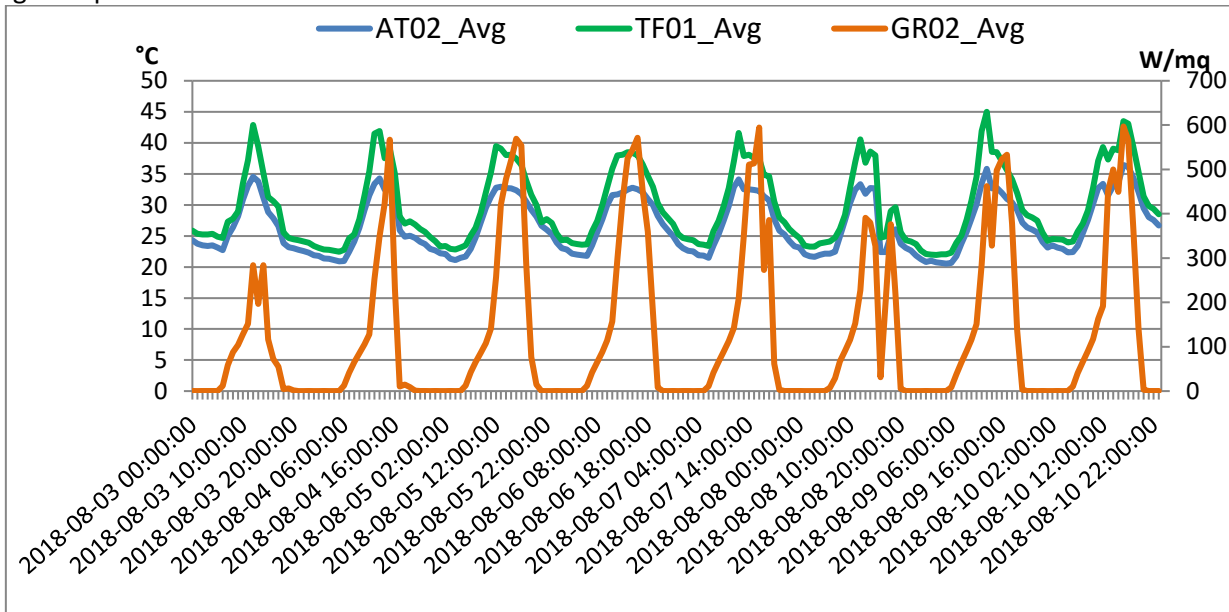


Figura 68. parete sud-ovest. Legenda: AT02: temperatura dell'aria; TF01: temperatura fogliare; GR02.

Alle ore 12 la temperatura in media, nel periodo compreso tra il 3 e 10 agosto è di oltre 33 °C. La temperatura fogliare, alle ore 12 è in media di 40,6 °C, con punte di 45 °C alle ore 13. I valori più elevati della radiazione globale, in media sono di 428 W/mq alle ore 14, e di 398,7 alle ore 16 con punte elevate di 569 W/mq alle ore 16.

Settembre: periodo 14-21

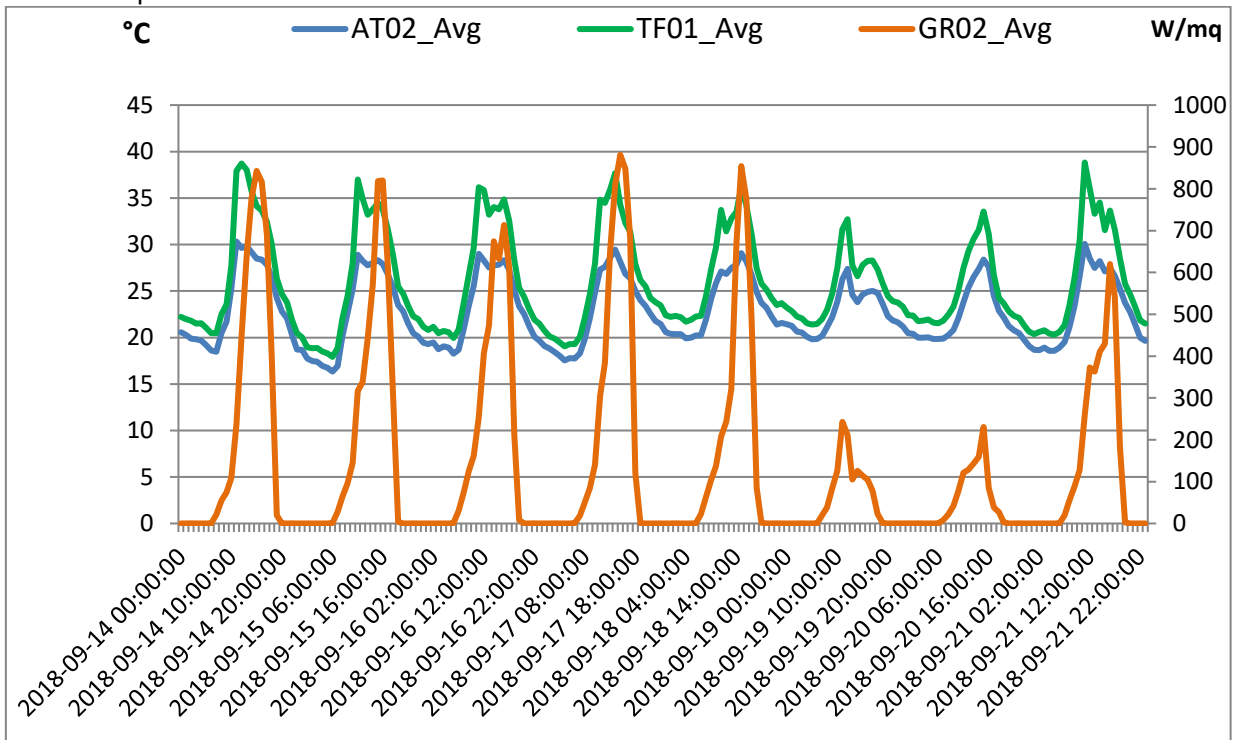


Figura 69. Parete sud-ovest. Legenda: AT02: temperatura dell'aria; TF01: temperatura fogliare; GR02

La Temperatura dell'aria, in settembre, è più bassa (in media alle ore 11 è di 27, 8 °C). La temperatura fogliare più elevata rimane, in media, di 34, 7 °C, alle ore 11. I valori più elevati della radiazione globale si hanno intorno alle ore 15 con 600 W/mq, con punte di 881 W/mq.

7 Comfort microclimatico degli ambienti interni

L'attività ha previsto lo sviluppo di una task di ricerca e sperimentazione finalizzata a valutare il comfort microclimatico dell'edificio dimostrativo in relazione all'impiego della vegetazione sulle pareti esterne. A questo proposito sono stati installati: 2 globotermometri e 2 termoigrometri, posizionati al primo e secondo piano dell'edificio prototipo, oggetto di analisi. I valori monitorati delle temperature medie radianti, temperature dell'aria interna e umidità relativa sono stati messi in relazione con quelli riportati nella Norma UNI EN ISO 7730:2006. Come riportato nella norma citata, gli ambienti termici moderati sono caratterizzati da parametri termici variabili entro un ristretto intervallo:

Temperatura Aria Interna (AT07_Piano 1, AT08_Piano 2): $10^{\circ}\text{C} < \text{AT} < 30^{\circ}\text{C}$;

Temperatura Media Radiante (TaG01_Piano 1, TaG02_Piano 2): $10^{\circ}\text{C} < \text{TaG} < 30^{\circ}\text{C}$;

Umidità Relativa (RH07_Piano 1, RH08_Piano 2): $30\% < \text{RH} < 70\%$;

Velocità dell'aria (Va): $0 \text{ m/s} < \text{Va} < 1 \text{ m/s}$.

Come si evince dai grafici (Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73) di seguito riportati, gli andamenti della temperatura dell'aria interna sono racchiusi nel *range* indicato dalla norma sopra citata, ad eccezione della settimana di agosto dove le temperature esterne molto alte hanno avuto una ripercussione anche all'interno degli ambienti confinati, innalzando di 2 gradi la temperatura dell'aria interna riportata nella norma per gli ambienti termici moderati. Mentre per quanto riguarda il monitoraggio della temperatura media radiante (Figura 74, Figura 75, Figura 76, Figura 77) e dell'umidità relativa (Figura 78,

Figura 79, Figura 80, Figura 81) si può affermare che la presenza della parete verde riesce a contenere i risultati monitorati entro i *range* di riferimento descritti nella norma UNI EN ISO 7730:2006 [12].

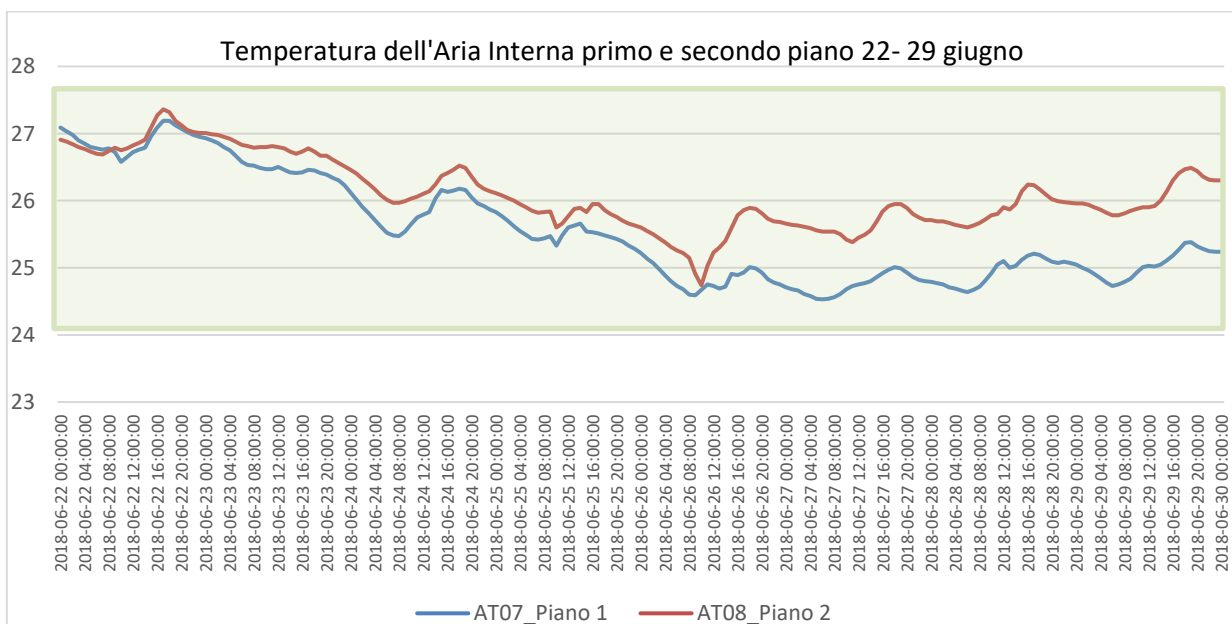


Figura 70.

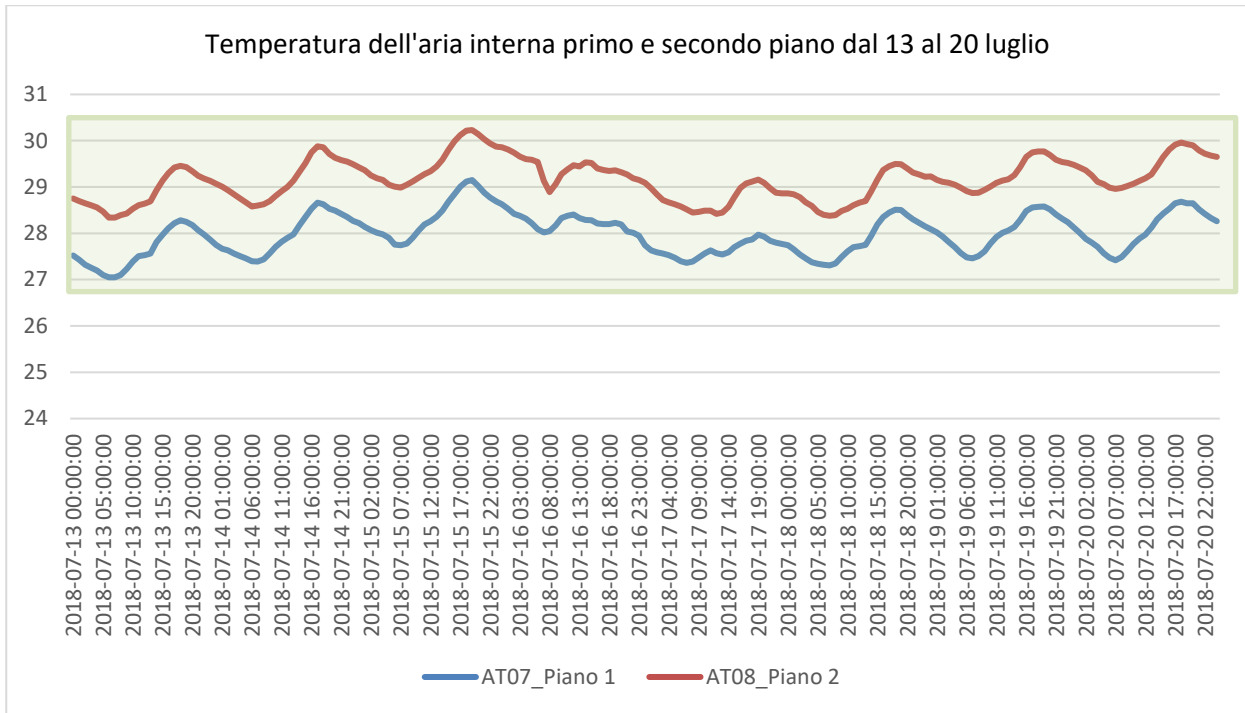


Figura 71.

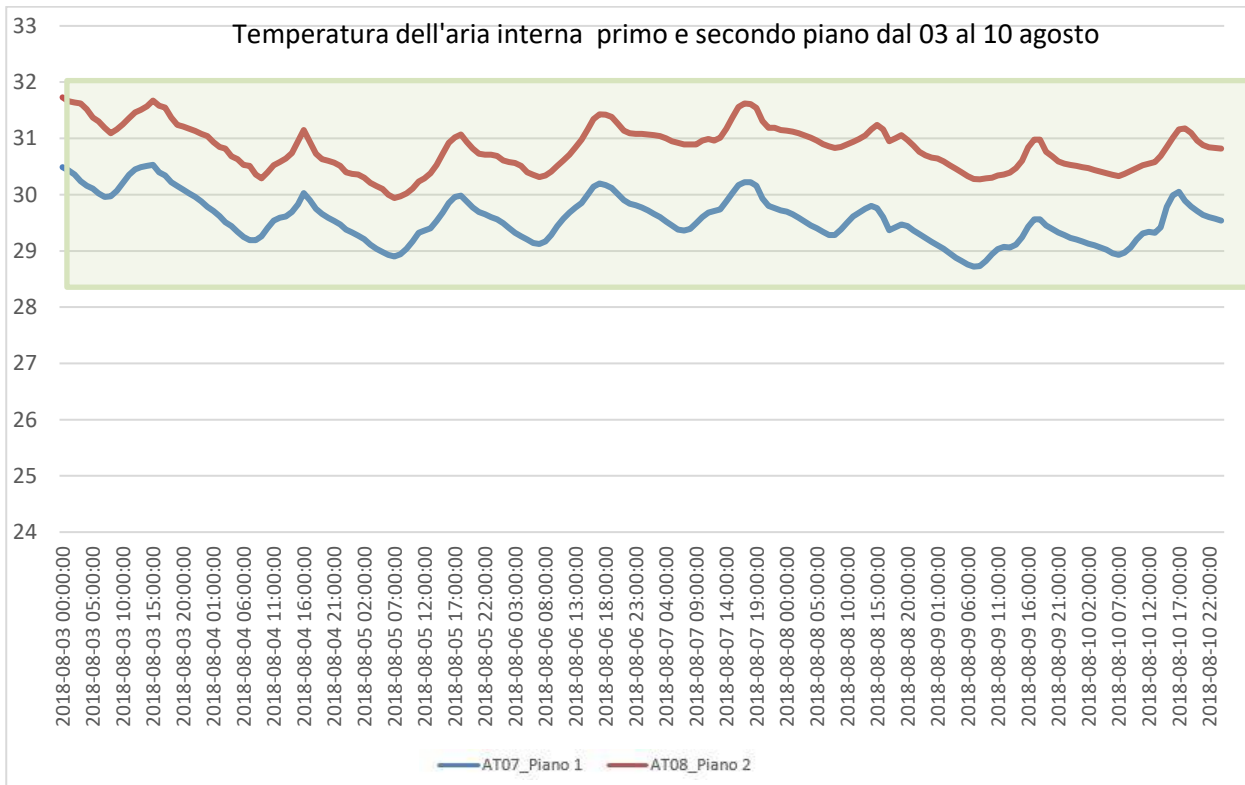


Figura 72.

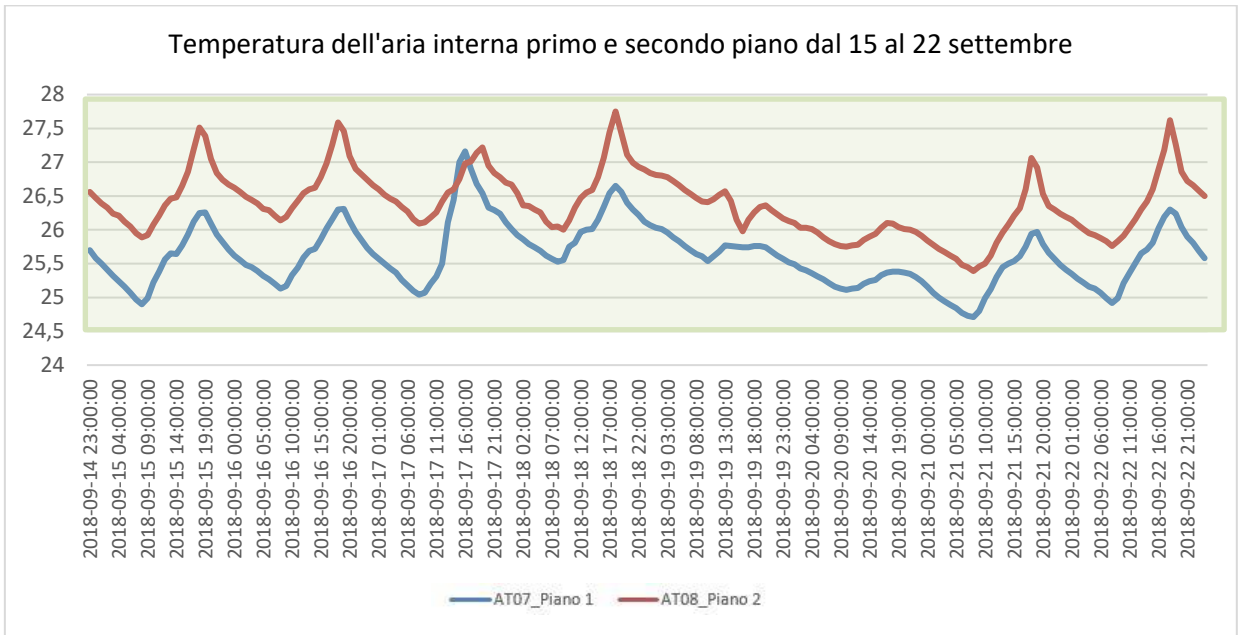


Figura 73.

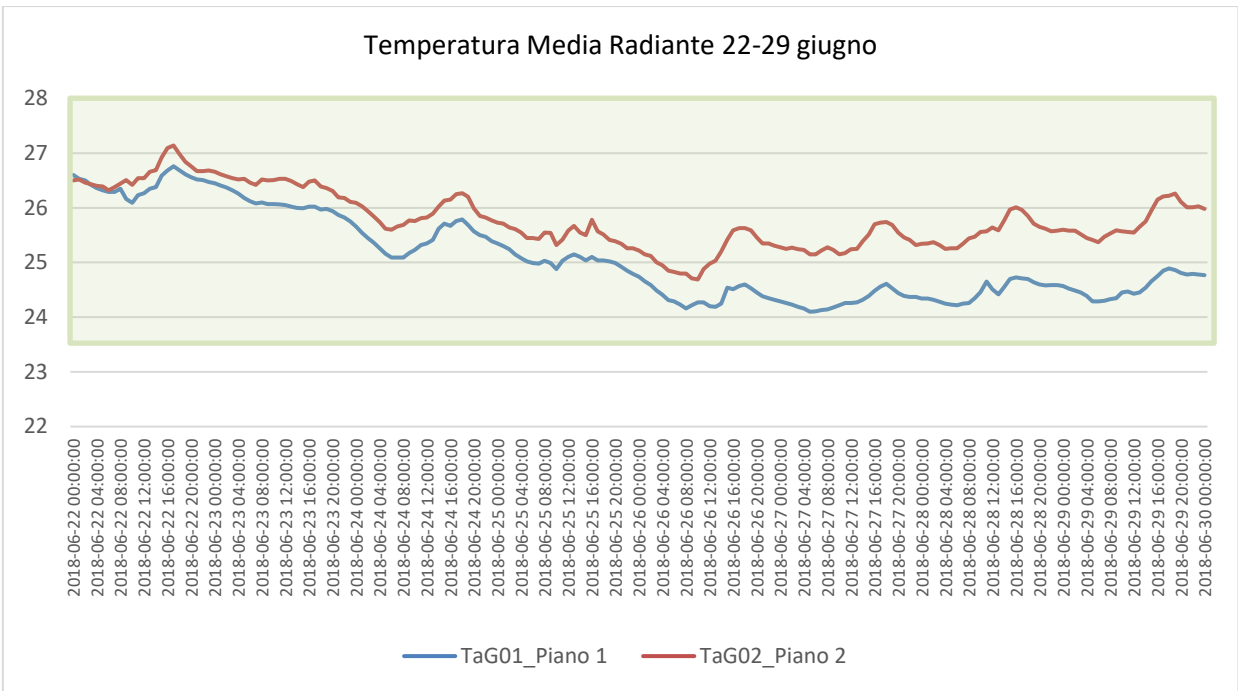


Figura 74.

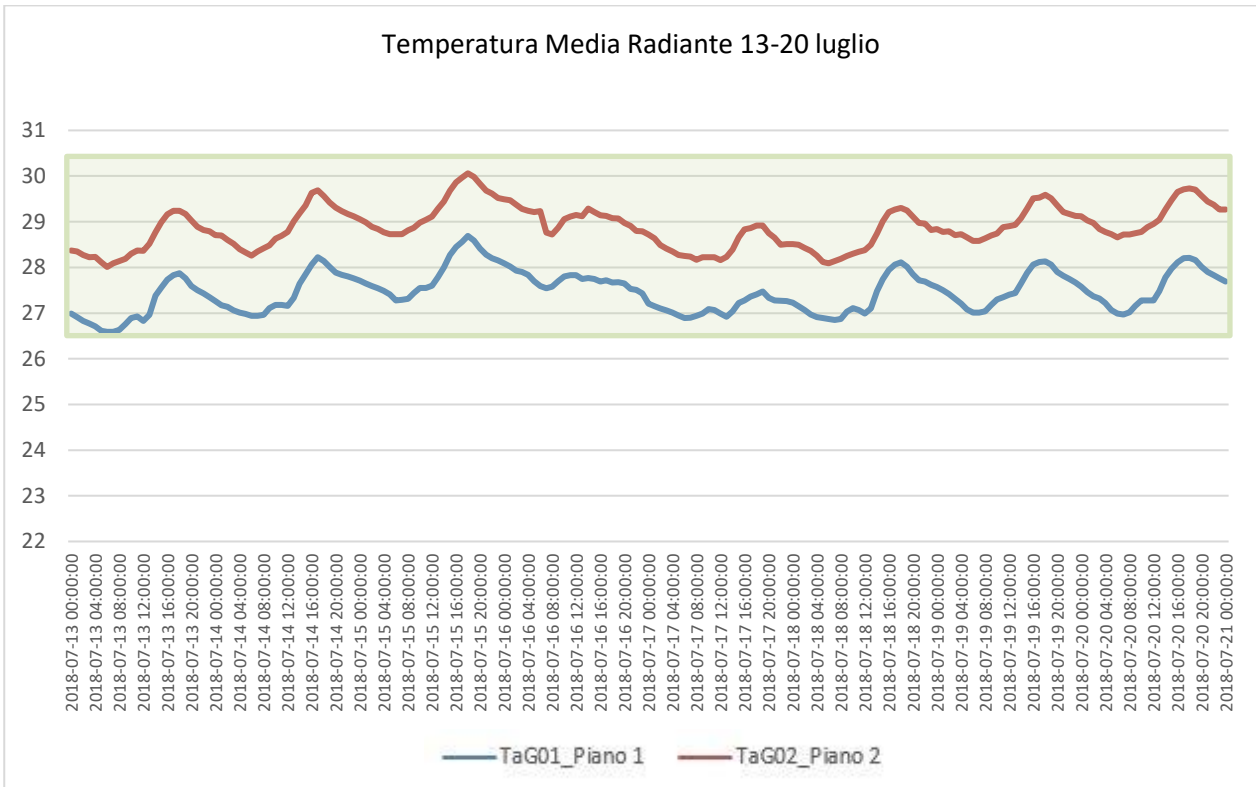


Figura 75.

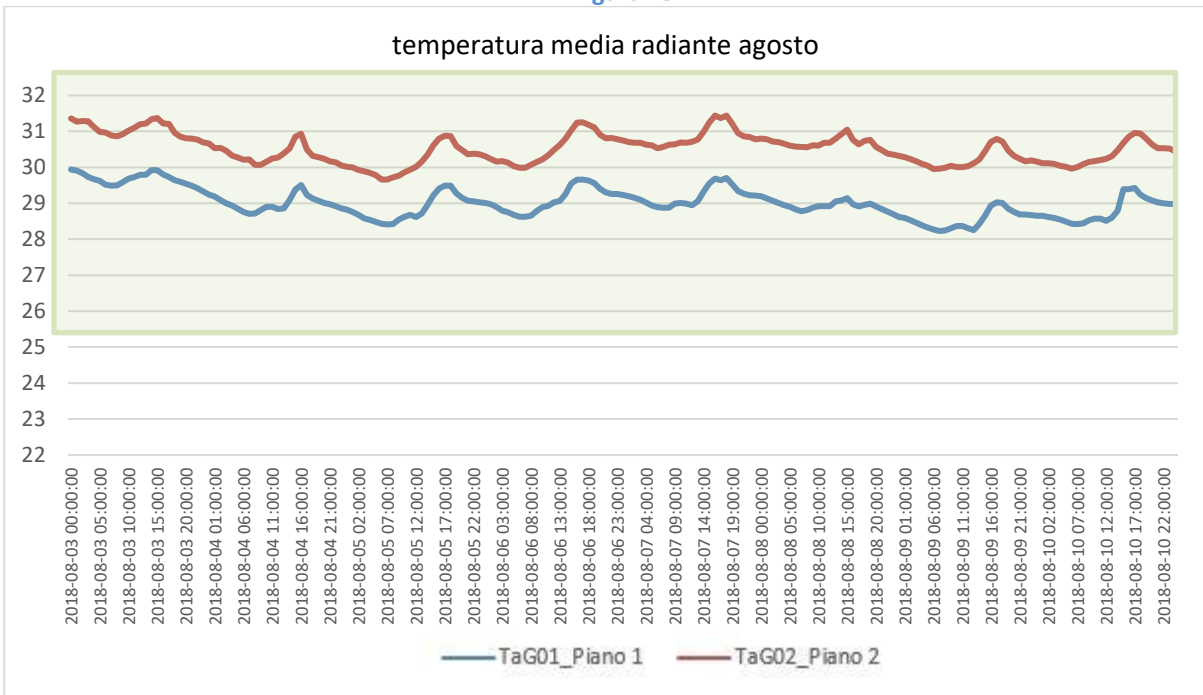


Figura 76.

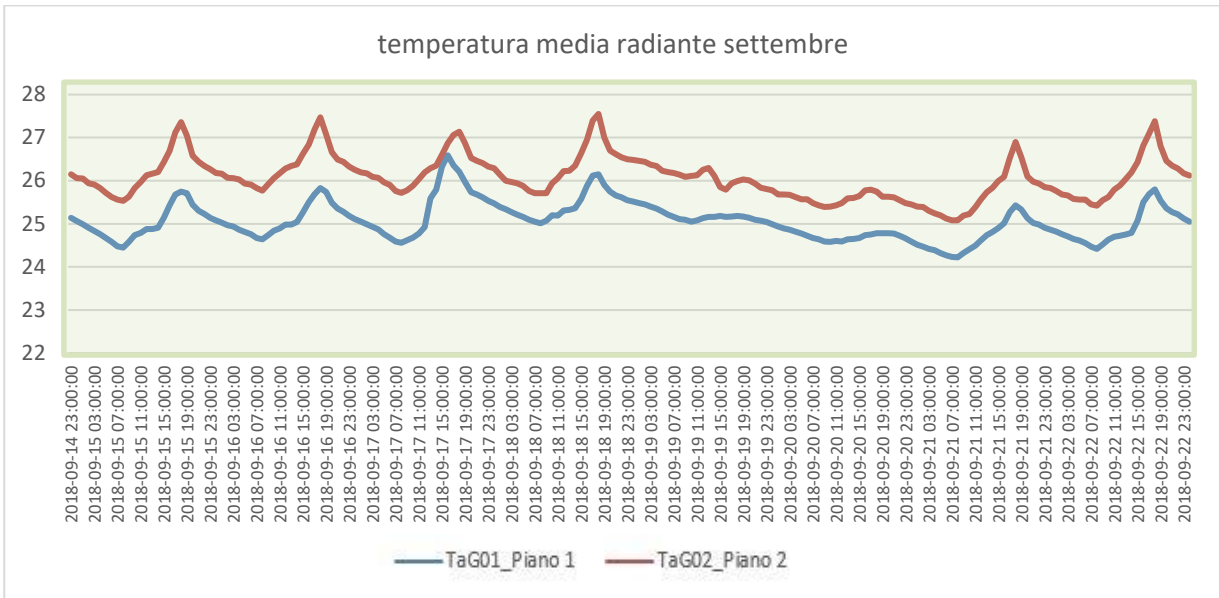


Figura 77.

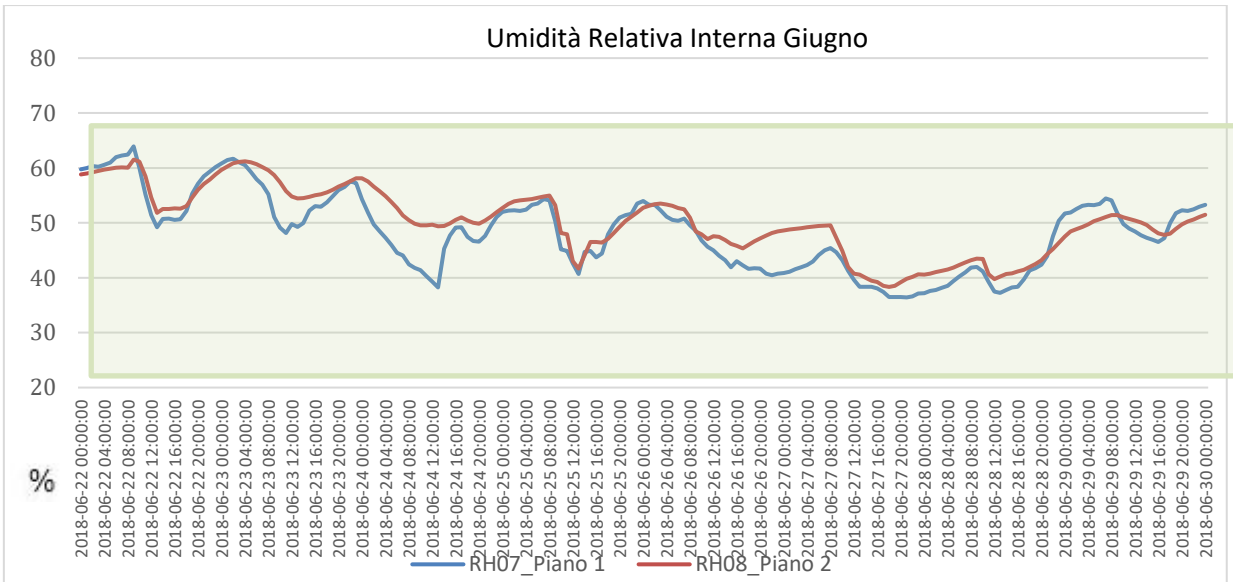


Figura 78.

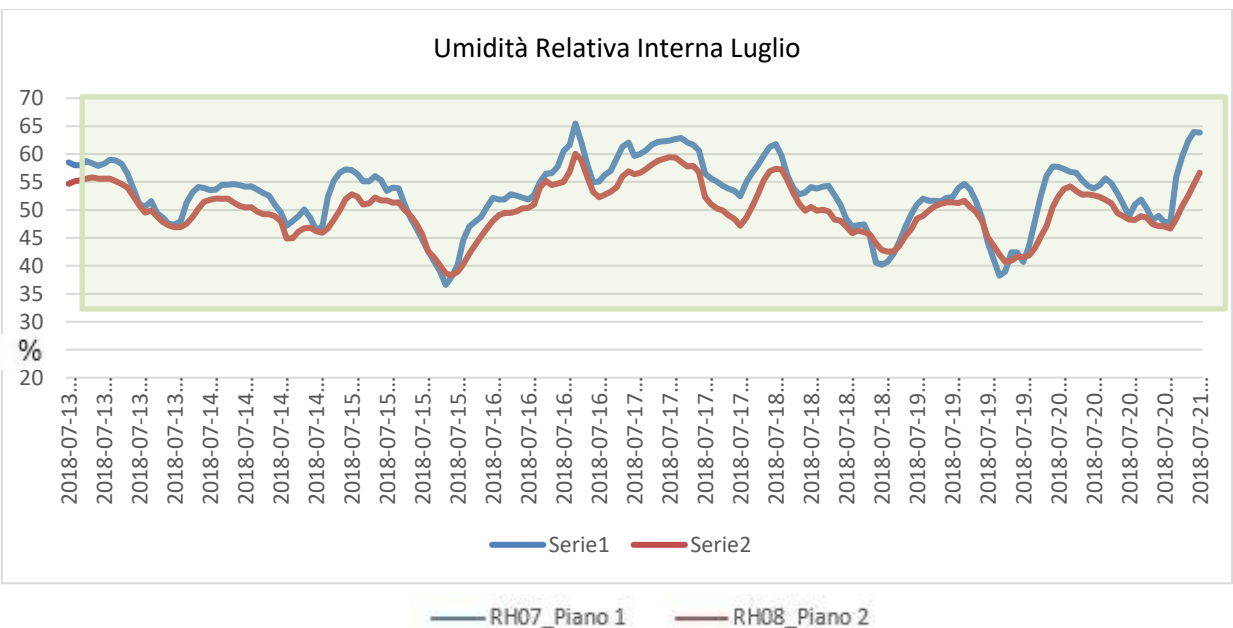


Figura 79.

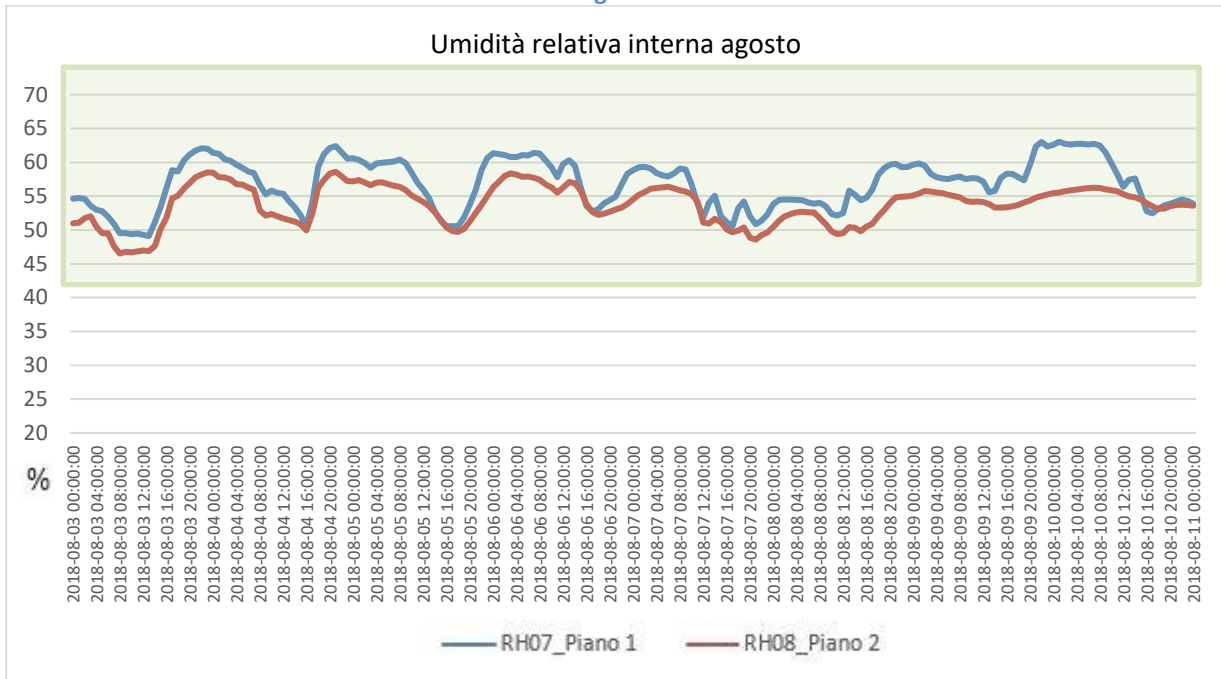


Figura 80.

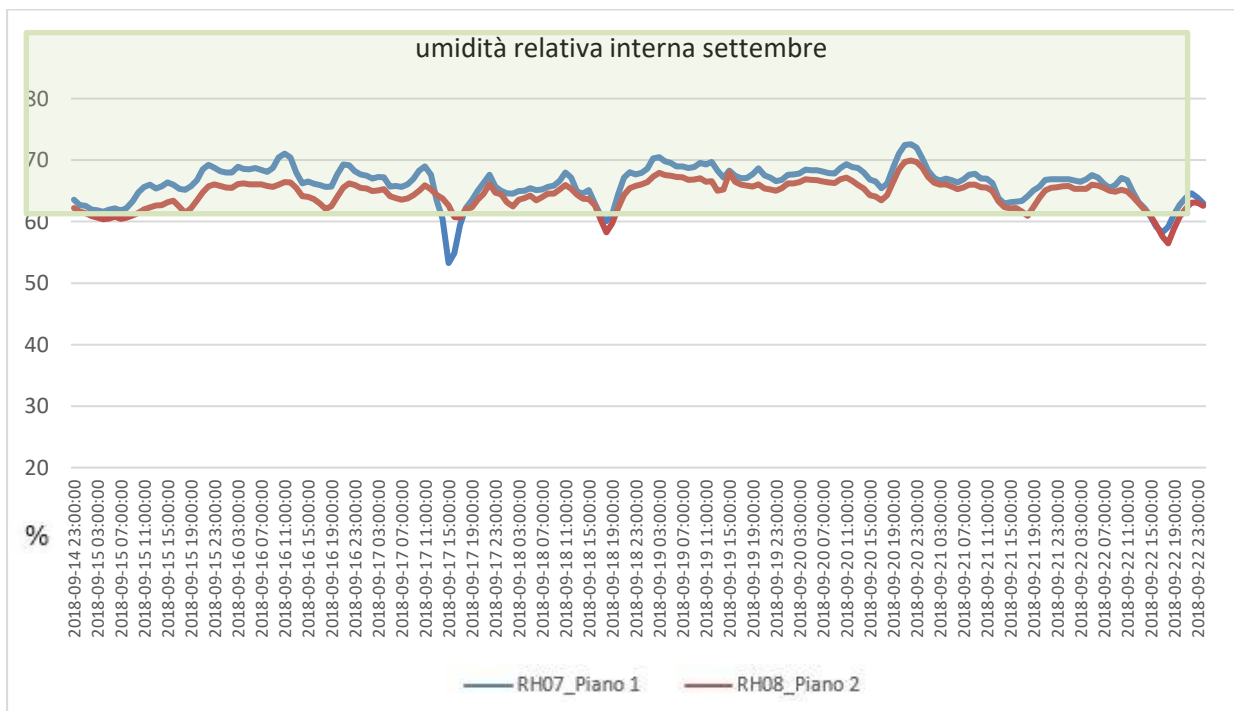


Figura 81.

Poiché l'installazione di nuovi sensori per la valutazione del comfort microclimatico interno è stata effettuata il 20 giugno 2018, è stato possibile esaminare le condizioni di benessere e non, riportate nella

Tabella 9 e indicate dalla UNI EN ISO 7730:2006, per il solo periodo estivo.

Tabella 9- Parametri per le condizioni di benessere

Variabile	Periodo invernale	Periodo estivo
Temperatura aria interna	20 – 24 °C	23 – 26 °C
Differenza verticale di temperatura	< 3 °C	< 3 °C
Temperatura superficiale del pavimento	19 – 26 °C	–
Asimmetria temperatura radiante pareti	< 10 °C	–
Asimmetria temperatura radiante soffitto	< 5 °C	–
Umidità relativa	30 – 70 %	30 – 70 %
Velocità aria	0,15 m/s (22 °C)	0,17 m/s (24 °C)

Negli stessi grafici sopra riportati con il rettangolo in verde si mostra come, nella settimana dal 22 al 29 giugno 2018, i parametri siano coerenti con gli intervalli più restringenti. Nella [Figura 70](#) si nota come, superati i primi giorni necessari alla stabilizzazione dei sensori, la temperatura dell'aria interna, grazie alla presenza della coltre vegetale installata nelle due esposizioni, sud ovest e sud est, riesca a contenere, per entrambi i piani, la temperatura entro il limite dell'intervallo tra 23°C e 26°C per la maggior parte delle ore della giornata. Da sottolineare che durante questo periodo le temperature esterne si sono assestate intorno ai 33 °C per molte ore della giornata, come si evince dai dati esaminati dalla stazione meteo installata sul tetto dell'edificio (AT01), e dai picchi di irraggiamento, monitorati sia sul tetto dell'edificio (GR01) e sia sulla parete verticale sud-ovest (GR02) che sulla parete verticale a sud-est (GR04) per il mese di luglio ([Tabella 10](#)) e per il mese di agosto ([Tabella 11](#)). Nonostante il caldo eccessivo nella zona climatica D, in cui ricade l'edificio, la parete verde riesce a contenere le temperature elevate.

Tabella 10. Monitoraggio della temperatura esterna (AT01) e dell'irraggiamento (GR) di un giorno tipo.

Timestamp	AT01_ °C	GR01_ W/m2	GR02_ W/m2	GR04_ W/m2
2018-07-20 08:00:00	25,19	419,1	71	563,2
2018-07-20 09:00:00	27,58	593,2	88,7	644,8
2018-07-20 10:00:00	29,87	740	106,4	658,6
2018-07-20 11:00:00	31,65	847	121,3	604,1
2018-07-20 12:00:00	32,35	898	231,4	483
2018-07-20 13:00:00	31	892	362,6	326,3
2018-07-20 14:00:00	30,84	841	442,1	183
2018-07-20 15:00:00	30,55	745,4	504,5	131,1
2018-07-20 16:00:00	30,17	610	601,1	112,3
2018-07-20 17:00:00	29,5	452,4	566,5	91,4
2018-07-20 18:00:00	29,53	280,3	462,2	70,03
2018-07-20 19:00:00	28,1	122,1	233,3	43,65
2018-07-20 20:00:00	25,37	16,51	13	9,52
2018-07-20 21:00:00	23,97	-0,054	0,113	-0,058
2018-07-20 22:00:00	23,14	-0,045	0,079	-0,078

Tabella 11. Monitoraggio della temperatura esterna (AT01) e dell'irraggiamento (GR) di un giorno tipo.

Timestamp	AT01_ °C	GR01_ W/m2	GR02_ W/m2	GR04_ W/m2
2018-08-06 08:00:00	27,29	354,2	65,46	527
2018-08-06 09:00:00	29,77	527,5	88,7	633,4
2018-08-06 10:00:00	30,98	676,1	114,3	662,4
2018-08-06 11:00:00	31,33	642,2	156,7	507,5
2018-08-06 12:00:00	30,87	895	297,8	541,7
2018-08-06 13:00:00	31,05	895	430	396
2018-08-06 14:00:00	31,47	853	525,6	244,2
2018-08-06 15:00:00	31,86	748,9	543,7	172,7
2018-08-06 16:00:00	31,54	657,8	571,1	194
2018-08-06 17:00:00	31,16	453,2	451,4	152,8
2018-08-06 18:00:00	30,15	302,2	359,8	105,7
2018-08-06 19:00:00	29,53	132,7	178,8	50,9
2018-08-06 20:00:00	28,1	10,11	7,848	3,985
2018-08-06 21:00:00	26,78	-0,037	0,079	-0,06
2018-08-06 22:00:00	25,72	-0,093	0,076	-0,074

I dati sperimentali di cui si dispone ci fanno dedurre che le condizioni interne di temperatura e umidità sono funzionali a una riduzione delle ore di accensione degli impianti per il condizionamento dell'aria e quindi conseguentemente ad un risparmio energetico. Tutti i dati interni monitorati sono stati registrati in un ambiente chiuso e non abitato, che non ha beneficiato degli effetti positivi dell'apertura delle finestre e quindi di un arieggiamento adeguato, altro punto questo che va sommato ai risultati già positivi dovuti alla installazione della coltre vegetale. Di seguito si riportano i dati relativi al periodo dal 15 settembre al 22 settembre 2018, già monitorato anche nella precedente annualità, con una coltre vegetale meno folta e un numero inferiore di sensori. La disponibilità di dati relativi a due annualità ha permesso di eseguire i confronti riportati nelle [Figura 82](#) (settembre 2017) e [Figura 83](#) (settembre 2018).

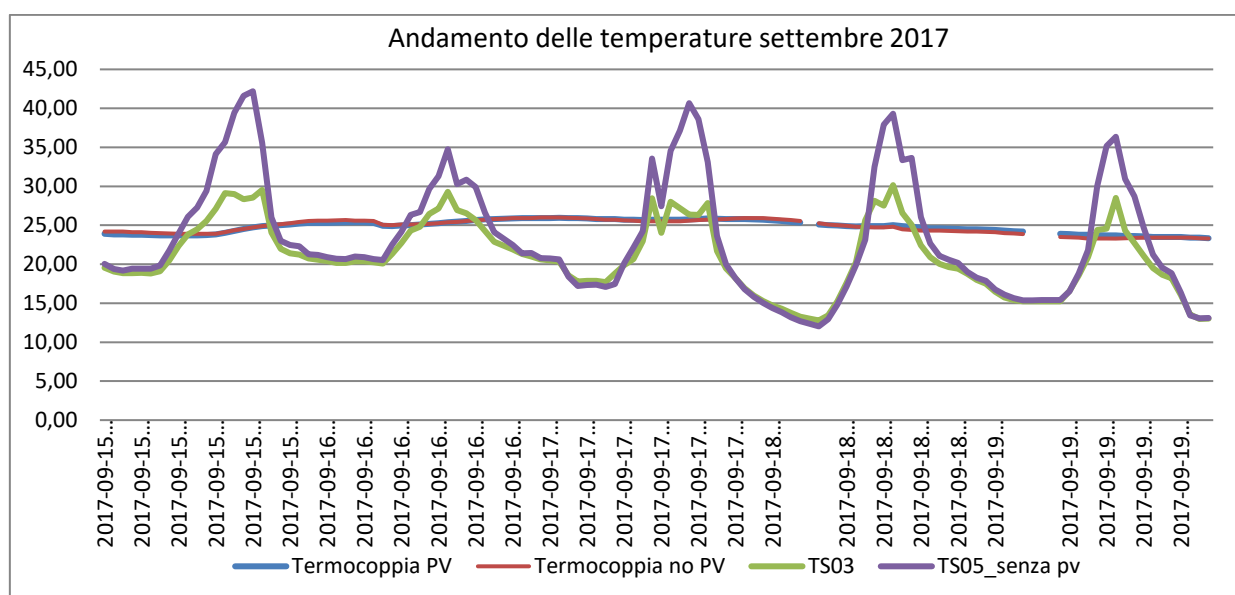


Figura 82- Temperature superficiali interne e esterne con e senza parete verde settembre 2017

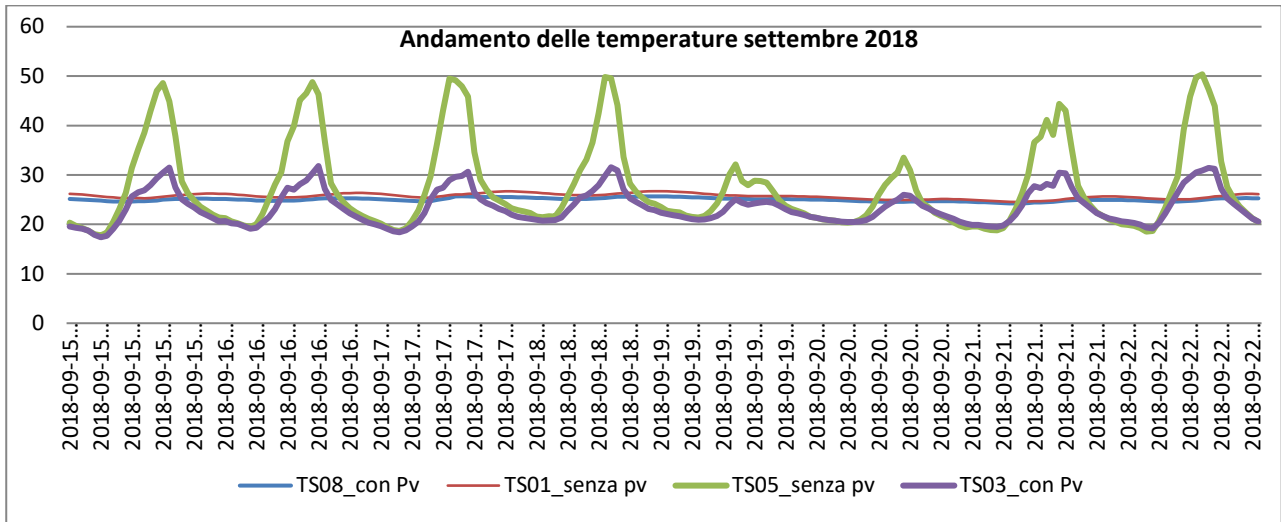


Figura 83- Temperature superficiali interne e esterne con e senza parete verde settembre 2018

La [Figura 82](#) e la [Figura 83](#) mostrano gli andamenti delle temperature superficiali esterne ed interne schermate e non schermate dalla coltre vegetale per quanto riguarda la campagna di acquisizione dati 2017 e 2018. Nella [Figura 82](#), che si riferisce al 2017, si nota come la temperatura superficiale interna dietro la coltre vegetale non si discosti molto dalla temperatura superficiale interna fuori dalla parete verde, con una differenza di temperatura di 0,5 gradi. Mentre nella [Figura 83](#) che si riferisce al 2018 si nota come la presenza della coltre vegetale faccia abbassare di tre gradi la temperatura superficiale interna e di circa 20 gradi la temperatura superficiale esterna. Queste differenze sono da attribuire a una coltre vegetale meno folta nel 2017 rispetto a una coltre vegetale più folta presente nel 2018. Da questi due grafici è evidente come la presenza della parete verde dia un notevole apporto in termini positivi per il microclima interno. In [Figura 84](#) sono riportati gli andamenti delle temperature esterne dal 15 al 19 settembre sia per l'anno 2017 che per l'anno 2018 mentre in [Figura 85](#) sono riportati gli andamenti delle temperature interne per lo stesso periodo. Si evidenzia che per l'anno 2017, con valori di temperatura esterna molto più ridotti rispetto allo stesso periodo del 2018, la temperatura ambiente interno non subisce una grande variazione ed è allineata alla temperatura esterna, essendo in quel periodo la coltre vegetale in crescita e non avendo per questo grande influenza sulle temperature. Mentre nel settembre 2018 la temperatura interna subisce un notevole abbassamento, intorno ai 2 gradi in media, grazie alla sola presenza della coltre vegetale. Infatti, l'edificio oggetto di studio è stato monitorato in entrambe le annualità e nelle stesse condizioni a contorno, senza persone all'interno che vivessero l'edificio e con le finestre chiuse in modo tale che non ci fossero altre influenze se non la coltre vegetale, che nel 2018 risultava molto folta e ben distribuita sulla griglia metallica di supporto. Anche in questo periodo, gli andamenti della temperatura dell'aria interna ([Figura 85](#)) sono risultati racchiusi nel range indicato dalla norma sugli standard di comfort microclimatico.

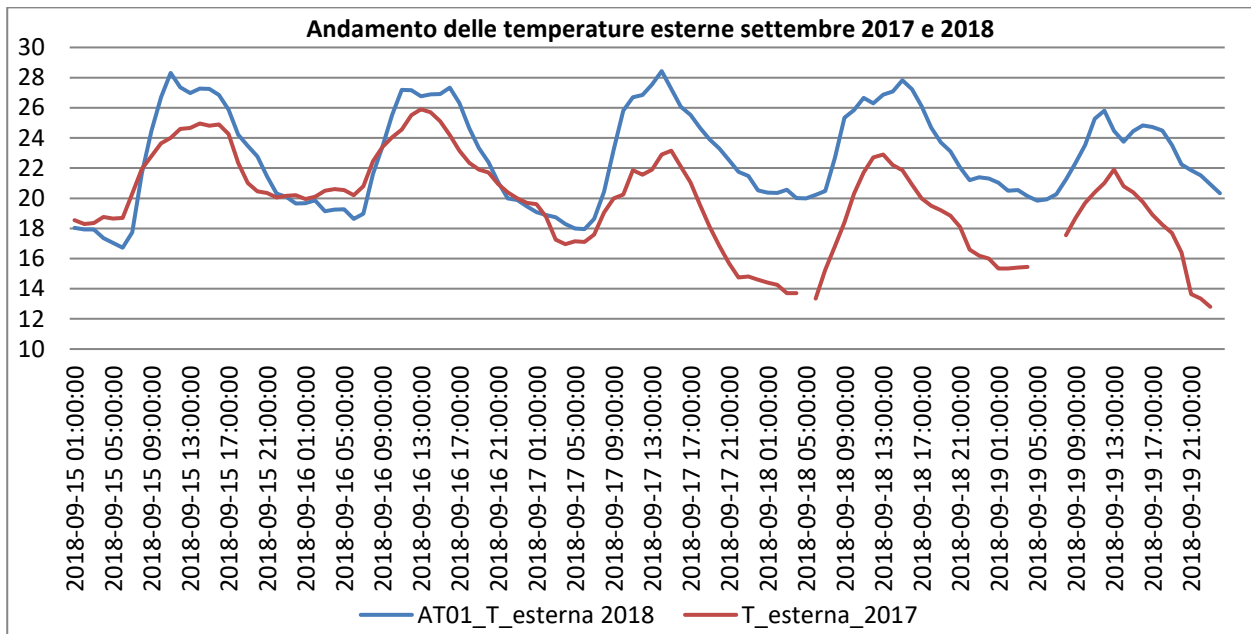


Figura 84. Temperature esterne dal 15 settembre al 19 settembre sia del 2017 sia del 2018

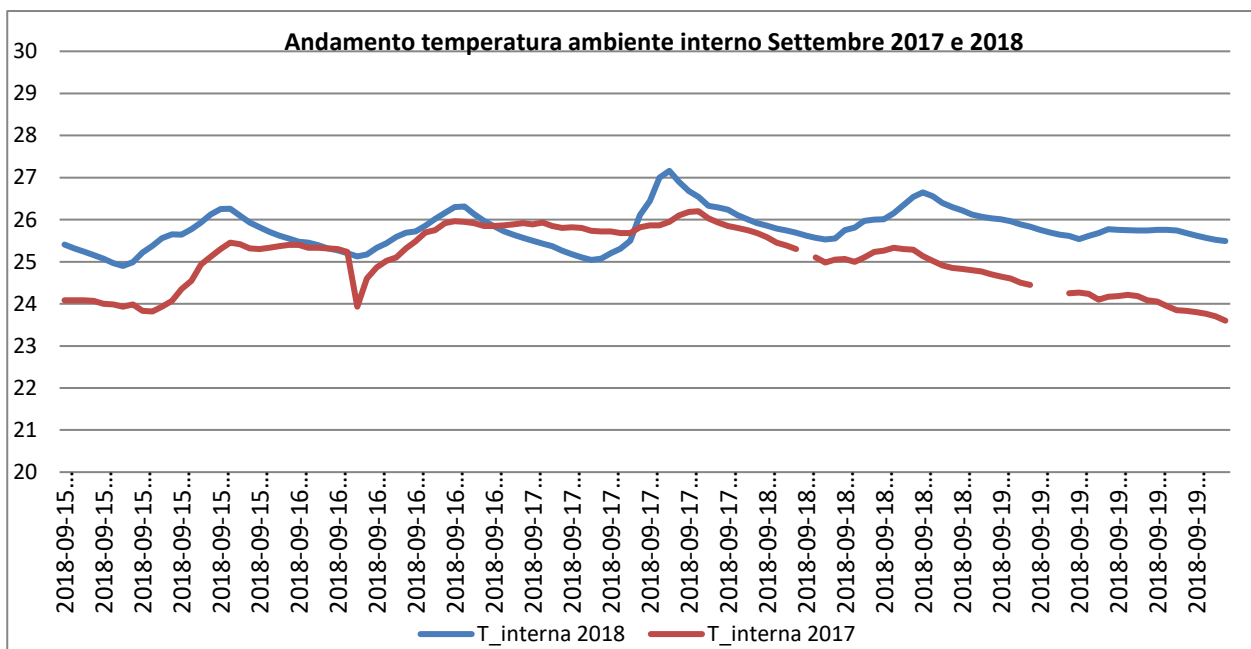
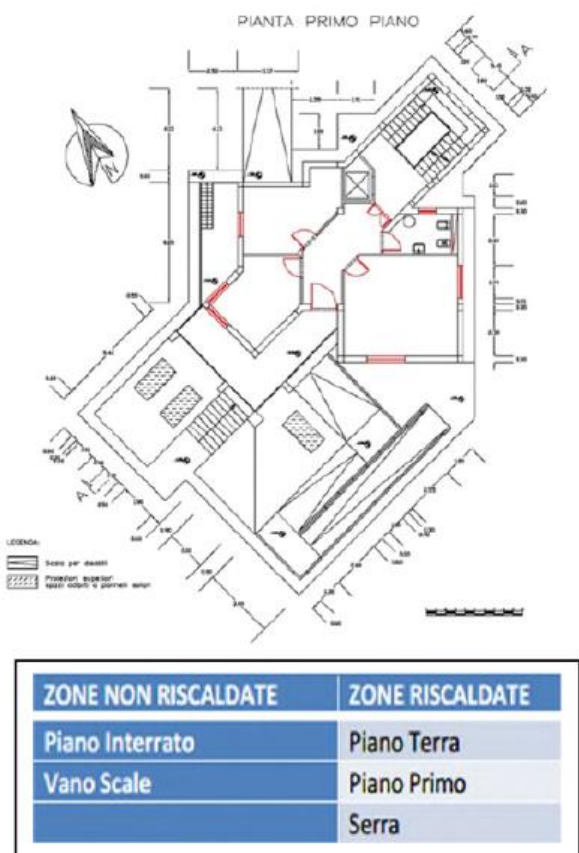


Figura 85. - Temperature interne dal 15 settembre al 19 settembre sia del 2017 sia del 2018

8 Serra bioclimatica

Le serre bioclimatiche appartengono alla categoria delle tecnologie passive per il controllo delle condizioni termo-igrometriche degli edifici. In generale, il termine “Sistema solare passivo” è utilizzato per descrivere quei sistemi che raccolgono, accumulano e ridistribuiscono energia solare senza l’utilizzo di impianti meccanici. In relazione alle diverse modalità di trasmissione del calore accumulato, le serre si possono dividere in due tipologie: a guadagno diretto o a guadagno indiretto. Le serre a guadagno diretto costituiscono estensioni vere e proprie dello spazio abitato: la radiazione solare entra direttamente nell’ambiente interno e viene assorbita dagli elementi massivi di accumulo (pareti, solai...). Nei sistemi a guadagno indiretto, la radiazione solare incide su una superficie di accumulo e riscalda l’aria dello spazio-filtro fisicamente separato dallo spazio abitato, detto spazio tampone. Il collegamento avviene tramite aperture che vengono regolate per favorire lo scambio d’aria che, assieme al calore trasmesso dalla superficie di accumulo, riscalda lo spazio abitato. La definizione di una tipologia di serra bioclimatica ai fini del miglioramento dell’efficienza energetica dell’edificio prototipo è una delle task in

corso di sviluppo sulla base di una collaborazione di ricerca con l'Università di Pisa. La **Figura 86** mostra una suddivisione delle 5 zone termiche prese in considerazione per valutare il comportamento energetico dei seguenti parametri: orientamento, materiali, stratigrafia, zona termica.



Progetto serra captante

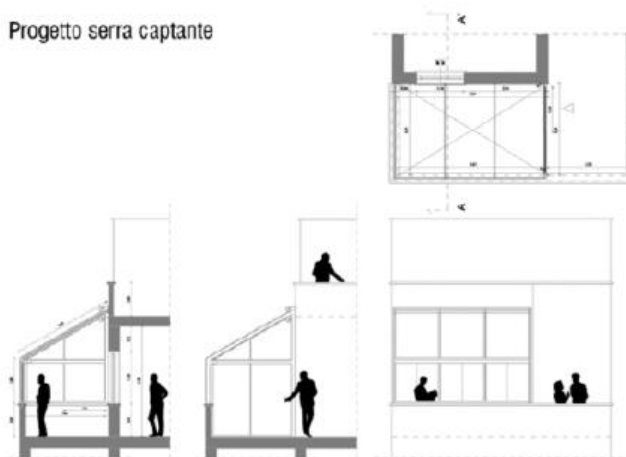


Figura 86. – Dettagli tecnici per la ricerca e la sperimentazione sulla serra bioclimatica

8.1 Caratteristiche tecniche

Serra bioclimatica per la captazione solare.

Ubicazione ENEA Casaccia, ed. f92 (area capanna).

Superficie coperta 7,5 mq.

Volume 20 m3 .





Figura 87 - Lato sud ovest

Figura 88- Lato sud est

La tipologia scelta è di tipo “addossato a parete con scambio convettivo attraverso apertura posta alla base della parete di separazione dell’edificio con attivazione manuale. Il prototipo presenta gli elementi di costruzione riportati di seguito.

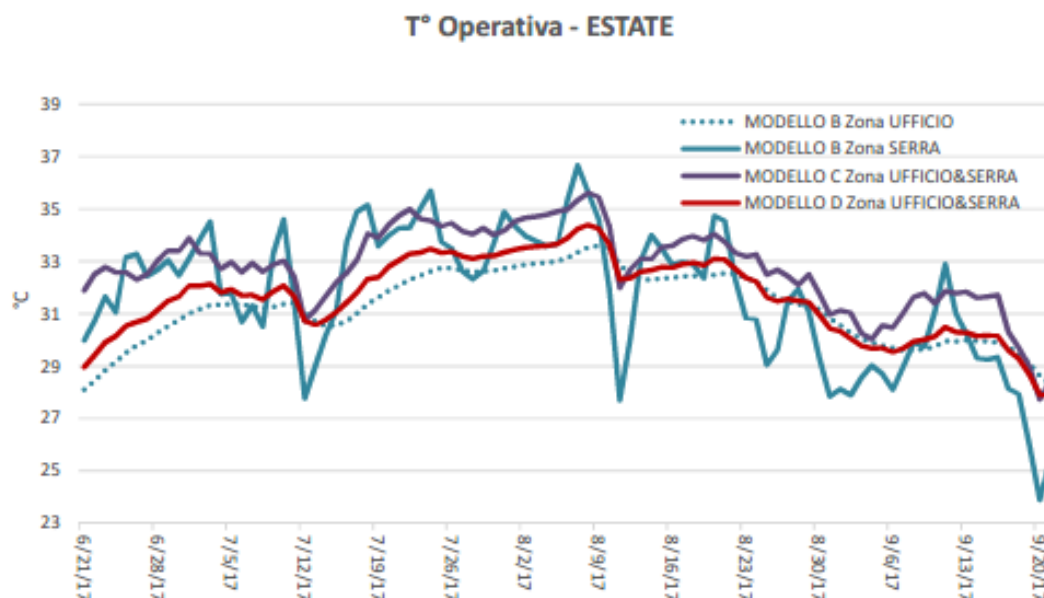
8.2 Caratteristiche esterne

Struttura in scatolati in acciaio da 80x30 x3 completi di piastra d’appoggio e ancoraggio zincato a caldo e verniciato a fuoco con polveri epossidiche colore giallo;

- Copertura trasparente verticale a vetro 5mm con finestre scorrevoli su binari e controtelaio in alluminio verniciato a tutta superficie di metri lineari 8 altezza 1,50 vincolati alle struttura portante mediante profili a H muniti di guarnizione e giunti di dilatazione;
- Struttura trasparente inclinata (una falda) composta da n. 3 lastra policarbonato compatto con trattamento anti UV spessore 10mm antisfondamento vincolato a struttura portante mediante profilo di giunzione strutturale in alluminio;
- Porta d’accesso composta da telaio in acciaio verniciato e lastre di policarbonato compatto.

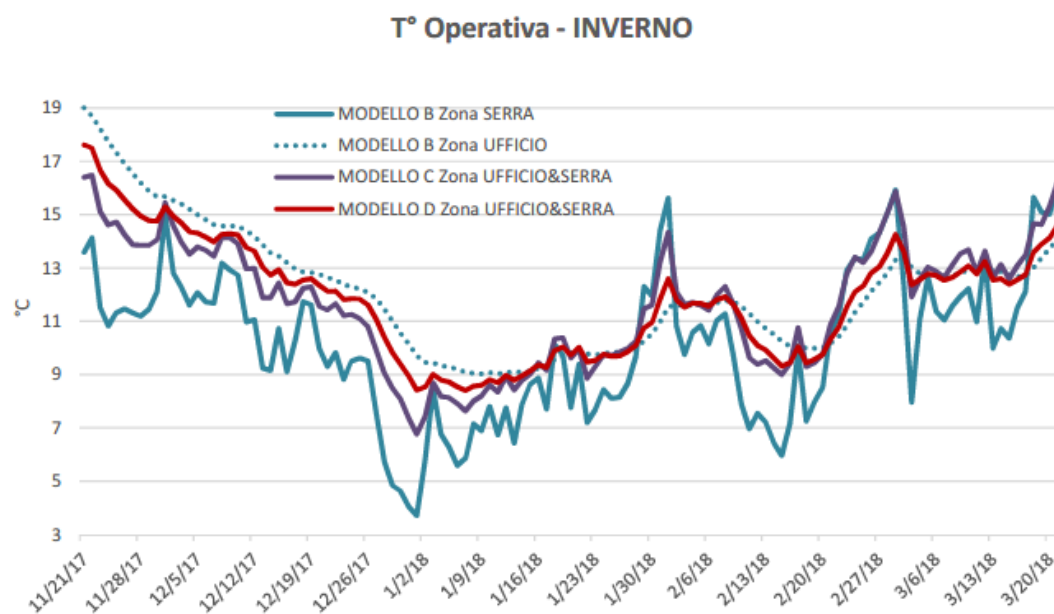
8.3 Caratteristiche interne

- Schermatura solare interna mobile a capanno con guide laterali (binari) a struttura fissa con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza per schermare la parete inclinata (falda) fino alla copertura completa delle finestre verticali;
- Fornitura e montaggio sistema schermante mobile verticale per le pareti laterali comprensivo di schermatura della porta;
- Fornitura e montaggio schermatura solare mobile esterna alla struttura mobile con guide laterali (binari) a struttura fissa con funzionamento automatico azionato da motori elettrici su tutta la lunghezza per schermare esternamente la parete inclinata (falda) fino alle finestre verticali.
- L’attività di ricerca, svolta in collaborazione con l’Università di Pisa, si trova ancora in una fase iniziale per quanto riguarda la sperimentazione a causa di ritardi nella consegna dei materiali della serra bioclimatica. Nell’ambito della collaborazione con l’Università di Pisa, tuttavia, sono state sviluppate delle prime simulazioni per definire l’attività di ricerca. In generale, per le procedure di calcolo, si può fare riferimento a quella relativa ai “sunspaces”, contenuta nell’appendice E della UNI EN ISO 13790, che propone 3 approcci, uno standard, uno conservativo ed uno dettagliato, per il calcolo del contributo radiativo dovuto alla presenza della serra. I grafici riportano le simulazioni operative, estate e inverno, per la temperatura interna dei diversi edifici che compongono l’area sperimentale dell’edificio.



Andamento della T Operativa Modelli B, C, D a confronto in estate

Figura 89. Simulazione della temperatura estate nei diversi ambienti dell'area sperimentale



Andamento della T Operativa Modelli B, C, D a confronto in inverno

Figura 90. Simulazione della temperatura inverno nei diversi ambienti dell'area sperimentale

- Sulla base della Figura 89, che mostra le simulazioni nel periodo estivo, si evince che per limitare il surriscaldamento della serra bioclimatica, è comunque necessaria una schermatura ombreggiante e una ventilazione naturale, attraverso opportune finestrate. Entrambe le osservazioni sono in corso di verifica. Le simulazioni condotte con il software Energy Plus, attraverso la collaborazione con l'Università di Pisa, confermano il contributo della serra bioclimatica al miglioramento del comfort nei limiti attesi nel periodo invernale (Figura 90) che apre considerazioni tecniche per sostenere una maggiore temperatura interna.

9 Climatizzazione microclimatica con sistemi solar cooling

L'attività della presente annualità ha riguardato la seconda campagna di prove mirate a valutare le prestazioni energetiche dell'impianto ENEA di solar cooling, situato presso il centro Martucci di Valenzano (Bari).

9.1 Analisi delle prestazioni dell'impianto

L'inizio della campagna sperimentale dell'estate 2018 e la relativa analisi delle prestazioni dell'impianto ha subito un forte ritardo a causa delle molteplici sostituzioni di parti dell'impianto (pompe di circolazione, organi di tenuta, dry cooler) per i danni subiti per la neve e l'ondata di freddo anomalo che ha colpito la località di Valenzano (dove la temperatura ha raggiunto persino i -10°C) e che hanno comportato la rottura di numerosi componenti dell'impianto. Solo nell'ultima settimana di agosto è stato possibile riattivare l'impianto. Pertanto le prove sono state effettuate nel periodo 01 - 25 settembre 2018.

9.2 Campagna sperimentale 2018

La serie di prove sull'impianto di solar cooling è iniziata il 01 settembre 2018 e si è conclusa il 25 settembre 2018, per un totale di 25 giorni di funzionamento. Il sistema di raccolta dati, tramite sensori di temperatura e di energia, ha permesso di acquisire, con intervalli di 15 minuti:

- le condizioni dell'ambiente esterno, ossia la temperatura ambiente (Ambient Temp.), l'irradianza (Irradiance) e l'umidità relativa esterna;
- le temperature di ingresso e uscita dal campo solare (Solar Panels T in, Solar Panels T out), dal serbatoio di accumulo caldo (Hot Storage T in, Hot Storage T out), dalla torre evaporativa (Cooling Tower T in, Cooling Tower T out), dal sistema di accumulo freddo (Cold Storage T in, Cold Storage T out) e dalla serra (Greenhouse T in, Greenhouse T out);
- le temperature interne ai serbatoi di accumulo caldo e freddo;
- il consumo di energia per ogni componente dell'impianto e il valore di energia elettrica per l'alimentazione dell'impianto e la relativa potenza elettrica;

L'irradianza durante il periodo di prova è riportata in Figura 91.

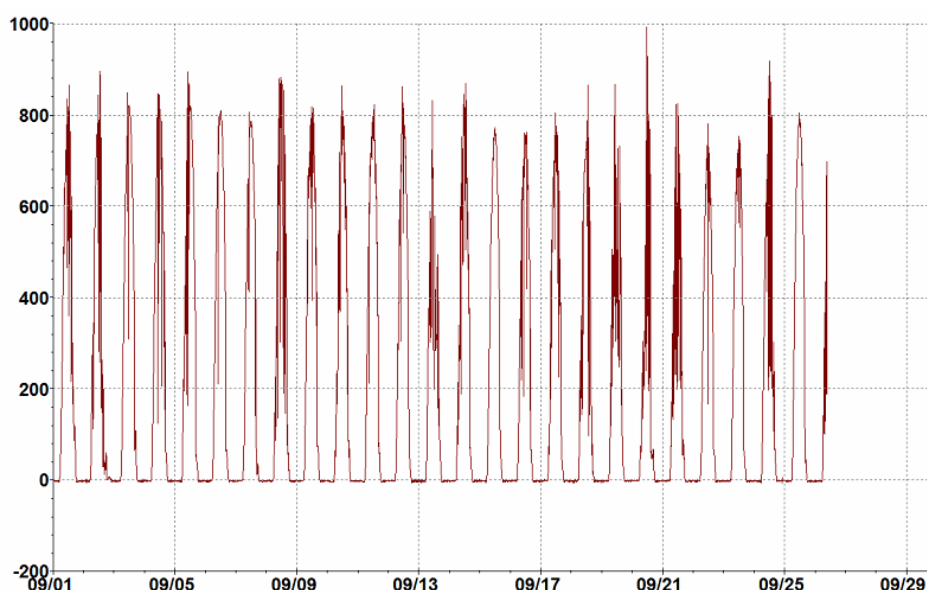


Figura 91 - Irradianza settembre 2018

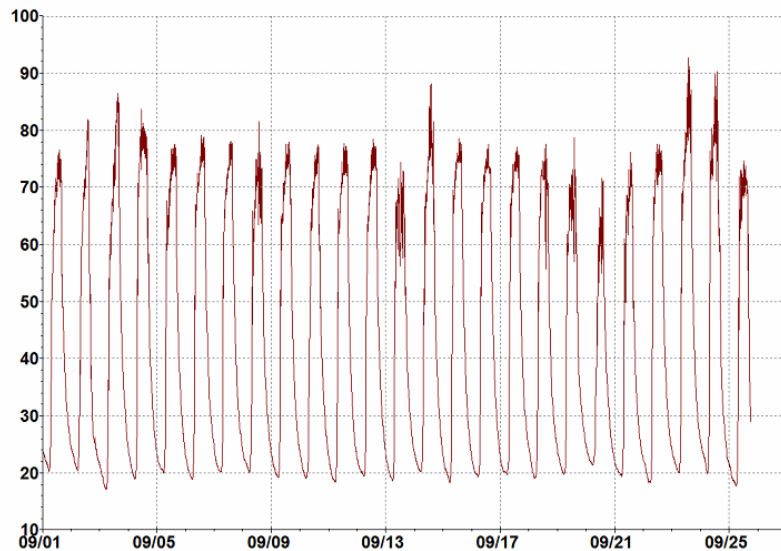


Figura 92 - Temperature campo solare, settembre 2018

Il sistema di gestione e acquisizione dei dati (*Ultrasite* di Emerson) acquisisce ad intervalli di 5 minuti le seguenti grandezze:

- l'indicatore di accensione e spegnimento per la pompa di circolazione che alimenta il campo solare (P1) e quella che porta l'acqua refrigerata dall'accumulo freddo alla serra (P5). Per le pompe P1 e P5 il sistema di acquisizione fornisce solo l'indicazione del suo stato di attivazione. Per le altre pompe poiché sono gestite dalla macchina ad assorbimento manca l'informazione diretta sugli intervalli in cui le pompe di circolazione sono in funzione. Due indicatori possono però darci questa informazione se entrambi sono positivi:
- orario di funzionamento: l'impianto è spento (o meglio la macchina ad assorbimento) fra le 17,00 e le 9,00 del mattino successivo;
- temperatura di set point: per far accendere il componente, la temperatura del fluido in ingresso alla macchina ad assorbimento dal serbatoio di accumulo caldo deve essere compresa fra i 75° ed i 94°C. Poiché le temperature misurate dal sistema di acquisizione dei dati sono istantanee, dunque non tengono conto del fatto che la grandezza all'interno dell'intervallo di tempo compreso fra due misure potrebbe superare il valore di attivazione, si è scelto che questo indicatore sia positivo anche se la temperatura dell'acqua refrigerata mostri una differenza, fra una misura e la successiva, di almeno 1°C. Infatti questa condizione assicura che la macchina frigorifera sia entrata in funzione.

A seguire l'andamento delle temperature che mostrano che la macchina ad assorbimento è entrata in funzione in più giorni del mese di settembre, rendendo probanti le prove effettuate nonostante il periodo non sia estate piena.



Figura 93 - Temperature alimentazione macchina ad assorbimento, settembre 2018

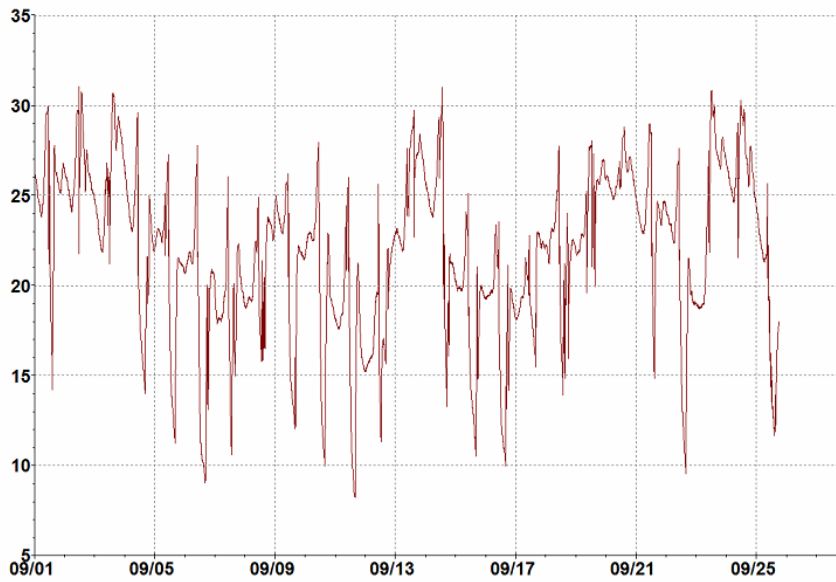


Figura 94 - Temperature acqua refrigerata all'uscita dalla macchina ad assorbimento, settembre 2018

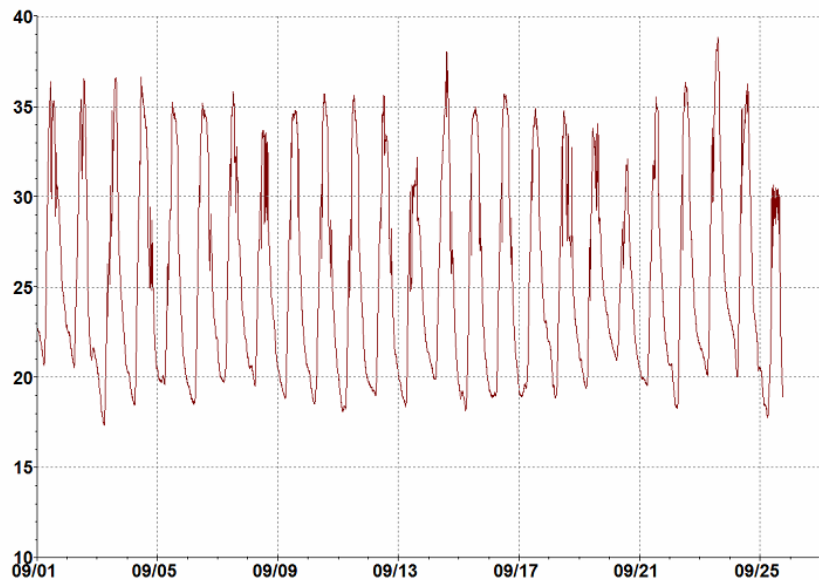


Figura 95 - Temperature torre evaporativa, settembre 2018

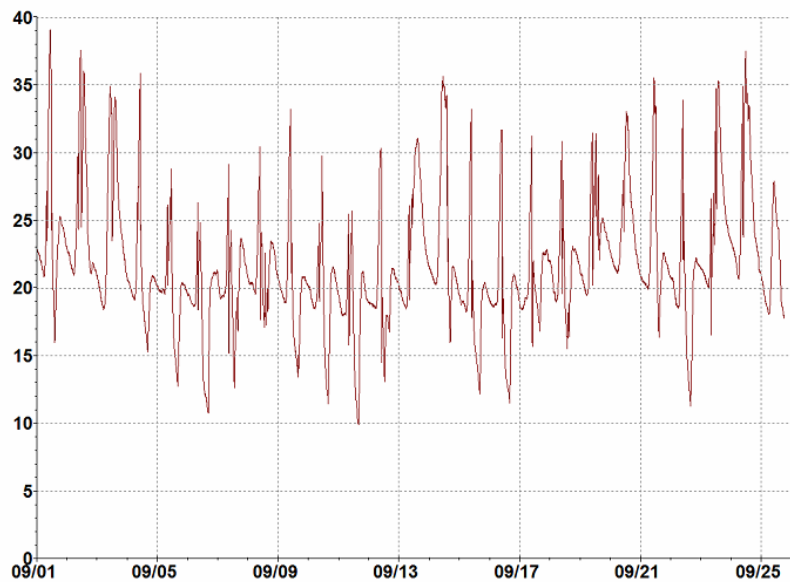


Figura 96 - Temperature acqua refrigerata verso la serra, settembre 2018

Da quest'ultimo grafico delle temperature dell'acqua refrigerata all'uscita dalla macchina ad assorbimento si evince che l'impianto ha avuto un funzionamento ottimale solo nei giorni 6, 11, 14 e 22 settembre, quando la macchina ad assorbimento ha lavorato in modo continuo per più di 5 ore raggiungendo la temperatura di circa 8,23 °C. In questa fase l'assorbitore ha prodotto effetto utile molto prossimo al massimo del suo potenziale, nonostante la temperatura di 76.29°C del fluido vettore di alimentazione superi di poco la soglia di attivazione della macchina di 75°C .

Il giorno 11 settembre l'impianto ha avuto un corretto funzionamento considerando che la temperatura dell'acqua che, il sistema di distribuzione della serra preleva dal serbatoio di accumulo freddo, si aggira attorno ai 10,18 °C. Ci si aspetta il coefficiente di prestazione della macchina frigorifera ad assorbimento su valori elevati (0,7-0,8), ma i dati raccolti dal sistema di acquisizione mostrano valori più bassi, come si evince da Figura 97.

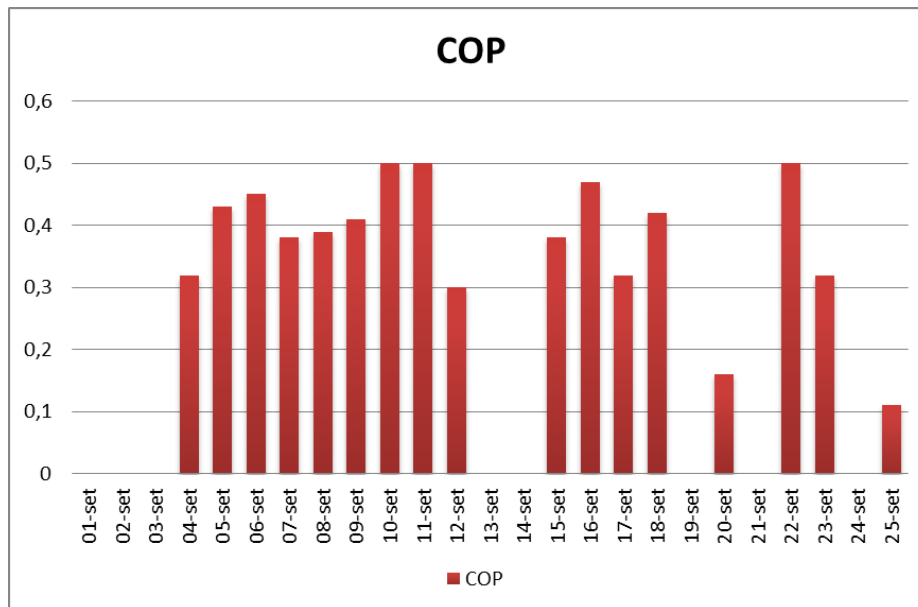


Figura 97 - Coefficiente di prestazione macchina ad assorbimento, settembre 2018

il COP è calcolato come

$$COP = \frac{Q_{out\ ABSR}}{Q_{in\ ABSR}}$$

Il COP nei primi giorni di prova si attesta su valori non elevati, fra 0,35 e 0,45, per poi aumentare attorno a 0,5. Il funzionamento della macchina frigorifera ad assorbimento può così apparire poco soddisfacente, ma va considerato il modesto apporto della fonte solare nel periodo in cui si è svolta la campagna sperimentale. Quanto detto è confermato dalle temperature in uscita dall'assorbitore (

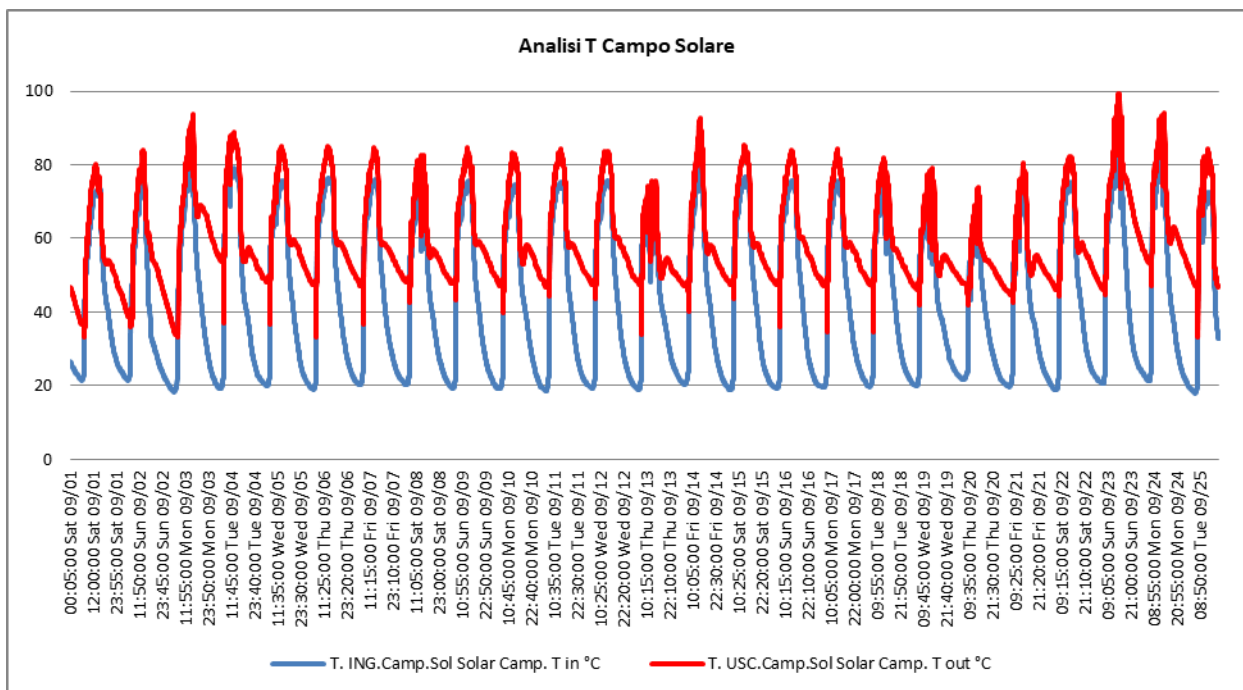


Figura 108), che raggiungono in alcuni giorni anche il valore di 8,23° C considerando che la macchina frigorifera può portare l'acqua a 7°C. Ciò fa prevedere che, nei mesi più caldi, la macchina ad assorbimento possa avvicinarsi frequentemente al valore di efficienza migliore che dispositivi di questo tipo possono raggiungere, ossia un COP di 0,7 - 0,8.

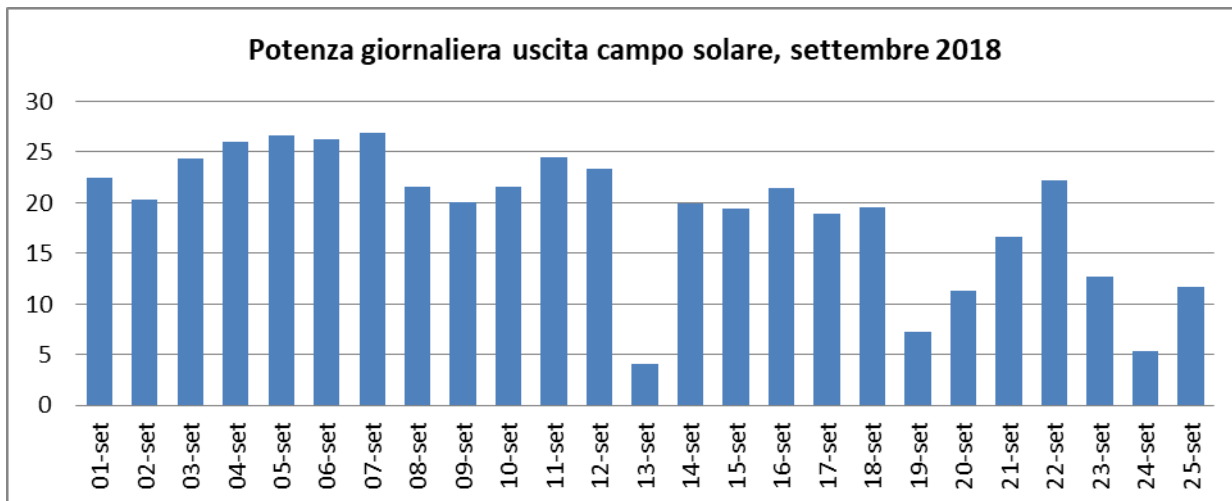


Figura 98 - Potenza giornaliera uscita campo solare, settembre 2018

Si può osservare come il giorno 13 settembre il campo solare è stato praticamente inattivo (il rendimento è risultato nullo). Questo comportamento è dovuto al basso irraggiamento registrato in quel giorno, che ha fatto sì che il campo solare non abbia generato abbastanza energia da far scattare il contatore del misuratore di energia.

Nel seguito del rapporto si farà riferimento esclusivamente per il mese di settembre ai giorni 6 - 11 - 14 - 22 settembre, essendo i dati raccolti in questi giorni (per tutti i componenti) più rilevanti al fine di valutare il funzionamento dell'impianto.

Poiché gli strumenti installati misurano grandezze energetiche e non potenze, per effettuare una prima analisi riguardo i flussi di potenza che transitano nelle varie parti dell'impianto è stata messa in atto una procedura adatta a tale scopo. A partire dal contatore di energia sono stati individuati gli intervalli di tempo in cui si è registrata una variazione del valore esaminato; nota la variazione di energia è stato possibile stimare i valori di potenza termica scambiata dal componente analizzato (valore medio riferito al tempo di campionamento), dividendo il valore della variazione di energia (espressa in kWh) per l'intervallo di tempo (in ore) intercorrente fra due misure successive del contatore. Poiché i valori di potenza così stimati non possono essere esaustivi per dare una valutazione al comportamento dell'impianto è stato ricavato il valore di potenza media giornaliera.

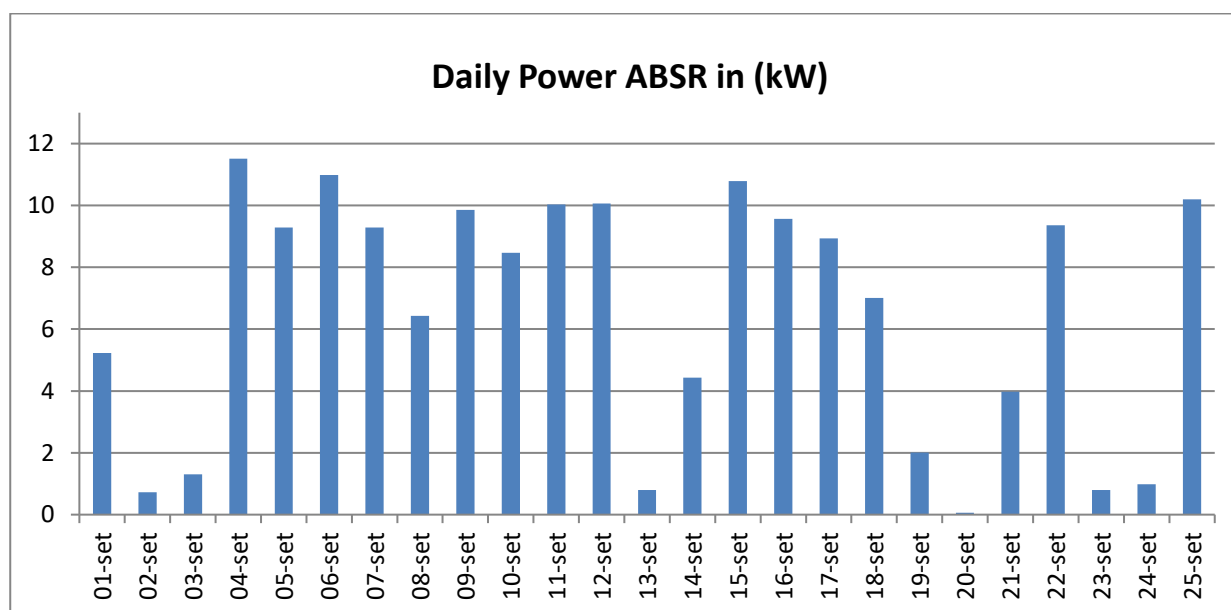


Figura 99 - Potenza giornaliera ingresso macchina ad assorbimento settembre 2018

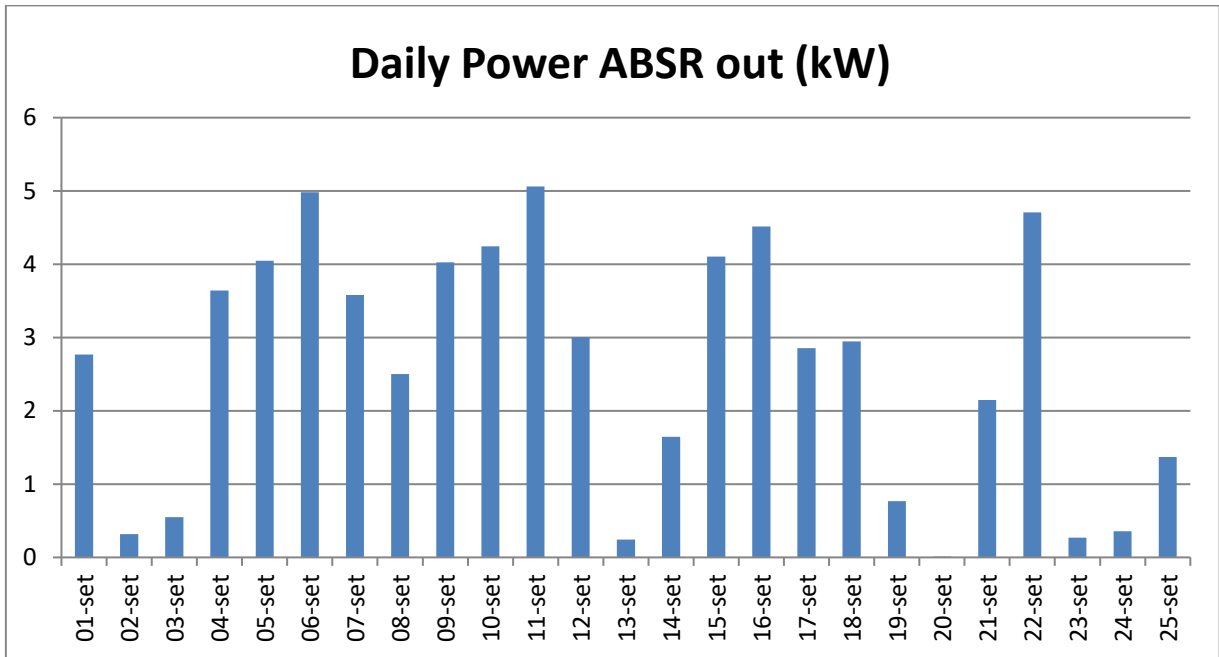


Figura 100 - Potenza giornaliera uscita macchina ad assorbimento, settembre 2018

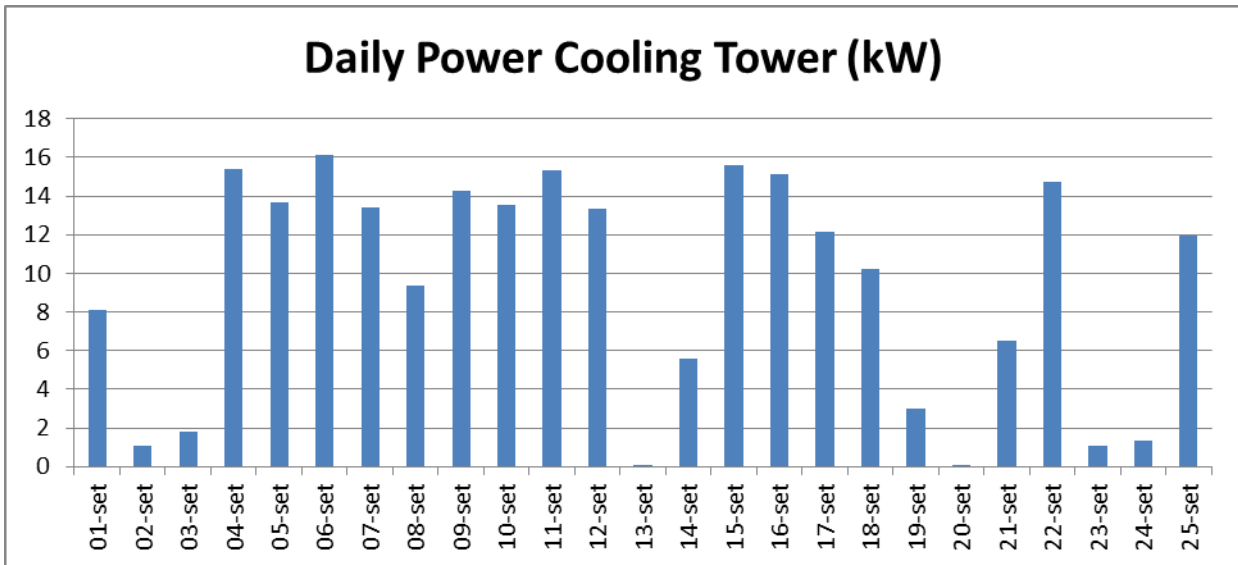


Figura 101 - Potenza giornaliera torre evaporativa, settembre 2018

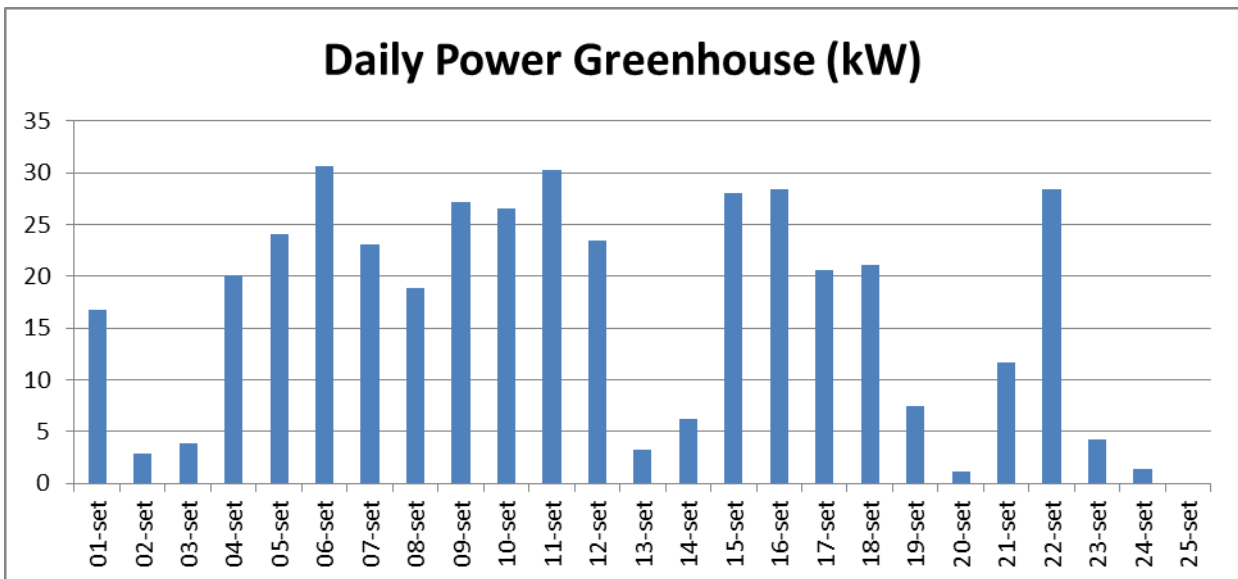


Figura 102 - Potenza giornaliera serra, settembre 2018

I grafici riportati evidenziano come l'impianto non abbia prodotto effetto utile per tutti i giorni, a causa dell'annuvolamento e di giornate non perfettamente assolate.

9.3 Giorni campione della campagna sperimentale di settembre 2018

Del periodo di osservazione nel quale sono stati rilevati i dati che descrivono il funzionamento dell'impianto che va dal 01 al 25 settembre 2018 sono i giorni 6-11-14-22 settembre 2018. A titolo esemplificativo sono rappresentati in Figura 103-22-23-24 l'evoluzione delle temperature per questi giorni di settembre, in cui l'andamento delle temperature dell'acqua refrigerata dà la certezza che la macchina ad assorbimento stia funzionando correttamente.

Per le potenze termiche sviluppate in ogni parte dell'impianto è stata definita la grandezza delta T, che è pari all'effettiva differenza di temperatura quando il dispositivo è in funzione, mentre è nulla quando il componente in analisi è in OFF.

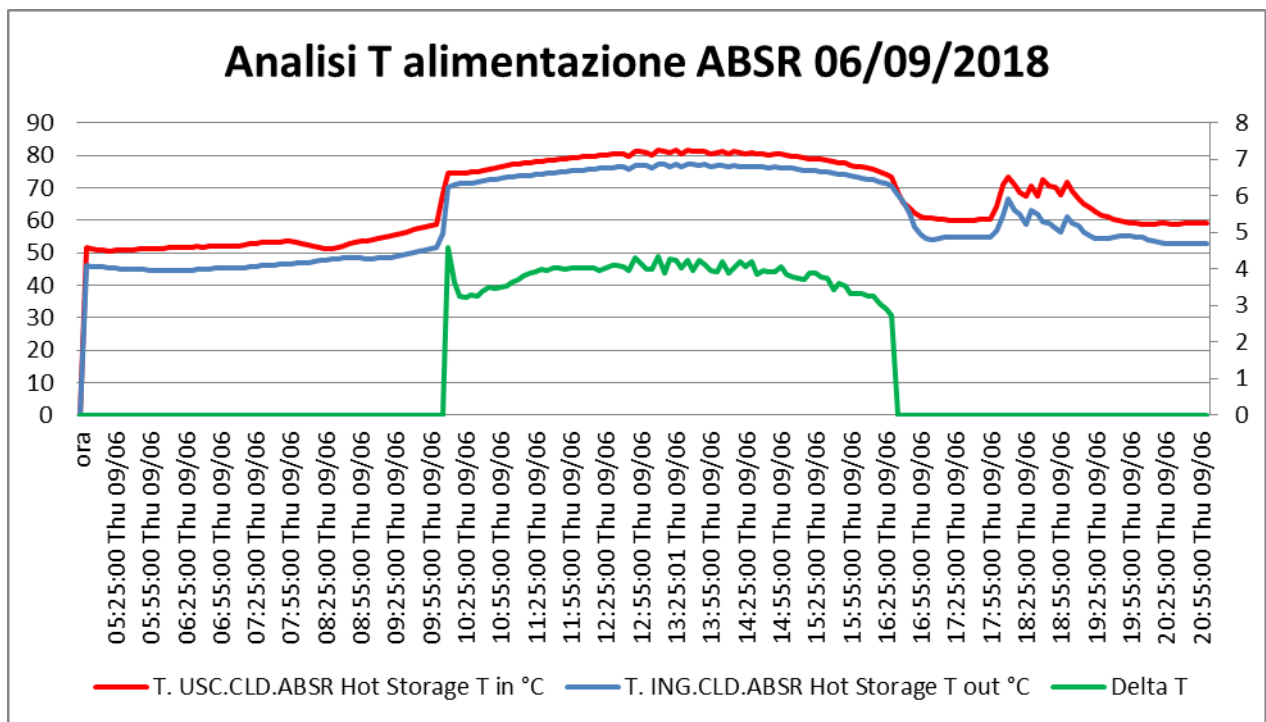


Figura 103 - Temperatura acqua di alimentazione assorbitore, 06 settembre 2018

Per il giorno 06 settembre 2018 la macchina frigorifera ad assorbimento entra in funzione dalle 09:55, quando la temperatura del fluido vettore in ingresso (curva rossa), proveniente dall'accumulo caldo, raggiunge i 75°C che da quel momento funziona senza interruzioni fino alle 16:15. A quel punto la temperatura in ingresso segna un calo progressivo, passando in 25 minuti da 75°C a 65°C. Per la dinamica del fenomeno, 25 minuti costituiscono un periodo breve per una differenza di temperatura di tale entità. E' però spiegabile un gradiente di temperatura di 10° C dato che, non appena il fluido scende da 78 a 75°C, la macchina si spegne, con il conseguente arresto delle pompe di circolazione, e l'acqua si raffredda molto velocemente, fino a raggiungere 65°C. In questo intervallo di tempo si registra una sola differenza di temperatura negativa: l'acqua esce dalla macchina ad assorbimento per andare nell'accumulo caldo con una temperatura maggiore di quella con cui entra (curva blu).

L'analisi della situazione esposta, è simile al giorno 11 settembre giorno in cui la macchina ad assorbimento entra in funzione alle 10:40 e si spegne alle ore 15:50.

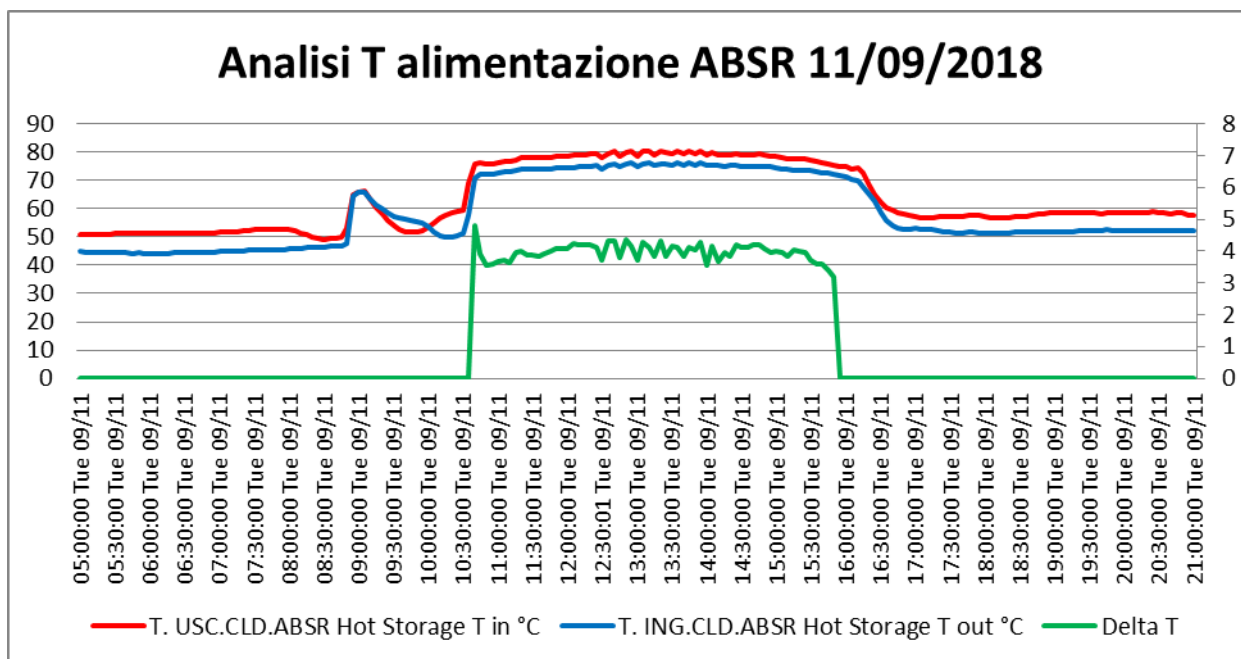


Figura 104 - Temperatura acqua di alimentazione assorbitore, 11 settembre 2018

Per il giorno 11 settembre 2018 la macchina frigorifera ad assorbimento entra in funzione alle 10:40, raggiunge i 75°C e da quel momento funziona senza interruzioni fino alle 15:55. A quel punto la temperatura in ingresso segna un calo meno accentuato rispetto al giorno 6 settembre. In questo giorno si ottiene il miglior risultato di temperatura dell'acqua che esce dalla macchina ad assorbimento di tutto il mese considerato di circa 8,23°C registrata alle ore 15:55

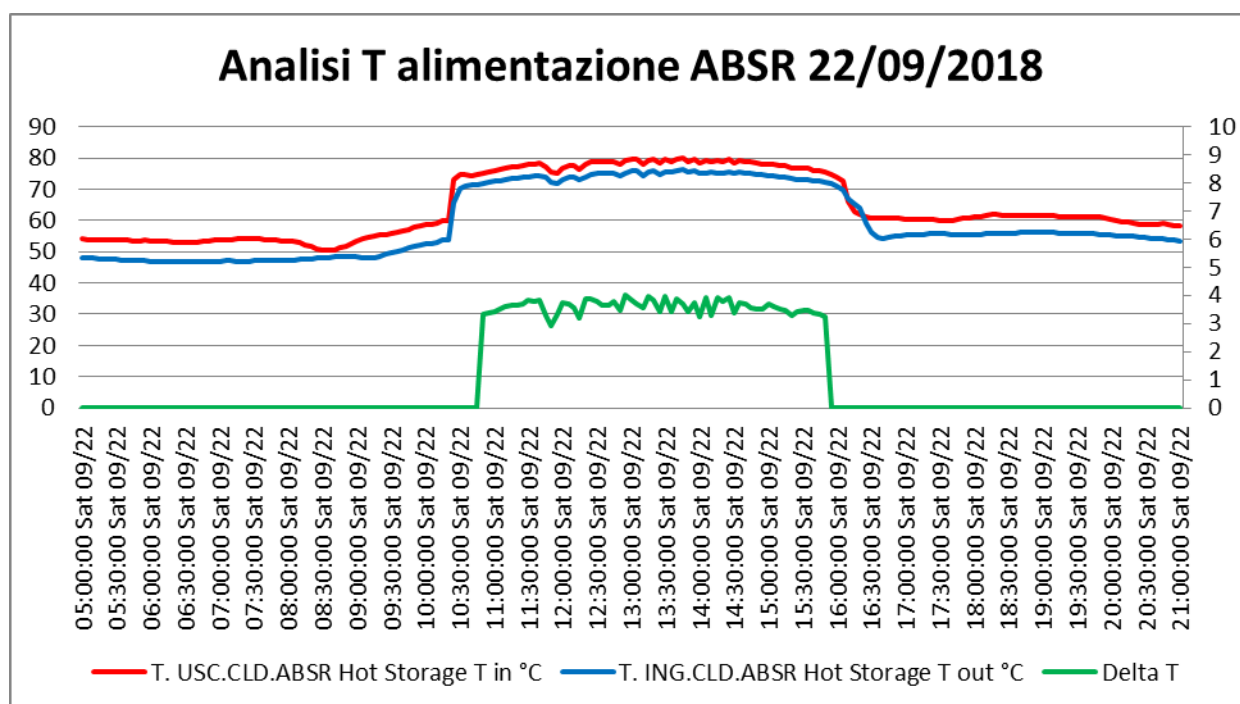


Figura 105 - Temperatura acqua di alimentazione assorbitore, 22 settembre 2018

Il giorno 22 settembre la macchina ad assorbimento ha lavorato continuamente accendendosi alle 10:50 per poi spegnersi alle ore 15:50. Dai grafici si evidenzia come in questo giorno il delta T nelle ore di lavoro rimane pressoché costante.

In questo giorno la temperatura dell'acqua che esce dalla macchina ad assorbimento è di circa 9,55 °C registrata alle ore 16:00

Il giorno 14 settembre è preso in esame come l'andamento degli altri giorni in cui la macchina ad assorbimento non ha lavorato continuativamente ma si è accesa alle 10:55 per poi spegnersi alle ore 11:05; si è poi riaccesa alle ore 13:55 e poi si è spenta definitivamente alle ore 16:50. La temperatura dell'acqua che è uscita dalla macchina ad assorbimento è stata di circa 8,29 °C registrata alle ore 17:00

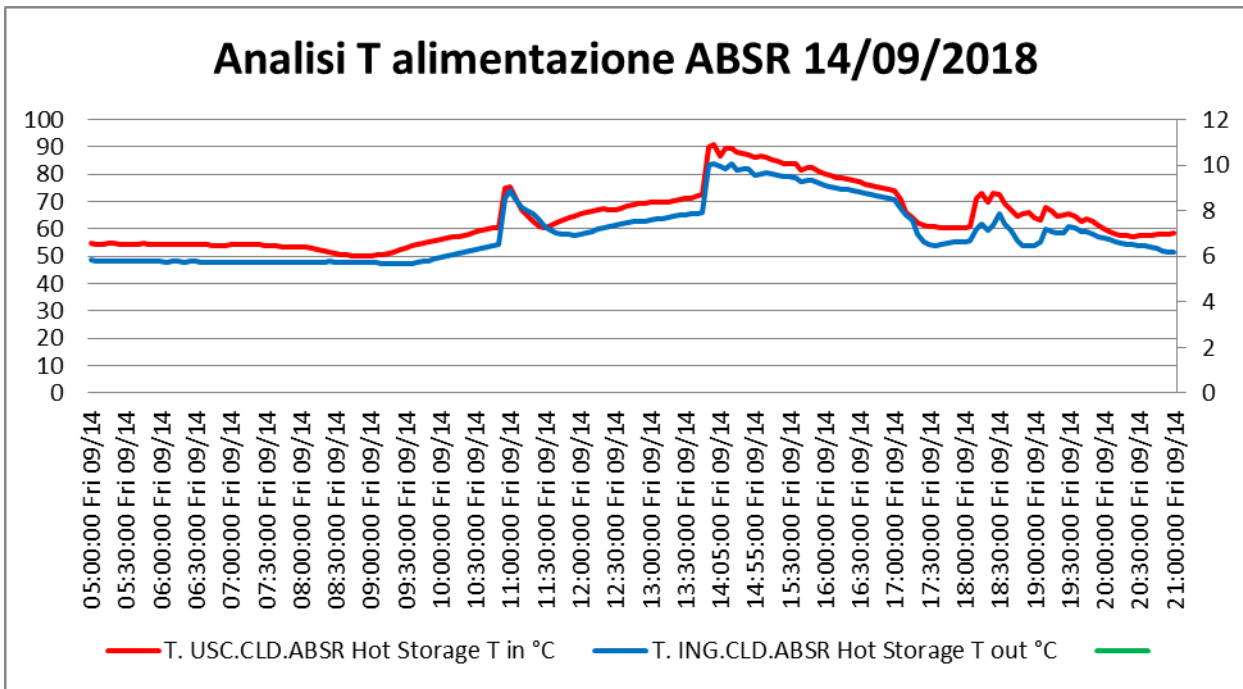


Figura 106 - Temperatura acqua di alimentazione assorbitore, 14 settembre 2018

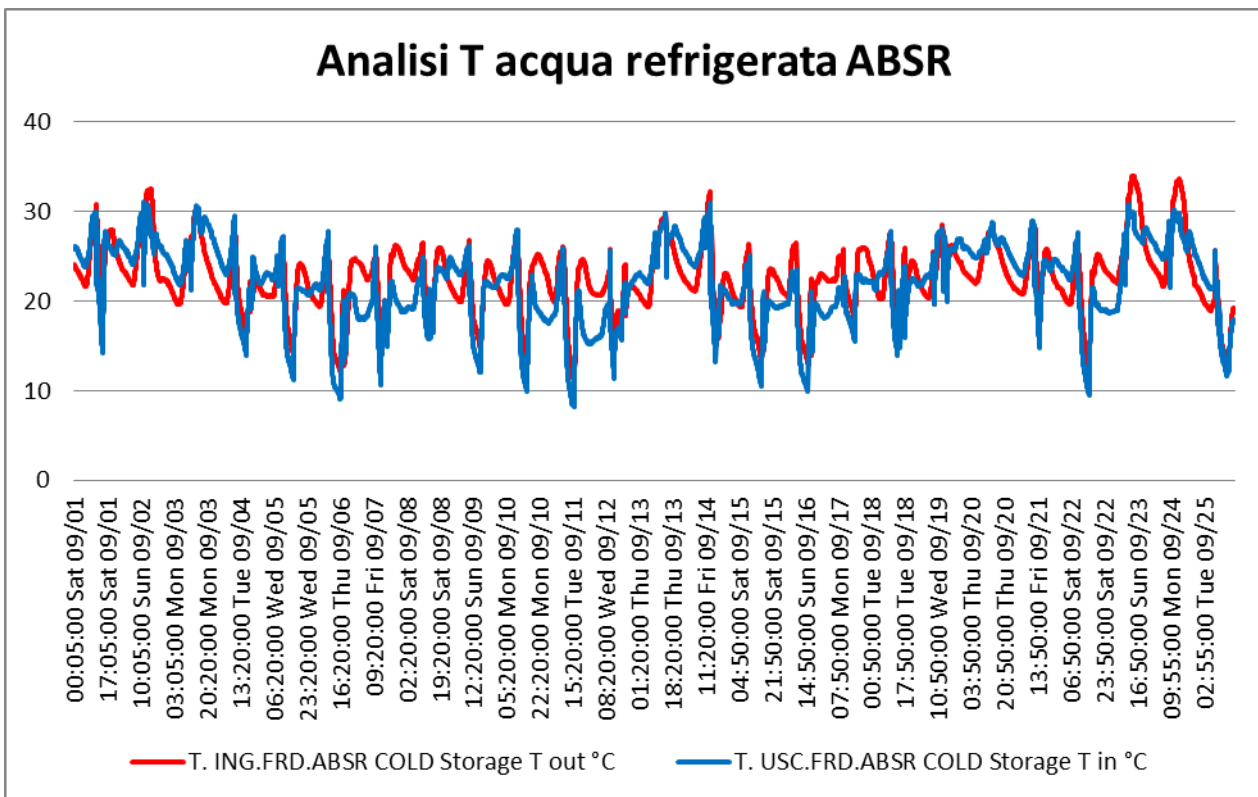


Figura 107 - Temperature campo solare, settembre 2018

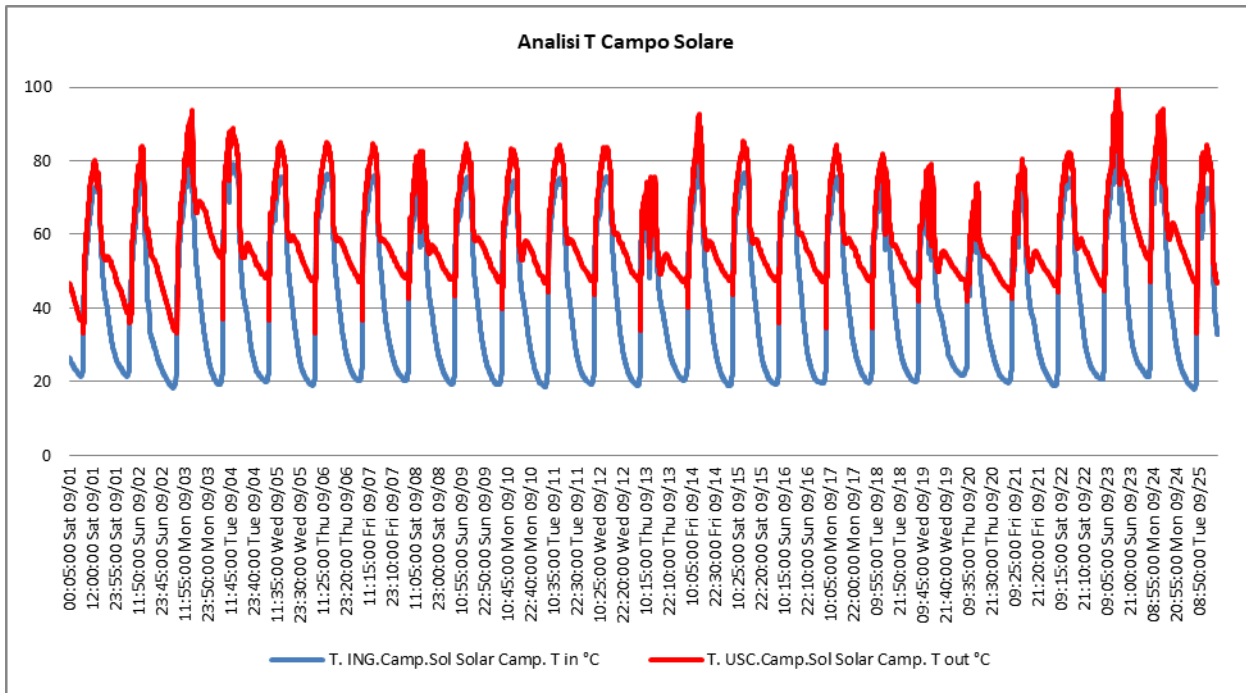


Figura 108 - Temperature campo solare, settembre 2018

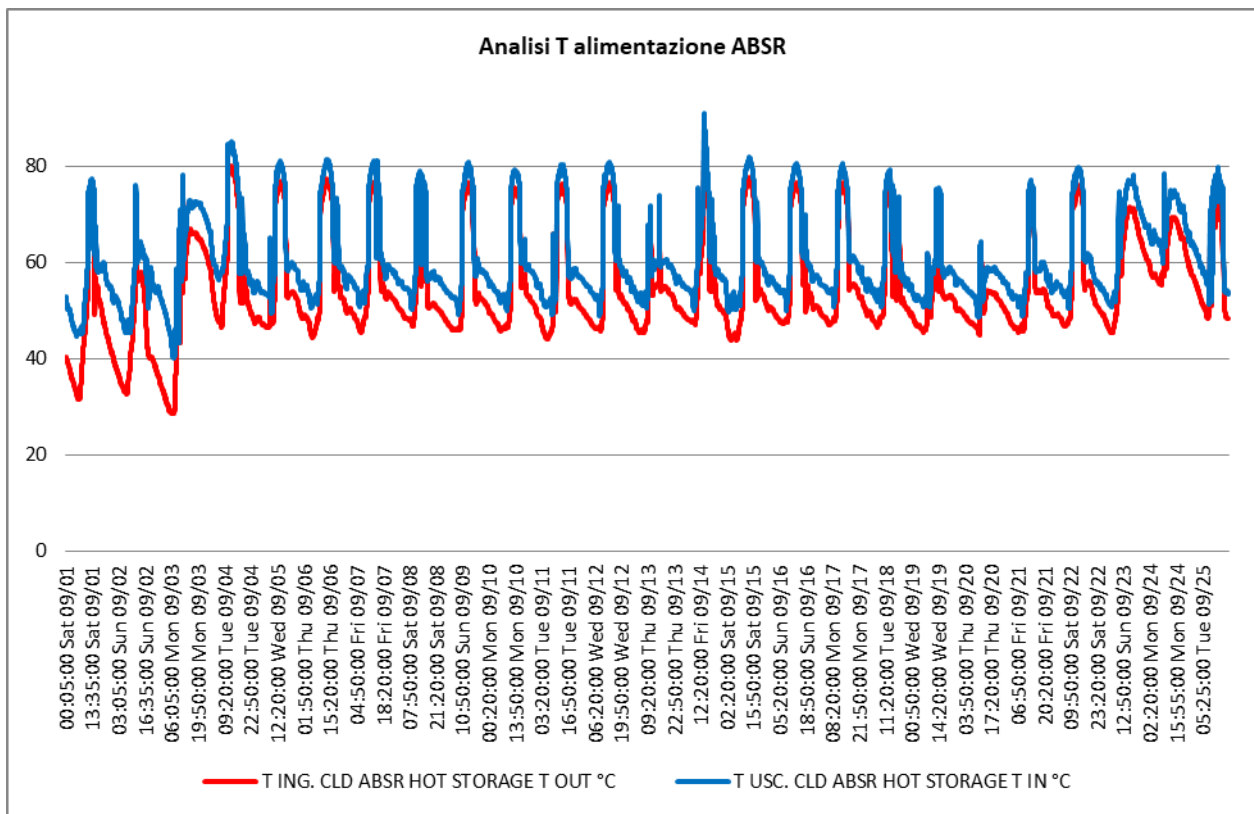


Figura 1097 - Temperature alimentazione macchina ad assorbimento, settembre 2018

Analisi T Torre Evaporativa

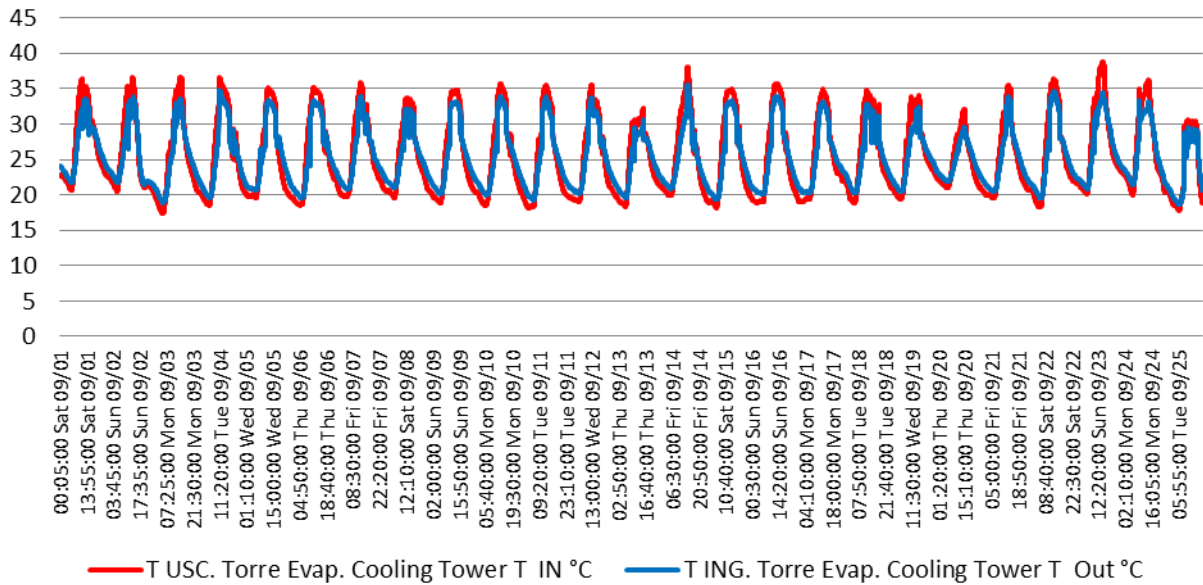


Figura 110 - Temperature torre evaporativa, settembre 2018

Analisi T acqua refrigerata serra

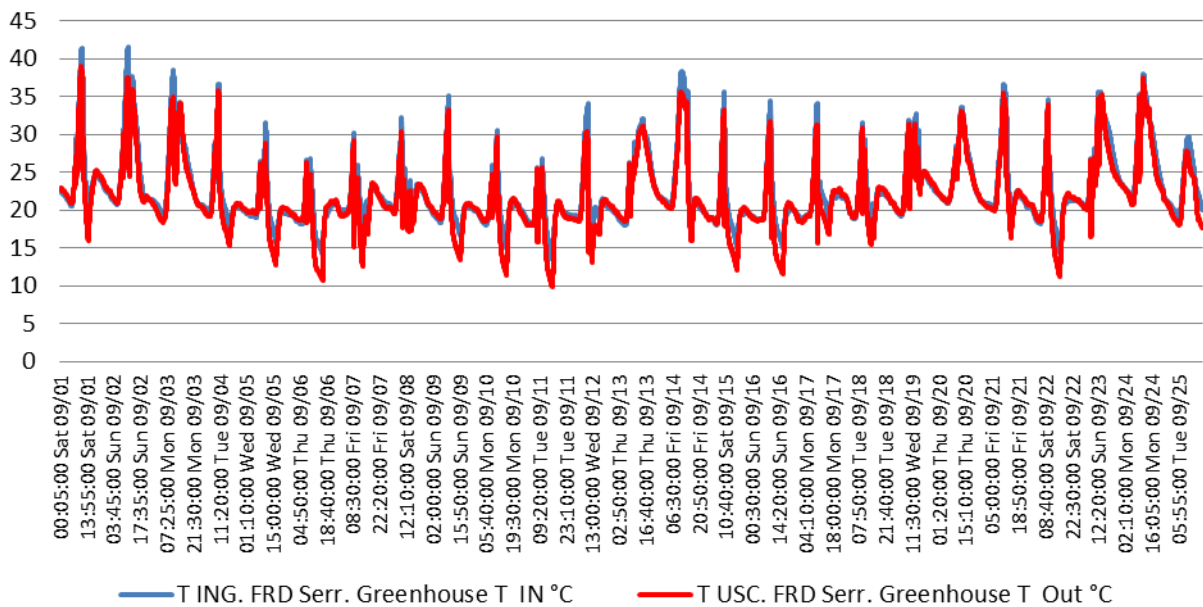


Figura 29 - Temperature acqua refrigerata verso la serra, settembre 2018

Il calcolo dei flussi di potenza è stato effettuato ipotizzando le portate⁵ costanti (valore nominale): tale scelta risulta appropriata in quanto la macchina frigorifera ad assorbimento richiede, per massimizzare il suo COP, che la portata in essa evolvente sia pressoché costante (Tabella 12).

Tabella 12 - Portate nominale, settembre 2018

Portata nominale campo solare	25 l/min
Portata nominale accumulo caldo - assorbitore	72 l/min
Portata nominale assorbitore - accumulo freddo	46,2 l/min
Portata nominale accumulo freddo - serra	46,2 l/min
Portata nominale torre evaporativa	153 l/min

La potenza termica giornaliera (Figura 111) che la fonte solare mette a disposizione del campo solare è ricavata andando a mediare i valori di irradianza sull'arco di una giornata e moltiplicando tale valore per la superficie di apertura del campo solare (57 m²).

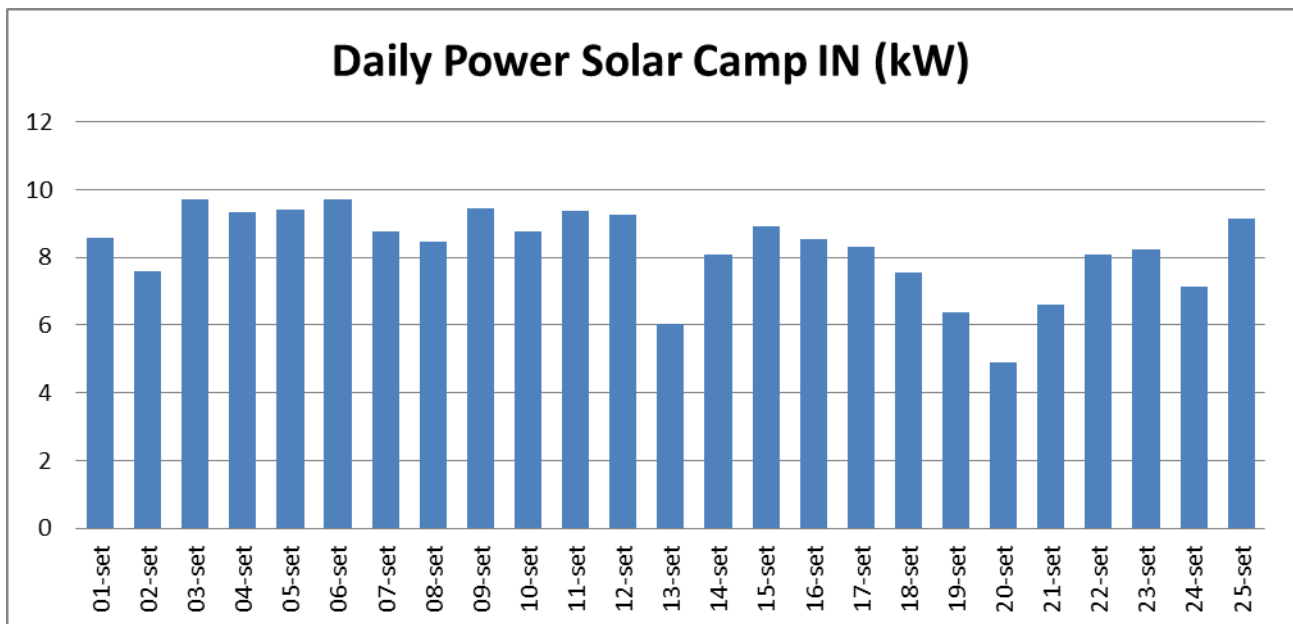


Figura 111 - Potenza giornaliera ingresso campo solare, settembre 2018

Per effettuare l'analisi energetica del campo solare è necessario ricavare i valori medi giornalieri di potenza e l'energia che i collettori solari mettono a disposizione del serbatoio di accumulo caldo. La potenza è stata determinata considerando il valore medio della differenza di temperatura durante l'intervallo di funzionamento della pompa di circolazione P1 (Figura 1).

⁵ Poiché i misuratori installati sull'impianto sono dei contabilizzatori di energia, la grandezza portata non è misurabile.

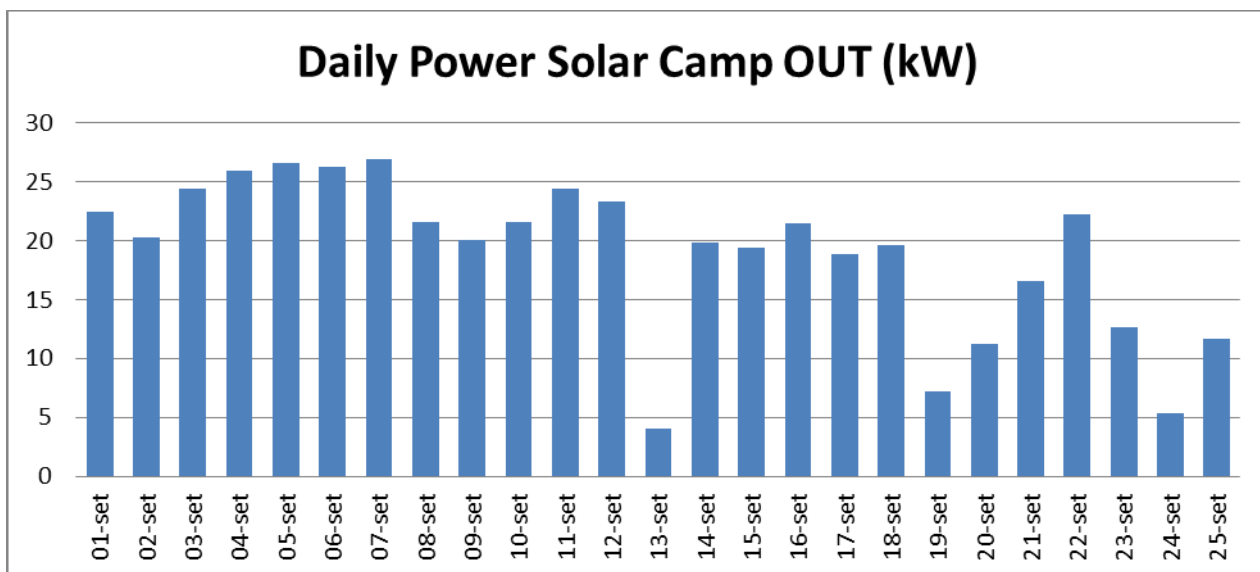


Figura 31 - Potenza giornaliera in ingresso al campo solare, settembre 2018

Il rendimento giornaliero del campo solare calcolato come:

$$\eta = \frac{Q_{out\ CS}}{Q_{in\ CS}}$$

è riportato in

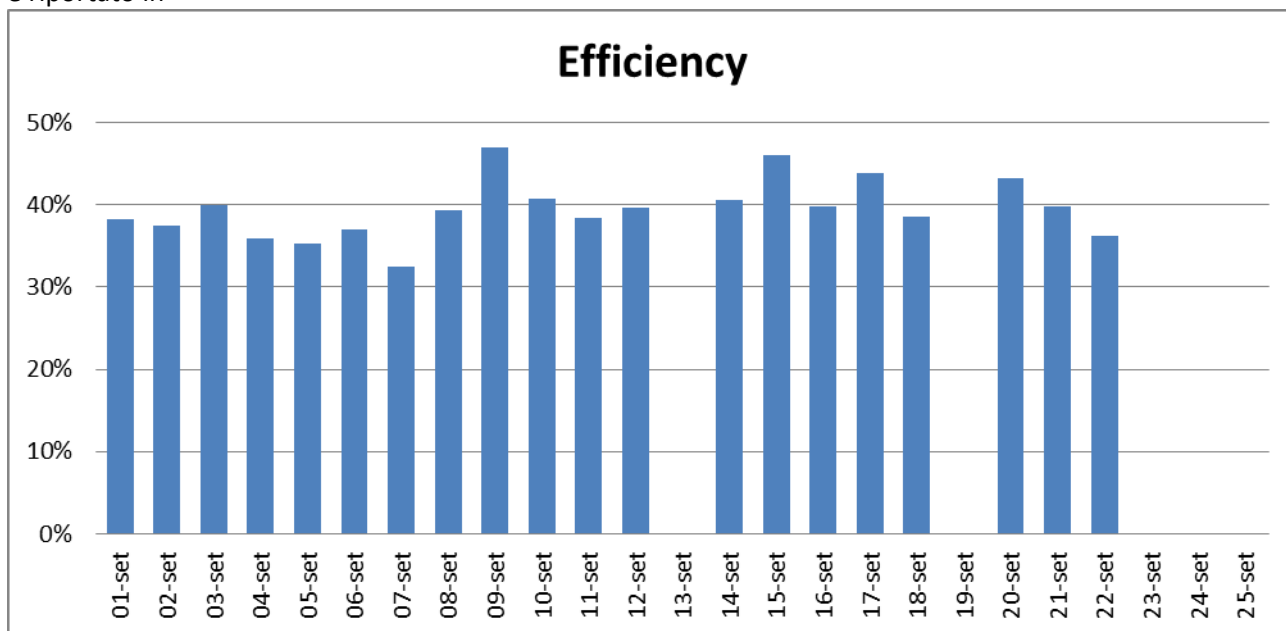


Figura 112 - Rendimento campo solare, settembre 2018

Nel tempo di osservazione il rendimento è sempre al di sotto del 50%, mentre il rendimento massimo dei collettori solari si aggira attorno al 60%. Ciò è attribuibile al degrado che hanno subito alcuni tubi evacuati che hanno pregiudicato le prestazioni dell’impianto.

In maniera analoga a quanto esposto per il campo solare, è possibile andare a determinare i valori giornalieri di potenza ed energia per ogni porzione di impianto.

Analizzando il carico termico che il serbatoio di accumulo caldo mette a disposizione della macchina frigorifera ad assorbimento si ottengono i valori riportati nel grafico seguente:

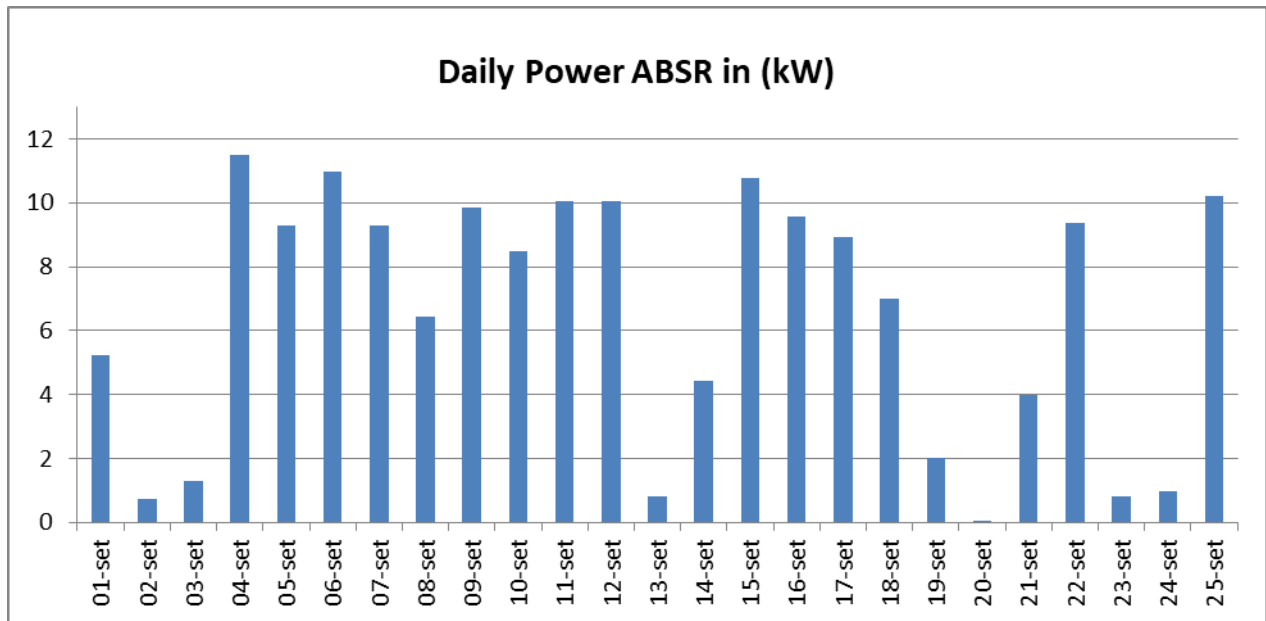


Figura 33 - Potenza giornaliera ingresso macchina ad assorbimento settembre 2018

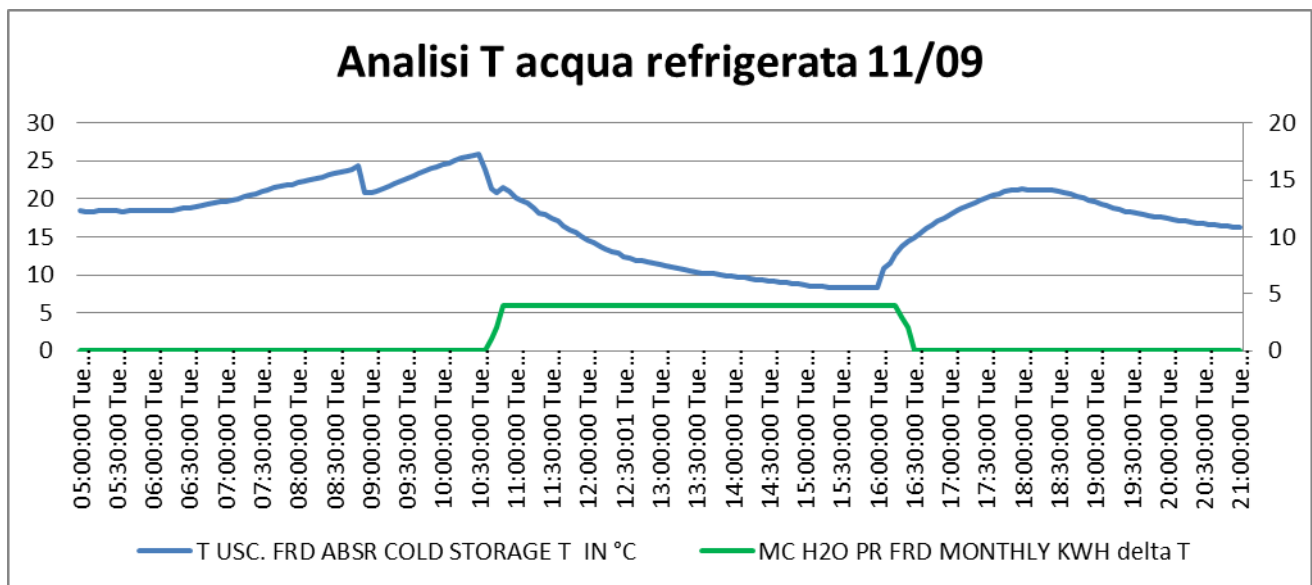


Figura 113 - Analisi temperatura acqua refrigerata in uscita alla macchina ad assorbimento, 11 settembre 2018

In questa giornata del 11/09/2018 la macchina ad assorbimento è entrata in funzionamento in modo continuativo alle 10:40, come è possibile desumere dalla curva verde che rappresenta la grandezza deltaT, quando la temperatura dell'acqua all'uscita è di oltre 25,97°C. Dopo 1 ora, alle 11:40, la temperatura del fluido refrigerato è scesa fino a 16,48°C, con un calo di temperatura di quasi 9,49°C. La macchina ad assorbimento prosegue il suo funzionamento, facendo progressivamente abbassare la temperatura dell'acqua da mandare all'accumulo freddo, fino ai 8,23°C alle ore 15:50, avvicinandosi molto ai 7°C, che segnano la temperatura limite desiderata, ed evidenziando un funzionamento ottimale della stessa.

La potenza termica dissipata dalla torre evaporativa nel giorno 11/09/2018 è presentata in Figura 114:

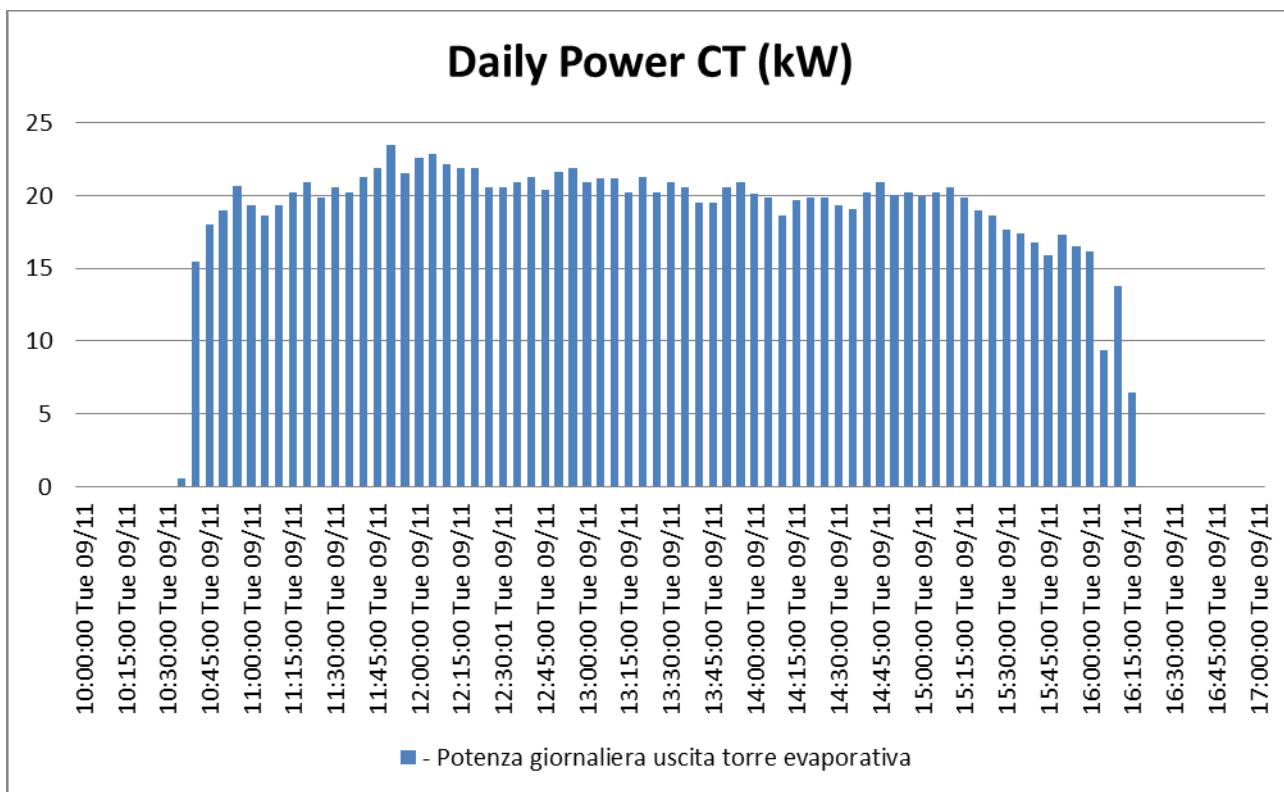


Figura 114 - Potenza giornaliera uscita torre evaporativa, settembre 2018

Questi valori risultano elevati per la elevata portata di acqua evolvente nel componente. La valutazione della potenza frigorifera inviata alla serra dal serbatoio di accumulo freddo deve tener conto però dell'attuale sistema di distribuzione, che è ancora in fase di sperimentazione. Per completezza si riportano i valori di potenza giornaliera sviluppata fra l'impianto e la serra, senza approfondire l'analisi su di essi (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), effettuata dall'Università di Bari, che si è occupata dell'attività sul sistema di distribuzione in serra.

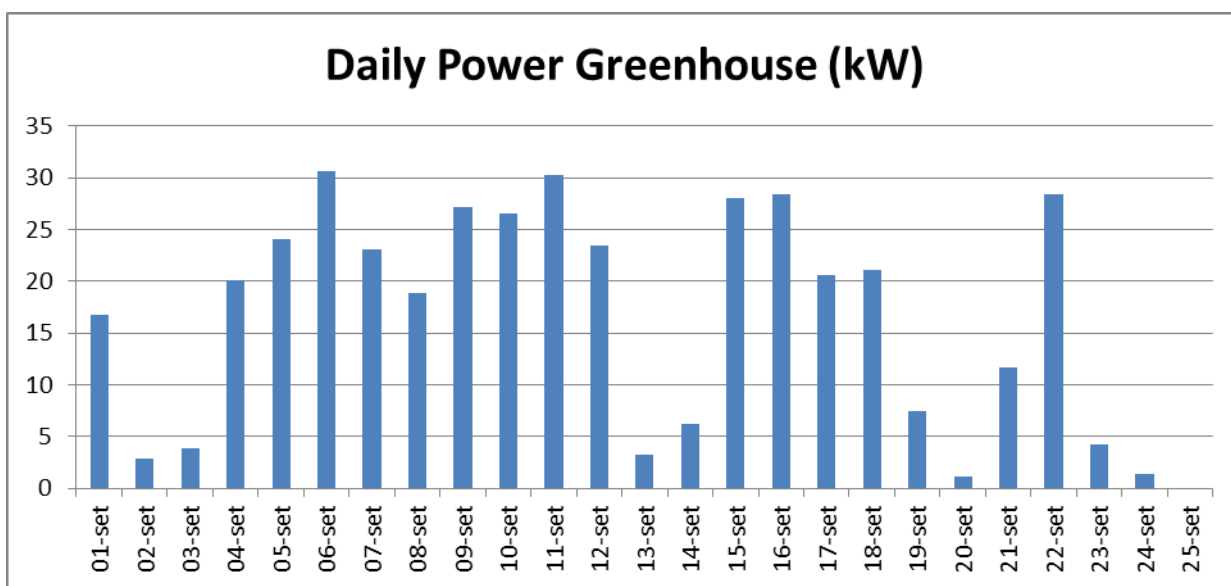


Figura 115 - Potenza giornaliera serra, settembre 2018

È stata, inoltre, condotta stima del consumo elettrico richiesto per il funzionamento dell'impianto, in particolare delle pompe di circolazione, della torre evaporativa e del dissipatore termico. Tale dato non è fornito di norma, risulta però necessario per quantificare l'ammontare effettivo del consumo dell'impianto. Al riguardo si ricorda che l'impianto è stato costruito con componenti e dispositivi commerciali e tipicamente utilizzati negli impianti di solar cooling per valutare il potenziale di replicabilità dell'impianto. In questo modo si determina il consumo elettrico giornaliero delle pompe di circolazione, riportato in Figura 116.

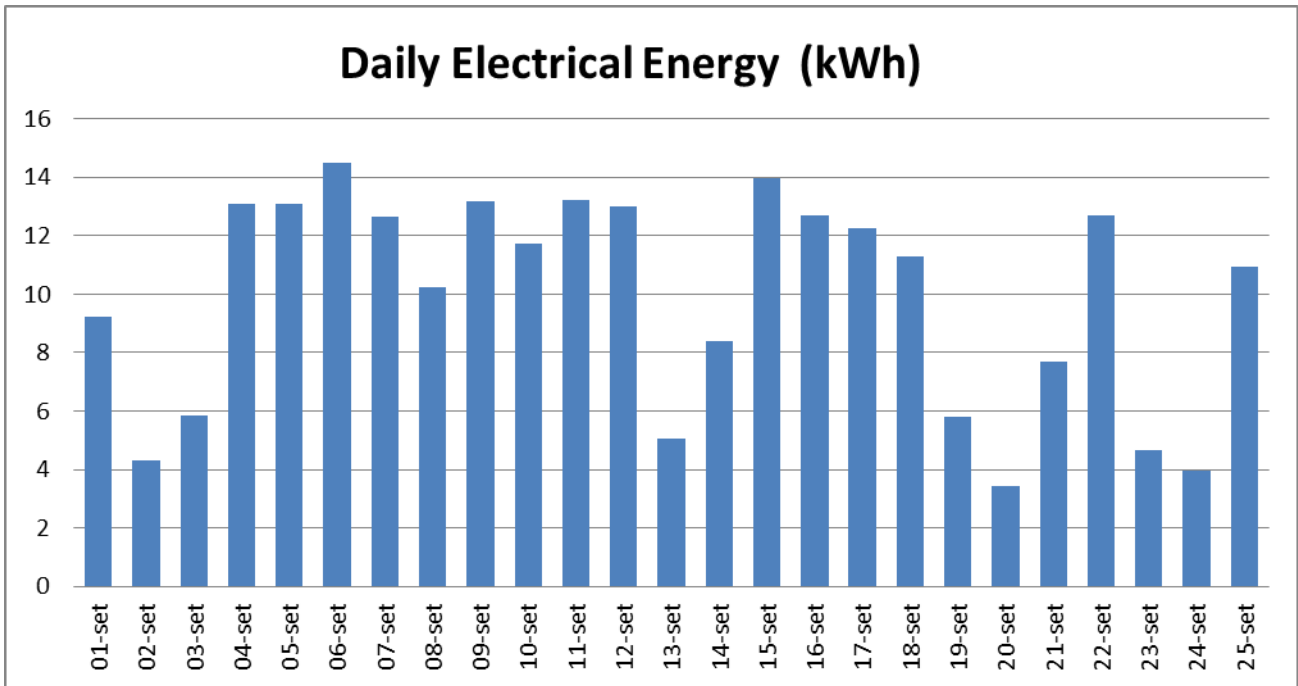


Figura 116 - Energia elettrica giornaliera, settembre 2018

Al termine dell'analisi della campagna sperimentale del 2018 è stato possibile ricavare il dato sui consumi elettrici richiesti per l'alimentazione delle pompe di circolazione, del dissipatore di calore e della torre evaporativa: durante l'intero periodo di prova l'impianto ha richiesto per il suo funzionamento 296 kWh di energia elettrica.

Ciò ha permesso di definire un'efficienza globale di impianto (Figura 117), calcolato come:

$$\eta = \frac{Q_{out\ ABSR}}{Q_{in\ ABSR} + E_{el}}$$

e di determinarne il valore medio, tenuto conto solo dei giorni in cui l'impianto è effettivamente in funzione, pari a 30,6%.

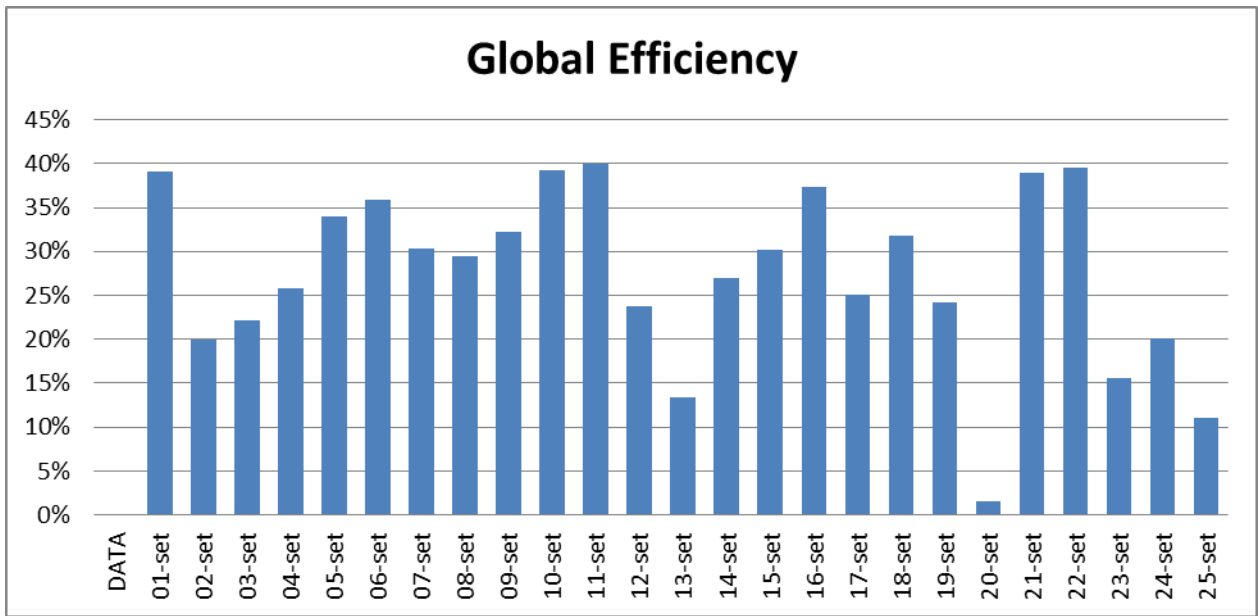


Figura 117 - Efficienza globale impianto, settembre 2018

10 Conclusioni

Le attività di ricerca e sperimentazione finora svolte hanno messo in evidenza le potenzialità dei sistemi vegetali applicati alle pareti esterne degli edifici, rispetto alla diminuzione del flusso di calore entrante all'interno degli stessi, con vantaggi sotto l'aspetto delle spese energetiche per il condizionamento climatico nel periodo estivo. L'apparato sperimentale previsto ai fini del monitoraggio di parametri climatico-ambientali, si è dimostrato efficiente alla valutazione microclimatica dell'influenza esercitata dalla coltivazione di specie vegetali rampicanti e del calcolo dei flussi di calore tra l'ambiente esterno, la coltre vegetale e le pareti della struttura. Le specie vegetali selezionate sono risultate adeguate a realizzare una schermatura naturale delle pareti dell'edificio, rispettivamente quella di Sud-Est e di Sud-Ovest, prese in considerazione ai fini della sperimentazione. Le specie vegetali sono state allevate sulla base di una tecnica colturale di tipo idroponico, con piante rampicanti collocate in vasi muniti di ugelli in plastica per l'irrigazione e la fertirrigazione. L'analisi della crescita vegetale sul sistema di verde parietale, effettuata mediante rilevamento fotografico e successiva elaborazione digitale con il software Octave, ha dimostrato l'efficacia delle essenze vegetali nella creazione di una barriera naturale nei confronti della radiazione solare. L'impiego dell'indicatore bioclimatico K_v (costante verde), rappresentato da un valore adimensionale compreso tra 0 e 1, calcolato sulla base dei diversi periodi di crescita vegetale del verde parietale, si è dimostrato particolarmente efficace ai fini della valutazione delle potenzialità del sistema vegetale. Per quanto concerne il calcolo del flusso di calore entrante nell'edificio, i risultati hanno messo in evidenza che, in prima approssimazione e in situazione puntuale e senza tenere conto dell'elemento convettivo, ad un $K_v = 0,7$ corrisponde una riduzione del flusso di calore entrante nell'edificio, di circa il 40%. Sono state osservate, su entrambe le pareti dell'edificio dotate di coltre vegetale diminuzioni della temperatura superficiale dei muri di oltre 12 °C rispetto alle pareti non schermate dalla vegetazione. Rispetto ai valori umidità relativa adiacenti l'edificio, rispettivamente all'interno del "gap" (intercapedine tra l'edificio e la parete verde) e all'esterno della parete verde, l'UR del gap è risultata mediamente superiore del 10%. Per quanto riguarda il comportamento energetico del terrazzo verde, l'analisi delle temperature superficiali del lastrico solare privo di inverdimento e rispettivamente dotato di coltre vegetale orizzontale a fatto registrare differenze di temperatura di circa 25 °C. Le temperature superficiali del soffitto dell'ambiente interno sottostante il terrazzo verde, tuttavia, ha mostrato una diminuzione di temperatura variabile tra 2 °C e 3 °C. Le elaborazioni dei dati sul tetto verde hanno mostrato una riduzione della trasmittanza termica di circa il 43% dovuta alla installazione del sistema vegetale sopra il lastrico solare. Per quanto riguarda la realizzazione e l'integrazione di una serra bioclimatica sull'edificio dimostrativo, l'attività ha finora preso in considerazione soprattutto la definizione tecnologica delle strutture mentre il monitoraggio dei dati non risulta ancora operativamente completato a causa di inconvenienti tecnici verificatisi durante l'installazione dei cavi e della sensoristica di monitoraggio climatico-ambientale. Nei confronti degli aspetti relativi al comfort microclimatico interno all'edificio prototipo dotato di coltri vegetali, le prime analisi hanno evidenziato che i valori di temperatura ed umidità sono risultati in linea con quelli previsti dalla norma UNI EN ISO 7730:2006. Infatti, si è rilevata una differenza di temperatura interna degli ambienti monitorati all'interno dell'edificio di circa 2 °C quando sono state confrontate le temperature interne del 2017 (coltre vegetale poco folta, con $K_v=7,8$) con le temperature interne del 2018 (coltre vegetale particolarmente folta, con $K_v=1$). I risultati, sebbene non sufficienti per una completa definizione del comportamento energetico dell'edificio dotato di coltre vegetale, evidenziano migliori prestazioni di comfort, soprattutto nel periodo estivo, in termini di minore flusso di calore verso l'interno dell'edificio. Rispetto al comportamento delle essenze vegetali è risultato evidente che il sistema idrico si configura tra gli elementi che necessitano di una maggiore attenzione tenuto conto che gli apporti idrici, in ultima analisi, condizionano la crescita fogliare e quindi l'effetto barriera nei confronti della radiazione solare. Particolare attenzione da parte degli operatori, dovrà essere riposta nella scelta delle specie vegetali, dei sistemi di fertirrigazione e delle tecniche colturali per evitare eccessi di consumi idrici. A questo proposito, durante un periodo di 150 giorni di sperimentazione sono stati rilevati consumi di 5,81 l/m²/giorno per le piante a parete e di 12,2 l/m²/giorno per le piante sul terrazzo verde. In particolare,

L'apporto di acqua alle coltivazioni vegetali in relazione al fenomeno della traspirazione delle piante risulta particolarmente importante per favorire l'aumento di umidità relativa dell'aria adiacente l'edificio e quindi maggiori condizioni di confort esterno ed interno all'edificio. Tenuto conto che ormai il verde rappresenta un elemento sempre più importante per migliorare la sostenibilità energetica ed ambientale delle aree urbane, ulteriori ricerche e sperimentazioni sono necessarie per una valutazione più approfondita non soltanto sulle prestazioni energetiche dell'edificio ma anche sui parametri biologici ed agronomici relativi ai sistemi vegetali impiegati per il verde. Da sottolineare che l'impiego delle coperture a verde, sia orizzontali che verticali, può essere realizzato in aree industriali, centri-semi-periferie delle città, vecchi e/o nuovi edifici residenziali e comunali (soprattutto scuole) e contribuisce al raggiungimento degli obiettivi europei previsti dalle Direttive sull'efficienza energetica, il risparmio di energia e la protezione dell'ambiente. Le azioni di ricerca e sperimentazione del Dipartimento Unità Efficienza Energetica (DUEE) dell'ENEA, condotte attraverso il Programma RDS, si propongono di contribuire alla definizione di Piani di sviluppo nazionali, in linea con il position paper dell'Alliance to Save Energy "Energy Efficiency: A Tool for Climate Change Adaptation, oltre che di valorizzare i sistemi vegetali come tecnologia naturale e passiva in grado di contrastare i mutamenti climatici, di migliorare l'efficienza energetica degli edifici, nonché di favorire la resilienza e la sostenibilità ambientale delle città e dei territori [13].

L'impianto solar cooling a servizio della serra nel periodo di osservazione 01-25 settembre 2018 non è entrato in funzione tutti i giorni considerati e ha prodotto acqua refrigerata a temperatura prossima al massimo consentito solo in pochi giorni, a causa dell'irradiazione solare di intensità minore rispetto a quanto avviene nei mesi tipicamente estivi.

Purtroppo i numerosi danni subiti dall'impianto a causa della nevicata del 2017, si sono ripercossi anche nell'estate 2018 causando una riduzione della campagna sperimentale.

L'impianto di solar cooling si è rivelato comunque adatto allo scopo di alimentare il sistema di distribuzione per refrigerare la serra; i giorni in cui le condizioni erano prossime a quelle ottimali di funzionamento della macchina ad assorbimento hanno fatto registrare temperature dell'acqua refrigerata (circa 8°C) che dimostrano come l'impianto sia in grado di funzionare al massimo delle sue funzionalità.

Si può dunque concludere che le potenzialità degli impianti di solar cooling per la refrigerazione dei sistemi serra costituiscono una soluzione con un buon potenziale di replicabilità.

La campagna sperimentale ha evidenziato una criticità di questa tipologia di impianti relativa all'eccessivo consumo di energia elettrica per le pompe di circolazione e, soprattutto, della torre evaporativa che limitano fortemente il rendimento globale dell'impianto (circa il 30%).

11 Riferimenti bibliografici

- [1] COM(2016) 51 final. Comunicazione della Commissione al Parlamento europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e sociale europeo e al Comitato delle Regioni. Una Strategia dell'UE in materia di riscaldamento e raffreddamento..
- [2] Direttiva 2002/91/CE.
- [3] Direttiva 2010/31/UE.
- [4] Direttiva 2012/27/UE.
- [5] COM(2013) 249 final "Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa"..
- [6] Direttiva efficienza energetica (UE) 2018/844.
- [7] «C.A. Campiotti, R. Di Bonito, G. Giagnacovo, R. Colletta, M. Scoccianti, C. Viola, Eco-Sistemi Vegetali per l'Efficienza Energetica e il Risparmio di Energia negli Edifici Urbani. Report RdS/2013/276».
- [8] Giuliano Vox ed Evelia Schettini. Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra. Report RdS/PAR2015/156..

- [9] Strategia energetica nazionale, D.M. del MiSE e del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare. 10 Novembre 2017.
- [10] Campiotti C., Consorti L., Giagnacovo G., Latini A., Puglisi G., Scoccianti M., Viola C. Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l'efficienza energetica degli edifici nella città metropolitana. Report RdS/PAR2015/141.
- [11] UNI 11235. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde..
- [12] UNI EN ISO 7730:2006.
- [13] Carlo Alberto Campiotti, Germina Giagnacovo, Luca Nencini, Matteo Scoccianti, Luciano Consorti, Carlo Bibbiani. Le coltri vegetali nel settore residenziale. Energia, ambiente e innovazione | 2/2018.

12 Abbreviazioni ed acronimi

Gap : area interna compresa tra la coltre vegetale e le pareti dell'edificio.

Kv : Costante verde.

SEN: Strategia Energetica Nazionale.