



Ricerca di Sistema elettrico

Le coperture vegetali per la sostenibilità energetica ed ambientale degli edifici

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

LE COPERTURE VEGETALI PER LA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA ED AMBIENTALE DEGLI EDIFICI

Campiotti C.A., Giagnacovo G., Latini A., Margiotta F., Nencini L., Pazzola L., Puglisi G. (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

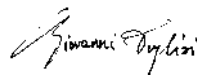
Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Tematica di ricerca: Edifici intelligenti

Progetto: D1 Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: C - Tecnologie “green” per gli edifici

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi



Si ringraziano i collaboratori: Scoccianti M. (Aidy Group srl), Tachis F. (Regione LazioDisu), Viola C. (Fondazione Cesaretti). Inoltre, si desidera ringraziare Giuseppe Petrozza per il fondamentale contributo fornito durante lo svolgimento della sua tesi di laurea per l'attività condotta sull'impianto di solar cooling e il tesista Campiotti Alessandro (Università La Tuscia, Viterbo) per il contributo nella raccolta ed elaborazione dei dati biometrici sulle essenze vegetali.

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 SOSTENIBILITÀ ENERGETICA ED AMBIENTALE DELLE AREE URBANE	6
2.1 SUBTASK C.1: COLTRI VEGETALI - REALIZZAZIONE DEL SOLAIO TETTO-GIARDINO	8
2.2 DESCRIZIONE TECNICA E DEI MATERIALI UTILIZZATI PER LA REALIZZAZIONE DEL SOLAIO VERDE ESTERNO	9
2.3 MONITORAGGIO DATI SUL PROTOTIPO DI PARETE VERDE	11
2.4 ACQUISIZIONE DATI	13
2.5 MONITORAGGIO DELLA PARTE DI SUD OVEST	15
2.6 DATI MICROCLIMATICI E BIO-AGRONOMICI RELATIVI ALLA PARETE SUD OVEST	22
2.7 DATI MICROCLIMATICI E BIO-AGRONOMICI RELATIVI ALLA PARETE SUD EST.....	24
2.8 RISULTATI E RACCOMANDAZIONI	31
3 MICROCLIMA DEGLI EDIFICI E COMFORT ABITATIVO.....	32
3.1 IL COMFORT MICROCLIMATICO PER EFFETTO DI PARETI VERDI	34
3.2 L'EDIFICIO E LE SUE CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI	35
3.3 VALUTAZIONE DEL COMFORT MICROCLIMATICO DELL'EDIFICIO F92	37
3.4 ANALISI, VALUTAZIONI E CONCLUSIONI	44
4 CLIMATIZZAZIONE MICROCLIMATICA CON SISTEMI SOLAR COOLING	47
4.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI GESTIONE E MONITORAGGIO.....	47
4.2 ANALISI DELLE PRESTAZIONI DELL'IMPIANTO	49
4.2.1 <i>Campagna sperimentale 2015</i>	49
4.2.2 <i>Campagna sperimentale 2017</i>	62
5 ALLEGATI.....	76
5.1 ALLEGATO 1	76
5.2 ALLEGATO 2	81
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	83

Sommario

I contenuti del rapporto tecnico riportano i risultati delle attività di ricerca e sperimentazione effettuate nel contesto della sostenibilità energetica degli edifici civili e rispetto all'impiego della tecnologia solar-cooling per il raffreddamento degli edifici-serra nel settore dell'agricoltura. Nel primo caso, le attività progettuali sono state effettuate sull'edificio F92, denominato "Scuola delle Energie", presso il Centro Casaccia dell'ENEA, mentre nel secondo caso presso l'area sperimentale dell'Università degli Studi di Bari dove risulta installato un sistema prototipo di solar-cooling per la climatizzazione di una serra ortofloricola. Per quanto riguarda la piattaforma sperimentale F92 dell'ENEA, le attività di ricerca e sperimentazione sono state focalizzate sulla raccolta di dati climatici e ambientali, attraverso il sistema di monitoraggio già installato sulla parete vegetale con il PAR 2015, e sulla realizzazione di un prototipo di terrazzo-giardino.

I dati raccolti sugli effetti della vegetazione (parete verde) nei confronti dell'edificio hanno evidenziato inequivocabilmente il ruolo positivo delle piante rispetto all'azione di schermo nei confronti della radiazione solare incidente che si riflette nella diminuzione della temperatura superficiale delle pareti dotate della coltre vegetale rispetto alle pareti prive di essenze vegetali (sono state rilevate differenze fino a 12 °C, soprattutto durante i mesi estivi). I dati mostrano anche la potenzialità delle interazioni che si stabiliscono tra l'azione biologica delle essenze vegetali nei confronti del microclima che delimita l'edificio dimostrativo. Infatti, i dati di temperatura fogliare, umidità e temperatura dell'aria esterna, si prestano a una prima considerazione tecnica sulla influenza dei processi evapo-traspirativi delle piante nei confronti di una diminuzione della temperatura dell'aria circostante l'edificio (sono stati registrate diminuzioni della temperatura dell'aria all'interno del *gap* coltre vegetale-parete di circa 1,5 °C).

E' stata svolta una prima breve sperimentazione mirata alla valutazione del comfort termo-igrometrico dell'ambiente interno isolato mediante la coltre vegetale per valutare le condizioni di comfort termo-igrometrico degli ambienti interni degli edifici in relazione alla norma UNI EN ISO 7730 (UNI, 2006), che associa il comfort termico con il PMV (Predicted Mean Vote) o Voto Medio Previsto. Tale parametro, definisce il comfort termico in funzione oltre che dell'ambiente (temperatura, velocità, umidità dell'aria e temperatura media radiante) anche delle variabili legate alle persone, quali il metabolismo energetico (associato alla loro attività) e la resistenza termica dell'abbigliamento. Sulla base di queste considerazioni, il documento tecnico riporta i dati sperimentali raccolti per una prima analisi rispetto all'azione che le superfici verdi esercitano sul comfort termoigrometrico (IEQ) degli ambienti interni.

Rispetto al settore dell'agricoltura, il documento tecnico riporta i dati di un'azione di ricerca e sperimentazione sullo studio di un sistema solar cooling per il raffrescamento di serre per uso ortofloricola (la ricerca non ha previsto la climatizzazione termica). I dati raccolti hanno evidenziato la potenzialità di questa nuova tecnologia di climatizzazione (sono state ottenute temperature di 6-7 °C dell'acqua in uscita dal sistema solar-cooling per il raffreddamento dell'aria della serra) ma anche la necessità di potenziare il sistema di controllo rispetto al monitoraggio e alla regolazione gli scambi termici nel sistema per una valutazione della potenza frigorifera inviata alla serra dal serbatoio di accumulo freddo e il sistema di distribuzione in modo più preciso e puntuale.

1 Introduzione

Nell'ultimo decennio si è assistito a un livellamento dei picchi di fabbisogno energetico giornaliero richiesti per il riscaldamento nella stagione invernale e per il condizionamento nei periodi estivi. In particolare, i consumi energetici medi di un edificio sono stimati mediamente in circa 200.000 kJ/m³ in inverno (periodo sotto riscaldato) e in circa 150.000 kJ/m³ per la climatizzazione estiva (periodo eccessivamente riscaldato). In particolare, l'energia elettrica per la climatizzazione estiva costituisce ormai nei Paesi dell'area Mediterranea circa il 30% dei consumi complessivi totali degli edifici residenziali e del terziario. L'Unione Europea stima la richiesta di energia elettrica per il condizionamento climatico dell'aria per il 100% degli edifici utilizzati per scopi civili e commerciali (case, negozi, uffici) in 60 Mtep al 2020 per servizi localizzati, sia in aree rurali che in aree urbane e non per impieghi industriali come quelli che si riferiscono alla conservazione e/o alla refrigerazione dei cibi (5). A questo proposito, gli obiettivi dell'Unione Europea, espressi sia con il "Libro verde sull'Efficienza Energetica" nel 2005 e in seguito con la Direttiva 2002/91/CE sulle prestazioni energetiche degli edifici (Energy Performance of Building Directive) sono quelli di contenere i consumi energetici sia per il riscaldamento che per la climatizzazione estiva (7). In particolare, tale Direttiva ha previsto l'estensione della valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio anche al regime estivo come evidenziato dalla sostituzione del concetto di "prestazione termica invernale" con quello più ampio di "prestazione energetica globale". Un ulteriore avanzamento nella direzione dell'efficienza energetica degli edifici si è avuto con Direttiva 2010/31/UE, che prevede 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".

Ai fini della riduzione dei consumi di riscaldamento e di raffreddamento, l'UE, con la COM(2013) 249 *final*, raccomanda soluzioni di tipo naturale, come la collocazione di coperture vegetali direttamente sugli edifici, negli spazi liberi nelle aree urbane e nelle strade (6). Successivamente, con la Direttiva 2012/27/UE, ha stabilito un quadro comune di misure per raggiungere gli obiettivi del 20% di riduzione delle emissioni di CO₂ entro il 2020. Ai sensi della Direttiva, gli Stati dovranno elaborare una strategia a lungo termine per favorire la ristrutturazione degli edifici residenziali e commerciali, sia pubblici sia privati. La strategia, entrata in vigore in Italia con il Decreto Ministeriale 102/2014, prevede aggiornamenti ogni tre anni (9). Significativa anche la detrazione fiscale per il verde negli edifici, inserita nella legge di stabilità 2018 (vedi Allegato 2). L'ENEA sottolinea come l'efficienza energetica oltre a costituire una risorsa di energia "non consumata" integra in modo virtuoso ambiente, clima, energia e sostenibilità, con vantaggi per lo sviluppo di filiere industriali e produttive, di occupazione, reddito e benessere per il Paese. A parere dell'Enea, importante è un Piano di "riqualificazione spinta" degli edifici residenziali (*deep renovation*) proposto dall'Agenzia, in grado di stimolare investimenti di 15-20 miliardi di euro/anno per riqualificare l'1% degli edifici/anno, nelle zone fredde del Paese, con risparmi complessivi di 3,4 Mtep e una diminuzione di 8,5 Mt di emissioni di CO₂ in soli 13 anni (2017-2030) (10).

Infine, la Strategia Energetica Nazionale (SEN 2017) ha previsto lo sviluppo di soluzioni operative che integrino ambiente, clima, energia e un piano di ampio respiro incentrato sull'efficienza energetica coerentemente con gli accordi di Parigi sul clima. Gli obiettivi principali prevedono entro il 2018 di arrivare al 28% di energia rinnovabile su tutti i consumi, e al 55% sui consumi elettrici. Tutti i settori sono interessati, tuttavia l'apporto maggiore è nel residenziale, ma sono coinvolti anche trasporti, agricoltura e industria. Sulla Gazzetta Ufficiale del 2 agosto 2016, n. L 208, è stata pubblicata la Raccomandazione (UE) n. 2016/1318(1) con la quale la Commissione europea ha reso pubblici i suoi orientamenti mirati a contribuire e ad assicurare che, entro il 31 dicembre 2020, tutti gli edifici di nuova costruzione siano a energia quasi nulla, e inoltre, a fare emanare da tutti gli Stati membri piani nazionali per aumentare il numero di edifici, nuovi o da ristrutturare, a energia quasi zero (14). La ricerca nel settore dell'edilizia, alla luce delle esigenze di miglioramento dell'efficienza energetica delle componenti strutturali che costituiscono gli edifici ai fini del risparmio o della eliminazione delle risorse energetiche fossili, è ormai orientata all'applicazione e alla valorizzazione di elementi naturali tra i quali

prioritariamente i sistemi vegetali (4). Sono questi gli aspetti alla base della presente ricerca e sperimentazione e degli obiettivi sull'integrazione del verde negli edifici.

Le attività di ricerca sono state sviluppate attraverso la formalizzazione di metodi e strumenti di indagine mirati alla individuazione di scelte operative utili ai fini della pianificazione e progettazione di edifici funzionali alla integrazione di sistemi vegetali per migliorarne la sostenibilità energetica ed ambientale. Gli obiettivi di ricerca sono stati sviluppati in accordo con i risultati raggiunti con il PAR 2015 (3) e hanno avuto come obiettivo la realizzazione di un sistema tetto-giardino e la raccolta di dati microclimatici e biologici sulla struttura di prototipo di parete verde, realizzata nell'annualità precedente. Le attività progettuali sono state condotte sull'edificio F92, denominato "Scuola delle Energie", situato presso il Centro Casaccia dell'ENEA. Il monitoraggio di dati climatico-ambientali è stato svolto sul prototipo di parete-vegetale sulle facciate di sud-est e di sud-ovest, sebbene la raccolta di dati sia stata svolta prevalentemente sulla parete di sud-ovest. Per quanto riguarda la raccolta di dati bioagronomici sulle essenze vegetali prese in considerazione e collocate su due delle pareti dell'edificio, si è scelto di valutare la crescita vegetale relativamente a un mix di essenze vegetali costituito da sette differenti essenze disposte su entrambe le pareti dell'edificio dimostrativo.

2 Sostenibilità energetica ed ambientale delle aree urbane

Le coltri vegetali esterne sia orizzontali (tetti verdi - green roofs) e sia verticali (pareti verdi - green walls) rappresentano eco-sistemi naturali realizzati con essenze vegetali su terrazzi, balconi e facciate di parti strutturali di edifici. Le piante vengono coltivate con substrati naturali oppure direttamente su terriccio e mantenute con sistemi di fertirrigazione automatica o manuale (2). La presenza di sistemi vegetali realizzati sulle strutture di un edificio incide sulle interazioni energetiche di questo e con l'ambiente esterno, migliorando le condizioni di comfort microclimatico per gli spazi esterni ed interni agli edifici. Nei periodi estivi, i tetti verdi (13), e le pareti verdi (3) sono in grado di mitigare i picchi di temperatura grazie all'evapotraspirazione delle piante e all'ombreggiamento nei confronti dell'irraggiamento solare diretto, consentendo anche di mitigare gli effetti fisici delle isole di calore o "Urban Heat Island (UHI)" nei centri cittadini. L'UHI causa un picco del carico elettrico tra 3-8% per ogni grado centigrado di incremento della temperatura estiva. Le essenze vegetali, con l'evapotraspirazione rilasciano acqua sotto forma di vapore e consumano una grande quantità di energia termica. Infatti, nel passaggio di stato da liquido a vapore occorrono circa 700 kWh per m³ di acqua, che altrimenti sarebbe assorbita dagli edifici e rilasciata come calore, pari a circa 2-3 °C di raffrescamento dell'aria. Per una copertura estensiva l'evapotraspirazione raggiunge 3-4 mm/m² giorno (3-4 litri H₂O/m²giorno). La scelta delle specie vegetali, tuttavia, è anche subordinata alle condizioni climatiche delle aree urbane considerate. Rispetto alle tecniche di coltivazione delle essenze vegetali in verticale, risulta senz'altro preferibile applicare alla parete, che sostiene la coltre vegetale, una struttura reticolare di sostegno fatta con legno, ferro o materiale plastico che oltre a favorire la crescita delle piante consente anche la realizzazione di una intercapedine tra la coltre vegetale e la parete dell'edificio, con vantaggi rispetto alla realizzazione di un "effetto camino" che migliora il movimento verso l'alto dell'aria calda sia in estate che in inverno. L'integrazione dei sistemi vegetali sugli edifici riduce la radiazione solare incidente e conseguentemente i consumi di energia elettrica e le emissioni di gas ad effetto serra (CO₂, CH₄, Fluorurati, vapore acqueo) dovuti al condizionamento dell'aria interna degli edifici. Un ulteriore effetto delle coperture vegetali è l'aumento della massa termica dell'involucro che favorisce sia lo sfasamento temporale sia l'attenuazione dell'onda termica nei confronti dell'edificio. Un indice della schermatura prodotta dalla coltre vegetale nei confronti della radiazione solare incidente si può misurare con il parametro LAI (Leaf Area Index - Indice di Area Fogliare) (Figura 1), che rappresenta l'efficienza bioclimatica della biomassa vegetale espresso in percentuale di radiazione intercettata (o trasmessa) nelle fasi stagionali (11). Tuttavia per valutare la riduzione di flusso termico per effetto della copertura verde è stato considerato un indice, detto "costante verde" (Kv), che mostra l'effetto della coltre verde sul riscaldamento di temperatura delle pareti dotate e rispettivamente prive di coltre vegetale. In particolare, tale indice è stato misurato in accordo con una biomassa vegetale della specie

vegetale a completo sviluppo fogliare (Tabella 1 e Tabella 2) e che in relazione alla Figura 1 corrisponde nel range di LAI compreso tra 3,5 e 5 (copertura pressoché totale). La costante verde così definita varia tra 0 e 1: è pari a zero nel caso in cui le temperature superficiali sono uguali in assenza e in presenza di parete verde; mentre è pari a 1 quando la temperatura superficiale della parete verde è pari a quella dell'aria e quindi con maggiori effetti sulla riduzione della temperatura superficiale esterna (1).

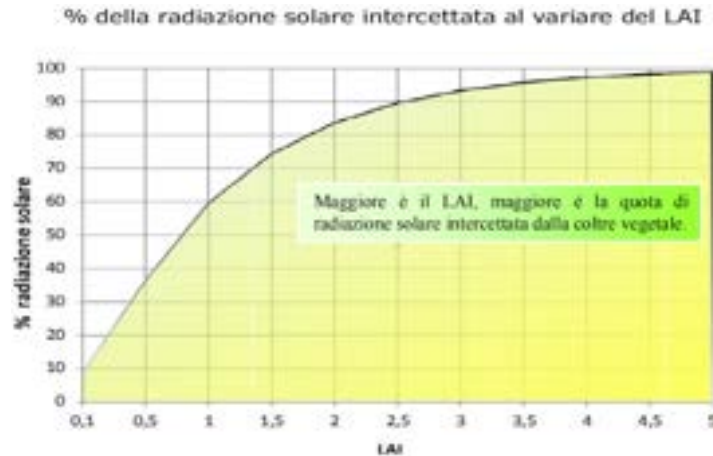


Figura 1: LAI (Leaf Area Index - Indice di Area Fogliare)

La formula che definisce la costante verde è la seguente:

Per valutare l'effetto di schermatura della radiazione solare incidente entrante in un edificio, dotato di coltre vegetale, è stato definito l'indice *costante verde* (K_v) (RdS/PAR2013/131; RdS/PAR2015/141; RdS/2013/276). In sintesi, la formulazione tecnica del parametro costante verde (K_v) è la seguente:

$$K_v = \frac{T_{pn} - T_{pp}}{T_{pn} - T_{ae}} \quad \text{da cui} \quad T_{pn} - T_{pp} = K_v (T_{pn} - T_{ae})$$

dove:

T_{pp} = Temperatura parete protetta;

T_{pn} = Temperatura parete nuda;

T_{ae} = Temperatura aria esterna.

In questo modo, è possibile misurare il fattore K_v in correlazione al fenomeno termico. 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_{pe}), 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});
- **K_v vale 1**, la coltre esercita completa schermatura, pertanto, in condizioni estive, la temperatura della faccia esterna (T_{pe}), risulta essere uguale alla temperatura dell'aria esterna (T_{ae}).

Tabella 1 Costante verde (Fonte: ENEA)

Essenza vegetale	K_v
<i>Partenocissus quinquefolia</i>	0,85
<i>Hedera helix</i>	0,83
<i>Lonicera hall prolific</i>	0,81

Tabella 2 Costante verde (Fonte: ENEA-Università di Bari)

Essenza vegetale	Kv
<i>Rhyncospermum jasminoides</i>	0,81
<i>Pandorea jasminoides variegata</i>	0,95

Sulla base delle tabelle sopra riportate (reperite in bibliografia), si vede che, in prima approssimazione, la *Pandorea jasminoides variegata* ($K_v = 0,95$), il *Partenocissus quinquefolia* ($K_v = 0,85$) e l'*Edera helix* ($K_v = 0,83$) che presentano il valore più elevato per la costante verde risultano potenzialmente le specie vegetali più indicate ai fini della riduzione della temperatura superficiale esterna. Per quanto riguarda la realizzazione di strutture tetto-giardino (16), oltre ai benefici in termini di contenimento del drenaggio di piogge improvvise ed intense, è opportuno sottolineare che per tali strutture vegetali sarebbe necessario anche l'installazione di strutture di accumulo dell'acqua piovana. Il tetto-giardino poiché presenta un'albedo molto ridotta (le superfici verdi costituite da essenze vegetali mediamente hanno valori di albedo compresi tra 0,25 e 0,35, inferiori a quelli delle superfici costituite da asfalto o altri materiali di costruzione), presenta effetti positivi sulla riduzione della riflessione della radiazione solare che, in parte, viene assorbita dal manto vegetale per le funzioni biochimiche delle piante, con effetti positivi sulla riduzione della temperatura dell'aria. Contemporaneamente, lo strato verde consente l'aumento della massa termica della superficie costruita, che favorisce il fenomeno dello sfasamento temporale e l'attenuazione dell'onda termica,. Rispetto alla radiazione solare incidente sull'edificio, la vegetazione, attraverso i fenomeni di riflessione, assorbimento e trasmissione, dissipa nell'atmosfera energia sotto forma di calore latente (H_l) e di calore sensibile (H_s) oltre all'energia utilizzata per i processi biologici. In particolare, i fenomeni della fotosintesi (P) e dell'evapotraspirazione, consentono alla coltre vegetale di dissipare fino al 50% dell'energia radiante associata alla radiazione solare. Si è visto sperimentalmente che, tenuto conto delle diverse caratteristiche genetiche e fenotipiche delle essenze vegetali (altezza, densità e colore fogliare, accrescimento, portamento, foglie sempreverdi o caduciformi, ecc.), un m^2 di foglie può arrivare ad evaporare fino a 0,5 litri di acqua tramite la dissipazione di calore latente. Nella stagione invernale, la coltre vegetale disposta in verticale consente la riduzione dello scambio termico con l'ambiente esterno in quanto viene ridotta la velocità dell'aria che lambisce la parete, con una diminuzione degli scambi convettivi e dell'umidità delle pareti esterne che, in ultima analisi, favoriscono il microclima dell'edificio. Rispetto al miglioramento delle condizioni ambientali, le coltri vegetali determinano anche benefici in termini di accumulo e filtrazione dei particolati solidi in sospensione derivanti dall'attività antropica (7).

2.1 Subtask c.1: Coltri Vegetali - Realizzazione del solaio tetto-giardino

Per la realizzazione del solaio tetto-giardino (Figura 2) si è innanzitutto proceduto con la verifica dell'agibilità dell'edificio rispetto al peso della copertura vegetale mediante un'analisi tecnico-documentale dei carichi massimi sopportabili dal solaio esistente (vedi Allegato 1). Il calcolo effettuato per verificare la resistenza del solaio tetto-giardino riporta le verifiche dei solai in latero-cemento secondo le indicazioni delle norme tecniche del D.M. 14.01.2008. I dati di input considerati sono stati: oggetto identificativo del solaio, caratteristiche dei materiali calcestruzzo e acciaio, caratteristiche geometriche del solaio, posizione e quantità di armatura presente in un singolo travetto, i carichi di progetto, i valori dei denominatori da utilizzare per il calcolo del momento sollecitante positivo e negativo, i coefficienti da utilizzare per le varie combinazioni di carico per gli stati limite di esercizio, il carico accidentale concentrato agente sul solaio, le caratteristiche della rete elettrosaldata presente nella soletta. Le verifiche sono state condotte sia per lo stato limite ultimo (SLU) che per gli stati limite di esercizio (SLE). La sezione resistente considerata è stata quella del solo travetto rettangolare. Per il calcolo del taglio resistente si è trascurato il contributo della eventuale compressione sul travetto. Sulla base delle descrizioni riportate nella relazione tecnica contenuta nel progetto strutturale ENEA dell'edificio F92, è stata sviluppata una valutazione tecnica per ridisegnare la carpenteria del solaio ai fini della sicurezza strutturale indispensabile per assicurare l'installazione di una tipologia estensiva di "copertura verde orizzontale". In particolare, la relazione tecnica ENEA riporta che tutte le travi

perimetrali sono sotto sporgenti per tutti i piani mentre quelle interne sono travi a spessore di solaio di dimensioni 24x90 cm.

Nella stessa relazione tecnica si evince, inoltre, che il solaio è realizzato in latero cemento con travetti del tipo a traliccio con fondello in laterizio e blocchi di laterizio interposti di alleggerimento per un'altezza di 20+4 cm di soletta collaborante. Il solaio è armato, in ogni travetto, con $1\phi 12+1\phi 10$ (1.92 cm^2)/50 cm agli appoggi, mentre in campata è armato con $1\phi(12+14)$ (2.67 cm^2)/50cm. In base a queste considerazioni è stato calcolato, con il metodo delle tensioni ammissibili, in vigore al tempo della costruzione dell'edificio, quale carico è in grado di sopportare il solaio attuale. Una ulteriore verifica, sviluppata con i metodi attualmente in uso, cioè agli stati limite, ha messo in luce che il carico sopportabile dalla struttura attuale è di 600 kg/m^2 utili oltre al peso proprio del solaio. Il foglio di calcolo utilizzato è riportato negli allegati.

2.2 *Descrizione tecnica e dei materiali utilizzati per la realizzazione del solaio verde esterno*

La realizzazione del solaio di copertura tetto-giardino ha previsto:

a) Strato di regolarizzazione o compensazione: lo strato di regolarizzazione o compensazione è stato realizzato mediante la stesura di uno strato di geotessile non tessuto (TNT) del peso unitario di circa 500 gr/mq, resistenza a trazione di almeno 30 kN/m (ISO EN 10319) con allungamento a rottura inferiore o uguale al 80% (ISO EN 10319) e resistenza al punzonamento maggiore 2000 N (ISO EN 12236).

b) Elemento di tenuta: l'elemento di tenuta utilizzato è costituito da un manto sintetico in PVC spessore nominale 1,8 mm, rinforzata con una griglia in fibra di vetro, resistente ai raggi UV, resistente ai microrganismi. Le caratteristiche della membrana sono rispondenti ai requisiti minimi previsti dalle normative EN 13956. Dettagli costruttivi dell'impermeabilizzazione (o Risvolti verticali dell'impermeabilizzazione riportata 20 cm sopra al livello finito del substrato) .

c) Caratteristiche del sistema multistrato verde pensile intensivo leggero prato: costituito da feltro di accumulo e protezione meccanica, elemento di accumulo drenaggio e aerazione tipo drain roof GEOPLAST (Figura 4) H 2,5 e 5 cm, telo filtrante e substrato, con i requisiti previsti dalla norma UNI 11235 (Figura 5).

d) Caratteristiche del sistema: spessore totale del sistema pari a $13 \text{ cm} \pm 5\%$ con spessore di substrato a compattazione avvenuta pari a 10 cm; peso a massima saturazione idrica, esclusa vegetazione, non superiore a 100 kg/m^2 ; a PF1 volume d'aria $\geq 40 \text{ l/m}^2$; capacità di accumulo idrico non inferiore a 35 l/m^2 con almeno 30 l/m^2 di acqua disponibile per le piante (potenziale idrico compreso fra 0 e -1,5 MPa) e quantitativo di acqua libera contenuta nel pannello di accumulo non superiore a 3 l/m.

e) Caratteristiche dell'elemento drenante: tipo Drain roof 25, con una conducibilità idraulica totale a 20kPa (secondo norma EN ISO 12958) a gradiente idraulico $i = 0,01$ non inferiore a 0,8 l/sm e ad $i = 0,1$ non inferiore a 2,4 l/sm (Figura 4).

f) Caratteristiche del substrato: substrato tipo "vulcan flor", la frazione granulometrica fino a 0,064 mm non superiore al 20%, la capacità di scambio cationico a 30 meq/100g e la sostanza organica non maggiore dell'8% in massa. Al punto di appassimento permanente (-1,5 MPa), il contenuto d'acqua non superiore a 0,07 gr gr-1 (gr d'acqua su gr di substrato secco). La quantità d'acqua disponibile per le piante non deve essere inferiore a 0,23 gr gr-1 (Figura 6).

g) Vegetazione : a prato tipo Zoysia japonica "zenith" o digondra nana e Sedum spp. (Figura 7 e Figura 8).

h) Caratteristiche impianto di irrigazione: il sistema prevede un impianto di irrigazione statico e

dinamico formato da: collettori di distribuzione con elettrovalvole autopulenti, antiusura con controllo di flusso, filtro sulla membrana e dispositivo di apertura e chiusura lenta; collettori dotati di microsfera per lo scarico invernale dell'impianto; centralina elettronica programmata a tempo e con inclusa batteria ricaricabile per la riserva della memoria; tubazioni di alimentazione e di adduzione ai vari settori con diametri variabili, inattaccabili agli agenti e provviste di apposite valvole di drenaggio automatiche; irrigatori dinamici a turbina a settore variabile, con gittata regolabile e ugelli intercambiabili; irrigatori statici antiurto e anticorrosione con ugello ad angolo di lavoro regolabile, frizione per la regolazione della direzione del getto dopo l'installazione, con molla di richiamo pistone (Figura 9).

i) Pozzetti di controllo termo-isolati per scarichi di facciata: pozzetto di controllo per scarico laterale muniti di coperchio, resistente al calpestamento e alla compressione; dotato di fessure verticali perimetrali per il deflusso dell'acqua e fessure sul coperchio per captare l'acqua di scorrimento superficiale; adatto per tutte le dimensioni dei pozzetti di raccolta. Dimensioni coperchio: 20x20 cm. Altezza: 15 cm.



Figura 2: Dettagli del “tetto giardino” e della tipologia di substrato



Figura 10: Evoluzione costruttiva della parete-verde sull'edificio ENEA "Casa delle Energie"

La struttura "greenery" installata presso la "Casa delle Energie", risulta dotata di un sistema di monitoraggio in grado di rilevare le seguenti grandezze:

- velocità e direzione del vento (WS, WD), (m/s) e (deg).
- precipitazioni (RG), (mm).
- temperatura e umidità relativa dell'aria (AT01, RH), (°C) e (%).
- radiazione globale (GR01), (W/m²)
- radiazione visibile (PAR), (μmol/m² s).
- temperatura della superficie vegetale (TF), (°C).
- temperatura suolo substrato (ST), (°C)
- contenuto idrico del suolo (SM), (m³/m³).
- analisi di CO₂ e di O₂, (ppm) e (%).
- temperatura muro/parete nudo (TS05), (°C).
- temperatura muro/parete schermato da coltre vegetale (TS01, TS03), (°C).



Figura 11: Sistema di monitoraggio

L'obiettivo principale del monitoraggio dei dati è la raccolta dei dati con il fine di definire il quadro energetico che caratterizza l'integrazione delle coltri vegetali negli edifici (Figura 11). A questo proposito la Figura 12 riporta uno schema che illustra gli scambi energetici che teoricamente caratterizzano l'integrazione di coltri vegetali negli edifici.

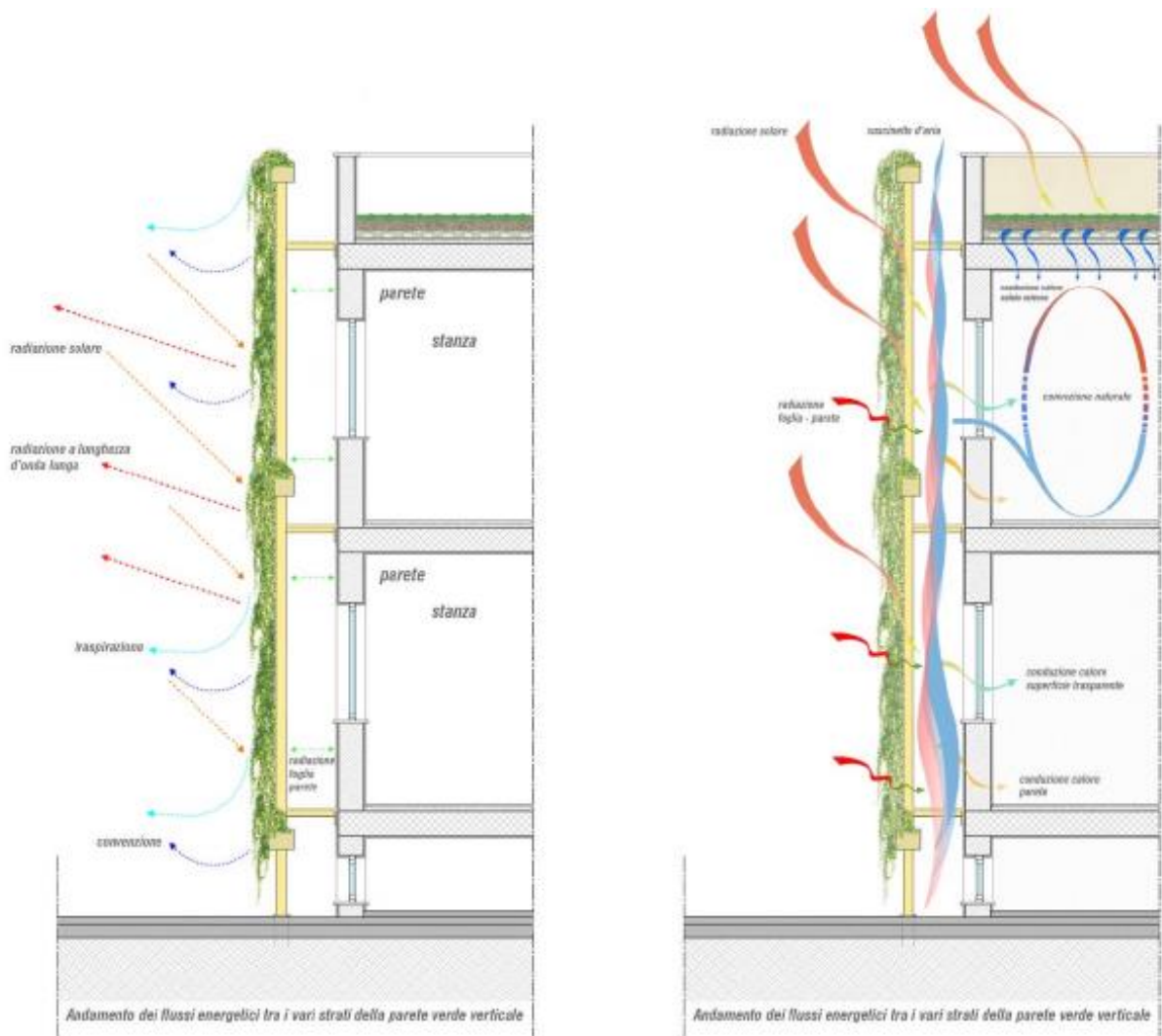


Figura 12: Descrizione teorica dei flussi e degli scambi di energia tra coltri vegetali ed edificio

2.4 Acquisizione dati

La frequenza di acquisizione delle misure è stata differenziata per i dati meteo e del suolo (30 s) e per il campionamento dell'analizzatore di CO₂ e O₂ (120 minuti). 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, pertanto, sono resi disponibili nel front del software di gestione Olinda Monitoraggio climatico-ambientali L'attività di ricerca ha previsto la caratterizzazione del sito relativamente alla piattaforma dimostrativa (Figura 13) utilizzata per la realizzazione del sistema prototipo di terrazzo-giardino e per la raccolta dei dati di radiazione solare incidente sul sito sperimentale (Figura 14). In particolare, l'installazione delle coltri vegetali sull'edificio-prototipo è stata realizzata rispettivamente sulle facciate di sud-est e di sud-ovest.

Infatti l'attività di ricerca del PAR 2016 è stata impostata soprattutto per una prima caratterizzazione degli aspetti microclimatici dell'edificio e delle coltri vegetali con lo scopo di raccogliere i dati essenziali sia climatico-ambientali e sia biometrici sulle essenze vegetali, propedeutica per definire i parametri essenziali ai fini dell'influenza delle essenze vegetali sui flussi energetici entranti nell'edificio. Pertanto, si è ritenuto di effettuare una raccolta dati basata soprattutto su parametri generali in grado di consentire una prima valutazione degli effetti energetici derivanti dalla schermatura delle coltri vegetali sulle pareti dell'edificio oltre che per valutare il comportamento delle essenze vegetali allevate secondo una tipologia colturale che ha previsto la coltivazione in vaso e non quella tipica su suolo. La raccolta dei dati è stata impostata utilizzando la parete di sud-ovest soprattutto per i dati microclimatici e la parete di sud-est principalmente per valutare la crescita delle essenze vegetali.

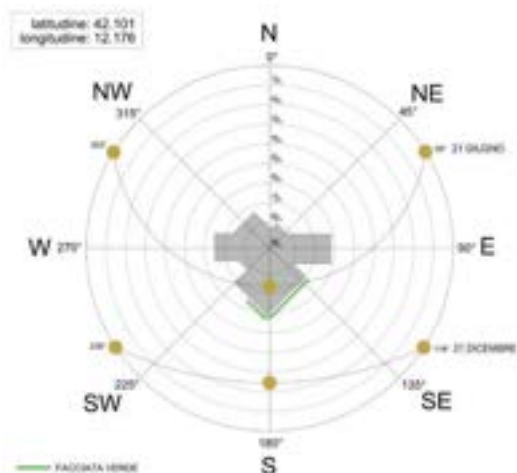


Figura 13: Carta del sole

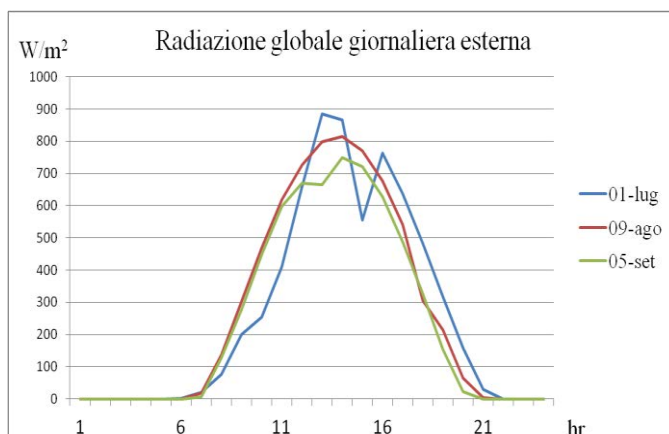
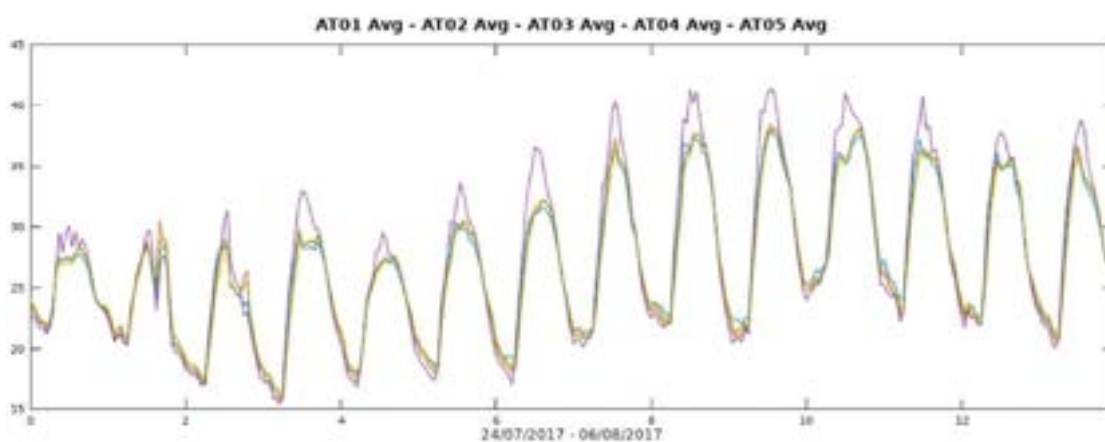


Figura 14: Dati stazione meteo per i mesi di luglio, agosto, settembre



NOTA: L'impianto dispone di cinque sensori della temperatura dell'aria, di cui uno disposto sul tetto dell'edificio (AT01), uno sul lato SO, all'esterno della parete verde (AT02), due sempre a Sud Ovest, ma all'interno della parete verde (AT03 e AT05) ed uno sul lato Sud Est, montato all'esterno della parete verde (AT04). Nella Figura sono riportate le temperature misurate dai cinque sensori su un arco di tempo di due settimane a cavallo fra luglio e agosto. La traccia viola, corrispondente al sensore posto a SE, mostra temperature sistematicamente più alte, rispetto agli altri sensori, nella parte più calda della giornata. Le altre quattro tracce, invece, sono molto ben sovrapponibili fra loro. In particolare non si osservano differenze di rilievo fra i due sensori montati all'interno della parete verde sul lato Sud Ovest e quello montato all'esterno.

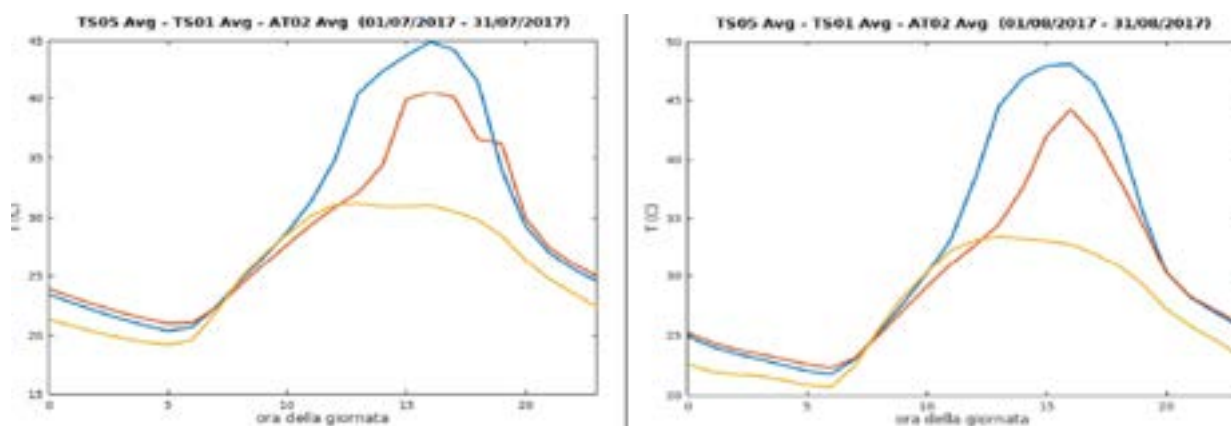


Figura 15 - Temperatura media della parete Sud Ovest nei mesi di luglio (a sinistra) e agosto (a destra). Blu: temperatura muro non protetto dalla coltre vegetale; Rosso: temperatura muro protetto dalla coltre verde; Giallo: temperatura aria

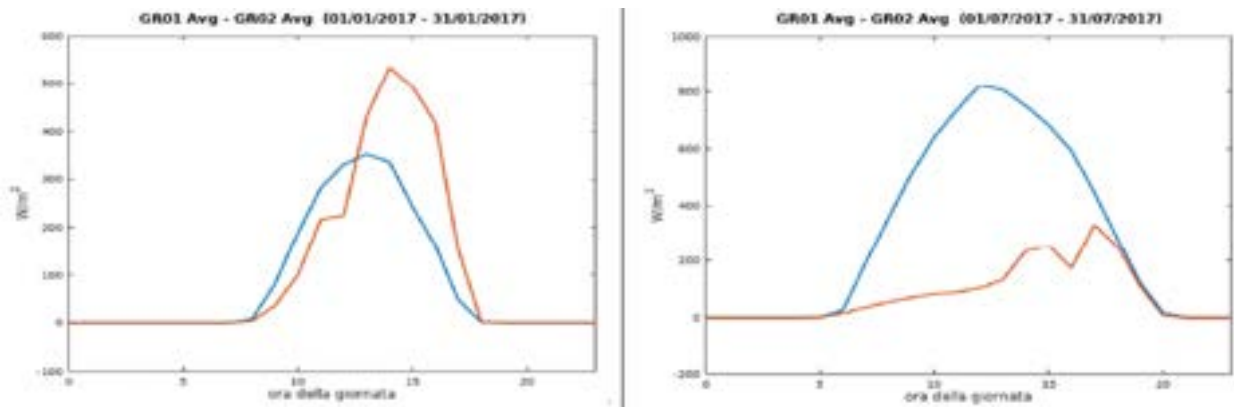


Figura 16 - Confronto fra le intensità medie della radiazione incidente nel corso della giornata, rilevata dai sensori posti sul tetto dell'edificio (linea blu) e sulla parete Sud Ovest (linea rossa).
A sinistra: mese di gennaio; A destra: mese di luglio.

NOTA: La radiazione incidente è rilevata da due sensori, di cui uno posto sul tetto dell'edificio e l'altro appoggiato alla parete Sud Ovest. E' interessante osservare che a gennaio, a causa della bassa inclinazione del sole, la parete verticale risulta complessivamente più irradiata del tetto, mentre la situazione risulta capovolta in estate. Inoltre, mentre il segnale rilevato sul tetto forma una campana abbastanza simmetrica nel corso della giornata, quello della parete Sud Ovest presenta un gradino (a gennaio) o addirittura un minimo relativo nelle ore di maggiore insolazione (a luglio). Queste strutture sono da ascrivere probabilmente al passaggio dell'ombra del montante metallico sopra il sensore.

2.5 Monitoraggio della parte di sud ovest

Di seguito si riportano i dati di radiazione solare convertiti in termini di energia incidente e rispettivamente energia sottratta mediante lo schermo naturale della coltre vegetale (Figura 17, Figura 18 e Figura 19) che evidenziano l'effetto di schermatura della coltre vegetale nel periodo estivo. In particolare i dati delle figure sono stati rilevati con la sensoristica installata sulla parete di sud ovest.

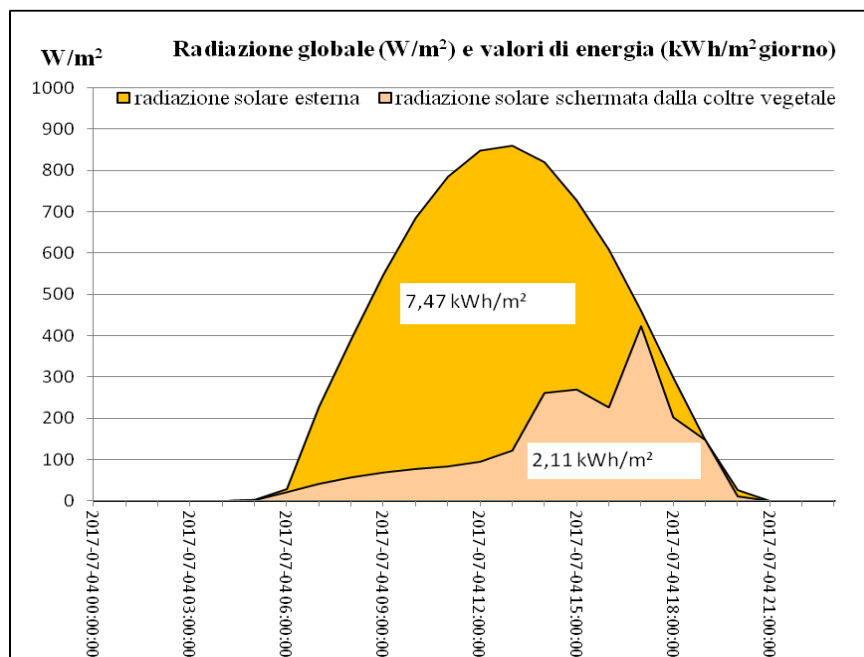


Figura 17 - radiazione solare globale

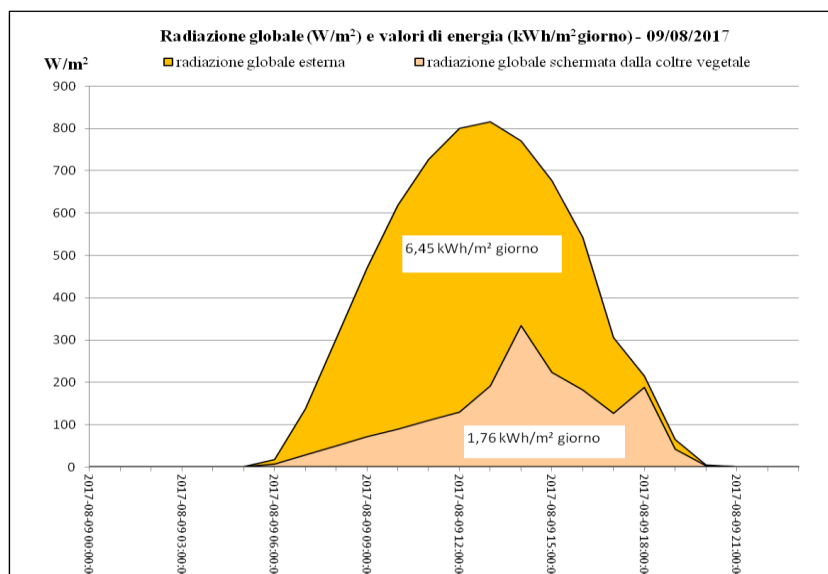


Figura 18 - radiazione solare globale

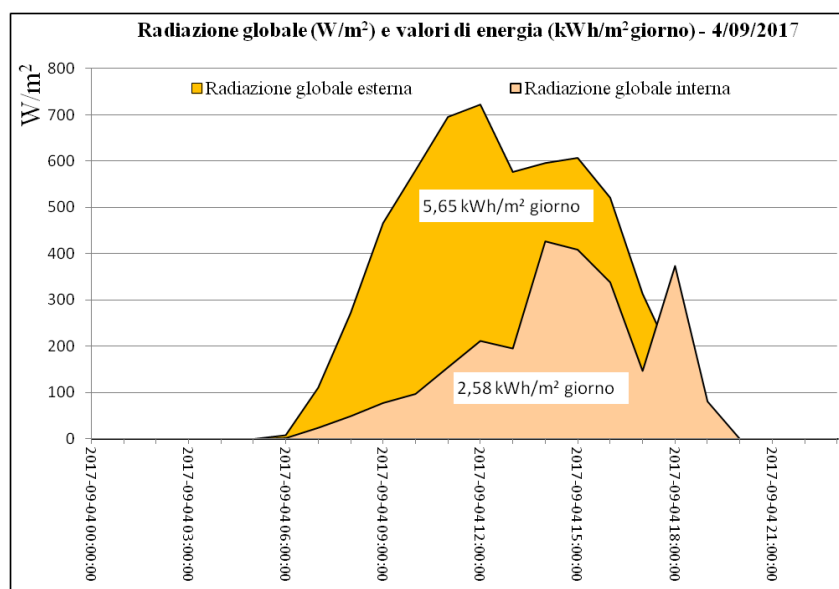


Figura 19 - radiazione solare globale

Da Figura 20 a Figura 25 si riportano i dati di radiazione solare globale e rispettivamente di quella visibile (*PAR-Photosynthetically Active Radiation*). Tali misure sono state effettuate per verificare la quantità di radiazione disponibile per l'accrescimento delle essenze vegetali all'interno della intercapedine creata tra la coltre vegetale e la parete dell'edificio. I dati mettono in evidenza che il PAR risulta ottimale per l'attività biologica delle piante che richiedono minimi di radiazione solare globale non inferiori a 200 W/m^2 . I dati del PAR sono riportati in $\mu\text{mol.m}^2\text{s}^{-1}$ ($1 \text{ W/m}^2 \approx 4.6 \mu\text{molem}^2/\text{s}$) ed evidenziano la forte riduzione di radiazione sia globale sia visibile causata dalla presenza della coltre vegetale. Nella Figura 21 i dati di PAR evidenziano un rilevamento non ottimale causato da una interruzione elettrica nel periodo.

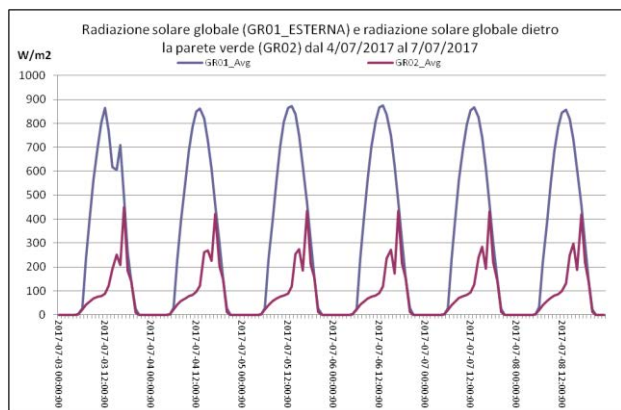


Figura 20 - radiazione solare globale, luglio

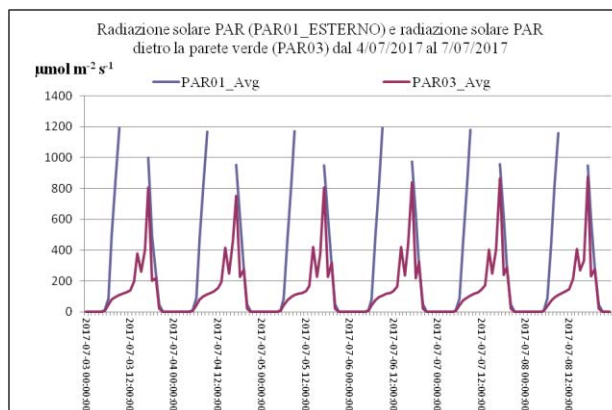


Figura 21 - radiazione solare PAR, luglio

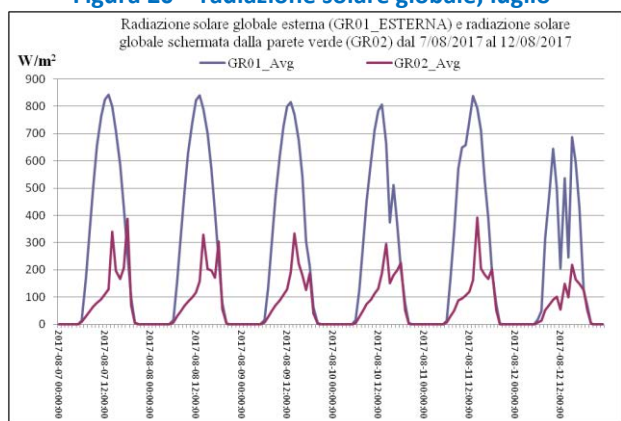


Figura 22 - radiazione solare globale, agosto

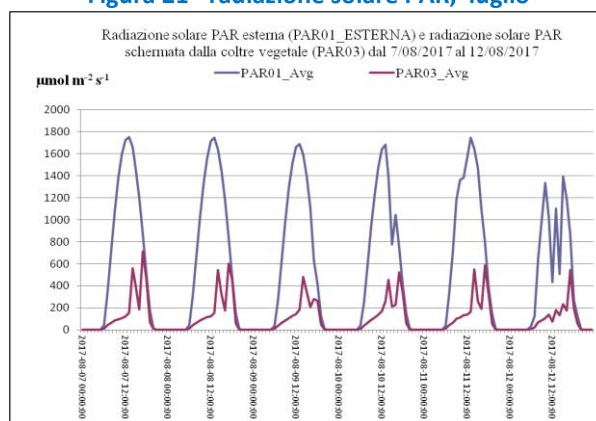


Figura 23 - radiazione solare PAR, agosto

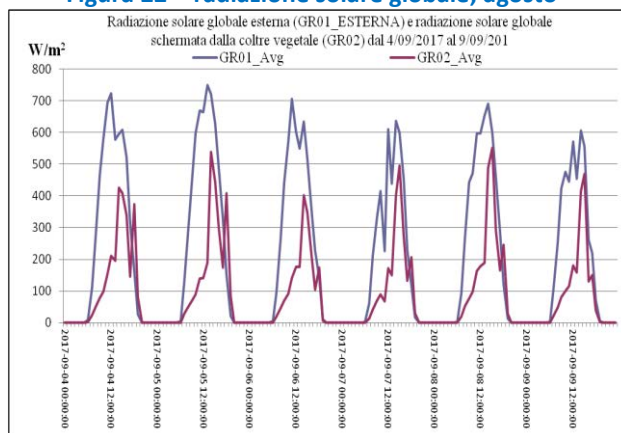


Figura 24 - radiazione solare globale, settembre

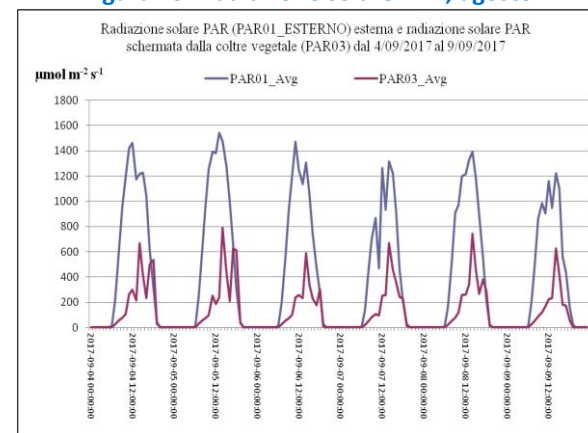


Figura 25 - radiazione solare PAR, settembre

Le Figura 26, Figura 27 e Figura 28 mostrano i dati di temperatura superficiale della parete schermata e rispettivamente non schermata dalla coltre, dell'umidità relativa (UR) interna ed esterna alla intercapedine e la temperatura fogliare esterna. per una maggiore comprensione dei dati, le figure riportano le sigle dei sensori utilizzati (vedi Figura 11). I dati evidenziano: una forte riduzione della temperatura superficiale della parete schermata rispetto alla parete non schermata di variabili tra 5°C (nelle ore centrali) e 14°C (nelle ore pomeridiane); le curve delle umidità relative interna/esterna non mostrano differenze (le due curve praticamente risultano coincidenti); la temperatura fogliare mostra una variazione compresa tra 20°C (prime ore della mattina) e 32 °C (ore serali) prima della discesa nelle ore notturne. L'andamento della curva della temperatura fogliare sembrerebbe confermare il fenomeno fisiologico della traspirazione che aumenta nelle ore più calde per raffreddare la foglia. Tale considerazione è avvalorata anche dall'aumento di umidità relativa che avviene in coincidenza con l'intervallo di stabilità della temperatura fogliare. Tale fenomeno biologico, confermato da numerosi lavori di ricerca, è in accordo con l'obiettivo di utilizzare le coltri vegetali per migliorare il microclima

che caratterizza l'area circostante l'edificio e conseguentemente per ridurre i consumi di energia per il condizionamento nei mesi estivi (15). Le curve dei dati sono in accordo per i periodi temporali considerati.

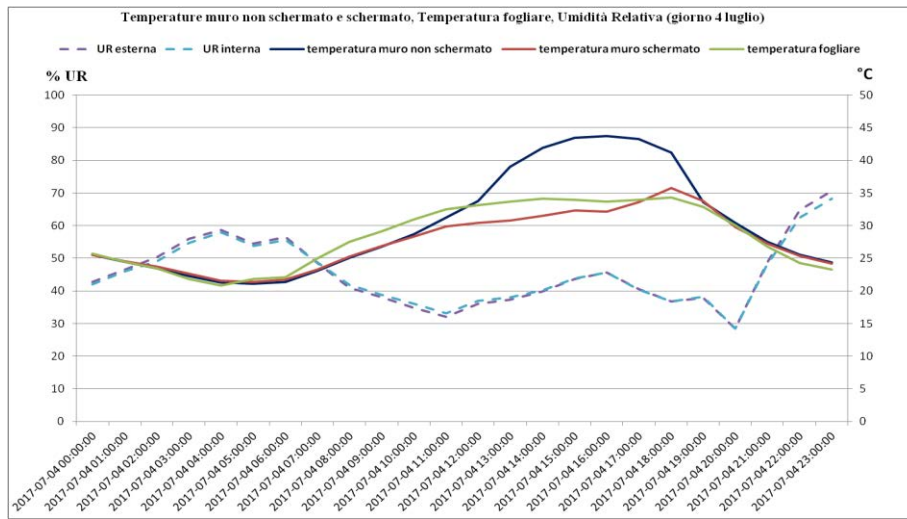


Figura 26: Luglio

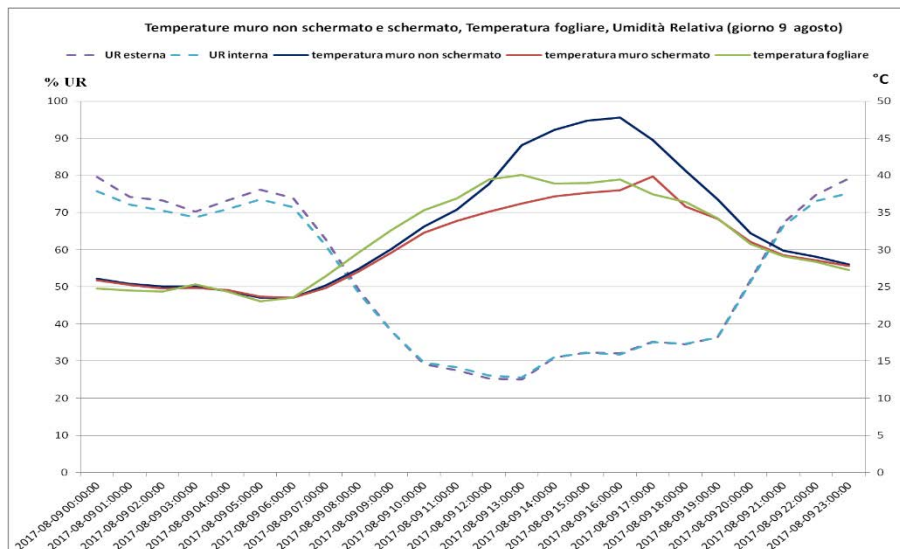


Figura 27: Agosto

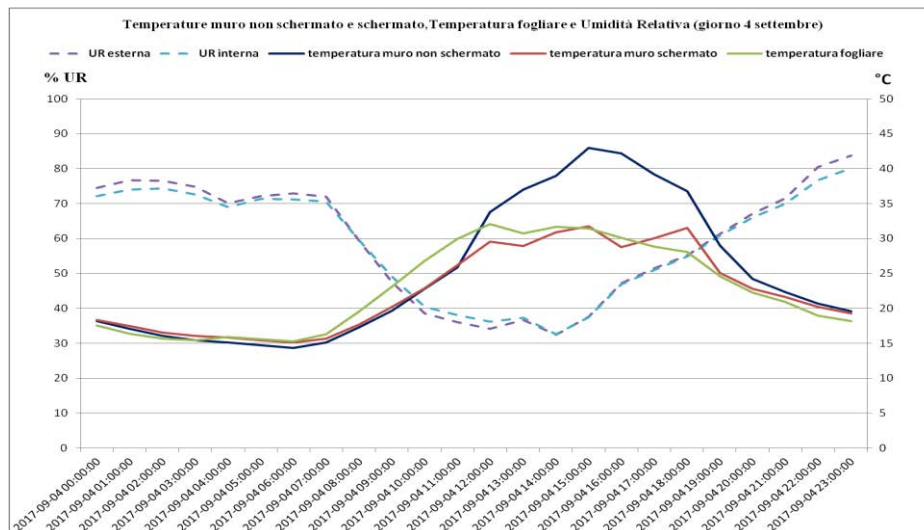


Figura 28: Settembre

Le Figura 29, Figura 30 e Figura 31 si riferiscono al confronto tra le misure di temperatura rilevate per la parete priva di coltre vegetale e per la parete schermata con la coltre vegetale. Sono evidenti le differenza di temperatura che presentano costantemente un valore di circa 10 °C con punte massime di 14 °C.

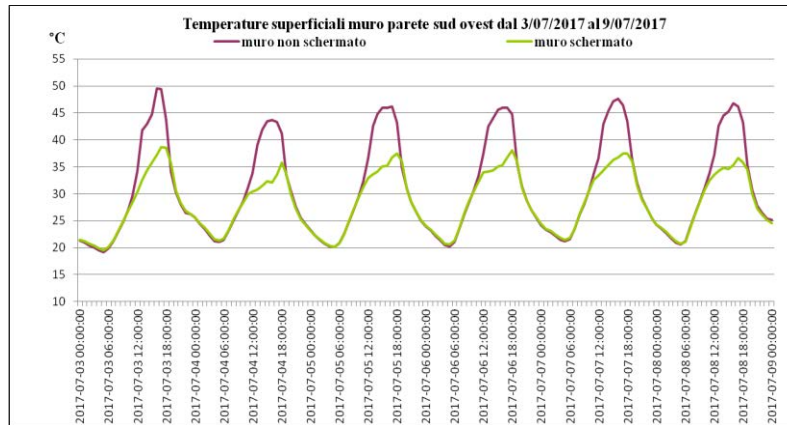


Figura 29: Luglio

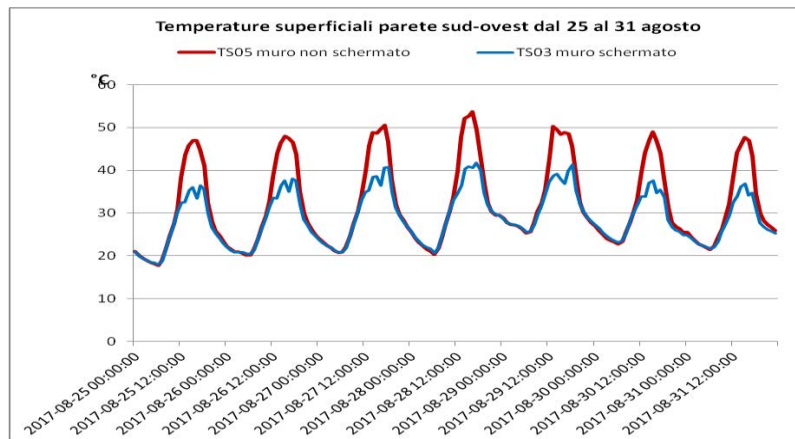


Figura 30: Agosto

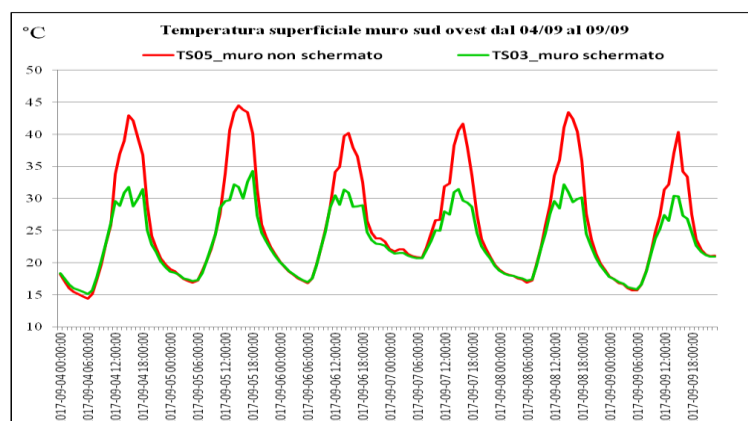


Figura 31: Settembre

Ai fini di valutare contemporaneamente gli effetti della coltre vegetale sui diversi parametri microclimatici si è preso come riferimento un giorno del mese di agosto particolarmente caldo. La Figura 29 evidenzia gli effetti della coltre vegetale come schermo per la radiazione globale e di conseguenza l'azione di diminuzione della temperatura superficiale sulla parete con la coltre vegetale.

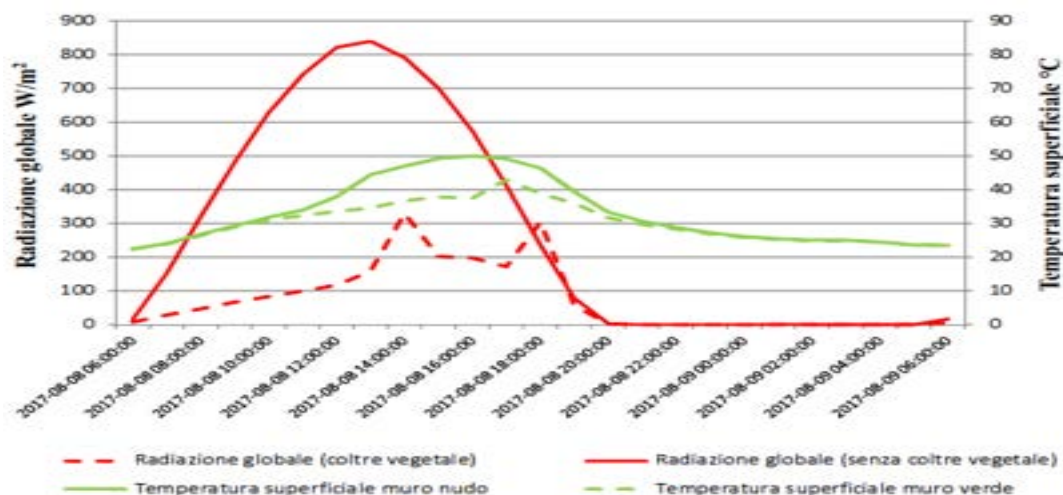


Figura 32: Profili di temperatura superficiale e radiazione globale sulla parete di sud-ovest

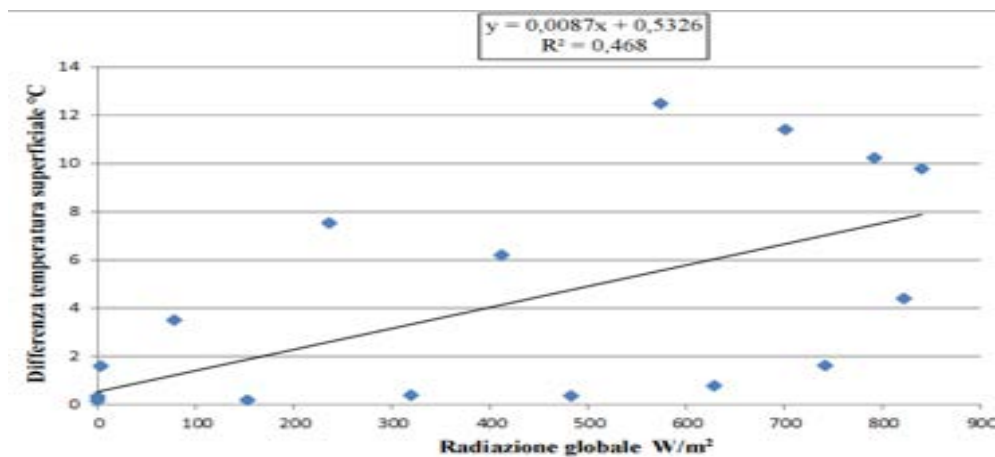


Figura 30: Correlazione tra radiazione globale e differenza temperatura superficiale muro

La NOTA: La Figura sopra riporta la fotografia della parete stessa scattata il 19 aprile alle ore 12.40 e accanto il grafico delle temperature medie nel mese di aprile, estremamente simile a quelli di luglio ed agosto. E' evidente che il sensore interno alla coltre vegetale (non ancora sviluppata!), indicato da una freccia rossa, risulta comunque riparato dall'ombra della struttura metallica, che si proietta sulla parete, mentre il sensore di riferimento (freccia blu) risulta effettivamente esposto al sole.

Tabella 3 riporta una sintesi dei valori massimi rilevati per le misure effettuate sulla parete di sud ovest. In particolare, si evidenzia una forte differenza sia di temperatura (differenze di oltre 10 °C) e sia di radiazione solare incidente sulla parete (diminuzione di valori superiori alla metà della radiazione incidente) tra le aree dotata di coltre vegetale rispetto alle aree prive di copertura vegetale.

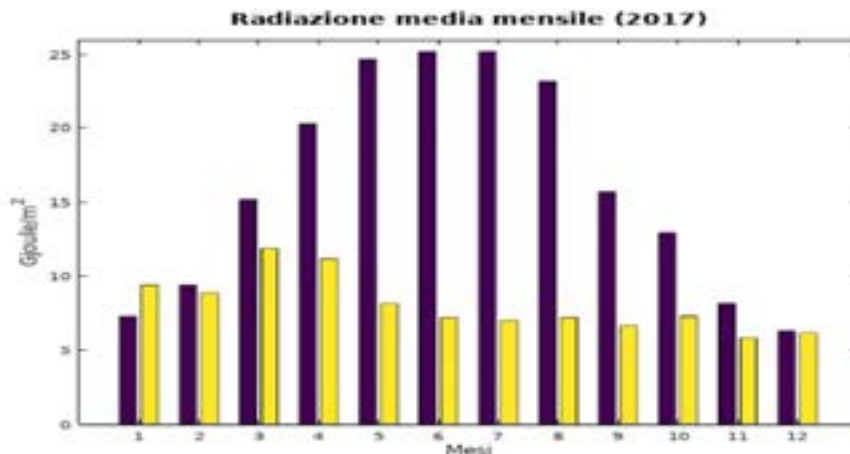


Figura 33 - Radiazioni giornaliere medie rilevate dal sensore posto sul tetto (*barre viola*) e dal sensore tra coltre e muro sulla parete Sud Ovest (*giallo*)

NOTA: Mentre il sensore sul tetto registra un prevedibile andamento stagionale, sulla parete Sud Ovest il periodo di massima insolazione risulta essere la primavera (marzo e aprile). Nei mesi successivi si osserva una diminuzione della radiazione incidente sulla parete, probabilmente a causa dell'ombra dei ballatoi (più estesa se il sole è più alto) e forse anche della crescita della copertura vegetale. L'ipotesi di un ruolo della copertura vegetale risulta suffragata anche dall'osservazione dei mesi autunnali, nei quali si registrano valori di insolazione decisamente inferiori, malgrado che la traiettoria del sole nel cielo non sia differente da quella primaverile.

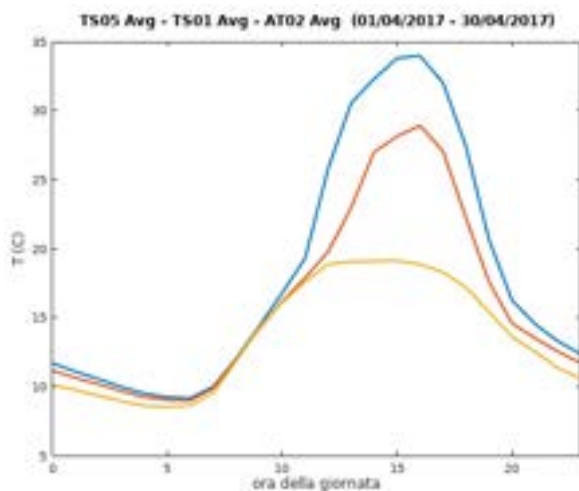


Figura 34 - A sinistra: temperature medie della parete SO nel mese di aprile; i colori sono da interpretare come nelle precedenti figure. A destra: fotografia del lato SO scattata il 19 aprile alle ore 12.40. Le frecce indicano la posizione dei sensori di temperatura della parete.

NOTA: La Figura sopra riporta la fotografia della parete stessa scattata il 19 aprile alle ore 12.40 e accanto il grafico delle temperature medie nel mese di aprile, estremamente simile a quelli di luglio ed agosto. E' evidente che il sensore interno alla coltre vegetale (non ancora sviluppata!), indicato da una freccia rossa, risulta comunque riparato dall'ombra della struttura metallica, che si proietta sulla parete, mentre il sensore di riferimento (freccia blu) risulta effettivamente esposto al sole.

Tabella 3: Valori microclimatici massimi rilevati esternamente e rispettivamente nell'intercapedine costituita dalla coltre vegetale e dalla parete sud ovest dell'edificio

Valori massimi mensili	lug-17	ago-17	set-17	Unità di misura
temperatura aria esterna	34,65	37,24	27,47	°C
umidità relativa esterna	98,4	92,2	95	%
temperatura superficiale muro non schermato	49,5	50,96	44,45	°C
temperatura superficiale muro schermato da coltre vegetale	38,71	43,72	34,26	°C
radiazione solare globale	874,0	845,0	748,4	W/m ²
radiazione solare globale schermata da coltre vegetale	450,8	407,1	552,4	W/m ²
temperatura fogliare	43,57	42,31	33,11	°C

Nota sulla intensità della radiazione incidente sulla parete Sud Ovest

La radiazione incidente è rilevata da due sensori, di cui uno posto sul tetto dell'edificio e l'altro appoggiato alla parete Sud Ovest. A titolo di esempio, in Figura 16 sono riportate le intensità medie mensili rilevate nei mesi di gennaio e di luglio, è interessante osservare che a gennaio, a causa della bassa inclinazione del sole, la parete verticale risulta complessivamente più irradiata del tetto, mentre la situazione risulta totalmente capovolta in estate. Inoltre, mentre il segnale rilevato sul tetto forma una campana abbastanza simmetrica nel corso della giornata, quello della parete SO presenta un gradino (a gennaio) o addirittura un minimo relativo nelle ore di maggiore insolazione (a luglio). Questi comportamenti sono da ascrivere probabilmente al passaggio dell'ombra del montante metallico sopra il sensore. In Figura 33 è riportato l'andamento delle insolazioni giornaliere medie sul tetto e sulla parete SO nel corso del 2017. Mentre il sensore sul tetto registra un prevedibile andamento stagionale, sulla parete SO il periodo di massima insolazione risulta essere la primavera (marzo e aprile). Nei mesi successivi si osserva una diminuzione della radiazione incidente sulla parete, probabilmente a causa dell'ombra dei ballatoi (più estesa se il sole è più alto) e forse anche della crescita della copertura vegetale. L'ipotesi di un ruolo della copertura vegetale risulta suffragata anche dall'osservazione dei mesi autunnali, nei quali si registrano valori di insolazione decisamente inferiori, malgrado che la traiettoria del sole nel cielo non sia differente da quella primaverile.

In conclusione, sulla base dei dati raccolti, per quanto riguarda il lato SO, la coltre vegetale, a causa di uno sviluppo non ancora completo della biomassa fogliare, pur contribuendo a diminuire sensibilmente l'insolazione sulla parete, non è sufficiente ad abbassare apprezzabilmente la temperatura della parete.

2.6 Dati microclimatici e bio-agronomici relativi alla parete sud ovest

I dati sulla parete di sud ovest (Figura 35) sono stati rilevati soprattutto sulla varietà *Lonicera japonica* Hall's Prolific e in misura parziale sul binomio delle essenze vegetali *Hedera helix* e *Lonicera*.



Figura 35: In primo piano la parete sud ovest: nel riquadro rosso il binomio Lonicera 'Hall's Prolific'

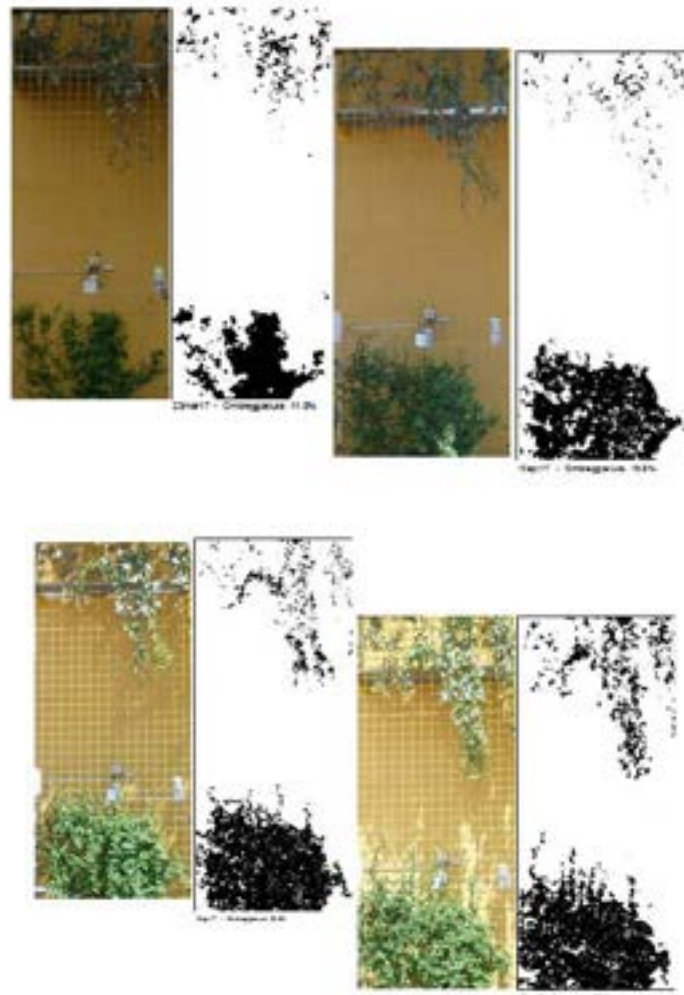


Figura 36: Binomio culturale Hedera-Lonicera

La Figura 36 riporta i dettagli relativi alla varietà Lonicera Hall's prolific. In particolare, si riportano l'analisi di crescita effettuata tramite valutazione fotografica e i relativi parametri della curva logistica. E' opportuno sottolineare che la curva di crescita logistica risulta leggermente sottostimata a causa del colore giallo dei fiori che si confonde con il colore giallo delle pareti dell'edificio.

Data	<i>Lonicera japonica</i> 'Hall's Prolific' (m ²)	Parametri della curva logistica	
		C_{max} (m ²)	<i>Lonicera Japonica</i> 'Hall's Prolific'
		τ (gg)	2.54
		$t_{0.5}$ (gg)	30.7
23mar17	0.18		100
10apr17	0.64		
19apr17	0.95		
10mag17	1.29		
31mag17	1.80		
07giu17	2.07		
20giu17	1.86		
06lug17	1.88		
20lug17	2.28		
31lug17	-		
31ago17	2.24		

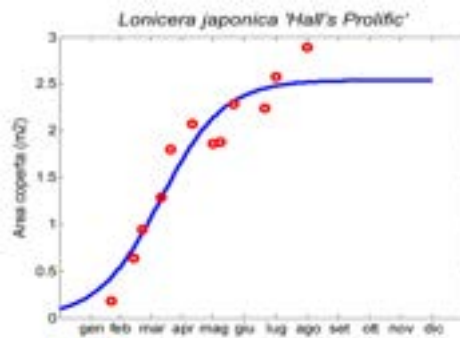
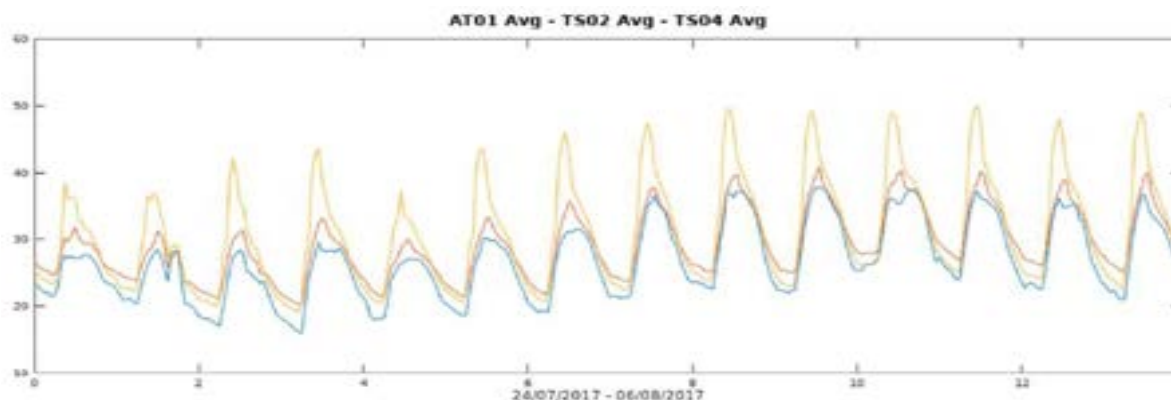


Figura 37: Sviluppo della copertura fornita dalla pianta *Lonicera Japonica* 'Hall's Prolific' ed interpolazione della curva logistica di crescita.

2.7 Dati microclimatici e bio-agronomici relativi alla parete sud est

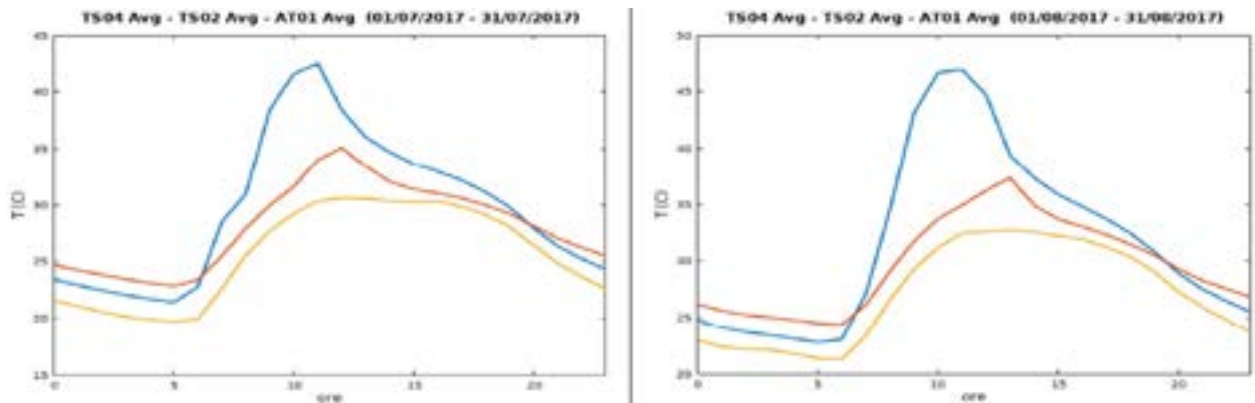
La parete di sud est è stata monitorata soltanto per le temperature riferite alla parete dotata/priva di coltre vegetale (Figura 38 e Figura 39). I dati mostrano una differenza media di temperatura di circa 10 °C soprattutto nelle ore centrali della mattina (tra le 11h e le 13h).



Confronto fra la temperatura del muro esposto a Sud Est e la temperatura dell'aria

Azzurro: temperatura aria; **Rosso:** temperatura muro riparato dalla coltre verde; **Giallo:** temperatura muro esposto al sole.

NOTA: E' interessante notare che la coltre di vegetazione agisce come una serra durante le ore notturne, contenendo l'irradiazione di calore e mantenendo la temperatura della parete leggermente più alta di quella della zona non protetta (traccia rossa più alta della traccia blu).



Temperatura media della parete Sud Est nei mesi di luglio (a sinistra) e agosto (a destra)
Blu: temperatura della zona esposta al sole; **Rosso:** temperatura della zona protetta dalla coltre verde;
Giallo: temperatura dell'aria

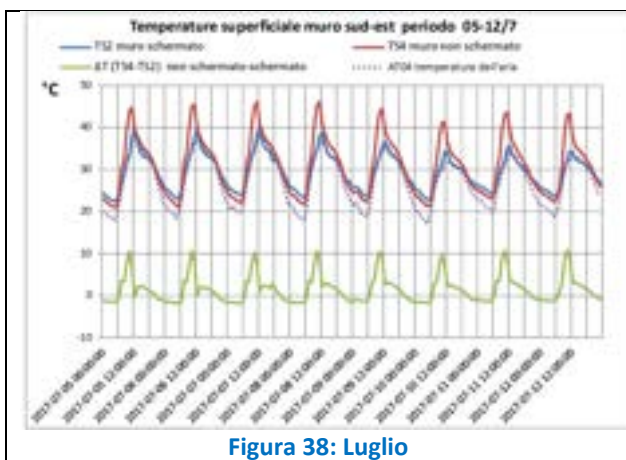


Figura 38: Luglio

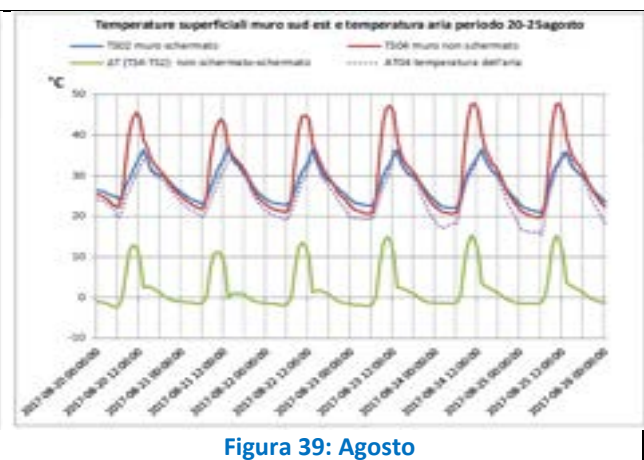


Figura 39: Agosto

Per tutti i periodi considerati si nota che la temperatura dell'aria esterna nelle ore notturne risulta inferiore rispetto ad entrambe le aree della parete (schermata e non schermata dalla coltre vegetale). Questa osservazione conferma la validità della coltre vegetale sia nei periodi caldi (luglio, agosto) e sia in quelli meno caldi. Infatti, tale comportamento è evidente soprattutto nella Figura 40 (inizio periodo di settembre).

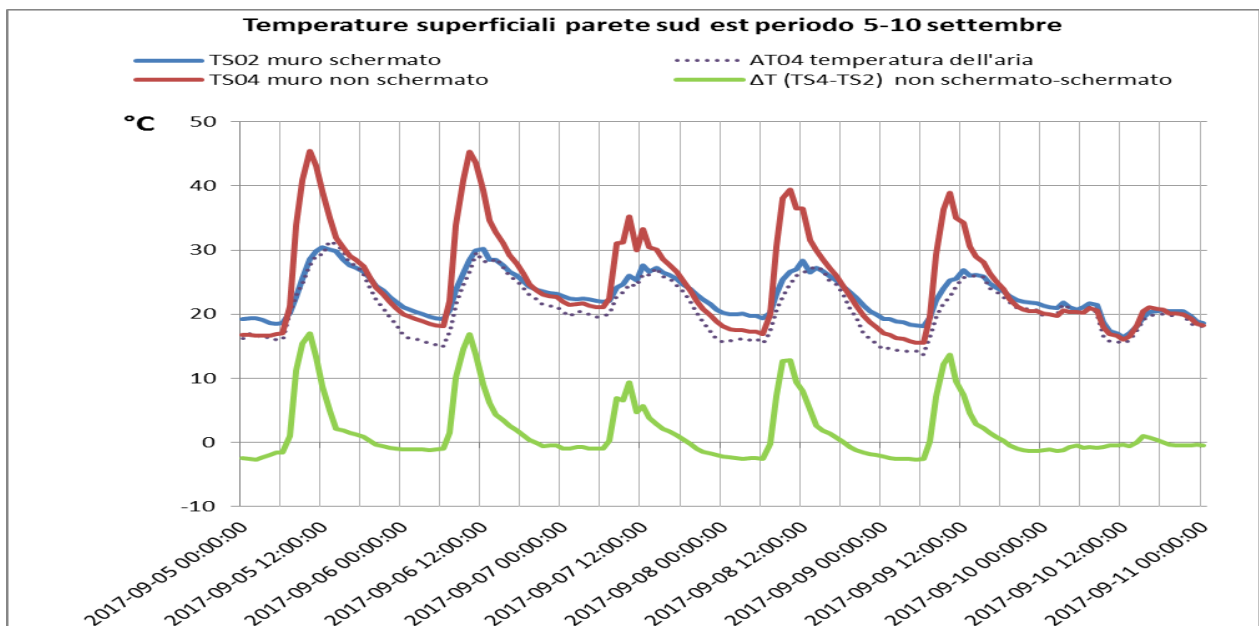


Figura 40: Settembre

Per quanto riguarda l'analisi di crescita delle essenze vegetali disposte sulla parete di sud est (Figura 41), effettuata per via fotografica, le figure da Figura 42 a Figura 45 riportano le rispettive curve di crescita. I risultati sono riportati in Tabella 4.



Figura 41: Parete sud est. I riquadri indicano le piante considerate. Partendo dal secondo piano in alto a sinistra: *Vitis vinifera* fragaria; *Partenocissus quinquefolia* (alto); *Partenocissus quinquefolia* pendente. Al primo piano partendo da sinistra: *Vitis vinifera* varietà Pizzutello; *Partenocissus quinquefolia* (basso); *Vitis vinifera* varietà Regina.

Tabella 4: Area (espressa in m²) della copertura fornita dalle piante che hanno raggiunto un più elevato sviluppo fogliare durante il periodo di osservazione. Gli ultimi dati del "Pizzutello" sono mancanti, in quanto la pianta risultava in buona parte coperta dai rami del *Partenocissus Quinquefolia* L. adiacente.

	<i>Partenocissus quinquefolia</i> L. alto dx	<i>Partenocissus quinquefolia</i> L.pendente dx	<i>Partenocissus quinquefolia</i> L. alto sx	<i>Partenocissus Quinquefolia</i> L.basso dx	<i>Vitis vinifera fragaria</i> L.	<i>Vitis vinifera</i> L. cv. "pizzutello"	<i>Vitis vinifera</i> L. cv. "regina"
23mar17	0	0	0	0	0	0	0
10apr17	0.12	0	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03
19apr17	0.35	0	0.23	0.23	0.09	0.14	0.08
10mag17	0.97	0.19	0.72	0.84	0.15	0.22	0.19
31mag17	1.81	0.59	1.83	2.27	0.49	0.63	0.70
07giu17	1.78	0.66	1.92	2.83	0.58	0.56	1.02
20giu17	1.80	0.65	2.59	3.42	1.03	1.06	1.44
06lug17	2.22	0.62	2.82	3.64	1.40	1.63	1.90
20lug17	2.30	0.60	2.80	3.50	1.76	1.88	2.40
31lug17	2.63	0.69	3.19	3.84	1.82	-	2.89
31ago17	2.45	0.70	2.99	3.30	1.83	-	3.09

I dati della NOTA: La Figura sopra riporta la fotografia della parete stessa scattata il 19 aprile alle ore 12.40 e accanto il grafico delle temperature medie nel mese di aprile, estremamente simile a quelli di luglio ed agosto. E' evidente che il sensore interno alla coltre vegetale (non ancora sviluppata!), indicato da una freccia rossa, risulta comunque riparato dall'ombra della struttura metallica, che si proietta sulla parete, mentre il sensore di riferimento (freccia blu) risulta effettivamente esposto al sole.

Tabella 3 sono stati poi interpolati con una semplice curva logistica, in modo da ottenere i parametri caratteristici di ciascuna pianta. La funzione logistica adotta è:

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

Dove $C(t)$ è la copertura fornita dalla pianta, C_{max} è la copertura asintotica massima, τ è il tempo caratteristico di sviluppo e $t_{0.5}$ è il punto di flesso della curva, corrispondente al momento di massima velocità di sviluppo.

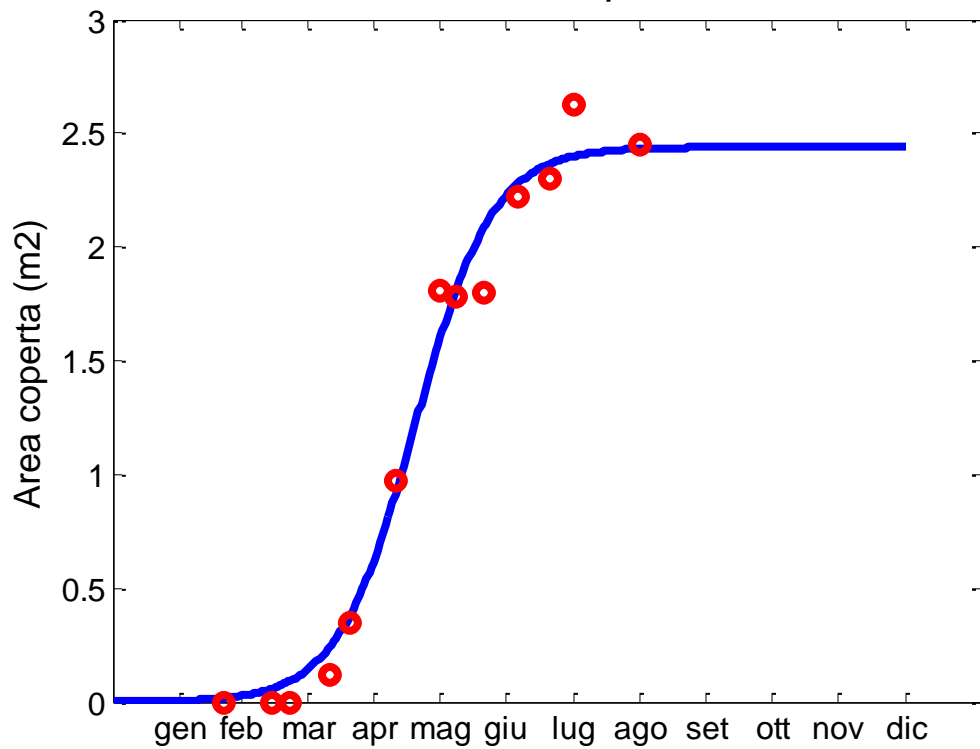
I parametri delle curve logistiche così calcolati sono riportati in Tabella 5, mentre nelle figure da Figura 42 a Figura 45 sono riportate le rispettive curve logistiche.

Tabella 5: Parametri delle curve logistiche calcolate per le sette piante di Figura 41

	<i>Partenocissus Quinquefolia</i> L. alto dx	<i>Partenocissus Quinquefolia</i> L.pendente dx	<i>Partenocissus Quinquefolia</i> L. alto sx	<i>Partenocissus Quinquefolia</i> L.basso dx	<i>Vitis Vinifera</i> <i>Fragaria</i> L.	<i>Vitis Vinifera</i> L. cv. "Pizzutello"	<i>Vitis Vinifera</i> L. cv. "Regina"
C_{max} (m ²)	2.44	0.65	3.03	3.61	1.90	2.46	3.24
τ (gg)	17.8	6.3	14.6	11.1	15.3	19.7	20.2
$t_{0.5}$ (gg)	139	136	147	144	169	176	177

L'osservazione dei grafici delle Figg. 34a-34d mostra che mentre la crescita delle viti si adatta soddisfacentemente al modello logistico, nel caso delle piante di *Quinquefolia* L. sembra registrarsi un arresto dello sviluppo a crescita non ancora ultimata, da addebitarsi presumibilmente ad effetti negativi di tipo tecnico ed operativo.

Partenocissus Quinquifolia L. alto



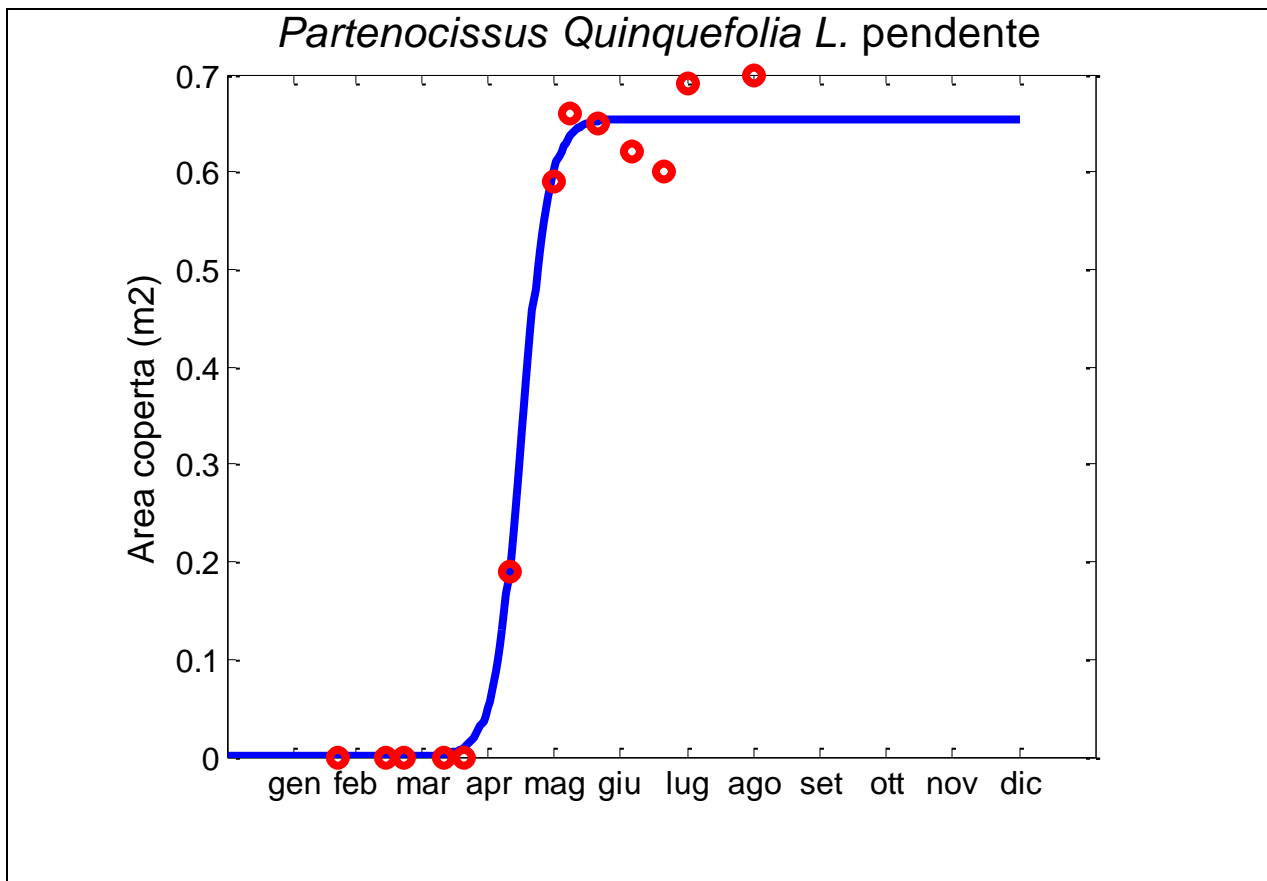


Figura 42: Sviluppo della copertura fornita dalle due piante di *Partenocissus Quinquefolia L.* poste al 2° piano ed interpolazione delle curve logistiche di crescita.

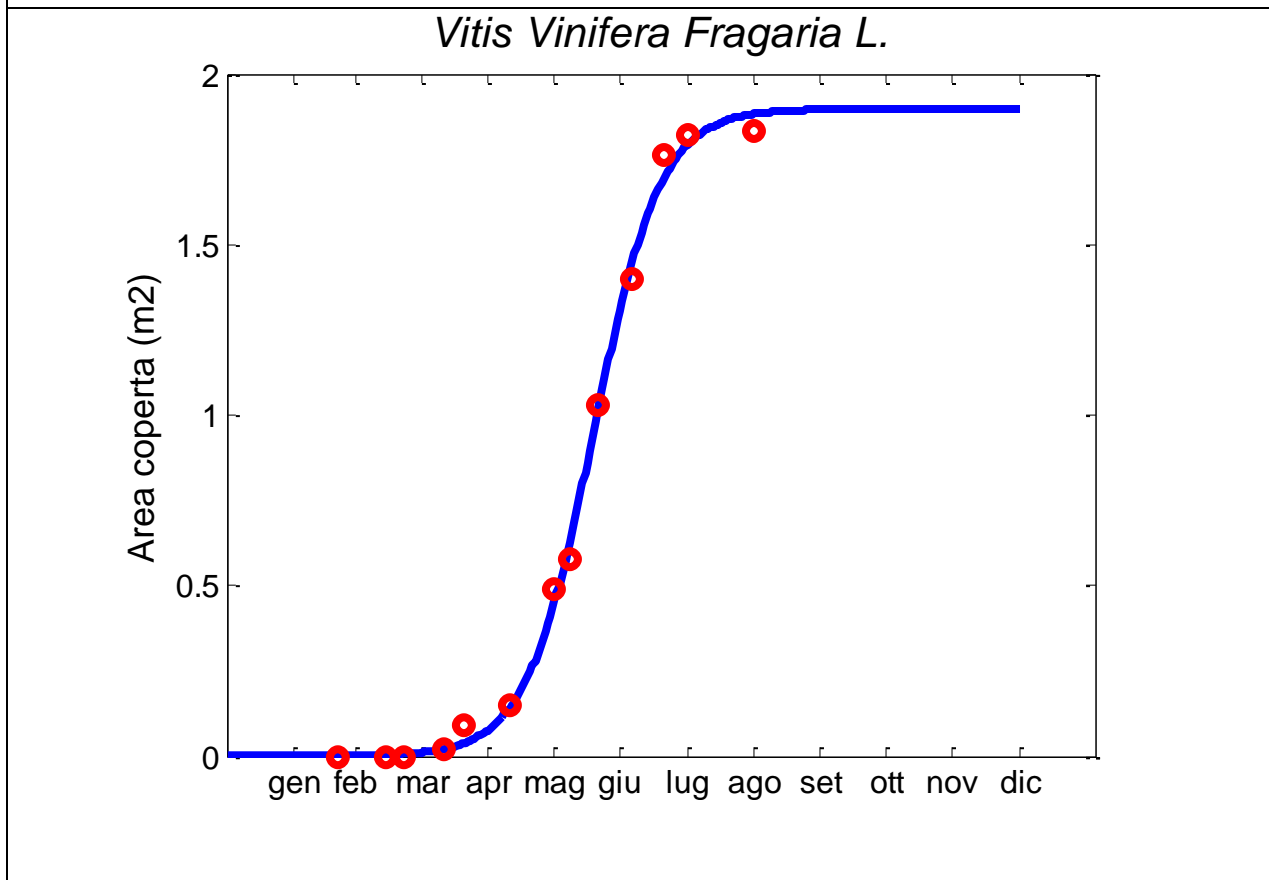
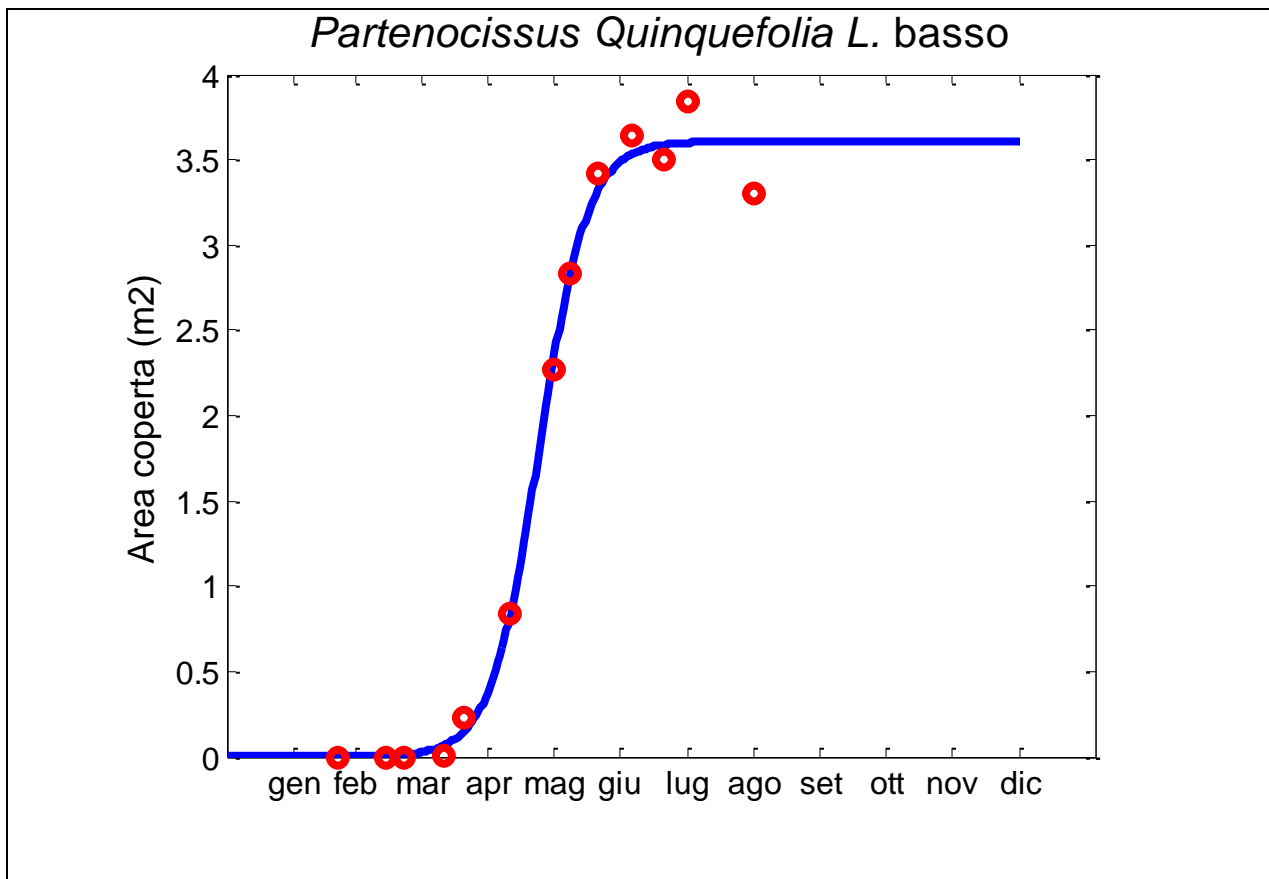


Figura 43: Sviluppo della copertura fornita dalla pianta *Partenocissus Quinquefolia L.* posta al 1° piano e dalla pianta *Vitis Vinifera Fragaria L.* ed interpolazione di curve logistiche di crescita.

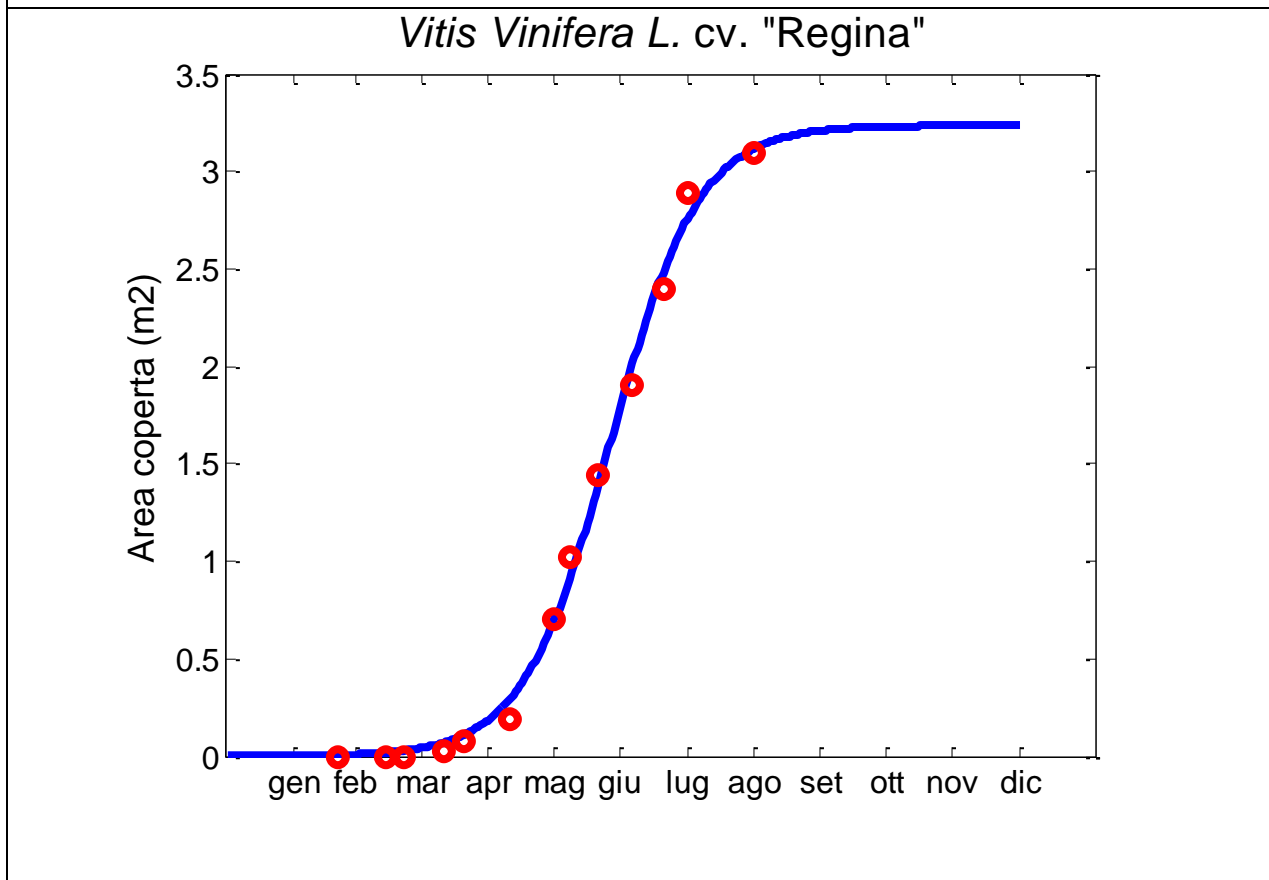
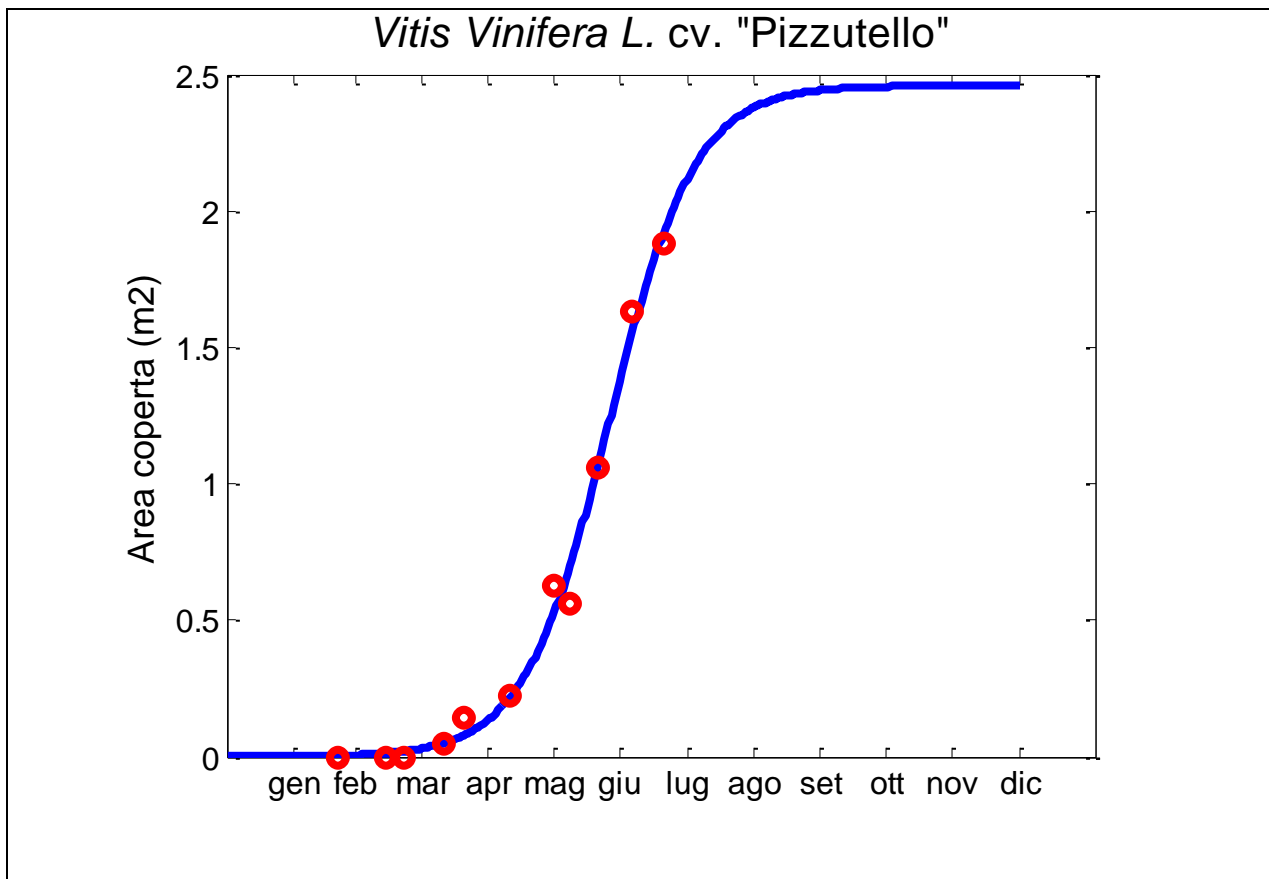


Figura 44: Sviluppo della copertura fornita dalle piante *Vitis Vinifera* L. cv. "Pizzutello" e *Vitis Vinifera* L. cv. "Regina" ed interpolazione di curve logistiche di crescita.

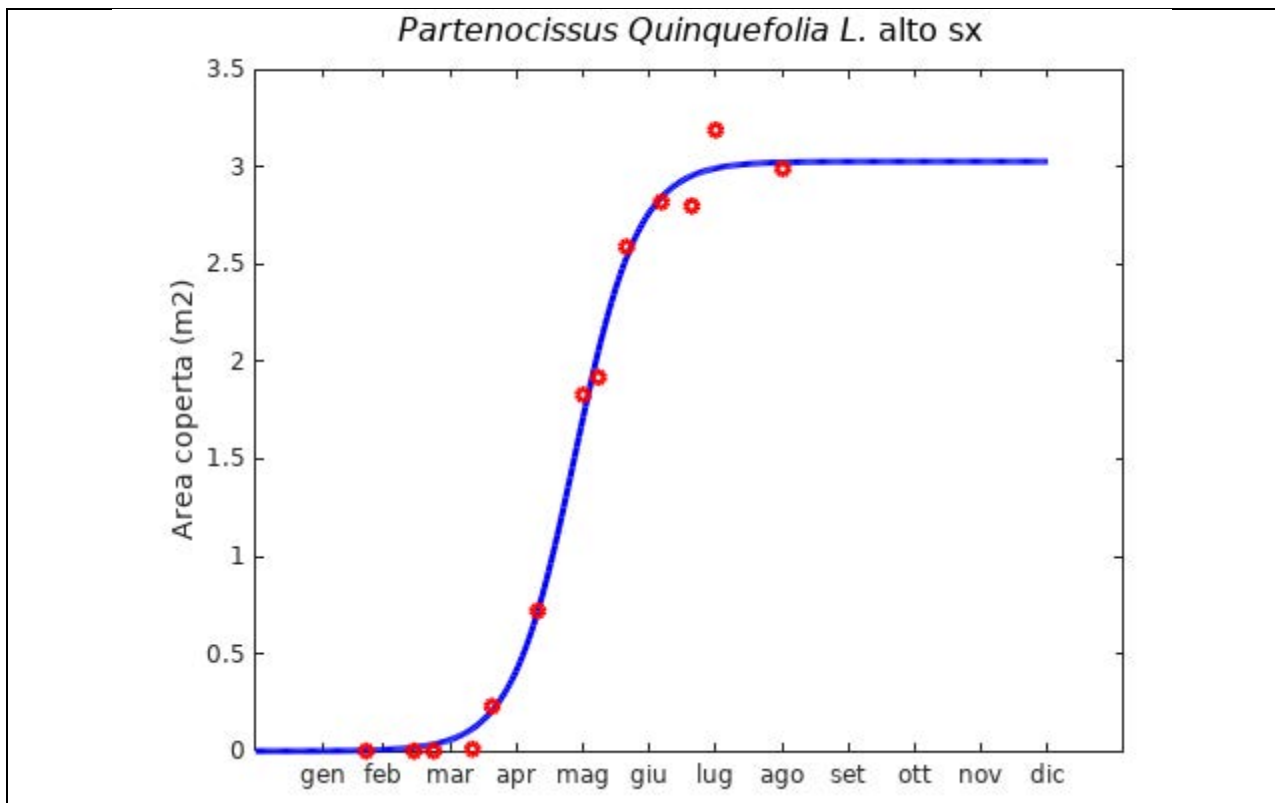


Figura 45: Sviluppo della copertura fornita dalla pianta *Partenocissus Quinquefolia* L. posta sul 2° piano e dalla pianta *Vitis Vinifera* Fragaria L. ed interpolazione di curve logistiche di crescita.

2.8 Risultati e raccomandazioni

Le attività di ricerca effettuate con il PAR 2016 hanno messo in evidenza la potenzialità dei sistemi vegetali nel migliorare il microclima e il comfort degli edifici. Di particolare interesse è risultata la definizione della Costante verde K_v che, sebbene in prima approssimazione, consente una valutazione della potenzialità delle diverse essenze vegetali rispetto alla capacità di diminuire il flusso energetico da parte della parete all'interno degli spazi interni degli edifici. Una forte riduzione è stata osservata in merito alla temperatura superficiale delle pareti dotate di copertura vegetale durante i mesi estivi. Tale osservazione risulta soprattutto conseguente alla forte riduzione della radiazione incidente ad opera della coltre vegetale piuttosto che alla temperatura dell'aria esterne. Un dato significativo ai fini energetici ed ambientali è anche l'aumento dell'umidità relativa dell'aria adiacente l'edificio dimostrativo (all'interno dell'intercapedine tra la coltre vegetale e le pareti dell'edificio) che si è manifestato sulla base di un aumento dell'umidità relativa dell'aria circostante l'edificio dimostrativo. Per quanto riguarda lo studio delle essenze vegetali, effettuato soltanto sulle piante disposte sulla pareti, l'analisi di crescita effettuata mediante rilevamento fotografico ha evidenziato un adattamento e uno sviluppo significativo delle piante alla condizione di allevamento in vaso addossato sulla parete verde. Per quanto riguarda la scelta delle specie vegetali, le Vitaceae hanno mostrato un accrescimento ottimale sia per le condizioni colturali che per le condizioni climatiche. La loro crescita, infatti, sebbene in vaso, è risultata rilevante se consideriamo che nel periodo marzo-agosto hanno raggiunto una copertura di circa 3 m². In generale, tutte le essenze vegetali che sono state utilizzate per la sperimentazione hanno mostrato un adattamento ottimale ai valori climatici che hanno caratterizzato il periodo sperimentale (si sono riscontrati valori di temperatura superiori ai 40 °C). I risultati, sebbene parziali e certamente non sufficienti per una completa definizione dell'influenza dell'elemento verde rispetto agli scambi energetici tra la coltre vegetale, l'atmosfera adiacente e l'edificio dimostrativo, tuttavia hanno reso disponibile una prima analisi conoscitiva sui parametri biologici delle essenze

vegetali in relazione ai parametri microclimatici di maggiore interesse ai fini delle prestazioni energetiche e del comfort degli edifici in regime estivo (ed invernale). Ulteriori ricerche sono necessarie per una valutazione più approfondita non soltanto sui parametri biologici ed energetici ma anche sui consumi di acqua e sulle reazioni biologiche delle piante quando disposte in verticale (parete verde) e/o in orizzontale (tetto-giardino), ai fini del controllo e della caratterizzazione dei flussi termici e della radiazione solare incidente.

3 Microclima degli edifici e comfort abitativo

Per ottenere condizioni di benessere in un ambiente di lavoro occorre garantire condizioni accettabili dal punto di vista microclimatico, della qualità dell'aria, del livello acustico e di illuminazione.

In particolare, nella valutazione del benessere termoigrometrico e dello stress termico il corpo umano può essere considerato come un sistema termodinamico sul quale è possibile fare un bilancio di energia, dato dall'equazione al punto (1):

$$S = M - W - E_{res} - C_{res} - E - C - R - K \quad (1)$$

in cui vengono indicati: con **S** il termine di accumulo di energia per unità di tempo; **M** la potenza sviluppata per attività metabolica; **W** la potenza meccanica dissipata per attività lavorativa; **E** la potenza termica per evaporazione nella traspirazione; **E_{res}** la potenza termica per evaporazione nella respirazione; **C_{res}** la potenza termica scambiata per convezione nella respirazione; **C** la potenza termica scambiata per convezione; **R** la potenza termica scambiata per irraggiamento; **K** la potenza termica scambiata per conduzione.

Come noto, affinché venga assicurato il comfort termico globale, è necessario che il corpo umano rimanga in condizione di equilibrio omeotermo. In tal caso il termine di accumulo **S** deve essere nullo ovvero la potenza ceduta all'ambiente deve essere pari alla potenza generata dai processi metabolici. Dall'equazione di bilancio, esplicitando tutti i termini, l'equazione di benessere risulta una funzione di:

$$S = f(M, I_{cl}, t_a, t_{mr}, v_a, UR) \quad (2)$$

Dalla relazione al punto (2) i parametri che determinano le condizioni di benessere, influenzando gli scambi termici tra individuo e ambiente, sono sei.

Di queste, due sono strettamente riferite all'uomo:

- il dispendio metabolico **M** (correlato all'attività svolta);
- la resistenza termica conduttiva **I_{cl}** ed evaporativa del vestiario.

Le altre quattro fanno riferimento alle condizioni ambientali:

- la temperatura dell'aria ambiente, **t_a** (che influenza gli scambi termici convettivi);
- la temperatura media radiante, **t_{mr}** (che influenza gli scambi termici radiativi);
- la velocità relativa dell'aria, **v_a** (che influenza gli scambi termici convettivi);
- l'umidità relativa dell'aria, **U.R.** (che influenza lo scambio evaporativo dal corpo).

Poiché l'edificio, oggetto di studio, non risulta abitato, non sono stati esaminati i parametri relativi al metabolismo energetico e alle proprietà termofisiche dell'abbigliamento, mentre sono stati considerati quelli relativi all'ambiente.

Dei 4 parametri fisico-ambientali indicati nell'elenco sopra riportato, l'unico del quale si dispone di dati monitorati è quello della temperatura dell'aria (**T_a**), vista l'assenza di sensori per il rilevamento della velocità e dell'umidità dell'aria dell'ambiente interno, e di un globotermometro per la valutazione della temperatura media radiante.

In particolare per quanto riguarda la determinazione della temperatura media radiante (**T_{mr}**) si è tenuto conto dell'equazione al punto (3) in cui essa risulta come media pesata delle temperature superficiali interne delle pareti:

$$T_{mr} = \frac{-\sum_p T_p * S_p}{\sum_p S_p}$$

(3) in cui il termine “p” è un pedice riferito alla parete, “S” ne è la sua superficie e “T” la temperatura superficiale interna.

Essendo tale correlazione affidabile per locali che non presentino gravi dissimmetrie termiche e dal momento che gli ambienti considerati in questa ricerca sono tali, questa può essere applicata.

Poiché come precedentemente detto la temperatura media radiante, è considerata funzione delle temperature superficiali interne (T_{si}) delle pareti, si è indagato sull’andamento delle temperature superficiali interne monitorandole attraverso un sistema di termocoppie (M2 e M3) come di seguito spiegato e delle eventuali correlazioni tra queste stesse, le temperature superficiali esterne delle pareti, la temperatura ambiente esterno, nonché dell’irraggiamento e la velocità del vento.

Della temperatura dell’aria (T_a), si dispone di dati monitorati per tutto l’anno solare, mentre per le temperature superficiali interne si dispone dei dati monitorati dal 15 al 30 settembre ma il sistema di monitoraggio OLINDA (Figura 11) ha avuto un problema tecnico per cui non ha registrato nessun dato dal 19 settembre al 10 ottobre a causa di un guasto elettrico.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno presentare tutti i grafici delle temperature e tutte le elaborazioni nel periodo compreso tra il 15 e 19 settembre, in cui i dati sperimentali sono completi.

Sono state confrontate le temperature rilevate in presenza della parete verde (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) con quelle rilevate in assenza della parete verde (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) per valutare la congruenza con gli indici di comfort e discomfort stabiliti dalla Norma UNI EN ISO 7730:2006.

Tabella 6: Schema della denominazione dei sensori installati sulla parete verde dell’F92.

	MURO CON PARETE VERDE
Temperatura Superficiale Esterna	TS01 e TS03
Temperatura Esterna Intercapedine	AT03 e AT05
Temperatura Superficiale Interna	M3
Temperatura Interna	Stazione meteo ENEA

Tabella 7: Schema della denominazione dei sensori installati sulla parete dell’F92 senza parete verde.

	MURO SENZA PARETE VERDE
Temperatura Superficiale Esterna	TS05
Temperatura Esterna	AT01
Temperatura superficiale interna	M2

Contemporaneamente durante questa annualità è iniziato lo studio per lo sviluppo di un modello di sistemi verdi con l’obiettivo di realizzare uno strumento in grado di valutare i benefici e le prestazioni di questi sistemi su varie tipologie di edifici. Sulla base della sensoristica a disposizione si è proceduto alla validazione dell’algoritmo per il calcolo della temperatura superficiale interna.

Nella prossima annualità si provvederà a dotare l'edificio di ulteriori sensori utili per l'acquisizione dei dati e la valutazione dei parametri per implementare l'equazione della temperatura media radiante di cui al punto (3).

3.1 Il comfort microclimatico per effetto di pareti verdi

La valutazione del microclima interno è definita, secondo quanto riportato nella Norma UNI EN ISO 7730:2006, da opportuni indici di comfort (PMV e PPD) che sono funzione delle variabili prima descritte e che prevedono un intervallo di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali secondo quanto riportato in Tabella 8.

Quantità	Simbolo	Intervallo utile	Unità di misura
temperatura dell'aria	t_a	+10 ÷ +30	°C
temperatura media radiante	t_r	+10 ÷ +40	°C
pressione parziale del vapore acqueo	p_a	0 ÷ 2700	Pa
velocità relativa dell'aria	v_{ar}	0 ÷ 1	m/s
attività o dispendio metabolico	M	0,8 ÷ 4	met
isolamento termico del vestiario	I_{cl}	0 ÷ 2	clo

Tabella 8: Intervalli di applicabilità dei parametri ambientali ed individuali nella valutazione del PMV

Dei parametri indicati in Tabella 8 si è potuto verificare il solo andamento della temperatura dell'aria dell'ambiente interno dal momento che non si disponeva di ulteriori sensori; come si evince dal grafico in Figura 46 e si nota dalla Tabella 9, le temperature dell'aria dell'ambiente interno non scendono mai sotto i 23°C e non salgono mai sopra i 26°C; quindi nei giorni compresi tra il 15 e il 19 settembre 2017, periodo della nostra campagna, la condizione di comfort è sempre garantita.

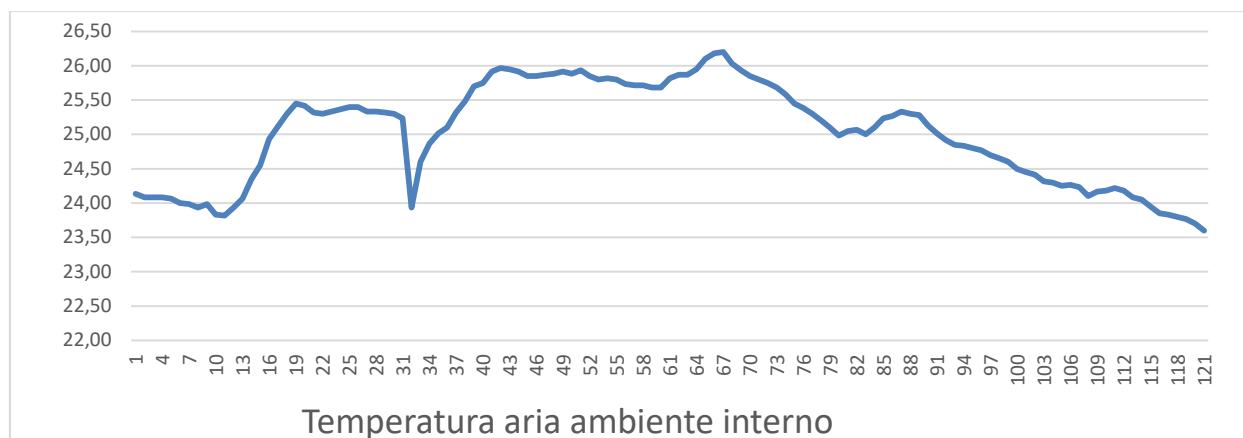


Figura 46: Temperatura aria ambiente interno

Tabella 9: valore medio, massimo, minimo della temperatura ambiente interno

temperatura ambiente interno	
valore medio	25,02
valore massimo	26,20
valore minimo	23,60

I parametri relativi alla velocità ed umidità dell'aria, e quelli della temperatura media radiante, come già detto, saranno oggetto di analisi della prossima annualità; mentre si è potuto indagare sul comportamento delle temperature superficiali interne (T_{si}) grazie all'installazione effettuata delle due

termocoppie M2 e M3 e verificarne quindi la congruenza con i range indicati nella stessa norma UNI EN ISO 7730:2006 relativamente a situazioni di discomfort.

Nello specifico la norma propone quattro casi di discomfort da asimmetria radiante, e cioè:

- Soffitto caldo, valido per temperatura radiante asimmetrica $>23^{\circ}\text{C}$
- Parete fredda, valido per temperatura radiante asimmetrica $<15^{\circ}\text{C}$
- Soffitto freddo, valido per temperatura radiante asimmetrica $<15^{\circ}\text{C}$
- Parete calda, valido per temperatura radiante asimmetrica $>35^{\circ}\text{C}$

Dall'analisi e dall'elaborazione dei dati misurati nel periodo oggetto di indagine (15-19 settembre 2017) si è riscontrato che i valori medio, minimo e massimo delle temperature superficiali interne della parete esposta a sud-ovest soggetta e non agli effetti della coltre vegetale, riportate in Tabella 10, possono essere ritenute accettabili nei termini di comfort microclimatico, visto che la norma definisce come situazione di discomfort una parete fredda se quest'ultima si presenta con una temperatura superficiale inferiore a 15°C e una parete calda se si presenta con temperatura superficiale superiore ai 35°C .

Tabella 10: valori medio, minimo e massimo delle temperature superficiali interne

	M3 (PV)	M2 (No_PV)
valore medio	24,83	24,80
valore massimo	25,96	26,00
valore minimo	23,34	23,30

Il grafico riportato in Figura 47 evidenzia il completo andamento delle temperature superficiali interne monitorate nel periodo compreso tra il 15 ed il 19 settembre 2017, confermando quanto si evince dai valori in Tabella 10.

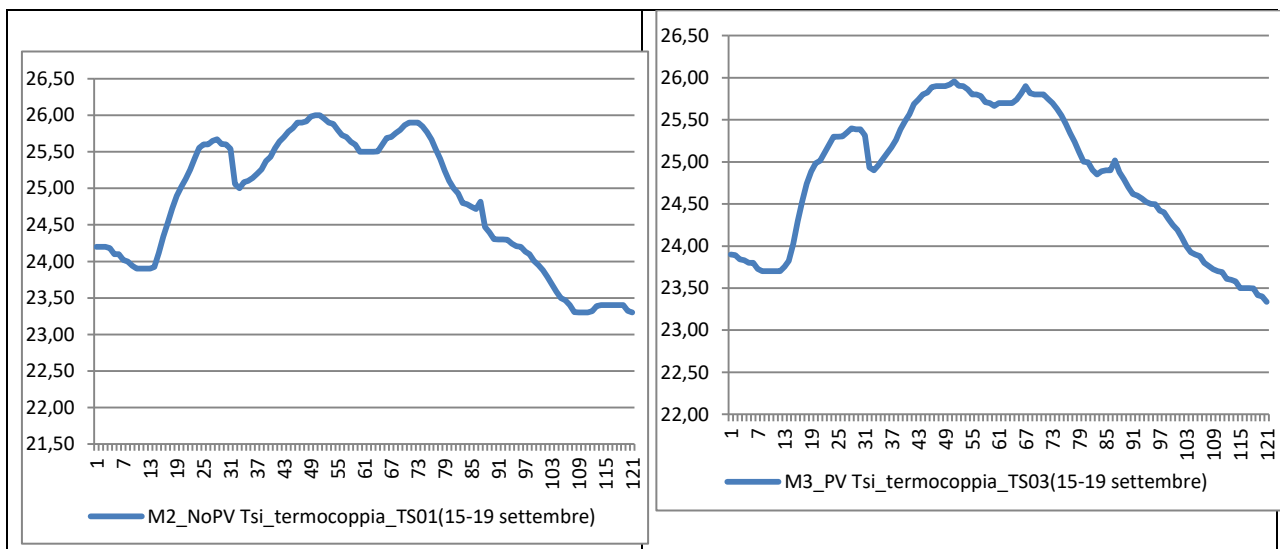


Figura 47: valori delle temperature superficiali interne Tsi, soggette e non alla coltre vegetale, non rientranti in situazioni di discomfort

3.2 L'edificio e le sue caratteristiche prestazionali

L'edificio sul quale sono stati effettuati studi, analisi e monitoraggi di dati ambientali sia esterni che interni e conseguenti valutazioni è, come precedentemente detto, l'edificio sito nell'area capanna del Centro Ricerche Casaccia ENEA, denominato F92 "scuola delle Energie".

Esso si sviluppa su quattro livelli, ognuno dei quali occupa una superficie di circa 130 mq.

La struttura, discostandosi dalle “ordinarie” costruzioni del tempo, risulta essere realizzata con materiali prestazionali e soluzioni tecnologiche innovative, tali da presentare un valore di trasmittanza termica del pacchetto opaco verticale pari a $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

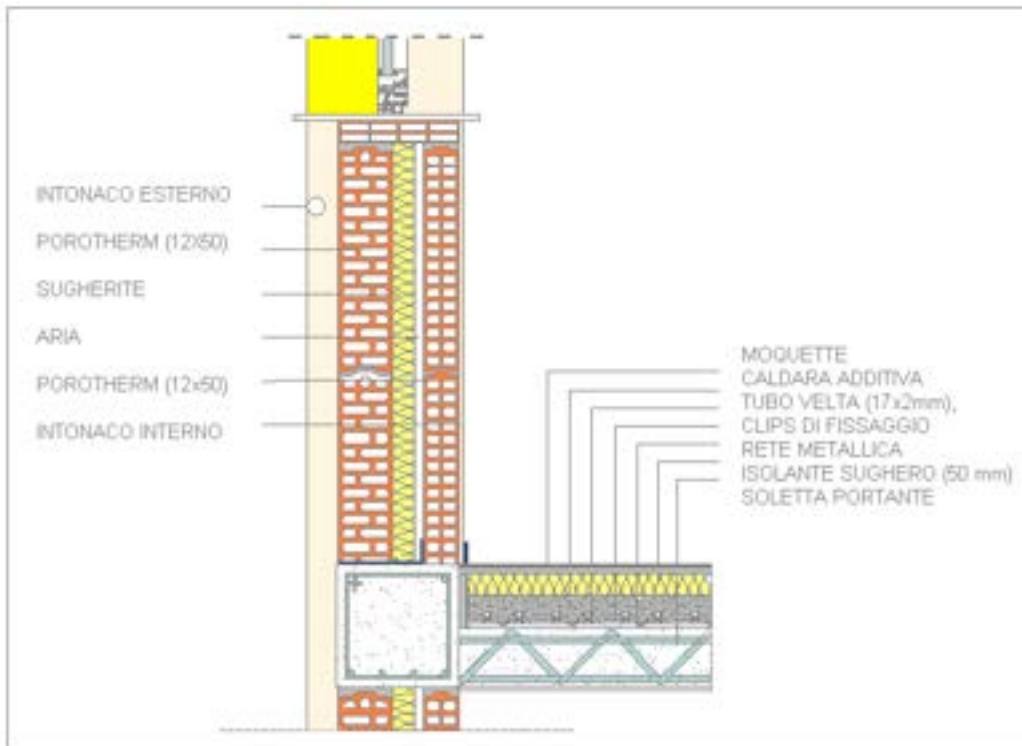


Figura 48: schema esemplificativo della sezione del pacchetto edilizio in uso.

I materiali considerati per la configurazione del pacchetto edilizio sono quelli riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**; in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportate le caratteristiche termo fisiche utilizzate per il calcolo della trasmittanza termica secondo la Normativa vigente.

Tabella 11: schema del pacchetto edilizio secondo UNI EN ISO 6946:2008

Parete esterna opaca F92 (calcolo da Norma 6946)									
	s	λ	ρ	cs	massa frontale	resistenza	R _{si}	R _{se}	trasmittanza
	(m)	(W/mK)	(Kg/m ³)	(kJ/kg K)	(Kg/m ²)	(m ² K/W)	(m ² K/W)	(m ² K/W)	(W/m ² K)
							0,13		
INTONACO interno in gesso	0,02	0,35	1200	1	24	0,06			
pannelli alveolari POROTHERM	0,08	0,265	700	0,84	56	0,30			
SUGHERITE	0,06	0,040	145	0,18	8,7	1,52			
CAMERA D'ARIA (2cm)	0,02		1,3	1	0,026	0,175			
pannelli alveolari POROTHERM	0,12	0,265	700	0,84	84	0,45			
INTONACO esterno premiscelato iso	0,03	0,050	280	1	8,40	0,60		0,04	
TOTALE	0,33				416,206	3,11			0,305

Le giaciture sulle quali è stato progettato e realizzato il sistema verde verticale sono quelle poste in direzione sud-est e sud-ovest. (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**)

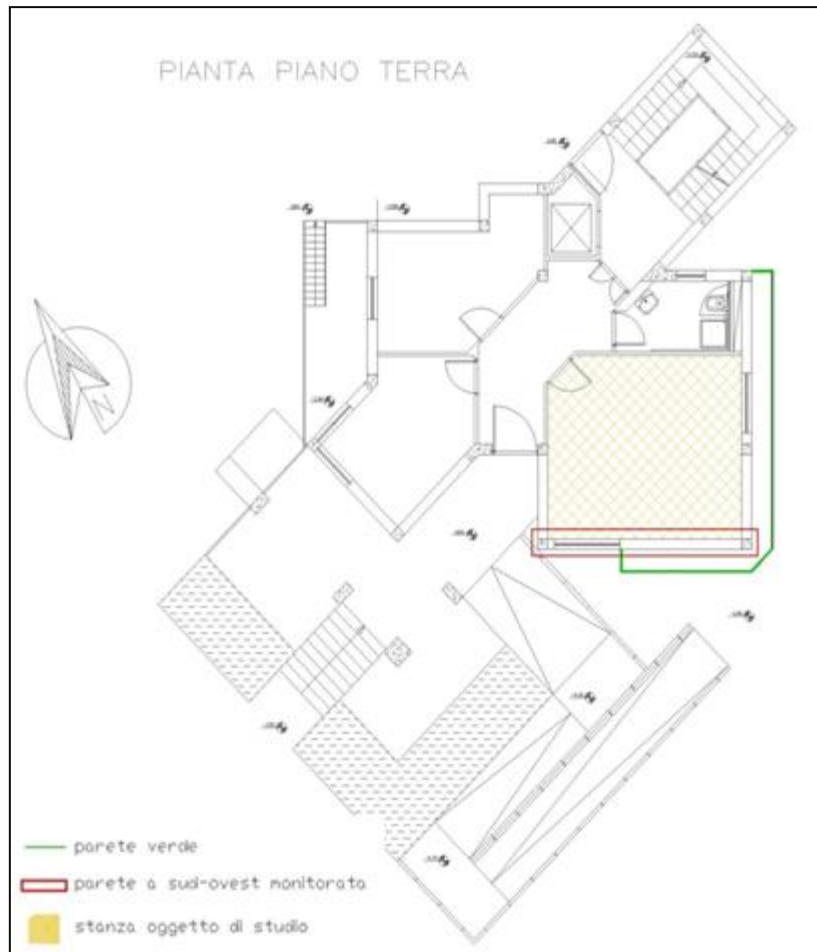


Figura 49: Pianta del primo piano dell'edificio e schema del sistema di verde verticale

3.3 Valutazione del comfort microclimatico dell'edificio F92

I parametri sui quali si è indagato, e che poi sono stati confrontati con quelli di calcolo, hanno riguardato la parete verticale esposta a sud-ovest, sulla quale una parte della superficie opaca dell'edificio risulta coperta dal sistema di verde verticale, mentre una parte no.

I dati monitorati riguardano sia le superfici interessate dalla parete verde che quelle completamente scoperte; tale condizione ci ha permesso di fare dovute valutazioni e confronti.

I dati per l'elaborazione del presente studio sono stati rilevati, come indicato in Figura 11, attraverso un sistema di sensori posti all'esterno dell'edificio F92; i dati rilevati da ogni misuratore vengono registrati e poi inviati sul web ad un portale virtuale denominato OLINDA (vedi paragrafo 2.3).

Del periodo compreso nell'intervallo considerato, alcuni dei dati raccolti sono risultati carenti in quanto la strumentazione di misura non ha registrato in modo omogeneo tutte le temperature; come si può notare dalla Figura 50 i dati relativi ad alcune ore risultano mancanti, per cui è stato necessario fare delle medie tra 2 misure per cercare di avere dei dati che non assumessero dei valori nulli (pari a zero) che invalidassero tutti gli andamenti con dei valori palesemente sbagliati.

		AT01_Avg (T amb est)	AT01_Avg (T amb est) <u>valore mancante</u>	AT03_Avg (T refintercapedine)	AT03_Avg (T refintercapedine) <u>valore mancante</u>	TS01_Av g	TS01_Avg <u>valore mancante</u>	TS05_Av g	TS05_Avg <u>valore mancante</u>
2	Timestamp	No_PV	No_PV	PV	PV	PV	PV	No_PV	No_PV
4		°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
438	2017-09-19 01:00:00	15,06	15,06	15,53	15,53	16,65	16,65	16,78	16,78
439	2017-09-19 02:00:00	14,71	14,71	15,17	15,17	16	16	16,12	16,12
440	2017-09-19 03:00:00	14,71	14,71	15,02	15,02	15,64	15,64	15,64	15,64
441	2017-09-19 04:00:00	14,85	14,85	15,25	15,25	15,45	15,45	15,38	15,38
442		15,32		15,425		15,3775		15,3825	
443		15,79		$\frac{(0,881+0,441)}{2}$		15,305		15,385	
444		16,26		15,775		15,2325		15,3825	
445	2017-09-19 08:00:00	16,73	16,73	15,95	15,95	15,16	15,16	15,39	15,39
446	2017-09-19 09:00:00	18	18	17,07	17,07	16	16	16,53	16,53
447	2017-09-19 10:00:00	18,89	18,89	18,49	18,49	17,8	17,8	18,8	18,8
448	2017-09-19 11:00:00	19,33	19,33	19,35	19,35	19,8	19,8	21,8	21,8
449	2017-09-19 12:00:00	20,54	20,54	20,76	20,76	21,56	21,56	30,08	30,08
450	2017-09-19 13:00:00	20,97	20,97	20,99	20,99	23,95	23,95	35,16	35,16
451	2017-09-19 14:00:00	21	21	21,37	21,37	29,11	29,11	36,36	36,36
452	2017-09-19 15:00:00	20,47	20,47	20,8	20,8	25,15	25,15	30,91	30,91
453	2017-09-19 16:00:00	19,87	19,87	20,16	20,16	24,05	24,05	28,71	28,71
454	2017-09-19 17:00:00	19,15	19,15	19,07	19,07	21,9	21,9	24,67	24,67
455	2017-09-19 18:00:00	18,58	18,58	18,5	18,5	19,94	19,94	21,22	21,22

Figura 50: Dati di monitoraggio delle temperature con valori mancanti e medie tra due misure

Abbinato al sistema fisso, sono stati affiancati dei sensori “mobili”, costituiti da termocoppie e un data-logger per il rilevamento della temperatura superficiale interna.

Le due termocoppie, M2 ed M3, sono state installate sulla superficie interna dell’edificio ed in corrispondenza, rispettivamente, dei sensori TS05 e TS01, installati sulla superficie esterna dell’edificio.

In Figura 51 è indicato il posizionamento dei sensori delle temperature superficiali, esterno (TS01) ed interno (M3), in corrispondenza tra di loro.



Figura 51: sistema di monitoraggio termocoppie + datalogger

I dati sono stati prelevati di volta in volta manualmente, in formato excell, e successivamente uniformati a quelli presenti sul sistema OLINDA, per poter essere elaborati.

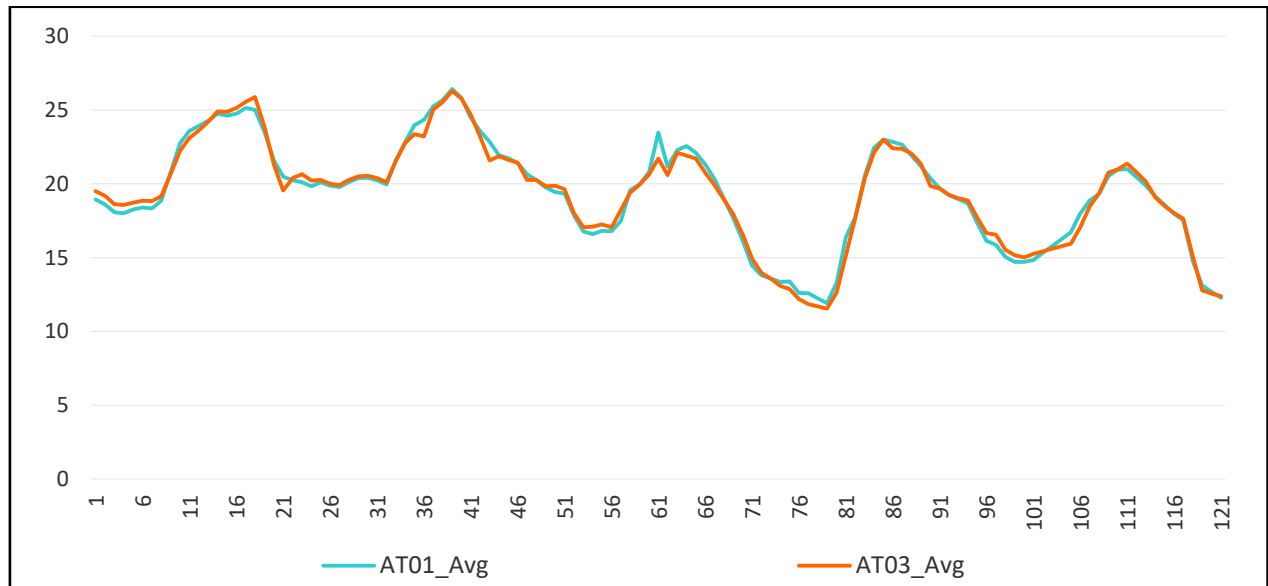


Figura 52: Andamento delle temperature esterne

In **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata. sono riportati gli andamenti delle temperature esterne, sia quelle soggette agli effetti della parete verde (AT03) che quelle non influenzate dalla stessa (AT01).

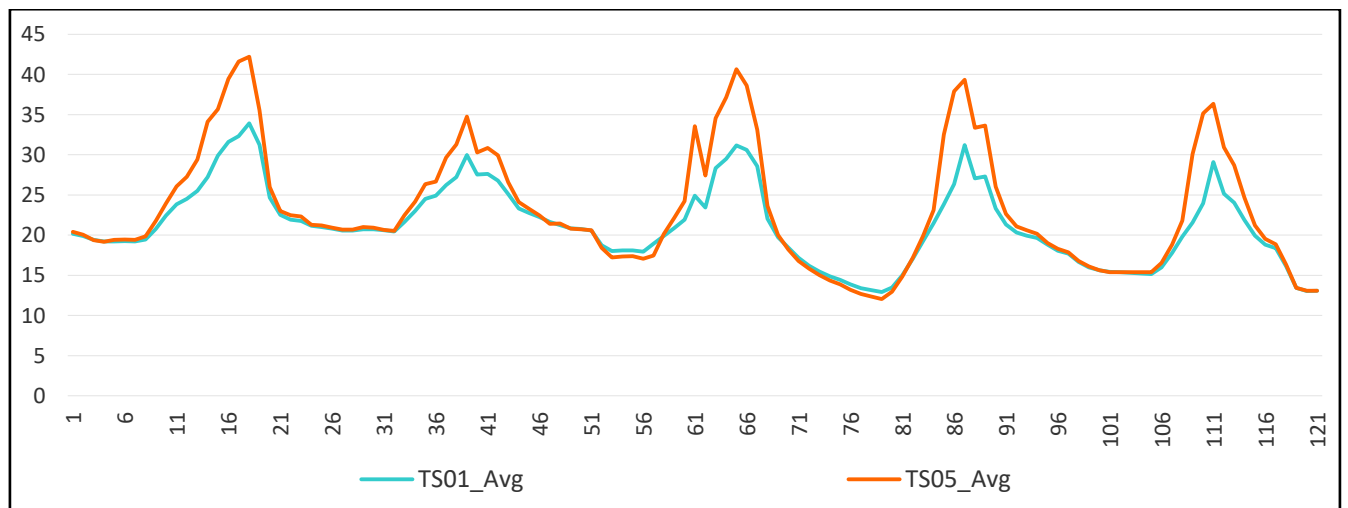


Figura 53: Andamento delle temperature superficiali esterne dell'edificio

In **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata. sono riportati gli andamenti delle temperature superficiali esterne dell'edificio, dove TS01 corrisponde alla temperatura superficiale esterna rilevata dal sensore installato dietro la parete verde ma più in prossimità della finestra, mentre TS05 è la temperatura superficiale esterna non influenzata dagli effetti della coltre vegetale.

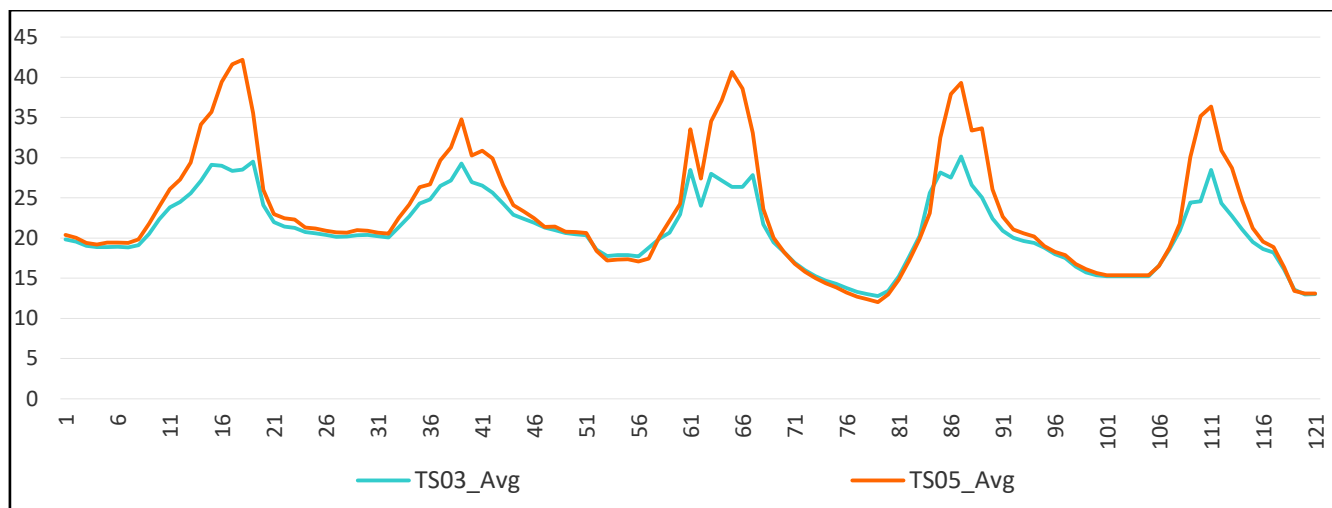


Figura 54: Andamento delle temperature superficiali esterne dell'edificio

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati gli andamenti delle temperature superficiali esterne dell'edificio, dove TS03 corrisponde alla temperatura superficiale esterna rilevata dal sensore installato dietro la parete verde ma più internamente, mentre TS05 è la temperatura superficiale esterna non influenzata dagli effetti della coltre vegetale.

Come si nota dalle due figure, sebbene i sensori TS01 e TS03 siano stati installati dietro la parete verde e posti ad una distanza tra di loro non elevata (meno di 2 metri), gli andamenti rilevati risultano differenti, presumibilmente per effetto dei moti convettivi che si generano all'interno dell'intercapedine tra la parete verde e la parete dello stesso edificio. Verifica questa che non è stata possibile effettuare dal momento che non si disponeva di alcun sensore predisposto al rilevamento della velocità del vento all'interno dell'intercapedine stessa. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono evidenziate le differenze tra i due andamenti delle temperature superficiali esterne rilevati dai sensori posti dietro la parete verde.

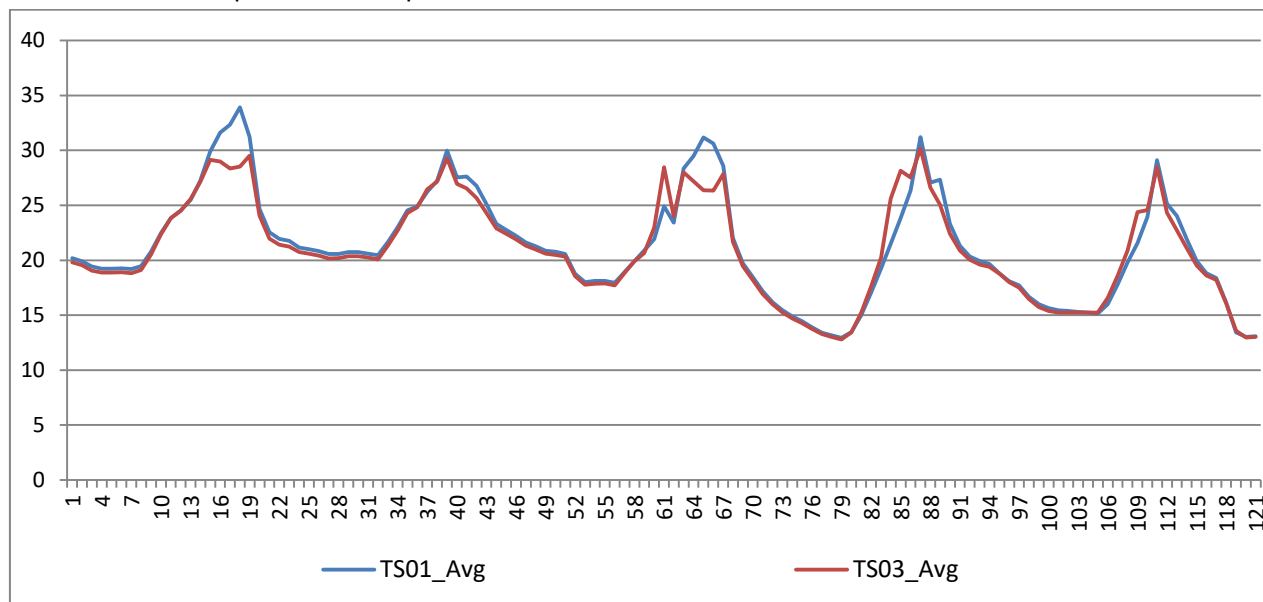


Figura 55: Andamento delle temperature superficiali esterne dietro la parete verde

Partendo dal presupposto che le pareti verdi rappresentano un sistema complesso e multivariato 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 che i parametri termofisici che caratterizzano le pareti degli edifici quali massa, densità, resistenza termica, eccetera,

variano in funzione dello sviluppo e della stagionalità delle piante, nonché delle condizioni climatiche esterne e dei parametri ambientali che caratterizzano il sito, la valutazione del comfort indoor non può prescindere da un'analisi combinata di tutti questi fattori al fine di stimare le reali prestazioni dell'edificio oggetto di analisi e stabilire quali relazioni intercorrono tra i diversi parametri termici, agronomici e tecnologici per l'ottimizzazione del sistema.

Ciò è risultato evidente avendo analizzato l'equazione del flusso termico non entrante per effetto della parete verde:

$$\frac{\Delta\phi}{A} = U \frac{K_v I}{h_e} \quad (4)$$

dove:

U è la trasmittanza termica dell'elemento opaco;

K_v è la costante verde;

I è la radiazione solare incidente sulla superficie esterna;

h_e è il coefficiente di scambio convettivo.

In cui la costante verde K_v è data dall'equazione:

$$K_v = \frac{T_{se} - T_{sev}}{T_{se} - T_{ae}} \quad (5)$$

dove:

T_{se} è la temperatura superficiale della parete opaca non soggetta agli effetti della coltre vegetale

T_{sev} è la temperatura superficiale della parete opaca non soggetta agli effetti della coltre vegetale

T_{ae} è la temperatura dell'ambiente esterno.

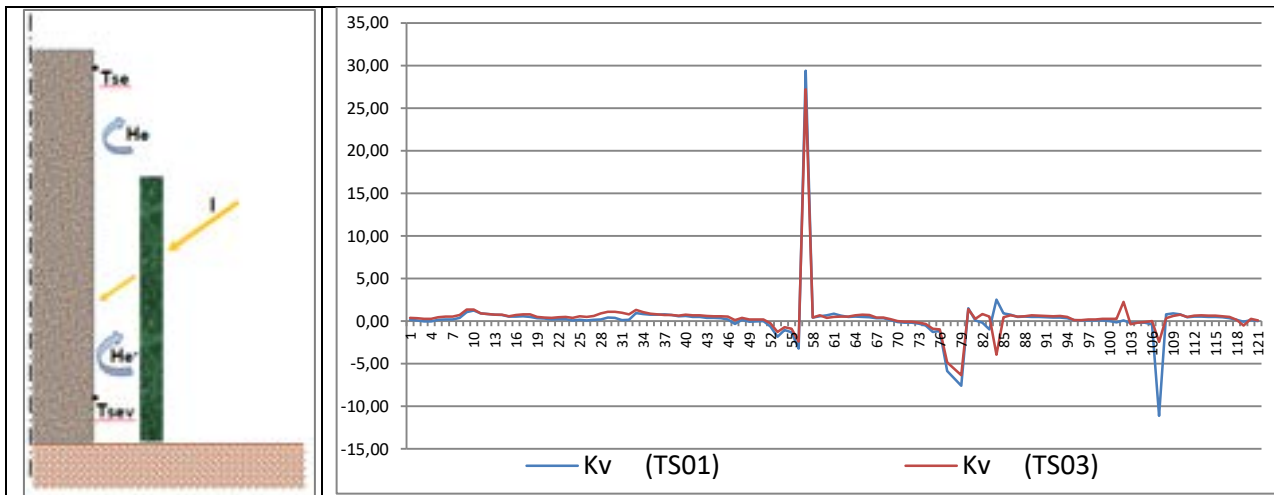


Figura 56: schematizzazione parametri per la valutazione della costante verde (K_v) ed andamento della stessa.

Nel grafico riportato a destra della Figura 56 è riportato l'andamento della costante verde, determinata con la relazione (5) in funzione delle misure delle temperature T_{se} , T_{sev} , e T_{ae} monitorate nel periodo compreso tra il 15 e il 19 settembre del 2017 relativamente alla parete esposta a sud-ovest ed in corrispondenza dei sensori TS05, TS01 e TS03, AT01.

Inoltre, come si evince dallo schema di sinistra della stessa **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, nella valutazione della costante verde (K_v) entrano in gioco, oltre alla temperatura dell'ambiente esterno (T_{ae}), anche le temperature superficiali esterne dell'elemento opaco, sia soggette che non agli effetti della coltre vegetale, rispettivamente T_{sev} e T_{se} , che ovviamente risentono sia dell'effetto della radiazione solare incidente (I), ma anche degli effetti dei moti convettivi (He e He^*), che in maniera indiretta si ripercuotono sul valore delle temperature stesse.

Da un'analisi effettuata su studi presenti in letteratura, si è riscontrato che alcuni di questi ritengono significativo il calcolo del coefficiente liminare esterno (Mazzali et al. 2013), in quanto la presenza del manto vegetale influisce sullo scambio convettivo tra la parete e l'ambiente esterno (Perini et al. 2011).

Lo scambio convettivo diventa quindi un parametro efficace per esprimere il comportamento del sistema parete quando il rivestimento esterno è costituito da un verde verticale.

Motivo, questo, che ha condotto la nostra ricerca ad approfondire l'andamento dei flussi energetici per effetto dei moti convettivi, considerando:

$$H_e = h_c + h_r \quad (6)$$

dove:

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

$$h_c = 4 + 4v \quad (7)$$

dove:

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

e

$$h_r = \varepsilon * h_{ro} \quad (8)$$

dove:

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

$$h_{ro} = 4 * \sigma * T_m^3 \quad (9)$$

σ è la costante di Stefan-Boltzmann pari a $5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
 T_m è la temperatura termodinamica media della superficie e delle superfici limitrofe

Tabella 12: valori di h_r risultanti da algoritmo implementato e su base di dati monitorati

Data e Ora	ε	$h_r = \varepsilon * h_{ro}$ (con $h_{ro} = 4 * \sigma (T_m^3)$)	σ	TS03_Avg	TS05_Avg
			$\text{W/m}^2\text{K}^4$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
2017-09-15 00:00:00	0.96	0.001772	5.67E-08	19.82	20.41
2017-09-15 01:00:00	0.96	0.001689	5.67E-08	19.54	20.05
2017-09-15 02:00:00	0.96	0.001546	5.67E-08	19.05	19.39
2017-09-15 03:00:00	0.96	0.001500	5.67E-08	18.87	19.19
2017-09-15 04:00:00	0.96	0.001528	5.67E-08	18.87	19.42
2017-09-15 05:00:00	0.96	0.001535	5.67E-08	18.9	19.45
2017-09-15 06:00:00	0.96	0.001521	5.67E-08	18.82	19.41
2017-09-15 07:00:00	0.96	0.001609	5.67E-08	19.12	19.84
2017-09-15 08:00:00	0.96	0.002057	5.67E-08	20.5	21.78
2017-09-15 09:00:00	0.96	0.002700	5.67E-08	22.34	23.95
2017-09-15 10:00:00	0.96	0.003382	5.67E-08	23.82	26.08
2017-09-15 11:00:00	0.96	0.003776	5.67E-08	24.5	27.27
2017-09-15 12:00:00	0.96	0.004523	5.67E-08	25.57	29.41
2017-09-15 13:00:00	0.96	0.006257	5.67E-08	27.13	34.13
2017-09-15 14:00:00	0.96	0.007405	5.67E-08	29.13	35.67
2017-09-15 15:00:00	0.96	0.008725	5.67E-08	29	39.44
2017-09-15 16:00:00	0.96	0.009319	5.67E-08	28.35	41.61
2017-09-15 17:00:00	0.96	0.009626	5.67E-08	28.53	42.19

Come si deduce da quanto riportato in Tabella 12 poiché dall'elaborazione dei dati misurati delle temperature superficiali della parete sud-ovest risulta che il valore della T_m moltiplicato per il valore della " σ " pari a $5.67 * 10^{-8}$ è approssimabile allo zero, consegue che sia nullo anche il valore del

coefficiente h_{ro} al punto (9) e quindi anche quello relativo al coefficiente h_r al punto (8), motivo questo che ha condotto ad approfondire l'algoritmo relativamente al solo coefficiente di convezione h_c (7).

Poiché il valore di h_c (vedi Tabella 13) nell'equazione al punto (7) è funzione della velocità del vento v , di cui si dispone però solo dei dati relativi alla velocità del vento di tipo ambientale (WS_Mean) e non di quella relativa all'intercapedine tra la parete verde e l'edificio, si rimanda alla successiva annualità l'implementazione del suddetto algoritmo.

Tabella 13: calcolo del coefficiente h_c

Data e Ora	WS_Mean	$h_c = (4+4v)$
2017-09-15 00:00:00	0.599	6.40
2017-09-15 01:00:00	0.805	7.22
2017-09-15 02:00:00	0.785	7.14
2017-09-15 03:00:00	0.469	5.88
2017-09-15 04:00:00	0.613	6.45
2017-09-15 05:00:00	0.794	7.18
2017-09-15 06:00:00	0.607	6.43
2017-09-15 07:00:00	0.477	5.91
2017-09-15 08:00:00	0.955	7.82
2017-09-15 09:00:00	2.097	12.39
2017-09-15 10:00:00	2.605	14.42
2017-09-15 11:00:00	2.778	15.11
2017-09-15 12:00:00	3.269	17.08
2017-09-15 13:00:00	3.548	18.19
2017-09-15 14:00:00	3.8	19.20
2017-09-15 15:00:00	3.234	16.94
2017-09-15 16:00:00	2.788	15.15
2017-09-15 17:00:00	2.767	15.07

Per questo si è progettato per la successiva annualità di installare nuovi sensori sia sulla parte di superficie opaca soggetta agli effetti della coltre vegetale che sulla parte non interessata dagli stessi, in modo tale da disporre dei suddetti dati di velocità del vento, per poter analizzare i conseguenti andamenti delle temperature superficiali esterne dell'edificio e valutarne l'attendibilità confrontando le temperature superficiali interne T_{si} con i dati monitorabili attraverso nuove termocoppie interne.

Ciò consentirebbe inoltre, considerando gli aspetti legati alle equazioni del bilancio termico degli edifici in regime transitorio, di determinare i valori delle temperature superficiali interne (T_{si}) delle pareti opache soggette e non agli effetti della coltre vegetale, attraverso l'equazione riportata al punto (10) che tiene conto degli effetti convettivi relativi alla definizione del valore di h_e .

$$T_{si} = \frac{h_e * T_a + U * T_{se}}{h_e + U} \quad (10)$$

Non avendo quindi potuto percorrere la strada suindicata secondo un processo in regime transitorio, si è proceduto, con riferimento alla normativa vigente in materia, all'individuazione dei parametri indicativi della performance energetica seguendo un ulteriore approccio, in cui il flusso termico fra l'aria esterna e l'aria interna, attraverso l'intera parete, è stato eguagliato a quello fra la superficie interna della parete e la stessa aria interna dell'ambiente (adduttivo). In tal modo si è ricavata la relazione della temperatura superficiale interna T_{si} utilizzata nell'analisi e nei confronti che di seguito vengono illustrati.

Più nello specifico sono stati considerati per quanto riguarda il flusso termico attraverso l'intera parete fra l'aria esterna e l'aria interna quello espresso dalla relazione:

$$\frac{Q_p}{A} = U (t_i - t_e) \quad (11)$$

In cui t_i e t_e sono le temperature dell'aria interna ed esterna ed U è la trasmittanza termica della parete, pari a:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{a,i}} + \sum_{j=1}^N \frac{s_j}{\lambda_j} + \frac{1}{h_{a,e}}} \quad (12)$$

con s_j e λ_j spessore e conducibilità termica del j-esimo strato omogeneo di materiale, $h_{a,i}$ e $h_{a,e}$ coefficienti adduttivi superficiali interno ed esterno.

E per quanto riguarda il flusso termico adduttivo unitario sulla parete interna, cioè fra la superficie interna e la stessa aria interna dell'ambiente, è stato preso pari a:

$$\frac{Q_{a,i}}{A} = h_{a,i} (t_i - t_{si}) \quad (13)$$

In cui t_{si} è la temperatura superficiale interna della parete.

Eguagliando le due espressioni si ha:

$$U (t_i - t_e) = h_{a,i} (t_i - t_{si}) \quad (14)$$

Da cui si ricava l'equazione relativa alla temperatura superficiale interna T_{si} :

$$t_{si} = t_i - \frac{U}{h_{a,i}} (t_i - t_e) \quad (15)$$

In cui il valore della trasmittanza termica fa riferimento al dato presente in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, il coefficiente adduttivo interno ($h_{a,i}$) è dato da norma UNI EN ISO 6946:2008, e i valori della temperatura interna (t_i) e della temperatura esterna (t_e) sono parametri ricavati dal monitoraggio effettuato.

3.4 Analisi, valutazioni e conclusioni

Sulla base dei dati a disposizione, quali: la trasmittanza termica della parete (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), il coefficiente adduttivo interno ($h_{a,i}$) da norma UNI EN ISO 6946:2008 e i valori dei parametri monitorati, la temperatura interna (t_i) e la temperatura esterna (t_e), si ottengono le temperature superficiali, calcolate secondo l'algoritmo suindicato (15) della parete esposta a sud-ovest rispettivamente in relazione alla porzione di superficie opaca interessata dall'effetto della coltre vegetale (T_{si_PV}) e quella non soggetta agli effetti della stessa ($T_{si_NO_PV}$).

I valori della temperatura superficiale interna (T_{si}) necessari per il calcolo della temperatura media radiante (T_{mr}) sono stati calcolati secondo l'equazione riportata al punto (15) e poi verificati attraverso un monitoraggio effettuato tramite l'installazione di termocoppie (M2 e M3).

Come si evince dalla **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, il verde verticale realizzato sulla parete esposta a sud-ovest dell'edificio F92 copre parzialmente la superficie della stessa parete, per cui i valori relativi alle temperature, nella valutazione dei parametri ambientali considerati ed analizzati, per la verifica dell'andamento della temperatura media radiante, sono:

- temperatura esterna (AT01)
- temperatura dell'aria all'interno dell'intercapedine (AT03 e AT05)
- temperatura interna (T_i).

Nel grafico riportato in Figura 57 le temperature superficiali interne, misurate attraverso le termocoppie (M2 e M3), rispettivamente soggette e non all'effetto della coltre vegetale, hanno un andamento molto simile, e si nota bene come la temperatura relativa alla porzione di parete dietro la coltre vegetale riporti una temperatura più bassa rispetto all'altra soprattutto nelle prime ore della giornata e nelle ore serali.

Questo evidenzia come la parete verde riesca ad attenuare la temperatura superficiale interna, quando l'irraggiamento è meno forte e diretto, mentre nelle ore più calde della giornata le due temperature registrate sono completamente allineate.

L'inversione di tendenza del grafico nell'ultimo giorno di monitoraggio è dovuto ad una giornata, dove le temperature erano notevolmente più basse come anche l'irraggiamento diretto (Tabella 14) rispetto ai giorni precedenti, per la nuvolosità presente, come si evince dallo schema sotto riportato dell'irraggiamento monitorato in quel giorno.

Tabella 14: irraggiamento diretto

Timestamp	GR02_Avg (W/mq)	Timestamp	GR02_Avg (W/mq)
2017-09-18 11:00:00	199,2	2017-09-19 11:00:00	143,7
2017-09-18 12:00:00	232,8	2017-09-19 12:00:00	224,7
2017-09-18 13:00:00	285,1	2017-09-19 13:00:00	264,9
2017-09-18 14:00:00	288,5	2017-09-19 14:00:00	299,9
2017-09-18 15:00:00	252,3	2017-09-19 15:00:00	205,4
2017-09-18 16:00:00	159,1	2017-09-19 16:00:00	125
2017-09-18 17:00:00	35,17	2017-09-19 17:00:00	58,13
2017-09-18 18:00:00	9,63	2017-09-19 18:00:00	10,85

Nelle Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. e Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. è riportato il confronto tra le temperature superficiali interne misurate (M3 e M2) e le temperature calcolate secondo l'algoritmo implementato relativamente alla parete esposta a sud-ovest, sia per la porzione di parete soggetta agli effetti della coltre vegetale che per la porzione di parete non soggetta agli effetti della parete verde.

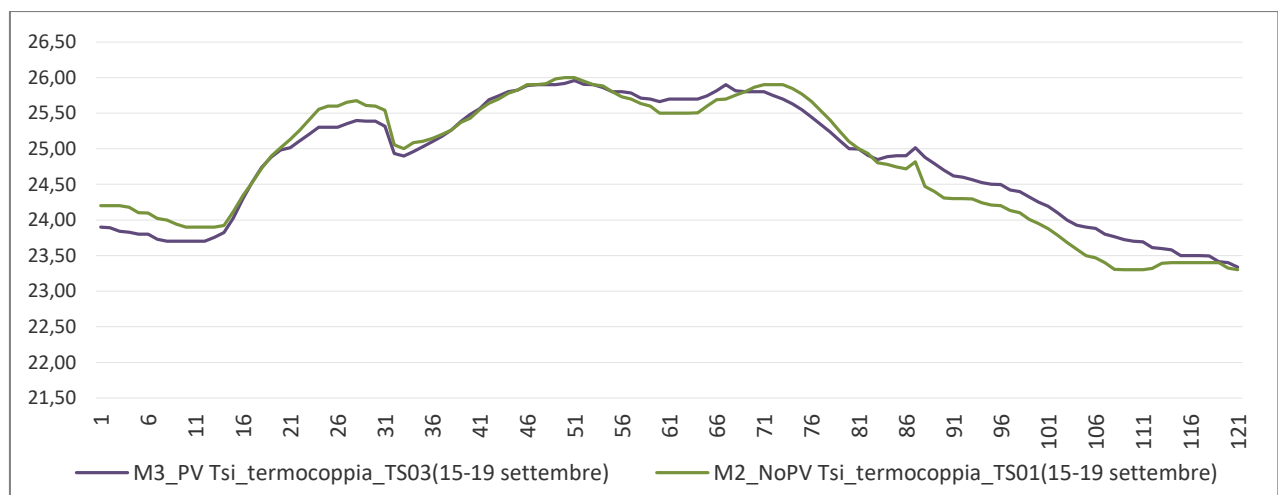


Figura 57: temperature superficiali interne misurate rispettivamente soggette e non all'effetto della coltre vegetale (M3_PV, M2_NO_PV)

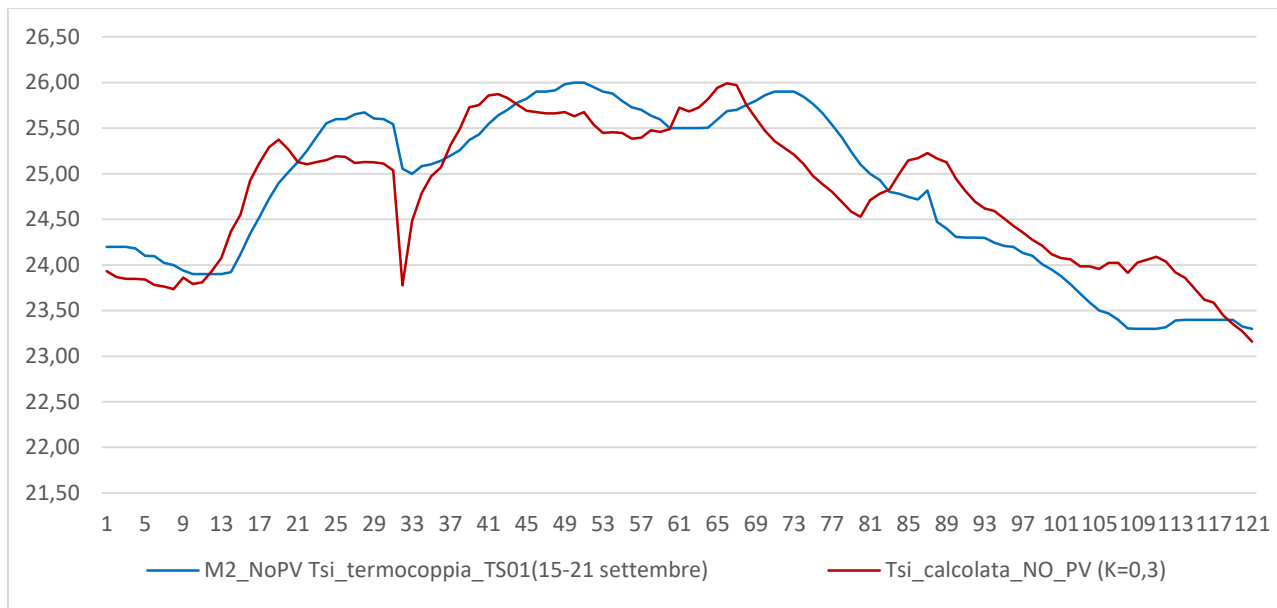


Figura 58: temperatura superficiale interna misurata (M2) e calcolata (T_{si}) relativamente alla porzione di parete non soggetta all'effetto della coltre vegetale

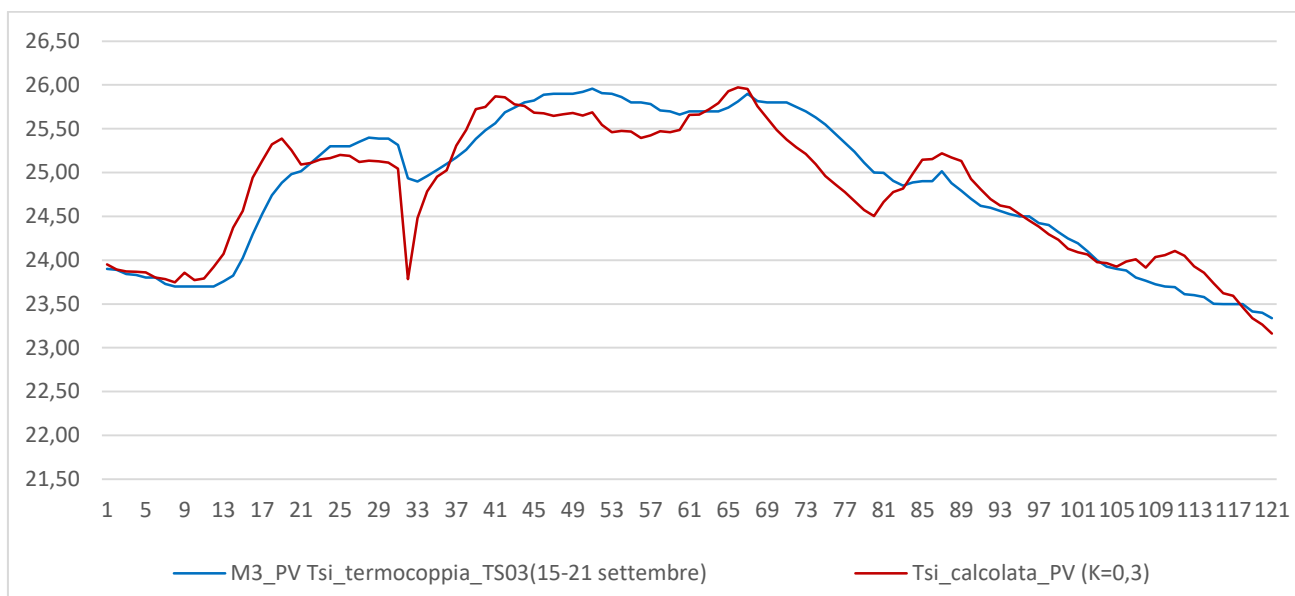


Figura 59: temperatura superficiale interna misurata (M3) e calcolata (T_{si}) relativamente alla porzione di parete soggetta all'effetto della coltre vegetale

In entrambe le figure suindicate (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) si evince un picco relativamente alla temperatura superficiale interna calcolata secondo l'algoritmo suindicato (T_{si}) che dall'analisi dei dati scaricati dal sistema di monitoraggio risultano dovuti ad una repentina variazione della temperatura esterna – T_e – misurata, di cui è funzione.

4 Climatizzazione microclimatica con sistemi solar cooling

L'attività della presente annualità ha riguardato realizzazione e messa in esercizio del nuovo sistema di gestione e controllo dell'impianto ENEA di solar cooling, localizzato presso il centro Martucci di Valenzano (Bari) e la prima campagna di prove mirate a valutarne le prestazioni energetiche.

Nella prima fase dell'attività è stato implementato il sistema di controllo che ha necessitato di notevoli lavori per il cablaggio delle nuove termocoppie installate nell'impianto e per la messa in opera del nuovo quadro preposto a fornire le alimentazioni elettriche a tutti i componenti dell'impianto e a controllare i segnali in ingresso e in uscita gestite dal nuovo controllore, denominato Einstein. Nella seconda fase è stata condotta una prima campagna sperimentale di misura volta a determinare le prestazioni dell'impianto nella sua configurazione standard.

4.1 Descrizione del sistema di gestione e monitoraggio

Il sistema di gestione e monitoraggio installato è il modello E2 della casa produttrice Emerson Climate Technologies; si tratta di un sistema dotato di tutti gli standard di sicurezza (delle informazioni) e robustezza (relativa al funzionamento continuo) richiesti per la gestione di impianti commerciali, che permette di acquisire agevolmente i dati, sia sul computer industriale localizzato presso l'impianto sia, attraverso un collegamento internet, su un computer (al quale è possibile collegarsi in remoto da qualunque postazione), appositamente dedicato al monitoraggio dell'impianto di solar cooling, situato presso l'Università di Bari. Il software di gestione utilizzato è denominato *Ultrasite*: si tratta di un software su piattaforma Microsoft sviluppato per applicazioni industriali che è stato riprogrammato e adattato alla configurazione e alle specifiche fornite da ENEA, sia per quanto riguarda le logiche di regolazione dell'impianto (messe a punto nella scorsa annualità, vedasi Report RdS/PAR2015/144), sia per quanto attiene al monitoraggio delle prestazioni dell'impianto e delle singole componenti.

Ultrasite permette, tramite un'apposita grafica, di tabulare e graficare l'andamento di grandezze di interesse, quali temperature, volumi ed energie, di controllare in remoto il funzionamento istantaneo dell'impianto complessivo e di fornire input di comandi ai singoli componenti. *Ultrasite* da anche la possibilità di riprogrammare le logiche di gestione o aggiungere nuove funzionalità o controlli agendo sul computer remoto, con notevole aumento della attività che è possibile effettuare sull'impianto. L'interfaccia realizzata, che costituisce il menu principale da cui accedere a tutte le funzionalità presenta sia un menù ad albero (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), dalla quale si possono riconoscere tutti i parametri di input ed output digitali ed analogici dell'impianto, sia una grafica che rappresenta fedelmente l'impianto, con tutti i suoi componenti (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).



Figura 60 - *Ultrasite*: menù ad albero



Figura 61 - *Ultrasite*: interfaccia grafica

All'interno della grafica sono riportati i valori istantanei di grandezze che riguardano l'impianto complessivo, quali la temperatura interna della serra, la temperatura e l'umidità relativa esterna,

l'irradianza valutata dal piranometro, la potenza e l'energia elettrica mensile. Si può accendere a quattro sottolivelli, ognuno dei quali specifico per una porzione dell'impianto:

- nel primo si hanno le temperature della "zona calda", ossia di quella porzione di circuito che permette la corretta alimentazione della macchina frigorifera ad assorbimento. E' raffigurata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (nota bene: al momento dell'acquisizione dell'immagine la sonda che misura la temperatura "T uscita pannelli solari" non era in funzione, dunque restituisce un dato errato).



Figura 62 - Ultrasite: interfaccia grafica, zona calda

Figura 2.22

- Nel secondo si ha la zona in cui viene prodotto l'effetto utile, ossia la refrigerazione del fluido vettore, dunque si hanno le grandezze di riferimento della macchina ad assorbimento, della torre evaporativa e dell'accumulo freddo (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).



Figura 63 - Ultrasite: interfaccia grafica, zona fredda

- Nella terza zona si analizza la distribuzione verso la serra (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).



Figura 64 - Ultrasite: interfaccia grafica, zona distribuzione serra

Il sistema di acquisizione dati raccoglie i valori di tutte le grandezze con intervalli di 5 minuti. Nella sua memoria *Ultrasite* raccoglie i dati di interesse registrati degli ultimi 62 giorni e dà la possibilità di creare dei grafici e confrontare fra loro diverse grandezze durante il funzionamento, anche in tempo reale.

4.2 Analisi delle prestazioni dell'impianto

Per quanto riguarda l'analisi sperimentale delle prestazioni dell'impianto, occorre precisare che l'inizio della campagna sperimentale dell'estate 2017 ha subito un grave ritardo a causa dei molteplici danni

subiti dall'impianto per l'ondata di freddo anomalo che ha colpito Valenzano (dove la temperatura ha raggiunto persino i -10°C) e che hanno comportato la rottura di numerosi componenti dell'impianto (pompe di circolazione, organi di tenuta, dry cooler). Solo nelle prime settimane di settembre è stato possibile sostituire i componenti danneggiati e attivare l'impianto. Pertanto le prove sono state effettuate nel periodo 15 - 30 settembre.

Durante le prime prove effettuate sull'impianto nell'estate del 2015, erano subito emersi gravi problemi nel sistema di gestione che non consentivano un corretto e continuo funzionamento dell'impianto e che avevano anche impedito una valutazione, seppur parziale, delle prestazioni dell'impianto.

Alla luce di tali problemi è stato riprogettato tutto il sistema di gestione e controllo, per cui si è ritenuto utile effettuare l'analisi dei dati provenienti dalla campagna sperimentale del 2015 e confrontarli con quelli (seppur numericamente non elevati) raccolti nel 2017 per valutare i benefici apportati all'impianto dal nuovo sistema di gestione e controllo Einstein.

4.2.1 Campagna sperimentale 2015

La prima serie di prove sull'impianto di solar cooling è iniziata il 29 luglio 2015 ed è durata fino al 7 ottobre 2015, per un totale di 45 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.) e l'irradianza (Irradiance);
- 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);
- il consumo di energia per ogni componente dell'impianto.

L'irradianza durante il periodo di prova è riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

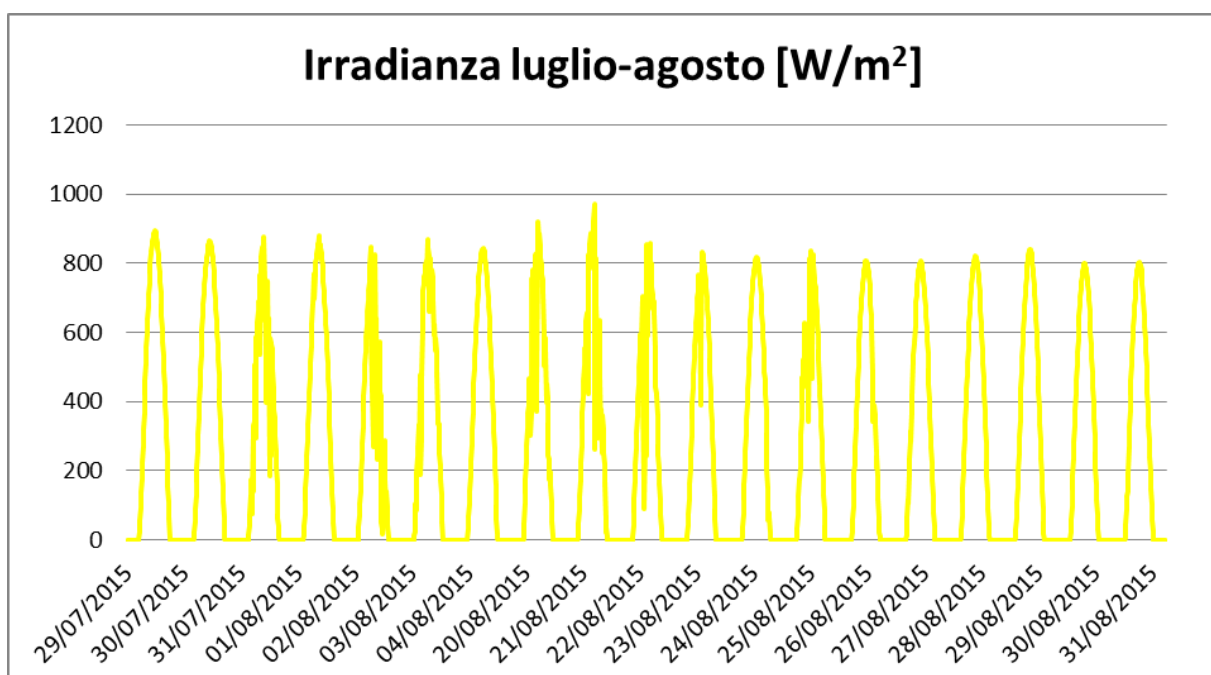


Figura 65 - Irradianza luglio e agosto 2015

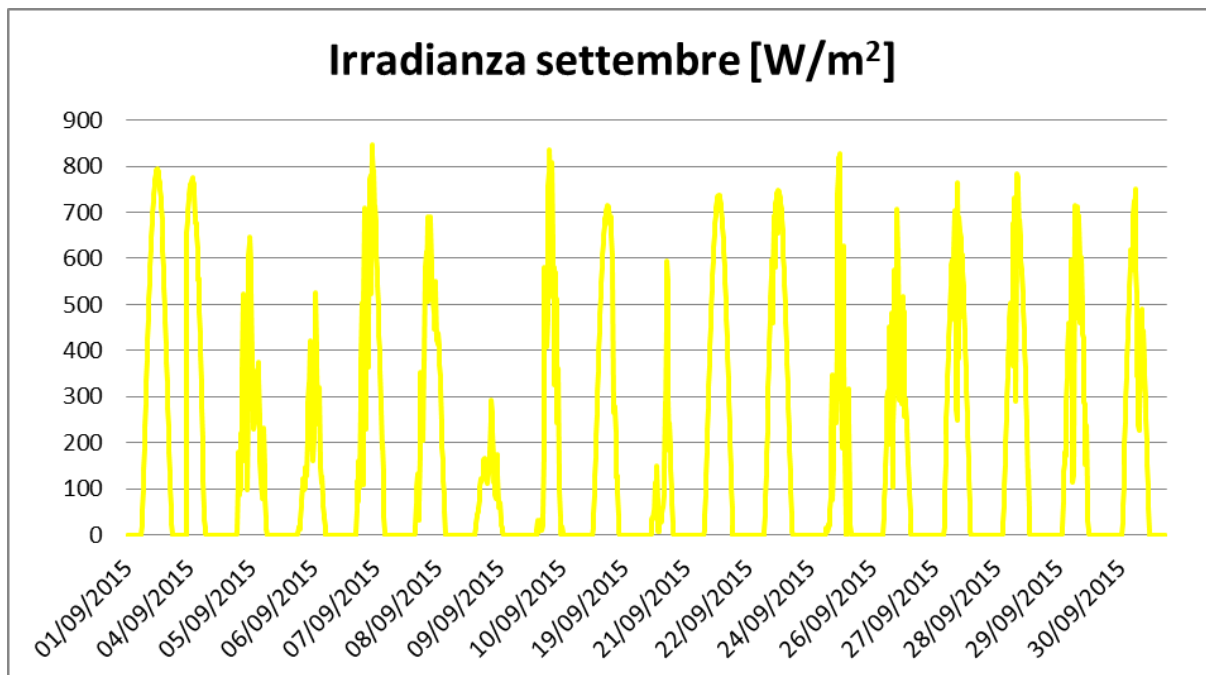


Figura 66 - Irradianza settembre 2015

La prima operazione effettuata sui dati è stata l'individuazione di una procedura automatica in grado di individuare i dati con valori palesemente errati e correggerli con un valore medio: tale operazione si è resa necessaria perché data l'entità degli "errori" le valutazioni sull'intero pacchetto di misure sarebbe risultata non attendibile. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati, a titolo di esempio, gli andamenti di due delle temperature di interesse. Si può vedere che i dati sono afflitti da numerose incongruenze, da correggere per poter analizzare il comportamento dell'impianto: temperature che assumono valore nullo o estremamente grande.

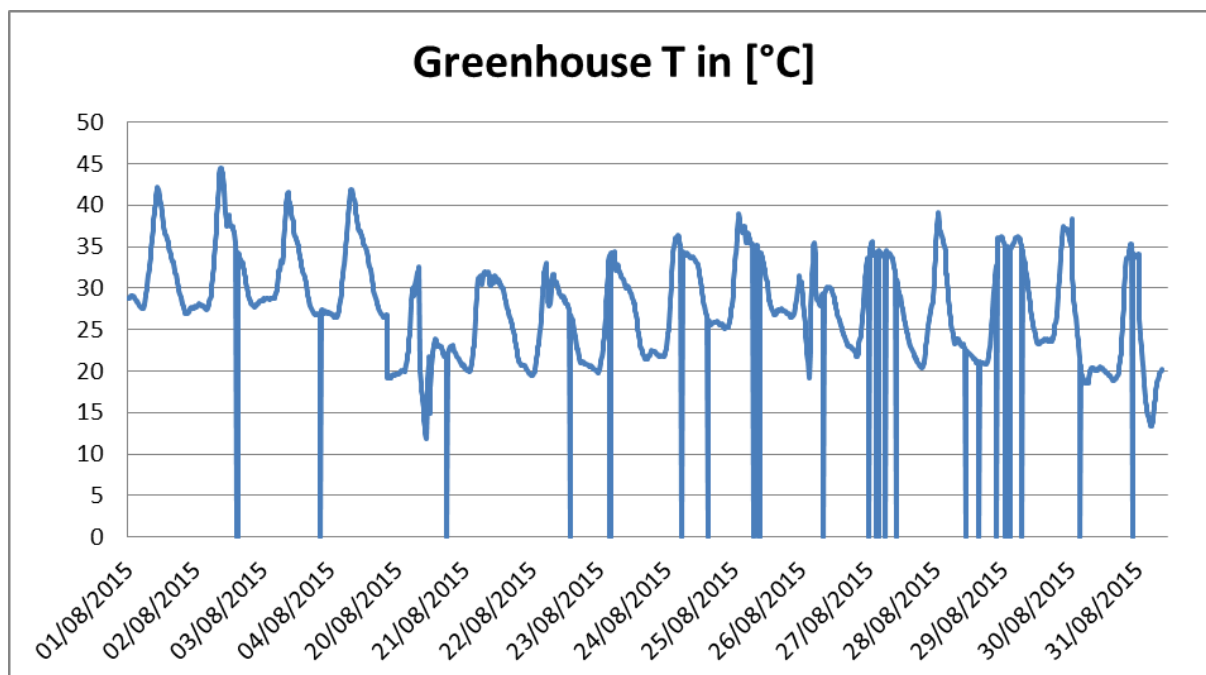


Figura 67 - Temperatura in ingresso alla serra, agosto 2015

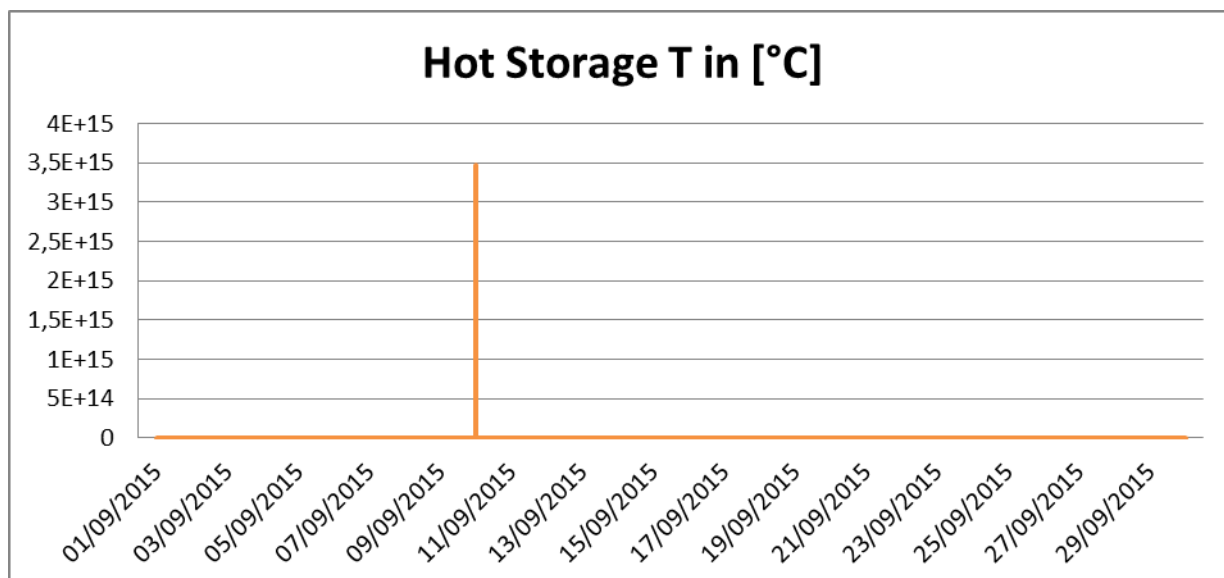


Figura 68 - Temperatura in ingresso all'accumulo caldo, settembre 2015

La correzione del valore errato è stata effettuata sulla base delle seguenti ipotesi: i dati errati erano compresi fra due valori "corretti" sono stati sostituiti con la media di tali valori; in caso di più misure consecutive errate, la sostituzione è avvenuta con la ripartizione progressiva della differenza fra il valore noto precedente e quello successivo, distribuendo equamente l'errore legato alla stima dei valori non noti.

Due esempi vengono mostrati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** in cui sono stati corretti i valori della temperatura del fluido vettore all'uscita rispettivamente della serra e della torre evaporativa.

La bontà del metodo scelto è confermata dal fatto che la temperatura all'ingresso della torre evaporativa è, per l'intervallo temporale considerato, monotona crescente, dunque tutto porta a pensare che anche quella in uscita possa assumere lo stesso andamento.

BR	BS	BT
Greenhouse T out	indicatore valore errato	Greenhouse T out corretta
EM5		
[°C]		
34		34
33,7		33,7
33,3		33,3
31,9		31,9
0	0	31,35
30,8		30,8
30,3		30,3
29,5		29,5
29		29
28,8		28,8
28,4		28,4

Figura 69 – Esempio misura errata a)

AI	AJ	AK	AL	AM
Cooling Tower T out	indicatore valore errato	Cooling Tower T out corretta	Cooling Tower T in	
EM3			EM3	
[°C]			[°C]	
38,1		38,1	35,7	
37,7		37,7	35,2	
38		38	35,8	
31,7		31,7	29,6	
0	0	32,3	31,9	
0	0	32,9	31,9	
0	0	33,4	31,9	
34		34	31,9	
34,8		34,8	32,4	
35,4		35,4	32,9	
36,2		36,2	33,6	

Figura 70 – esempio misura errata b)

Così facendo si sono ricavati degli andamenti di temperatura uniformi ed aderenti al comportamento reale dell'impianto. Nelle **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato il confronto fra la temperatura dell'acqua in ingresso alla serra e quella in ingresso nell'accumulo caldo, prima e dopo l'operazione di correzione.

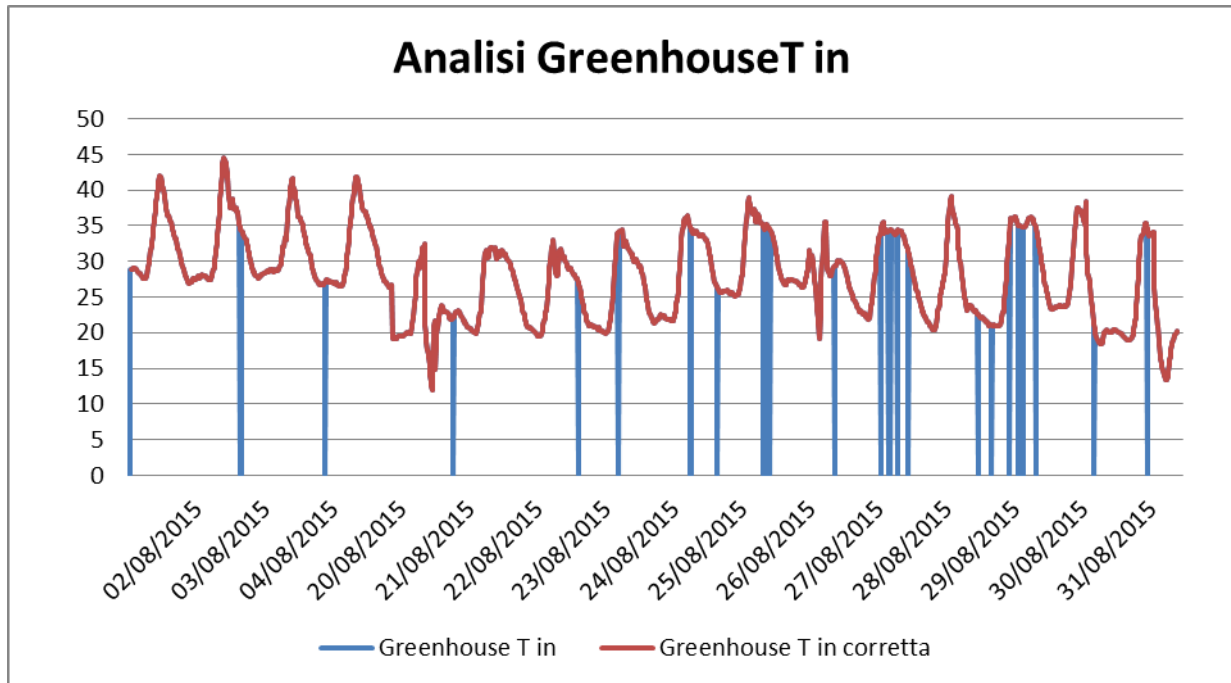


Figura 71 - Temperatura in ingresso alla serra prima e dopo correzione, agosto 2015

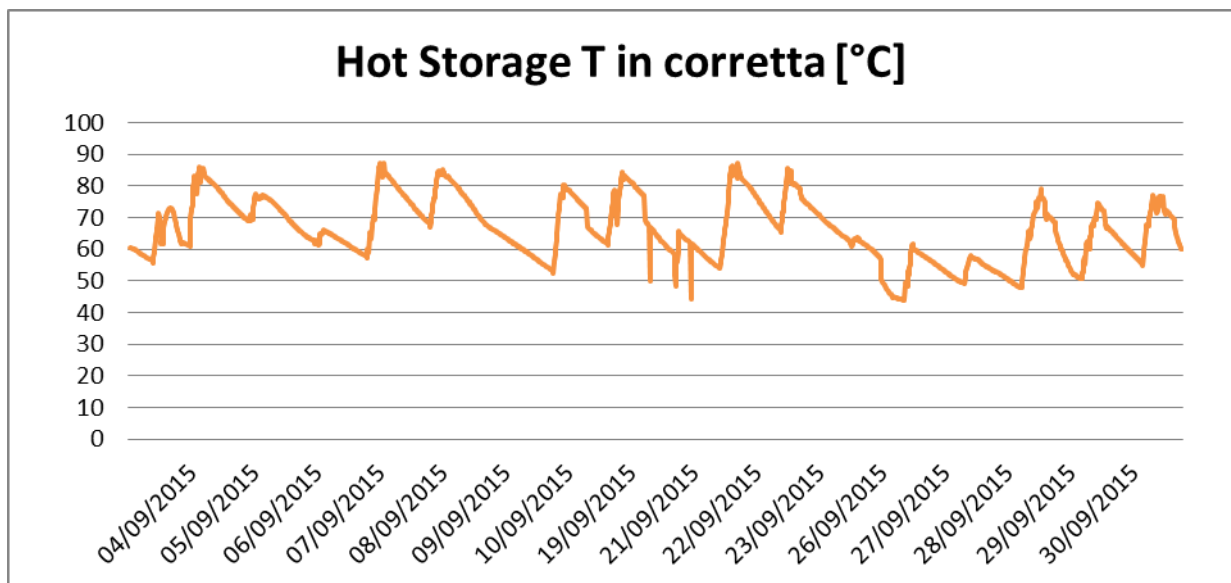


Figura 72 - Temperatura in ingresso all'accumulo caldo prima e dopo correzione, agosto 2015

Da Fig. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono riportati gli andamenti delle temperature all'ingresso ed all'uscita dei componenti che costituiscono l'impianto per il mese di settembre.

Analisi T Campo Solare

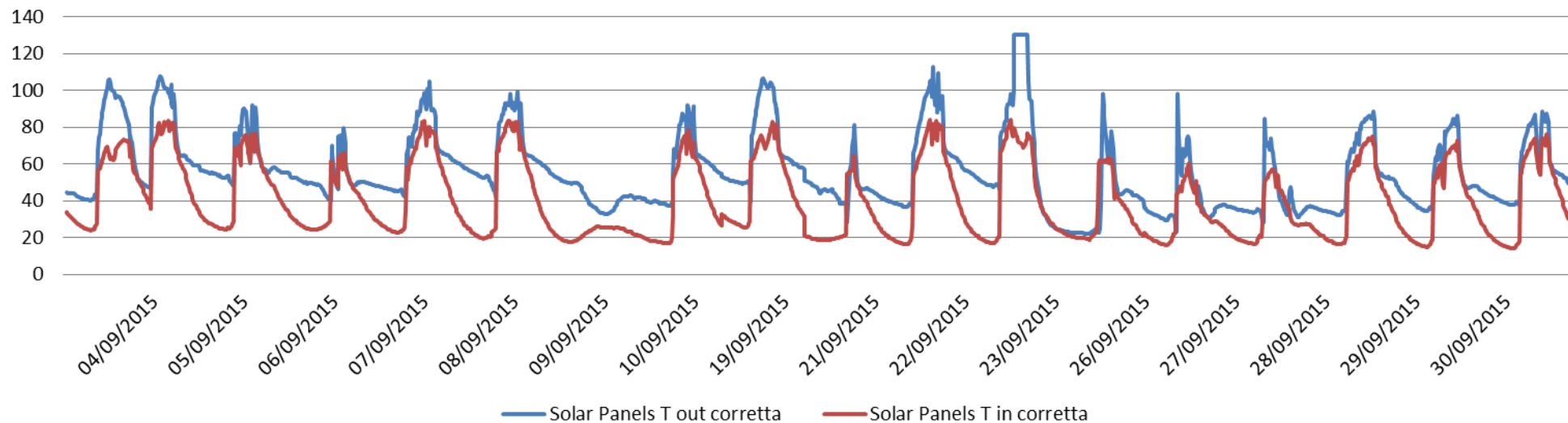


Figura 73 - Temperature campo solare, settembre 2015

Analisi T alimentazione ABSR

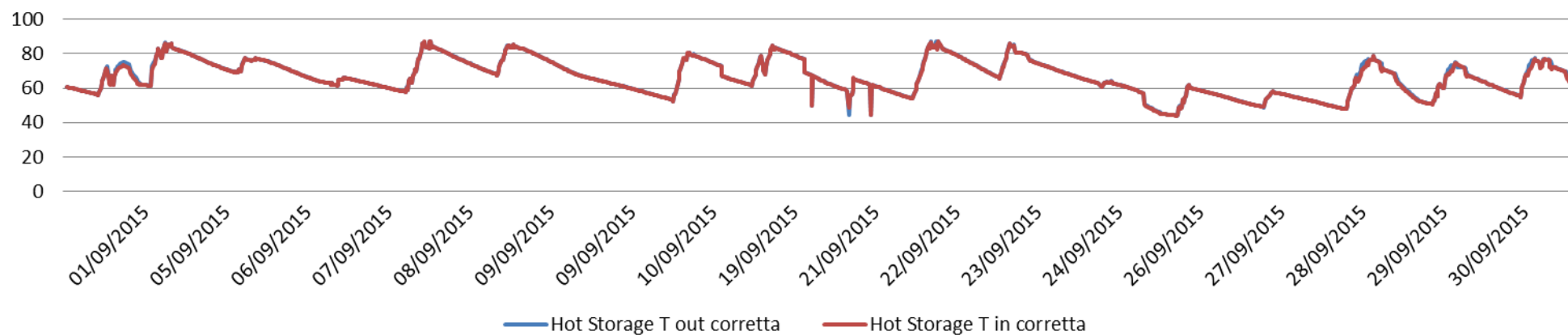


Figura 74 - Temperature alimentazione macchina ad assorbimento, settembre 2015

Analisi T acqua refrigerata ABSR

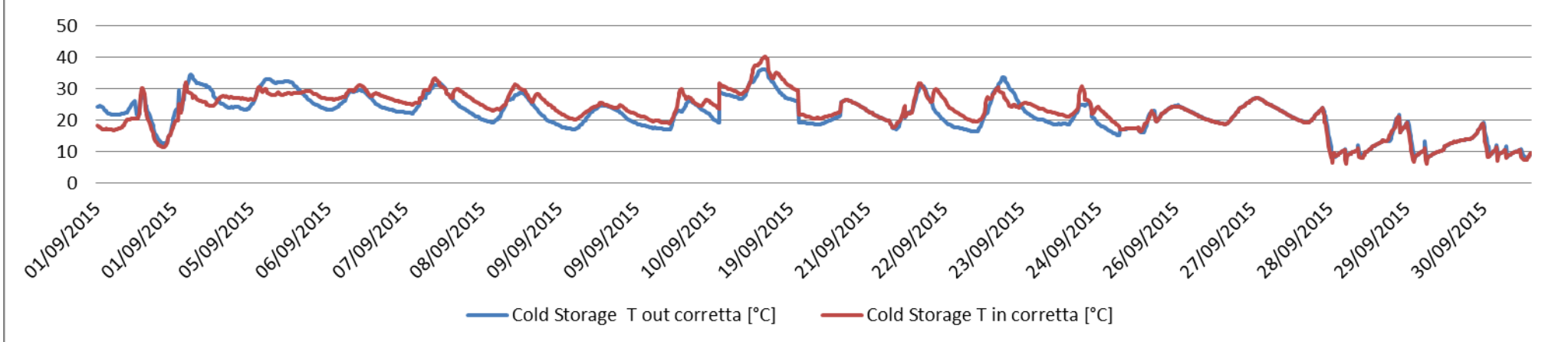


Figura 75 - Temperature acqua refrigerata all'uscita dalla macchina ad assorbimento, settembre 2015

Analisi T Torre Evaporativa

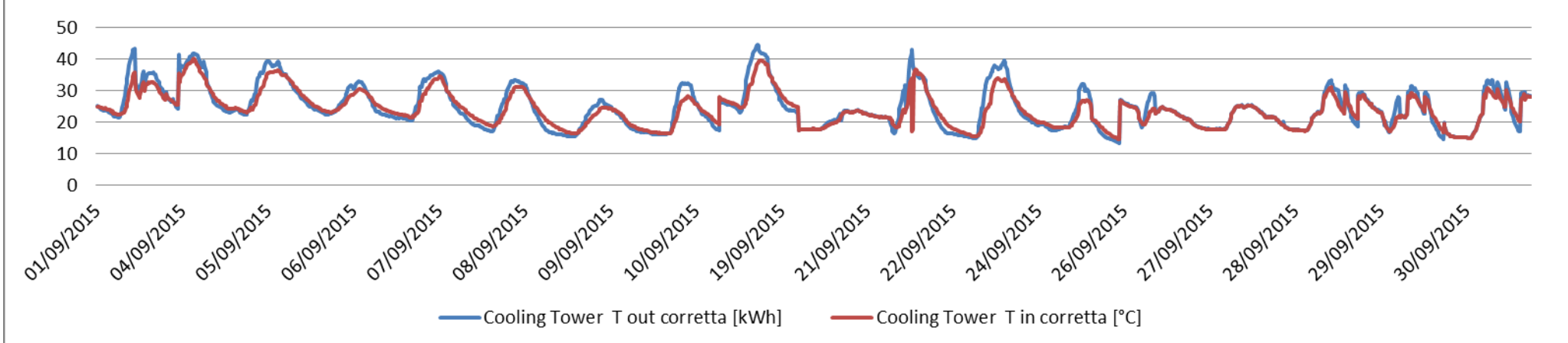


Figura 76 - Temperature torre evaporativa, settembre 2015

Analisi T acqua refrigerata serra

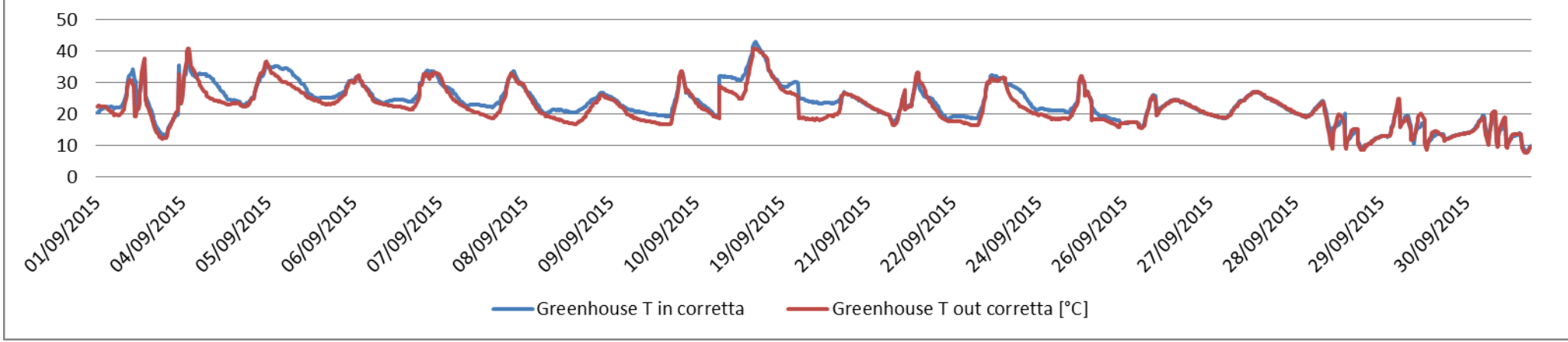


Figura 77 - Temperature acqua refrigerata verso la serra, settembre 2015

Analizzando la temperatura dell'acqua refrigerata all'uscita dalla macchina ad assorbimento si deduce che l'impianto ha avuto un funzionamento ottimale solo dal 28 al 30 settembre, quando si raggiunge la temperatura di 7,2 °C. In questa fase l'assorbitore sta producendo effetto utile al massimo del suo potenziale, nonostante la temperatura del fluido vettore di alimentazione superi di poco la soglia di attivazione della macchina di 75°C. Il corretto funzionamento dell'impianto è rispecchiato anche dalla temperatura dell'acqua che il sistema di distribuzione della serra preleva dal serbatoio di accumulo freddo, che si aggira attorno ai 10°C. Dunque ci si aspetta che il coefficiente di prestazione della macchina frigorifera ad assorbimento si aggiri su valori elevati (0,7-0,8), ma i dati raccolti dal sistema di acquisizione mostrano tutt'altro, come si evince da **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

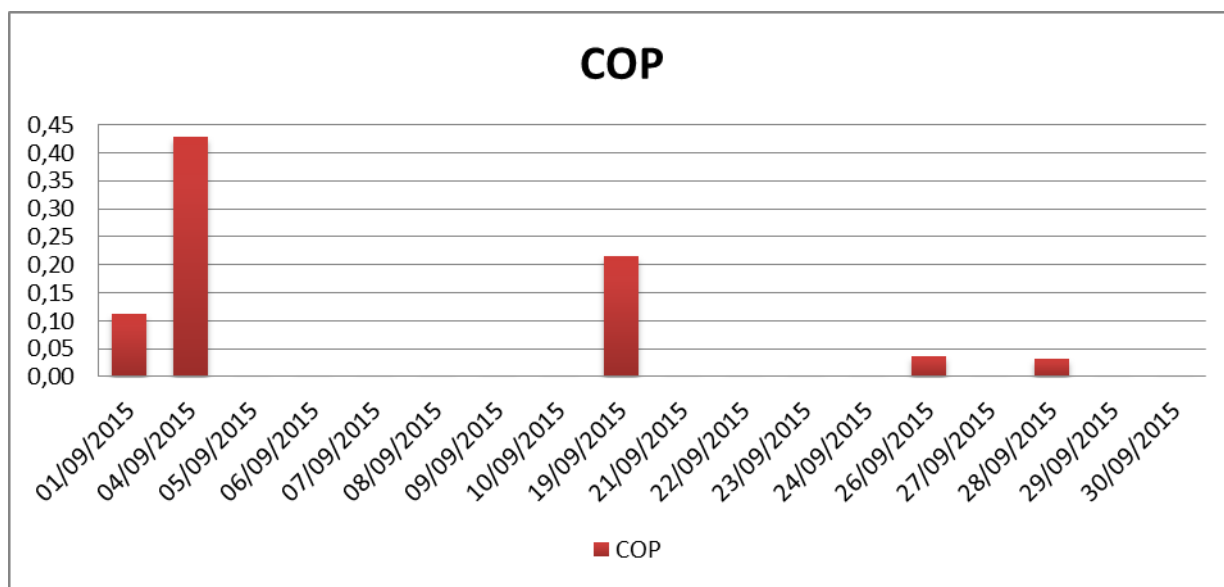


Figura 78 - Coefficiente di prestazione macchina ad assorbimento, settembre 2015

Il valore dell'energia ceduta dall'assorbitore al serbatoio di accumulo freddo risulta essere nullo nei giorni in cui l'impianto ha funzionamento migliore, quindi il COP, calcolato come

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

è in effetti nullo.

Ciò dà ulteriore conferma delle problematiche rilevate nella campagna sperimentale del 2015 riguardo il sistema di controllo e gestione dell'impianto.

Fondamentale per il funzionamento dell'impianto di solar cooling è l'apporto della fonte solare. Dai dati energetici a disposizione è stato possibile ricavare il rendimento medio del campo solare (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), calcolato come:

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

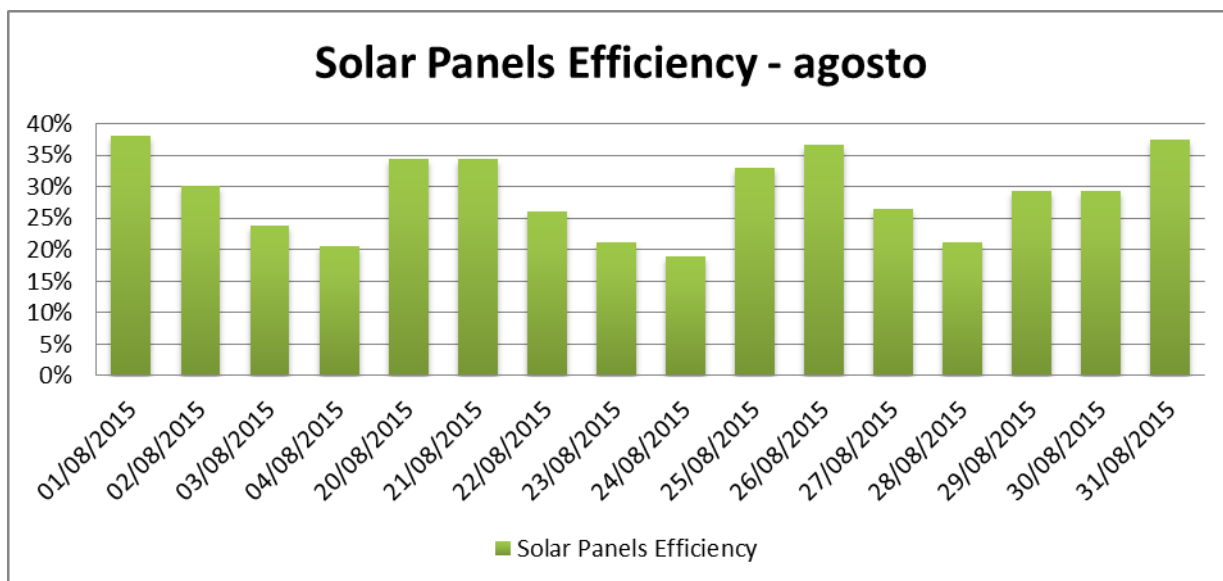


Figura 79 - Rendimento campo solare, luglio ed agosto 2015

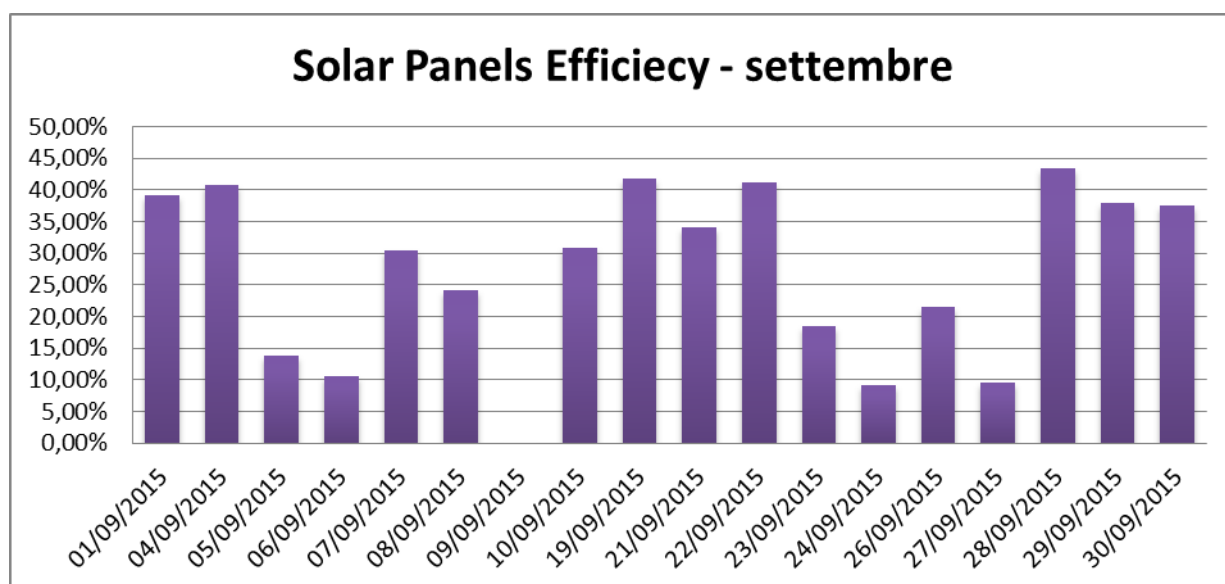


Figura 80 - Rendimento campo solare, settembre 2015

Si può osservare come il giorno 9 settembre il campo solare è stato praticamente inattivo, essendo il rendimento 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 al mese di settembre, essendo i dati raccolti in questo periodo (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, riportato da Fig. 3.19 a Fig. 3.23.

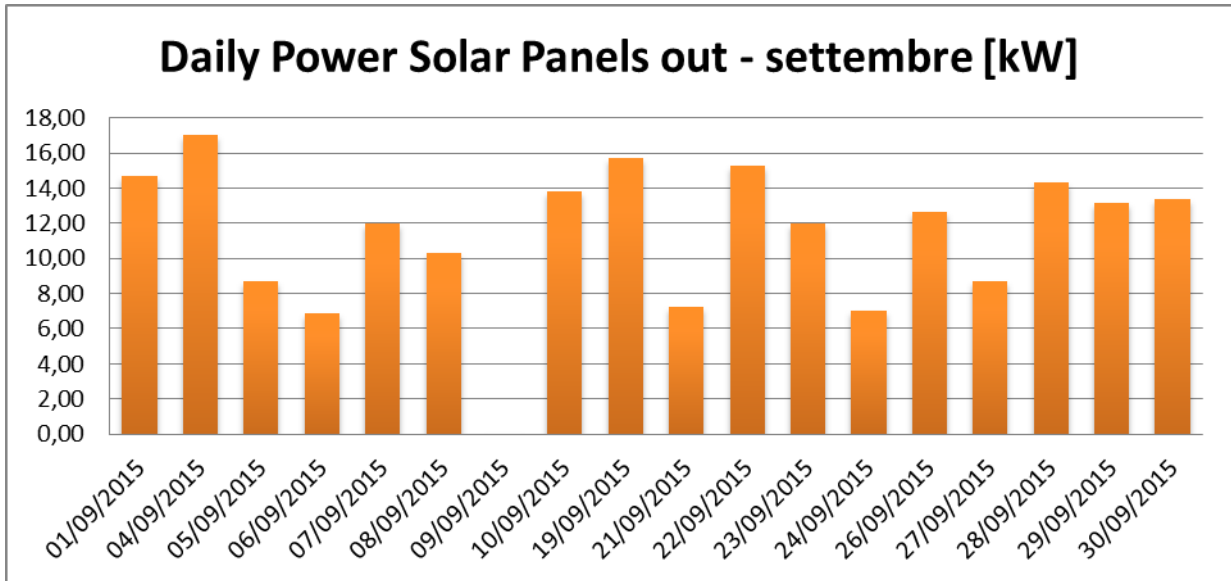


Figura 81- Potenza giornaliera uscita campo solare, settembre 2015

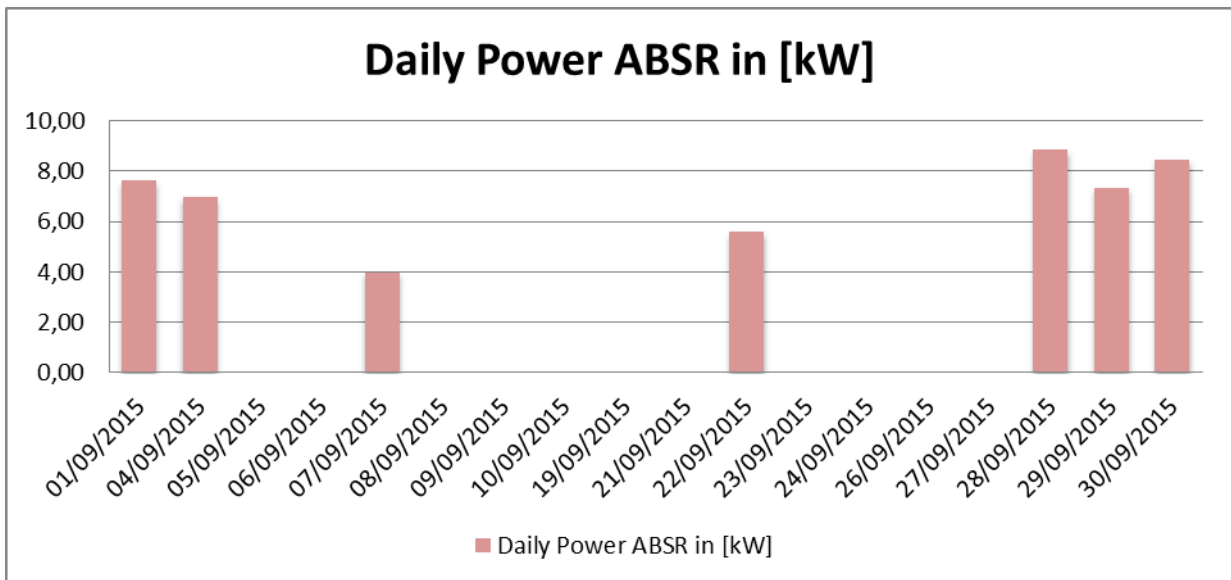


Figura 82 - Potenza giornaliera ingresso macchina ad assorbimento settembre 2015

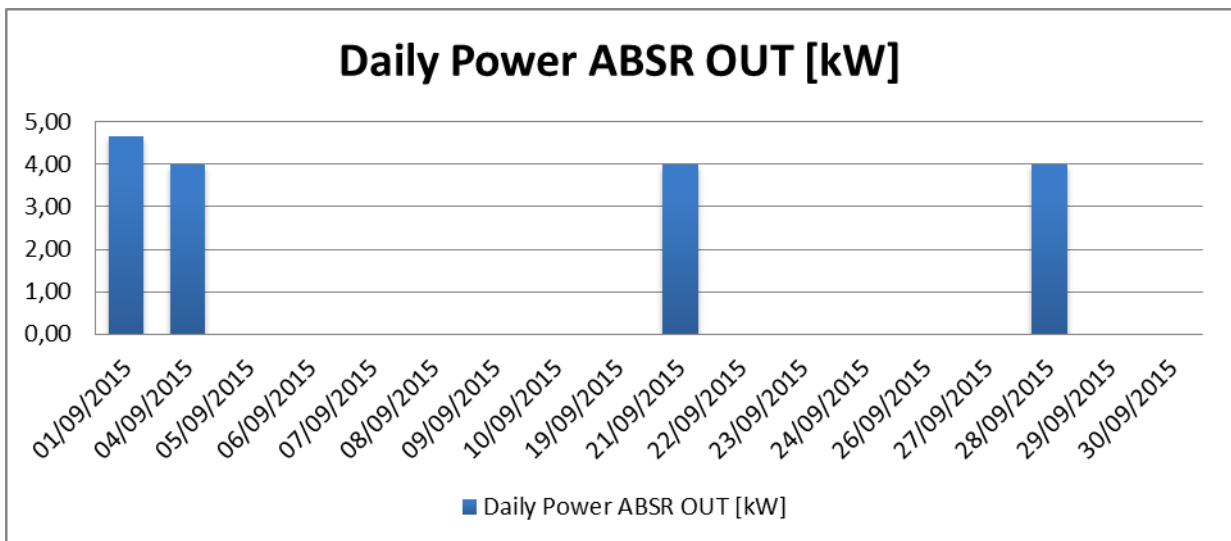


Figura 83 - Potenza giornaliera uscita macchina ad assorbimento, settembre 2015

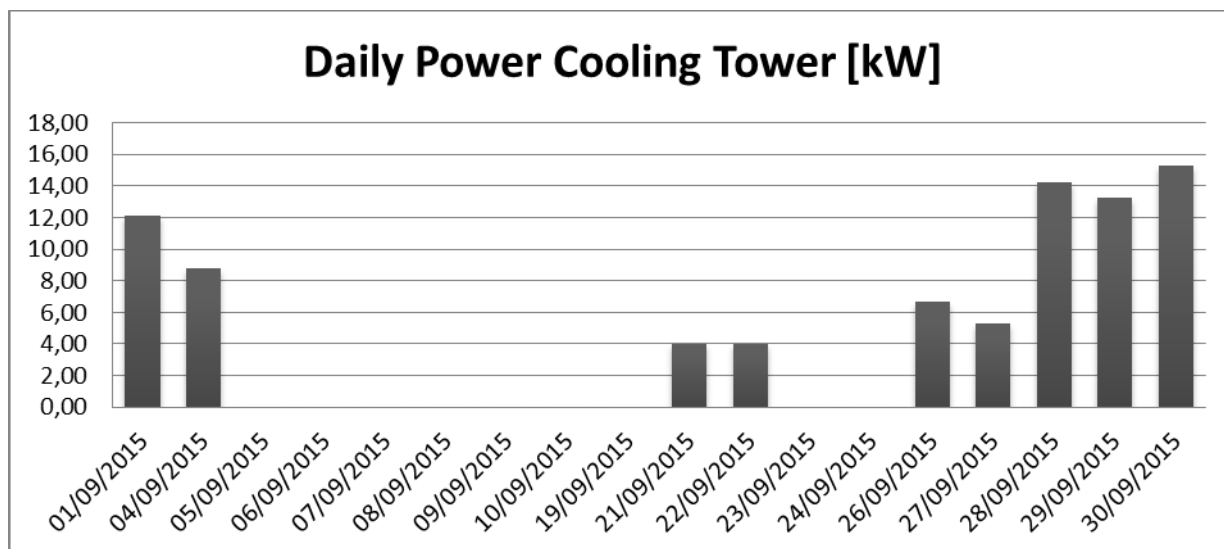


Figura 84 - Potenza giornaliera torre evaporativa, settembre 2015

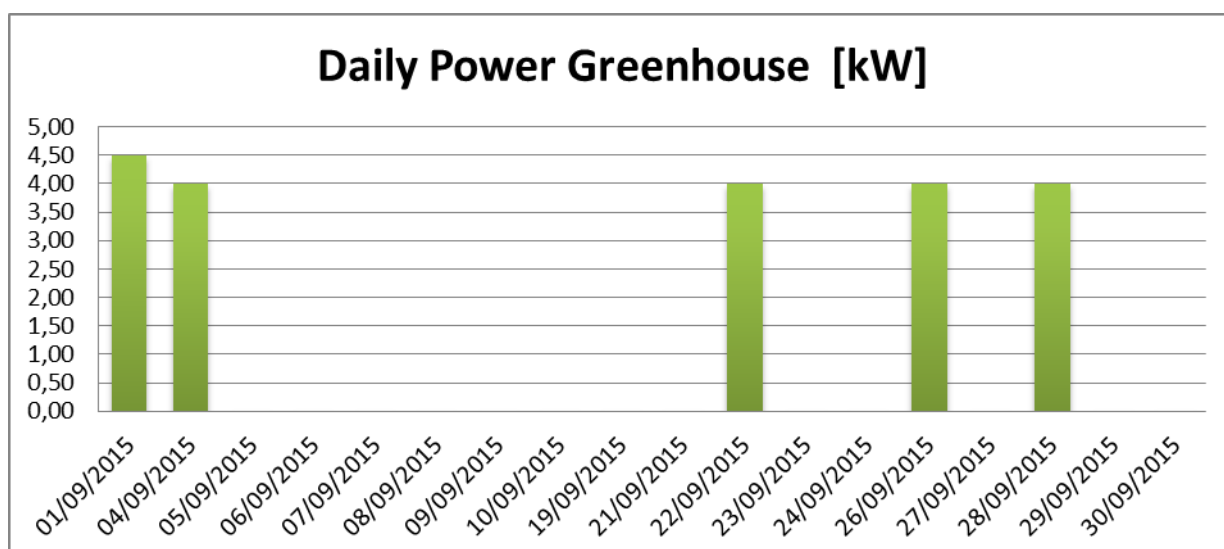


Figura 85 - Potenza giornaliera serra, settembre 2015

I grafici riportati evidenziano come l'impianto non abbia prodotto effetto utile per diversi giorni, nonostante la macchina frigorifera ad assorbimento fosse alimentata ad un livello termico adeguato (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Ciò conferma ulteriormente le problematiche del vecchio sistema di controllo, non in grado di gestire in modo corretto l'intero impianto.

È stata, inoltre, condotta stima del consumo elettrico richiesto per il funzionamento dell'impianto, in particolare delle pompe di circolazione. Tale dato non è fornito di norma, risulta però necessario per quantificare l'ammontare effettivo del consumo dell'impianto.

Si è considerata una pompa in funzione quando il componente da essa alimentato registra una variazione di energia (che equivale a considerare l'afflusso di una certa portata). Tramite il *data sheet* fornito dai produttori è stato possibile ricavare il valore di potenza nominale delle pompe. In fig.3.24 vengono riportate le curve, messe a disposizione dall'azienda produttrice, per le pompe di circolazione che alimentano campo solare, macchina ad assorbimento, accumulo freddo e serra.

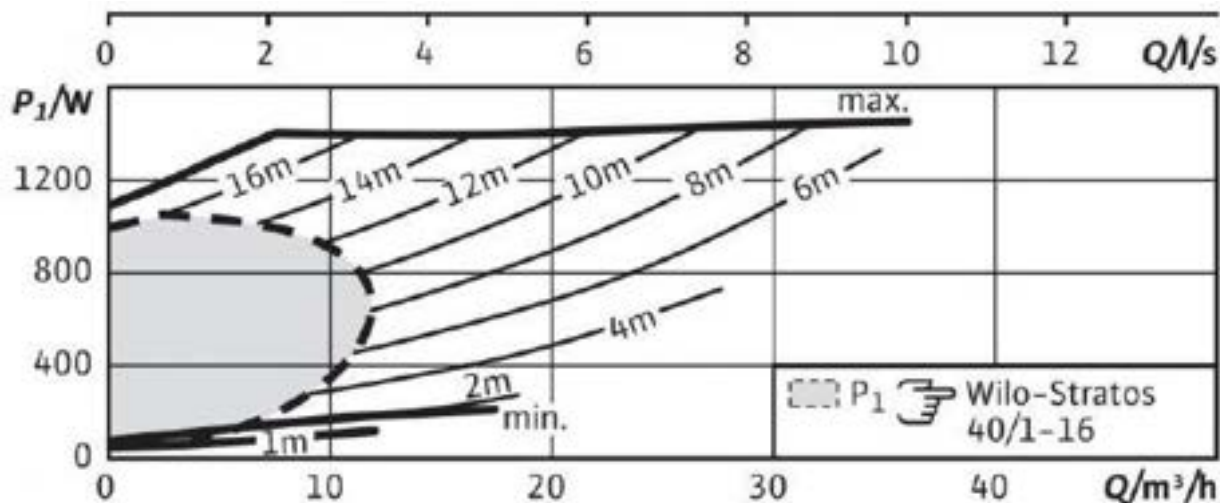


Figura 86 - Curva di funzionamento di una delle pompe installate

I valori di portata volumetrica oraria Q e la prevalenza della pompa H sono stati individuati dal progetto esecutivo dell'impianto.

Ricavata la potenza nominale di ogni pompa, è stata divisa per la portata Q, in modo da ottenere un'energia elettrica per unità di volume, espressa in $\frac{Wh}{m^3}$. Moltiplicando tale valore per il volume di acqua misurato, si è ricavato il consumo energetico giornaliero.

Tabella 15 - Parametri per la stima dei consumi elettrici, settembre 2015

	P1	P2	P3	P4
Portata volumetrica [m ³ /h]	6,4	4,3	9,2	2,8
Prevalenza [mCA]	12	14,7	/	12,3
Potenza nominale [W]	450	570	1100	453
Energia per unità di volume [$\frac{Wh}{m^3}$]	70,3	129,6	119,8	226,1

In questo modo si determina il consumo elettrico giornaliero delle pompe di circolazione, riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

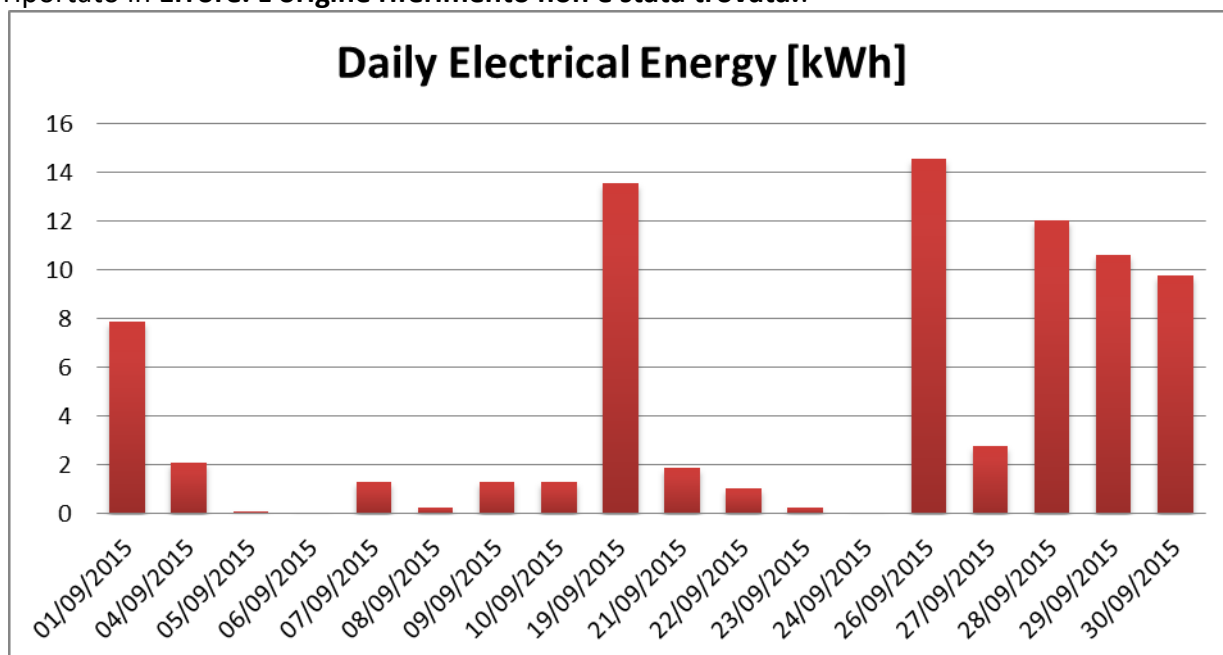


Figura 87 - Energia elettrica giornaliera, settembre 2015

4.2.2 Campagna sperimentale 2017

Come già specificato, il periodo nel quale sono stati rilevati i dati che descrivono il funzionamento dell'impianto va dal 15 al 30 settembre.

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato l'andamento dell'irradianza solare nel periodo di prova.

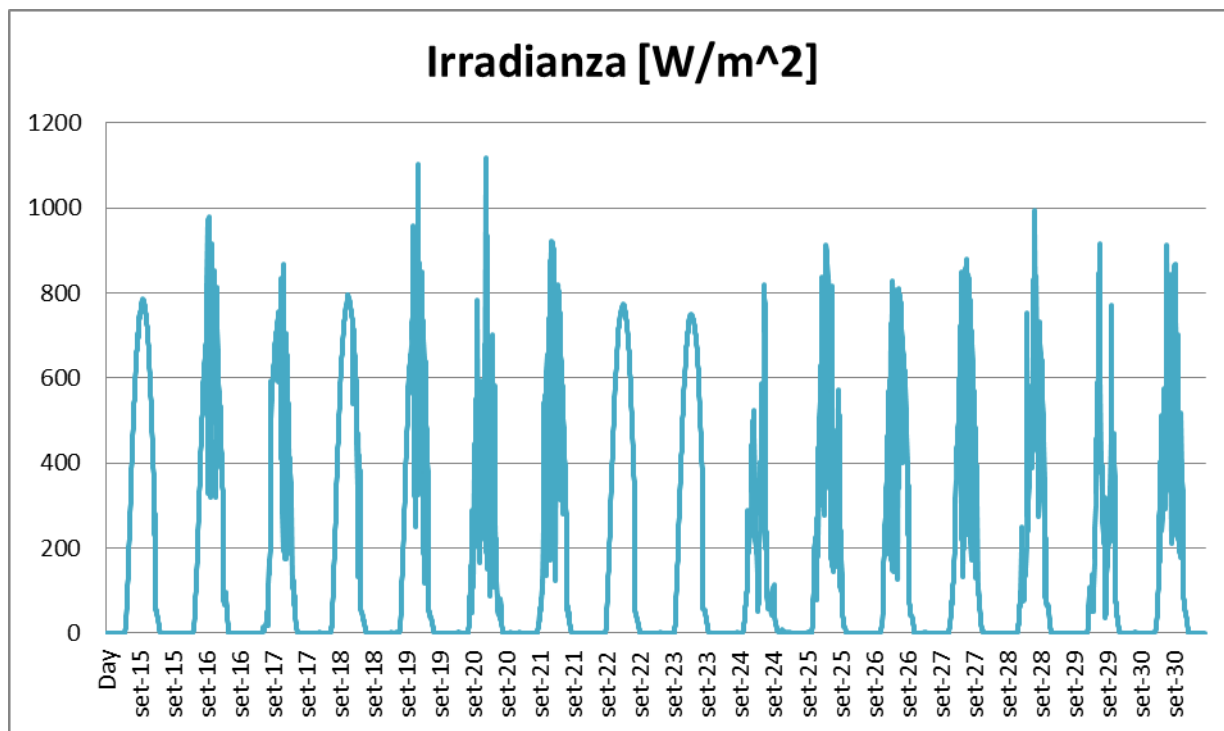


Figura 88 - Irradianza, settembre 2017

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

- le condizioni dell'ambiente esterno, ossia la temperatura ambiente, l'umidità relativa esterna e l'irradianza;
- le temperature di ingresso e uscita del fluido dal campo solare, dal serbatoio di accumulo caldo, dalla torre evaporativa, dal sistema di accumulo freddo, e dalla serra;
- le temperature interne ai serbatoi di accumulo caldo e freddo;
- il valore di energia elettrica per l'alimentazione dell'impianto e la relativa potenza elettrica;
- 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).

I dati raccolti possono essere agevolmente scaricati da remoto, sia sotto forma di grafico che di tabella in formato di testo.

Passaggio fondamentale dell'elaborazione dei dati è stato la determinazione degli intervalli di tempo in cui i componenti dell'impianto sono in funzione. Mentre per le pompe P1 e P5 il sistema di acquisizione fornisce indicazioni sullo stato di attivazione, non si ha a disposizione alcuna informazione diretta sugli intervalli in cui le pompe di circolazione gestite dalla macchina ad assorbimento sono in funzione. Per questo motivo sono stati determinati due indicatori, che dipendono da:

- orario di funzionamento: la logica di comando dell'impianto mette in off la macchina ad assorbimento fra le 22,00 e le 5,00 del mattino dopo;
- 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,

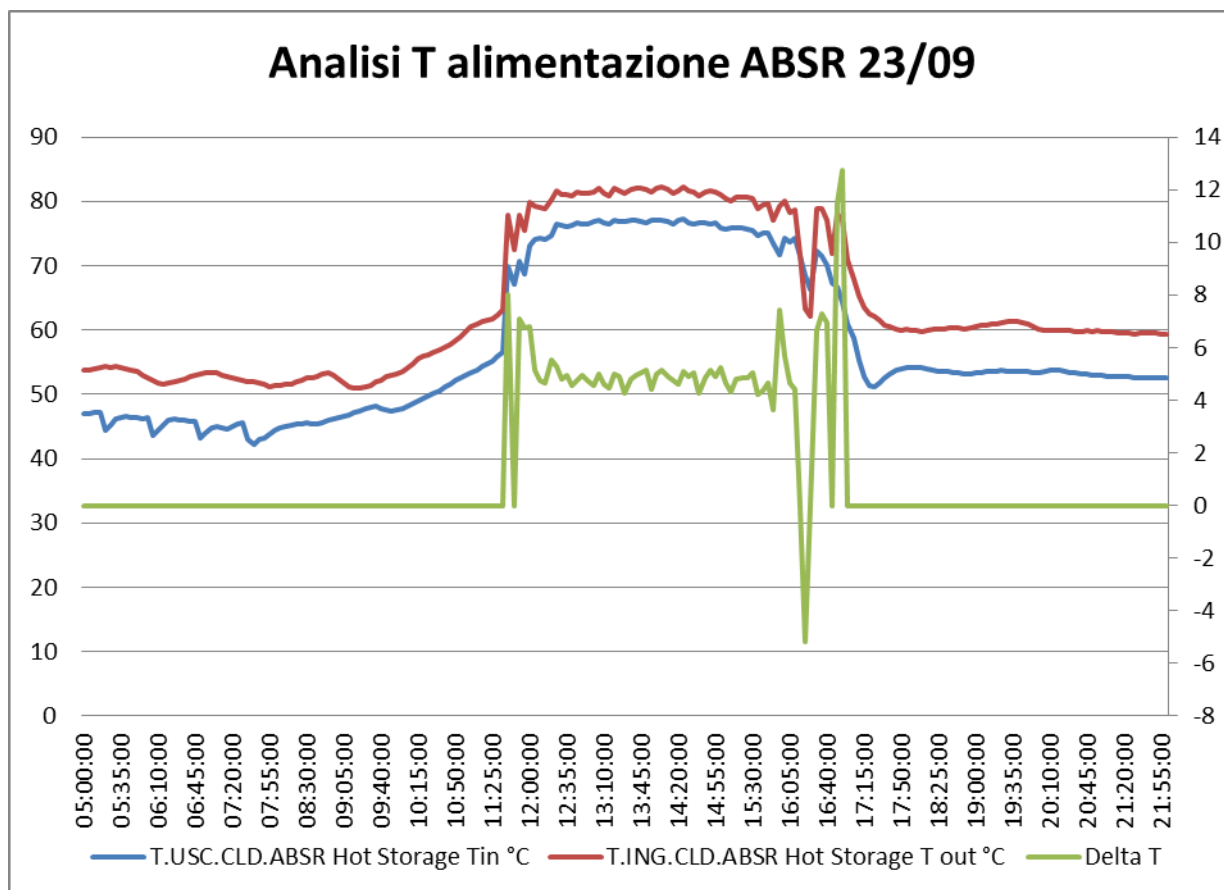


Figura 90 - Temperatura acqua di alimentazione assorbitore, 23 settembre 2017

La macchina frigorifera ad assorbimento entra in funzione dalle 11:35, quando la temperatura del fluido vettore in ingresso (curva rossa), proveniente dall'accumulo caldo, raggiunge i 75°C. Poco dopo vengono nuovamente a mancare le condizioni di funzionamento (alle 11:45 la temperatura dell'acqua in ingresso scende a 72,5°C), quindi l'assorbitore si spegne. Alle 11:50 si registrano nuovamente le condizioni di attivazione della macchina, che da quel momento funziona senza interruzioni fino alle 16:15. A quel punto la temperatura in ingresso segna un netto calo, passando in 15 minuti da 78°C a 63°C. Per la dinamica del fenomeno, 15 minuti costituiscono un periodo troppo esiguo per una differenza di temperatura di tale entità. Tale gradiente di temperatura è dovuto al fatto 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 63°C. In questo intervallo di tempo si registra una 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). Successivamente il fluido in ingresso supera nuovamente i 75°C, la macchina si accende per altri 30 minuti, per poi spegnersi definitivamente.

L'analisi della situazione esposta, che può essere estesa all'intero periodo di prova, e, in altre giornate è stata registrata anche nel transitorio di accensione della macchina. Si può concludere, pertanto, che tale anomalia sia legata al transitorio di funzionamento dell'impianto. Le cause possono essere dovute a diversi fattori. Il più probabile è legato alla gestione del sistema di controllo della macchina ad assorbimento, indipendente da quello generale dell'impianto, che accende in contemporanea le pompe di circolazione da esso controllate e la macchina frigorifera, provocando presumibilmente (sarà verificato nella prossima campagna sperimentale) un'eccessiva instabilità termofluidodinamica, tale da comportare differenze di pressione anomale.

Poiché questa problematica riguarda i transitori di accensione e spegnimento delle pompe di circolazione si è assunto di trascurare le differenze di temperatura negative, sostituendo tali valori con 0. Questa assunzione fa sì che il valore di deltaT medio giornaliero, necessario ai fini della valutazione

delle prestazioni energetiche dell'impianto, non sia penalizzato dal comportamento irregolare indotto dal transitorio.

Da Fig. 3.30 a Fig. 3.34 sono riportati gli andamenti delle temperature dei componenti principali dell'impianto¹.

Dai dati presentati viene messo in evidenza il fatto che nei giorni 20, 24, 29 e 30 settembre la macchina frigorifera ad assorbimento non entra in funzione. La temperatura in ingresso ed uscita della serra dipende dalla richiesta dell'utenza, che comanda manualmente l'azionamento della pompa di circolazione, e dal sistema di distribuzione. La richiesta di raffreddamento è stata nulla nei giorni 16, 17, 18, 20, 25, 29 e 30 settembre.

¹ Si è assunta l'ipotesi di considerare l'impianto in funzione quando la curva rappresentante la grandezza ΔT (verde) è maggiore di 0.

Analisi T Campo Solare

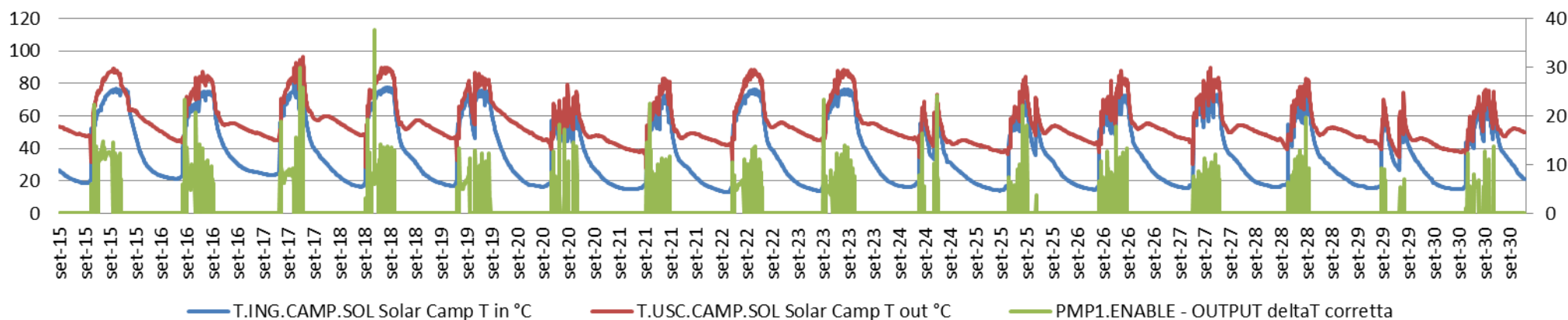


Figura 91 - Temperature campo solare, settembre 2017

Analisi T alimentazione ABSR

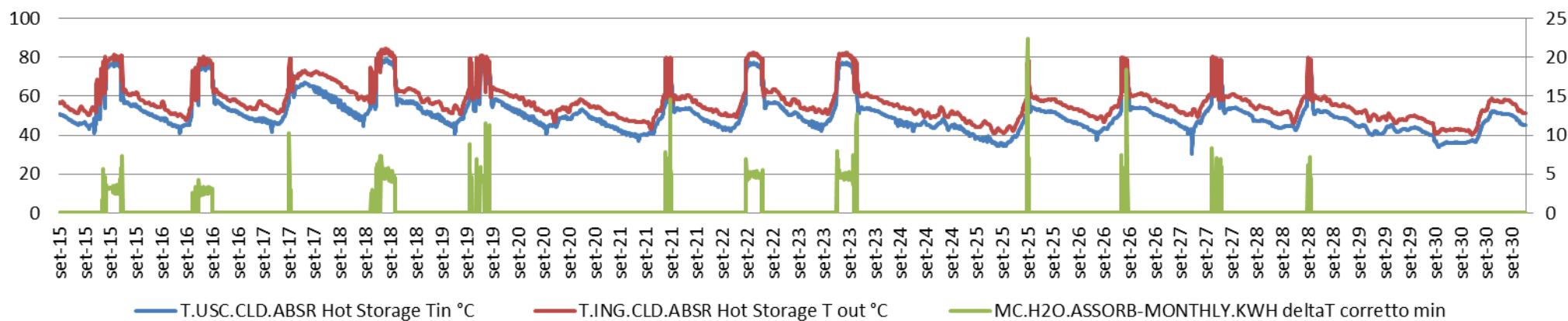


Figura 92 - Temperature alimentazione macchina ad assorbimento, settembre 2017

Analisi T acqua refrigerata ABSR

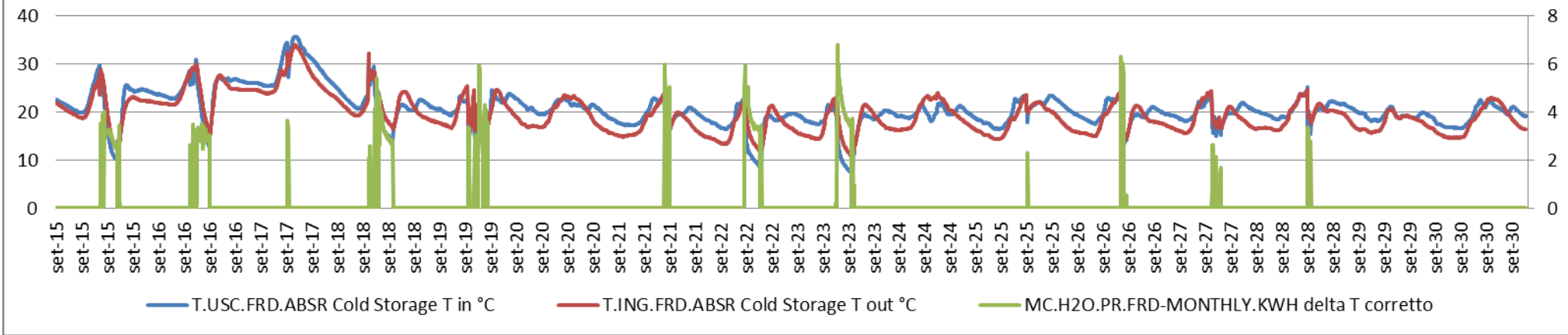


Figura 93 - Temperature campo solare, settembre 2017

Analisi T torre evaporativa

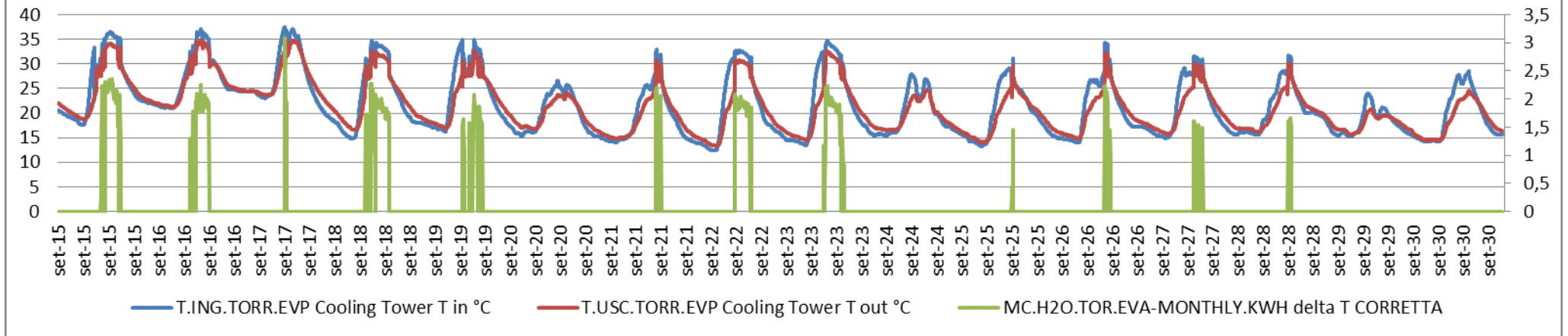


Figura 94 - Temperature torre evaporativa, settembre 2017

Analisi T acqua refrigerata serra

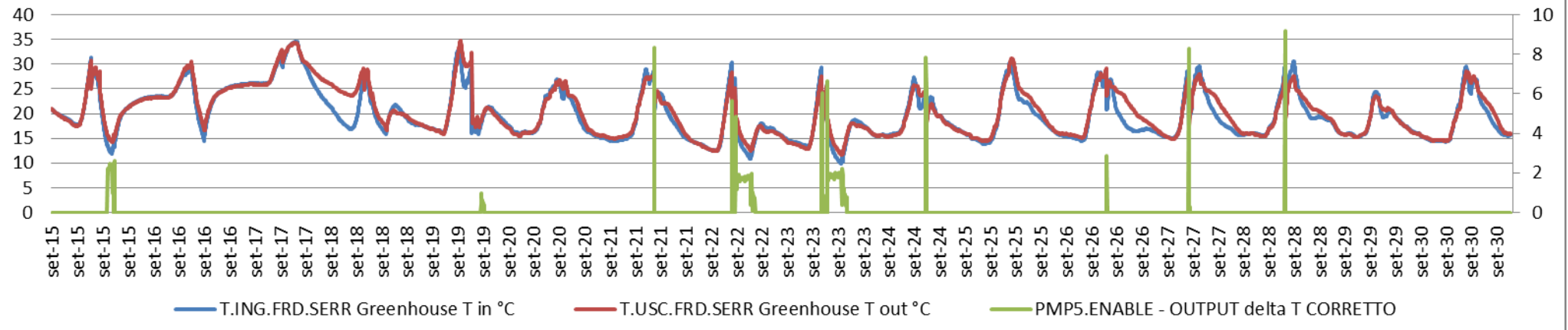


Figura 95 - Temperature acqua refrigerata verso la serra, settembre 2017

Il calcolo dei flussi di potenza è stato effettuato ipotizzando le portate² 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 (Tab. 3.2).

Tabella 16 - Portate nominale, settembre 2017

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 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) 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).

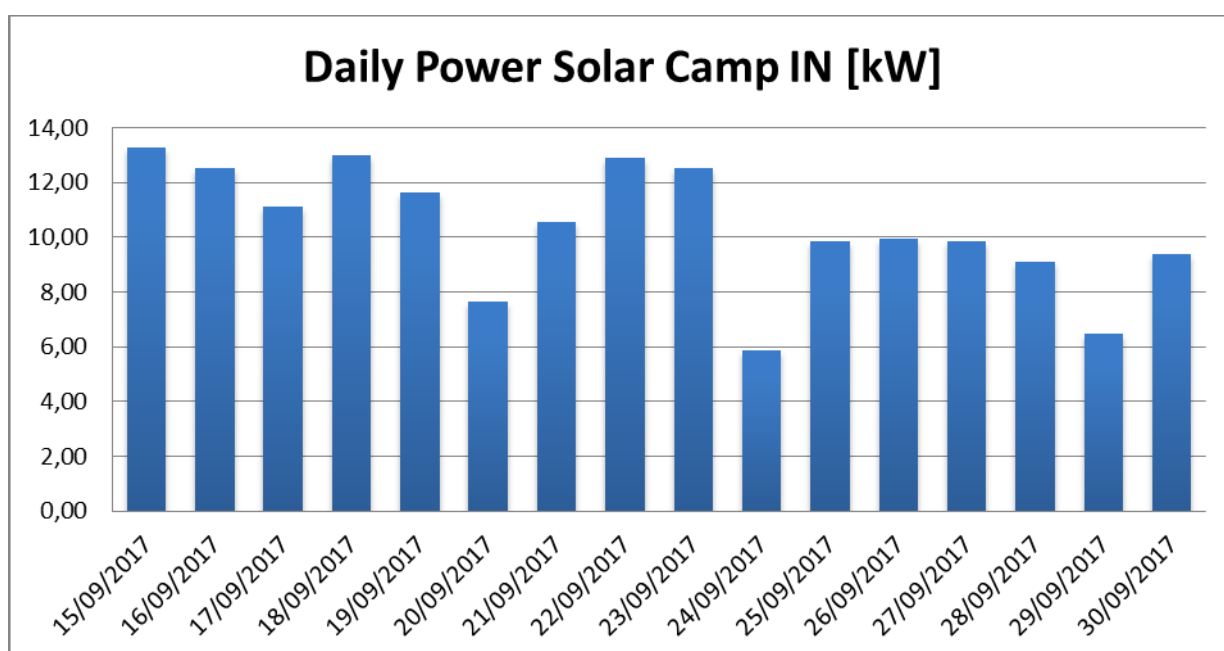


Figura 96 - Potenza giornaliera ingresso campo solare, settembre 2017

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 considerato il valore medio della differenza di temperatura durante l'intervallo di funzionamento della pompa di circolazione P1 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

² Poiché i misuratori installati sull'impianto sono dei conabilizzatori di energia, la grandezza portata non è misurabile.

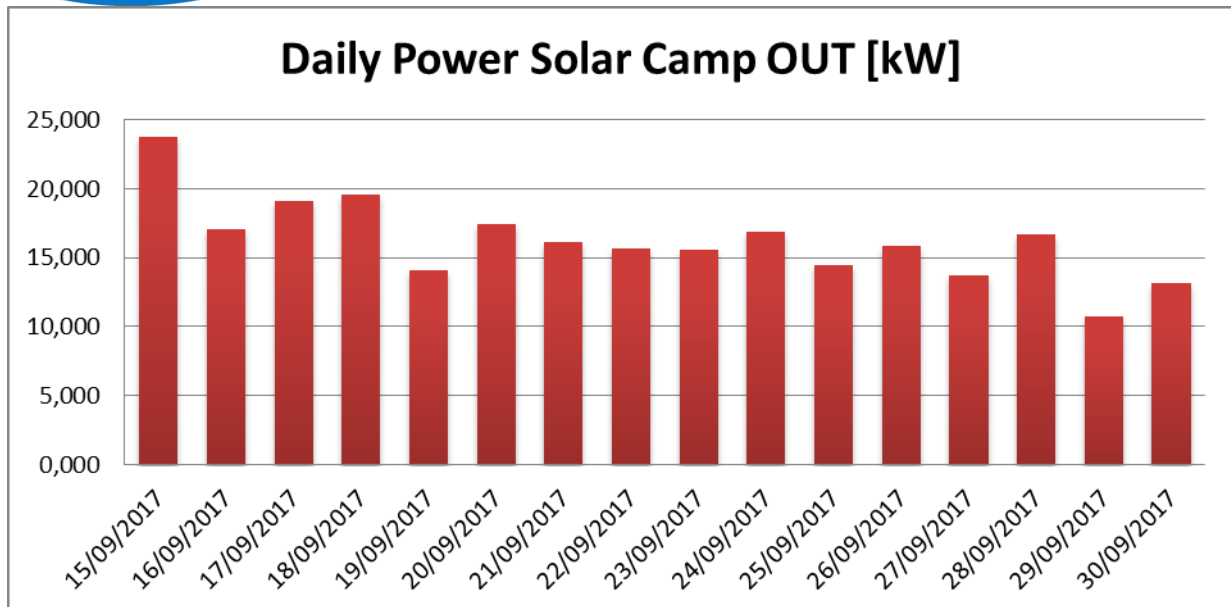


Figura 97 - Potenza giornaliera in ingresso al campo solare, settembre 2017

Il rendimento giornaliero del campo solare calcolato come:

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

è riportato in

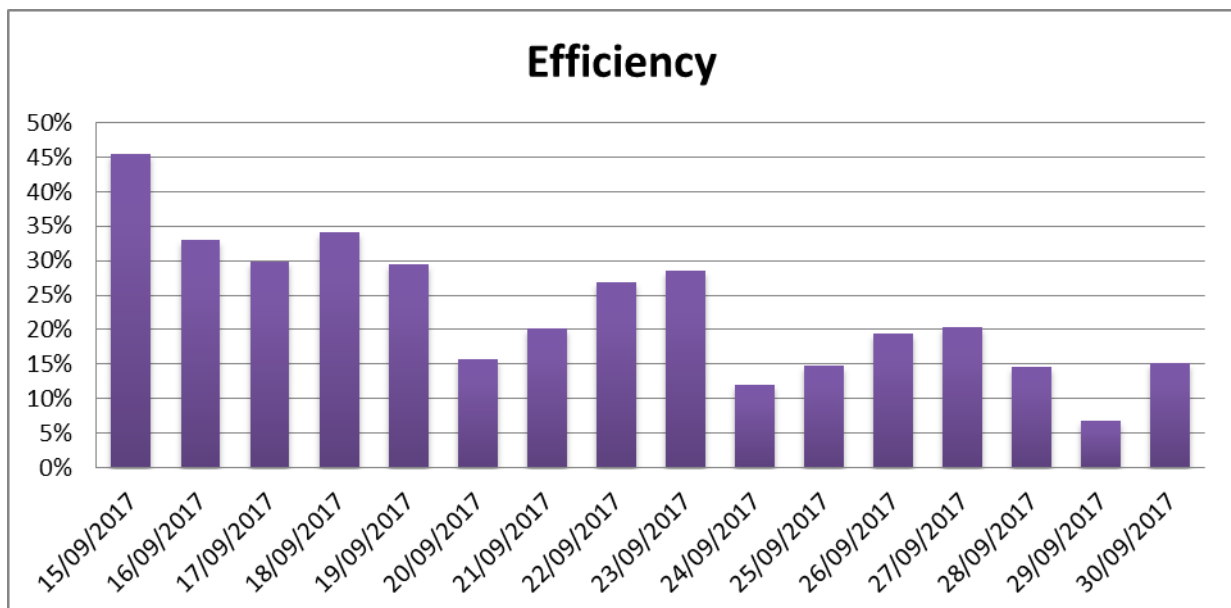


Figura 98 - Rendimento campo solare, settembre 2017

Si osserva in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** che il rendimento, durante il periodo di prova, si attesta sempre al di sotto del 50%. Questo valore è rilevante, se si considera che il rendimento massimo dei collettori solari si aggira attorno al 60%. Il comportamento del campo solare risulta dunque coerente con le aspettative.

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 ottiene **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

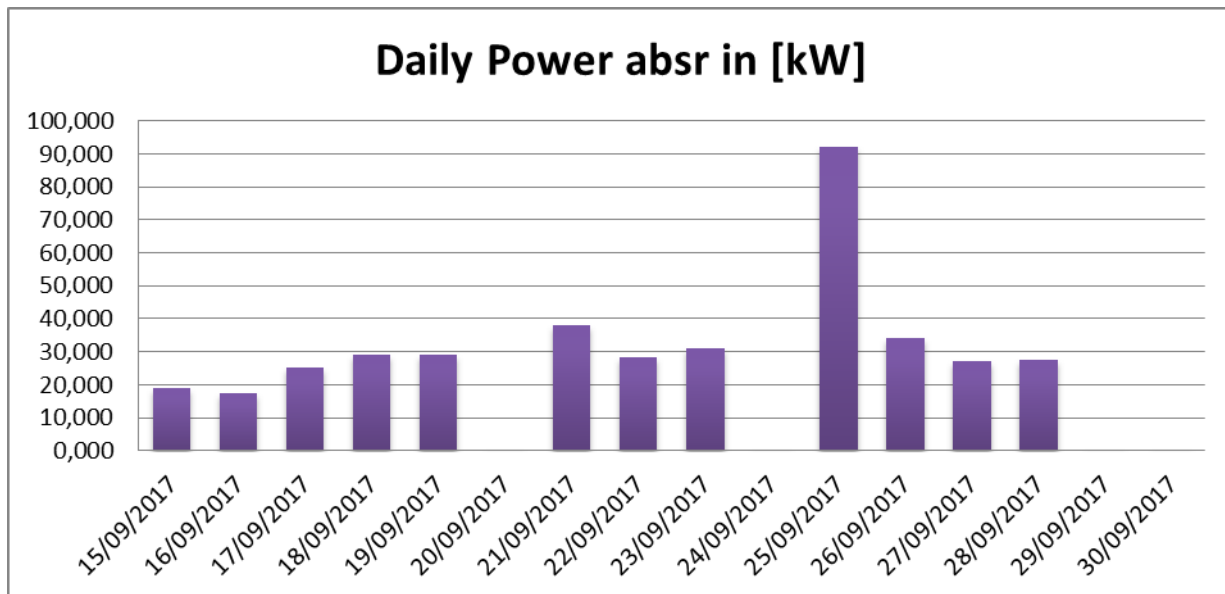


Figura 99 - Potenza giornaliera ingresso macchina ad assorbimento, settembre 2017

Il picco di potenza fatto registrare il 25 settembre è dovuto alla grande differenza di temperatura fra acqua in ingresso ed in uscita dalla sezione "calda" della macchina ad assorbimento (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**): in quel giorno però l'impianto è in funzione solo per pochi minuti, con il risultato di un modesto valore di energia (23 kWh).

La potenza termica in uscita dalla macchina frigorifera, che viene convogliata nel serbatoio di accumulo freddo, è riportata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

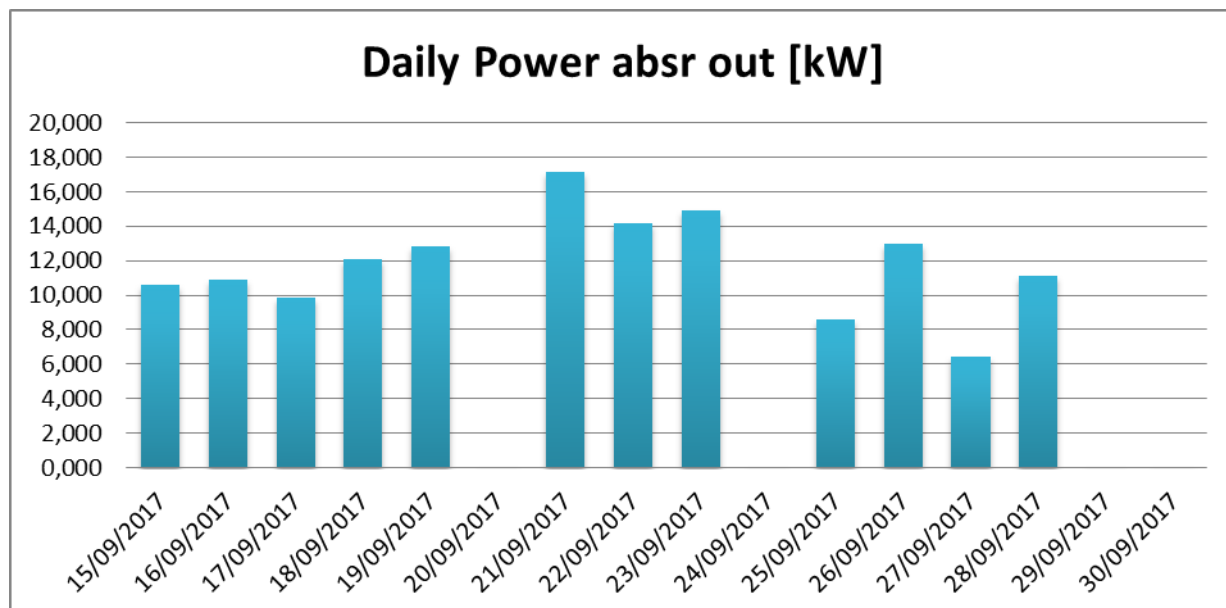


Figura 100 - Potenza giornaliera uscita macchina ad assorbimento, settembre 2017

In maniera analoga a quanto fatto per il campo solare, si procede ricavando il coefficiente di prestazione della macchina frigorifera (COP), che permette di dare un giudizio sul comportamento dell'assorbitore:

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

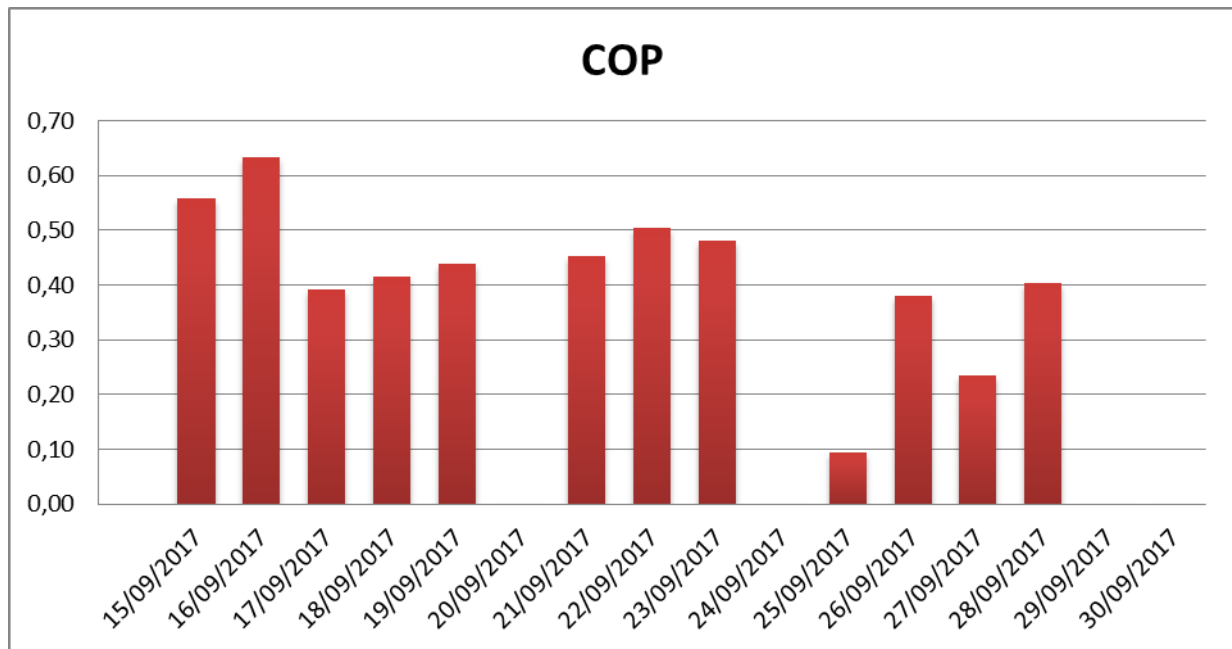


Figura 101 - Coefficiente di prestazione macchina ad assorbimento, settembre 2017

Il COP nei primi giorni di prova si attesta su valori elevati, fra 0,55 e 0,65, per poi ridursi attorno a 0,4. Il funzionamento della macchina frigorifera ad assorbimento appare soddisfacente, considerando 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 (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), che raggiungono in alcuni giorni anche il valore più basso al quale la macchina frigorifera può portare l'acqua: 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.

Un giorno in cui si può evidenziare la bontà del comportamento della macchina frigorifera ad assorbimento è il 23 settembre. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è riportato l'andamento della temperatura dell'acqua refrigerata dal componente.

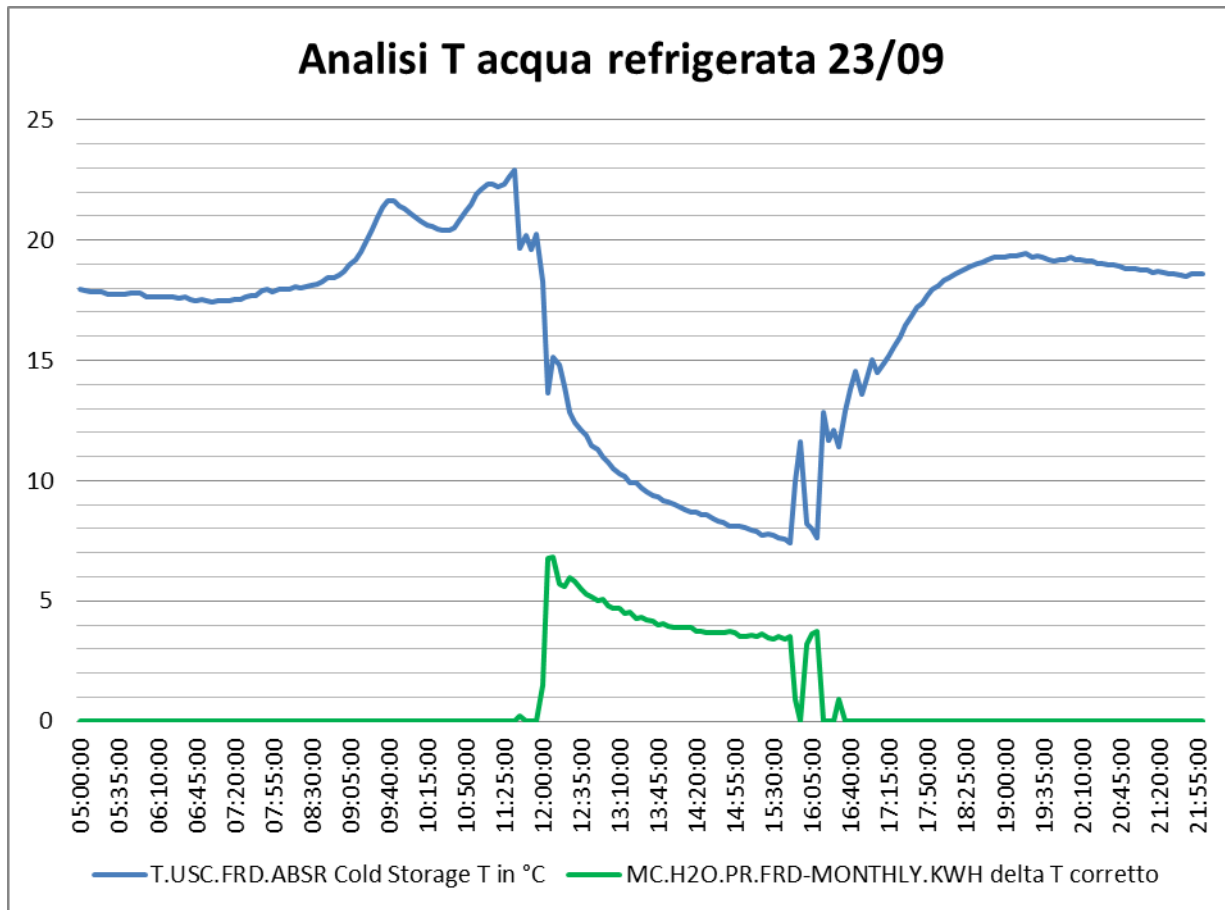


Figura 102 - Analisi temperatura acqua refrigerata in uscita alla macchina ad assorbimento, 23 settembre 2017

In questa giornata la macchina ad assorbimento è entrata in funzionamento alle 11:55, come è possibile desumere dalla curva verde che rappresenta la grandezza deltaT, quando la temperatura dell'acqua all'uscita è di 20,25°C. Dopo 10 minuti, alle 12:05, la temperatura del fluido refrigerato è scesa fino a 13,62°C, con un calo di temperatura di quasi 7°C in un intervallo di tempo abbastanza breve. La macchina ad assorbimento prosegue il suo funzionamento, facendo progressivamente abbassare la temperatura dell'acqua da mandare all'accumulo freddo, fino ai 7,43°C, 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 è presentata in Fig. 3.42:

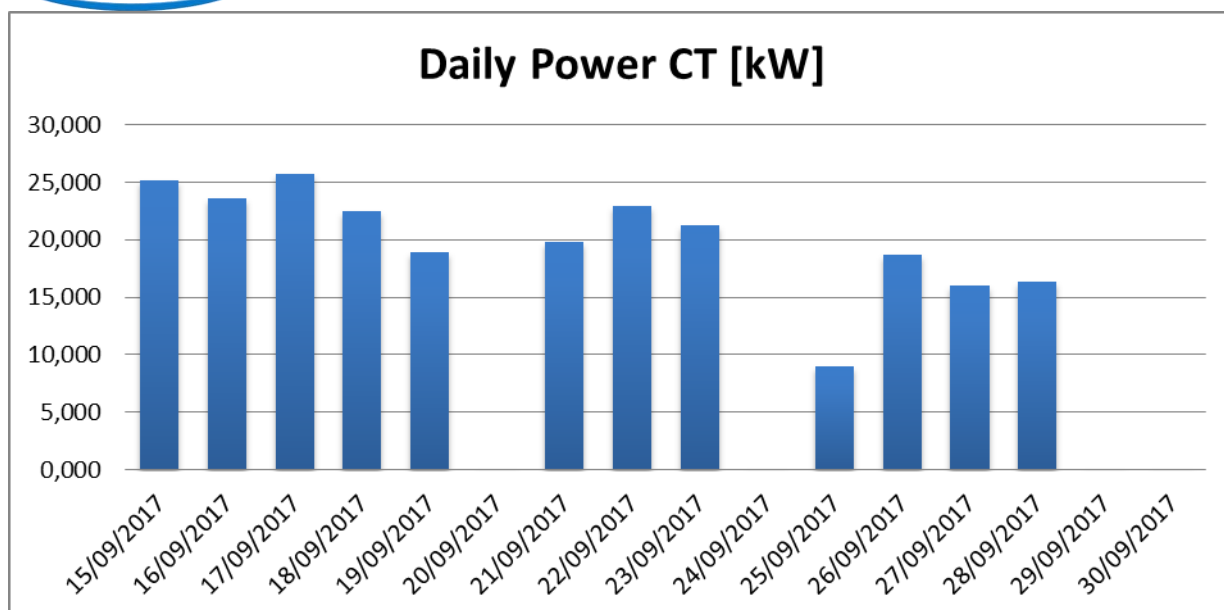


Figura 103 - Potenza giornaliera uscita torre evaporativa, settembre 2017

Questi valori risultano particolarmente elevati per la grande portata di acqua evolvente nel componente.

La valutazione della potenza frigorifera inviata alla serra dal serbatoio di accumulo freddo deve tener conto dell'attuale sistema di distribuzione, che è ancora in fase di sperimentazione e che sarà al centro della campagna di prove dell'estate 2018. 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.).

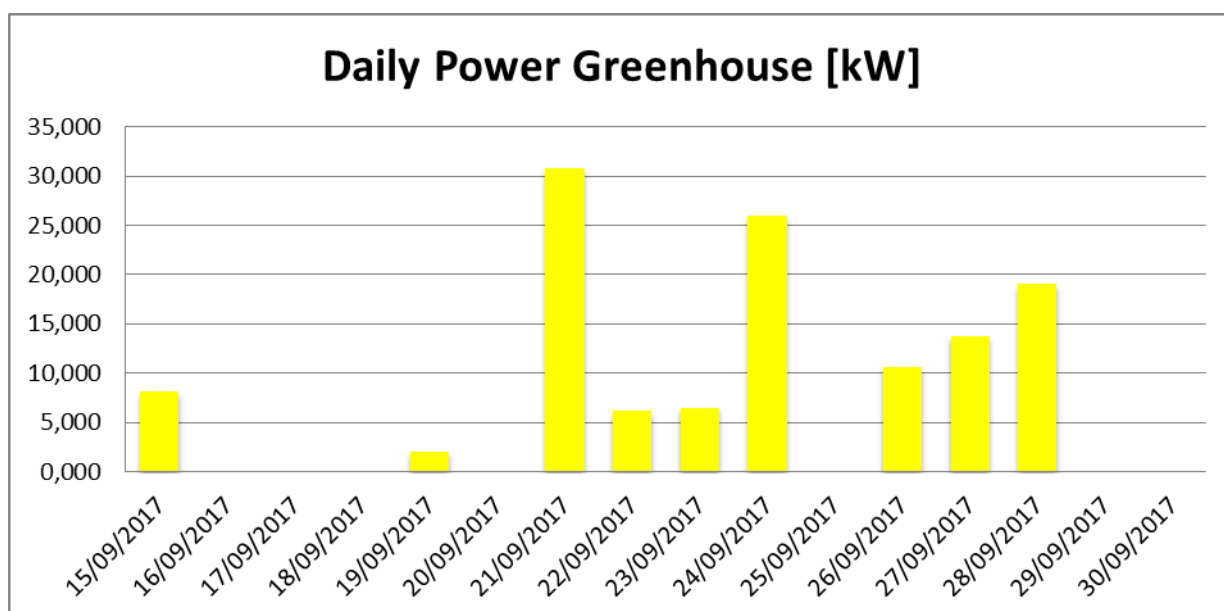


Figura 104 - Potenza giornaliera serra, settembre 2017

Al termine dell'analisi della campagna sperimentale del 2017 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 133,6 kWh di energia elettrica.

Ciò ha permesso di definire un'efficienza globale di impianto (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), 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 39,2%.

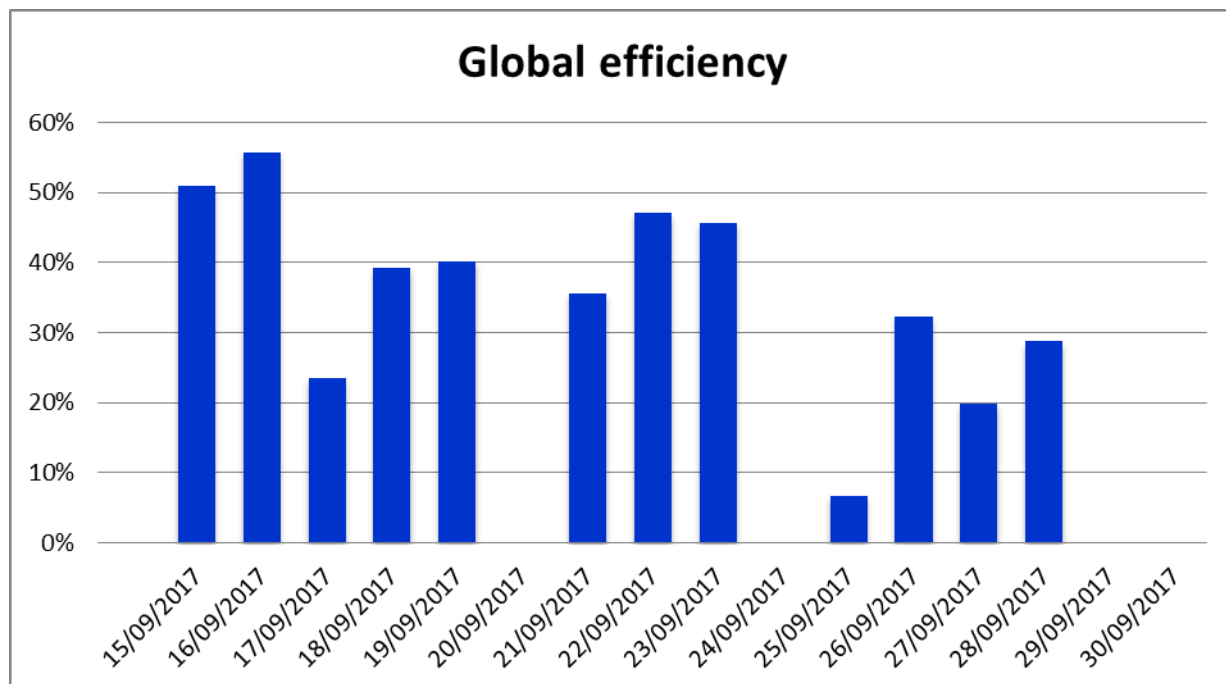


Figura 105 - Efficienza globale impianto, settembre 2017

5 Allegati

5.1 *Allegato 1*

COMUNE DI ROMA CAPITALE

ENEA CENTRO RICERCHE CASACCIA

**RELAZIONE DI VERIFICA PER LA PORTANZA DELSOLAIO DI COPERTURA
DELLA PALAZZINA ADIBITA A CASA LABORATORIO IN LOCALITA' CASACCIA**

La verifica in esame consiste nel determinare la portanza di una porzione di solaio della copertura della palazzina " casa laboratorio " sita nel centro ricerche dell'ENEA in località Casaccia.

Il sottoscritto Ing Claudio Luzzi nato a Roma il 15-06-1943 iscritto all'Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma al n° 9375 e residente in Roma, Via Enrico medi 32 incaricato di redigere la suddetta verifica ha proceduto ad effettuare le seguenti ricerche onde ottenere i dati necessari al raggiungimento dello scopo:

visita sul luogo interessato a lavoro

reperimento di piantine architettoniche

studio di un progetto strutturale della palazzina giuntomi, purtroppo senza disegni e carpenterie.

Il materiale a disposizione mi ha, tuttavia permesso di ottenere dei dati che ritengo sufficienti per giungere alla conclusione del lavoro e a ridisegnare la carpenteria possibile partendo dalle descrizioni della relazione tecnica contenuta nel progetto strutturale di cui sopra. Qui infatti si recita che tutte le travi perimetrali sono sotto sporgenti per tutti i piani mentre quelle interne sono travi a spessore di solaio di dimensioni 24x90 cm. Nella stessa relazione tecnica si evince, perché chiaramente espresso, che il solaio è realizzato in latero cemento con travetti del tipo a traliccio con fondello in laterizio e blocchi di laterizio interposti di alleggerimento per un'altezza di 20+4 cm di soletta collaborante. Il solaio è armato, in ogni travetto, con 1φ12+1φ10 (1.92 cmq)/50 cm agli appoggi, mentre in campata è armato con 1φ(12+14)(2.67 cmq)/50cm.

In base a queste considerazioni ci andiamo a calcolare con il metodo delle tensioni ammissibili, in vigore al tempo della costruzione che carico può sopportare il solaio attuale poi si effettuerà la verifica con i metodi attualmente in uso cioè agli stati limite. Caratteristiche geometriche della sezione reagente:

Altezza totale H(cm)=24	Analisi dei carichi kg/mq
Altezza utile h(cm)= 22	Peso proprio kg/mq 250
Spessore soletta s(cm)=4	Peso permanente kg/mq 200
Interasse l(cm)=50	Peso variabile kg/mq 400
Larghezza sezione B(cm)=14	Totale 850
Coeff omog =15	

Luce della campata più lunga L=5.35 m



Caratteristiche meccaniche e verifiche in appoggio.....In mezzeria

Afe(cm ²) 1.92	Afe(cm ²) 3.02
Xn (cm)=7.68	Xn (cm)=5.62
Jn(cm ⁴)= 8019.72	Jn(cm ⁴)= 15061.6
Wc(cm ³)=1044.7	Wc(cm ³)=2680.3
Wf(cm ³)=37.3	Wf(kg/cm ²)=61.3
Sigma c(kg/cm ²)=67.4	Sigmac(kg/cm ²)=5.7
Sigm f(kg/cm ²)=1903	Sigma f(kg/cm ²)=2580

Verifica di Solaio in Latero-Cemento

Oggetto: Solaio Casaccia

Caratteristiche dei materiali

Classe CLS C25/30 $f_{ck}=25$ Mpa $f_{cd}=11$ Mpa (0,6 $f_{ck}=15$; 0,45 $f_{ck}=11,25$)
 Acciaio B450C $f_{yd}=391$ MPa (0,8 $f_{yk} = 360$)

Caratteristiche geometriche

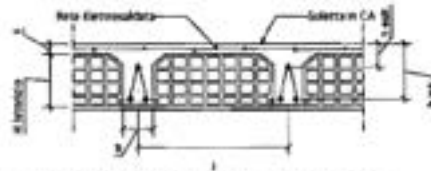
L (cm) 400 i (cm) 45
 H laterizio 20 cm b_w (cm) 12
 s 4 cm b_h (cm) 33
 H = 24 cm $\lambda = 16,67$ Snellezza del solaio

Armatura

	n° ferri	ø ferri [mm]	h [cm]	A_r [cmq]	A_{rd} [cmq]	ρ	L [cm]
spezzoni estradosso	1	16	2		2,01	0,0070	32+156
continua intradosso	2	14	21		3,08	0,0107	47+400+47

Analisi dei carichi

Peso Proprio 250 kg/mq
 Permanente 200 kg/mq
 Accidentale 400 kg/mq
 Totale SLE R 850 kg/mq



Verifica a flessione in campata ($M_{max} = q L^2 / \alpha$ - armatura resistente: continua intradosso)

SLU	α	M_{Ed} (kg m)	x (cm)	ω_s	M_{rd} (kg m)	FS
	<u>8</u>	1102,5	11,07	0,42	1996	1,81
SLE R	ψ	M (kg m)	x (cm)	J (cm ⁴)	σ_c (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)
	1,0	765	5,79	13532	3,28	128,94
SLE Q	<u>0,3</u>	513	5,79	13532	2,20	86,47

Verifica a flessione in appoggio ($M_{max} = q L^2 / \alpha$ - armatura resistente: spezzoni estradosso)

SLU	α	M_{Ed} (kg m)	x (cm)	ω_s	M_{rd} (kg m)	FS
	<u>14</u>	630	7,23	0,26	1503	2,39
SLE R	ψ	M (kg m)	x (cm)	J (cm ⁴)	σ_c (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)
	1,0	437,1428571	8,30	7948	4,56	113,04
SLE Q	<u>0,3</u>	293,1428571	8,30	7948	3,06	77,57

Verifica a taglio ($V_{Ed} = q L / \beta$)

	β	V_{Ed}	kg	FS
	<u>2</u>	1103		
k =	<u>1,98</u>	V_{rd}	1868	1,69
		$V_{rd,s}$	12047	10,93



Verifica a flessione e punzonamento della soletta per carico concentrato

	P	kg	ø (mm)	passo (cm)	$A_{s,r}$ (cmq)	
	<u>200</u>		<u>8</u>	<u>20</u>	0,33	
Flessione allo SLE R	b_m	M_{sd} (kg m)	x (cm)	J (cm ⁴)	σ_c (N/mm ²)	σ_r (N/mm ²)
	13	12	0,91	9	11,56	208,78

Punzonamento allo SLU

$V_{Ed,0}$ (MPa) =	0,75	$V_{Ed,0}$ (MPa) =	2,83
$V_{Ed,1}$ (MPa) =	0,33	$V_{Ed,1}$ (MPa) =	0,76

Verifica di deformabilità

K = 1 $\lambda_{lim} = 29,19$ $\lambda = L/H = 16,67$

Note: Non occorre effettuare il calcolo della deformazione

Conclusione per i carichi sopportabili dal solaio : **600 kg/mq utili oltre al peso proprio del solaio**

Occorre ora verificare solo la trave a spessore 24x90 in quanto le travi di bordo, ripeto tutte uguali e caricate con le medesime armature non portano in copertura il peso della tamponatura che è di progetto pari a 800 kg/ml pertanto sono sicuramente in grado di sopportare il carico massimo ammissibile di cui sopra calcolato per il solaio : ovvero 600 kg/mq.

Spessore trave (cm)=24

Larghezza trave(cm)=90

Luce trave L=4,80 m

Zona di influenza i= 5.15ml

Carico applicato P=5.15x600=3090 kg/m

M=1/8x3090x4.8^2= 8800 kgm in campata

M=1/14x3090x4.8^2= 5085 kgm in appoggio

Metodo delle tensioni ammissibili adottato al tempo

Caratteristiche meccaniche in appoggio

Af(cmq)=20.1

Xn (cm)=7.68

Jn(cm^4)= 8019.72

Wc(cm^3)=1044.7

Wf(cm^3)=37.3

Sigma c(kg/cmq)=55.8

Sigm f(kg/cmq)=11219.5

in campata

Af(cmq)=20.1

Xn (cm)=9.76

Jn(cm^4)= 89098

Wc(cm^3)=9116.45

Wf(kg/cmq)=416.9

Sigma c(kg/cmq)=96

Sigma f(kg/cmq)=2110

Calcolo e verifica con il metodo a rottura secondo metodo stress-block

I dati geometrici sono quelli già descritti:

αcc= coefficiente riduttivo per resistenza del cls a lungo termine= 0.85

γc=coefficiente di sicurezza per il cls =1.5

γs=coefficiente di sicurezza per l'acciaio =1.15

Med=momento di servizio = 88KNm

Fcd=tensione massima di progetto=17 N/mm^2

Fyd=tensione di snervamento di calcolo=391.3N/mm^2

α=-6.91



$\beta=325425$

$\psi=0.8$

$\lambda=0.40$ baricentro cls compresso

X=asse neutro =2.63 cm

$\epsilon's=0.11\%$ accorciamento acciaio snervato

$\epsilon_s=0.2.61$ allungamento acciaio teso<6.75%

M_r =momento resistente=162.8 KNm>88KNm **Verificato**

Conclusione il terrazzo in esame è in grado di sopportare **600 kg/mq utili oltre al peso proprio.**

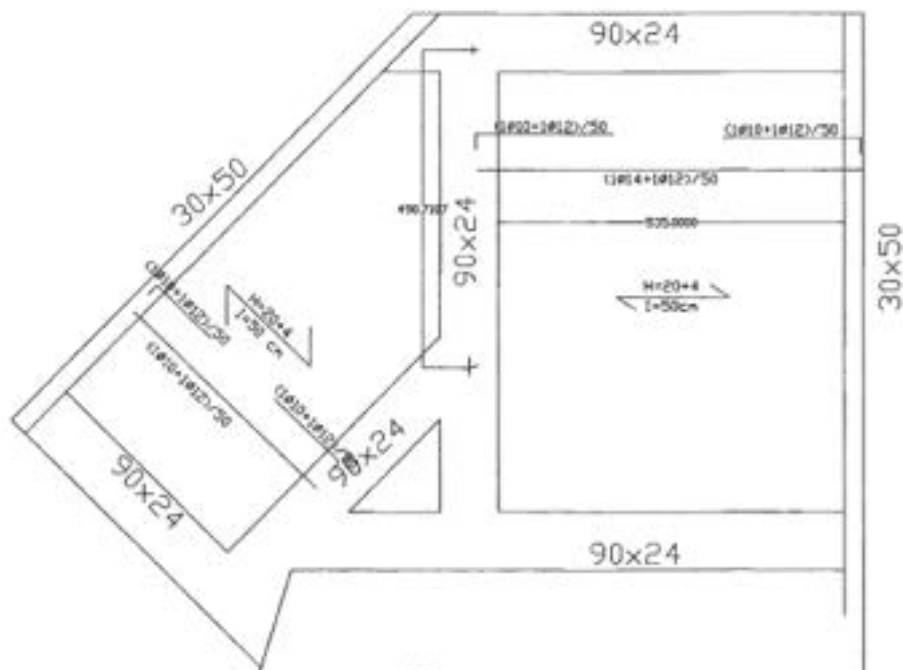


Figura 106: Misure del solaio di copertura della Casa delle Energie, Centro ENEA Casaccia

5.2 Allegato 2

Bonus Verde

In accordo con quanto sopra riportato, la realizzazione di coltri vegetali sugli edifici è in grado di contribuire positivamente, insieme agli interventi di riqualificazione energetica sulle parti opache e trasparenti di un edificio, in quanto sulla base delle caratteristiche delle essenze vegetali e dei sistemi di coltivazione impiegati, favoriscono il controllo della radiazione solare e del flusso termico conduttivo. Si riportano le tipologie di intervento possibili con i sistemi vegetali ai fini della riqualificazione energetica degli edifici.

Obiettivo	Tipologia di intervento	Soluzione naturale
Riduzione del coefficiente di attenuazione e della trasmittanza termica periodica, e incremento dello sfasamento dell'onda termica.	Realizzazione con essenze vegetali di tetto giardino orizzontale e/o di parete verde verticale.	Realizzazione con essenze vegetali di tetto giardino orizzontale e/o di parete verde verticale.
Riduzione del coefficiente di assorbimento della finitura superficiale dell'edificio nei confronti della radiazione solare incidente e dei flussi termici esterni ed interni.	Realizzazione con essenze vegetali di tetto giardino orizzontale e/o di parete verde verticale.	Essenze e/o sistemi vegetali.
Incremento del coefficiente di schermatura della radiazione solare incidente.	Inserimento di sistemi vegetali esterni in funzione di schermatura. Effetti di ombreggiamento da alberi.	Coltri vegetali, cespugli e/o alberi.

I vantaggi in termini di miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici con l'impiego dei sistemi vegetali sono mediamente compresi nell'ordine del 3-10% nei periodi invernali (riduzione energia per riscaldamento) e del 8-15% nei periodi estivi (riduzione energia per raffrescamento) rispetto ai costi annuali della climatizzazione microclimatica degli spazi interni abitati. Inoltre, il verde quando applicato all'involucro edilizio spesso migliora gli aspetti visivi dell'edificio e soprattutto non necessita di ulteriori spazi dedicati che potrebbero sottrarre ulteriore superficie edificabile. Sulla base di queste premesse, la legge di bilancio 2018 ha introdotto l'agevolazione fiscale denominata "bonus verde". Il beneficio consiste nel riconoscimento di una detrazione IRPEF di un importo pari al 36% delle spese documentate, fino a 5.000 euro per unità abitativa, sostenute ed effettivamente rimaste a carico dei contribuenti che possiedono o detengono, sulla base di un titolo idoneo, l'immobile sul quale sono effettuati gli interventi verdi. La misura prevede detrazioni per la 'sistemazione a verde' di aree scoperte di pertinenza di qualsiasi abitazione privata (terrazzi, giardini, anche condominiali) ed anche a lavori di recupero di giardini di interesse storico. Le regole da seguire per usufruire del "bonus verde" sono le seguenti:

- sono riconosciute le spese effettivamente sostenute dai contribuenti che detengono l'immobile sul quale sono effettuati gli interventi riguardanti aree scoperte private di edifici esistenti, unità immobiliari, pertinenze o recinzioni, impianti di irrigazione e realizzazione di pozzi sia privati che condominiali;
- è riconosciuta la detrazione anche per le spese relative ad interventi su parti comuni esterne di edifici condominiali fino ad un massimo di euro 5.000 per unità abitativa. In questo caso, la detrazione spetta al singolo condomino nel limite della quota a lui imputabile a condizione che la stessa sia stata effettivamente versata al condominio entro i termini di presentazione della dichiarazione dei redditi.
- le spese devono essere effettuate con mezzi di pagamento tracciabili;

- sono ricomprese nell'agevolazione le spese di progettazione e manutenzione connesse all'esecuzione degli interventi indicati.

6 Riferimenti bibliografici

1. Ariaudo F., G.V. Fracastoro, S. Corgnati. "Cooling Load reduction by green walls". 2008. Politecnico di Torino. Dipartimento di Energetica. Seminario in ppt, Barge, 08.09.2008.
2. Campiotti C.A., Bibbiani C., Alonzo G., Giagnacovo G., Ragona R., Viola C. Green Roofs and Facades agriculture (GRF) for supporting building energy efficiency. Journal of Sustainable Energy Vol.II, n.3, September 2011, pp. 24-29..
3. Campiotti C.A., Consorti L., G. Giagnacovo, A. Latini, G. Puglisi, M. Scoccianti, C. Viola. Caratterizzazione di tipologie di sistemi vegetali per migliorare l'efficienza energetica degli edifici nella città metropolitana. Report RdS/2015/141.
4. Cannaviello M. Prestazioni dell'involucro in regime estivo. Criteri per la riqualificazione energetica. ISBN 978-88-6055-592-2.
5. 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. {SWD(2016) 24 final}.
6. COM(2013) 249 final "Infrastrutture verdi – Rafforzare il capitale naturale in Europa".
7. David J. Nowak, Satoshi Hirabayashi, Allison Bodine, Eric Greenfield. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States . Environmental Pollution 193 (2014) 119e129. PP. 119-129.
8. Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2002 sul rendimento energetico nell'edilizia.
9. Decreto legislativo, 04/07/2014 n° 102, G.U. 18/07/2014. Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.
10. ENEA, audizione al Senato, 16/02/2017.
11. ENEA, Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2017. www.energiaenergetica.enea.it . pp. 99-100.
12. Parolini G., Del Monaco A., Fontana D.M., Fondamenti di fisica tecnica, UTET, 1983. pp. 291-310.
13. Parolini G., Fantini A., Impianti tecnici per l'edilizia, Sistema, 1970. pp. 342-416.
14. Raccomandazione (UE) 2016/1318 della commissione del 29 luglio 2016. L 208/46, IT, Gazzetta ufficiale dell'Unione europea 2.8.2016.
15. Ripa M. N., Muleo R., Recanatesi F., Speranza S., Mancinelli R., Ruzzi M. Sistemi vegetali e sostenibilità energetica: effetti sul microclima urbano. Report RdS/PAR2015/155.
16. UNI 11235/2015. Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde. 2007. Ente Nazionale di Normazione.