



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche in condizioni di funzionamento estive

F. Causone, M. Pietrobon, A. Tatti, L. Pagliano

ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI UN EDIFICIO AD ALTE
PERFORMANCE ENERGETICHE IN CONDIZIONI DI FUNZIONAMENTO ESTIVE

F. Causone, M. Pietrobon, A. Tatti, L. Pagliano

(Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

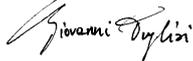
Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

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

Obiettivo: A. Soluzioni innovative per l'efficientamento degli edifici

Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA

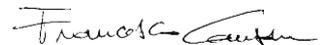


Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione per una attività di ricerca dal titolo: "Analisi delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche in condizioni di funzionamento estive".

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fabio Zanghirella



Responsabile scientifico Dipartimento di Energia – Politecnico di Milano: Prof. Francesco Causone



Gli autori ringraziano l'Ing. Carmelo Sapienza dello studio Sapienza & Partners, ROCKWOOL Italia and SIEMENS Building Technologies per il supporto tecnico.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE.....	9
2.1 MODIFICA E SETTAGGIO DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI	9
2.2 ANALISI DATI DI MONITORAGGIO	16
2.2.1 <i>Descrizione delle condizioni al contorno</i>	16
2.2.1.1 Condizioni climatiche.....	16
2.2.1.2 Occupazione	21
2.2.1.3 Logiche di controllo	21
2.2.2 <i>Dati di benchmarking</i>	33
2.2.3 <i>Analisi energetica</i>	36
2.2.4 <i>Analisi ambientale</i>	54
3 CONCLUSIONI.....	73
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	77
5 APPENDICE	78

Sommario

Il documento presenta i risultati delle analisi delle prestazioni energetiche ed ambientali, in condizioni di funzionamento estive, di un edificio residenziale monofamiliare ad alte prestazioni, in esercizio in Sicilia nel comune di Mascalucia (CT). L'edificio ha raggiunto la certificazione Passivhaus grazie alle elevate prestazioni termiche dell'involucro ed ai sistemi ad alta efficienza installati.

Esso rappresenta un esempio di nearly Zero Energy Building (nZEB) in clima mediterraneo ed è stato concepito come laboratorio vivente (living lab) offrendo l'opportunità di testare differenti logiche e strategie di controllo e di studiare la risposta degli occupanti alle stesse.

L'attività svolta ha riguardato l'analisi delle dinamiche di consumo e produzione di energia elettrica e delle condizioni di benessere termoigrometrico all'interno dell'abitazione, in relazione alle forzanti climatiche esterne, alle dinamiche di occupazione e alle logiche di controllo impostate. Al fine di acquisire e analizzare la totalità dei dati energetici ed ambientali dei mesi estivi, sono stati necessari alcuni interventi di aggiornamento e modifica del sistema di acquisizione dati e delle logiche di controllo precedentemente impostate.

L'analisi ha permesso di caratterizzare le prestazioni dell'edificio in condizioni di funzionamento estive, studiando gli effetti che differenti logiche di controllo e condizioni di occupazione hanno su di esse.

L'edificio ha risposto bene alle logiche settate, sia dal punto di vista energetico che ambientale. Complessivamente, nei mesi analizzati l'energia prodotta dal sistema fotovoltaico è maggiore dell'energia globale richiesta per tutti gli usi dell'edificio, ma potrebbe essere utile dettagliare ulteriormente i profili di consumo di energia per diversi usi finali, al fine di valutare strategie per migliorare l'accordo temporale tra generazione e consumo. Tra queste, lo spostamento temporale dei carichi flessibili, accumuli termici e/o elettrici per immagazzinare e rendere disponibile in modo più flessibile l'energia generata da fotovoltaico e solare termico. Questo consentirebbe di aumentare l'autoconsumo e alleggerire i costi trasferiti alla rete.

Dal punto di vista ambientale, l'edificio presenta un buon comportamento in termini di comfort anche nei periodi prolungati in cui è stato gestito in regime completamente passivo (free-floating). Tuttavia, potrebbe essere necessario ottimizzare ulteriormente i sistemi di settaggio delle schermature solari per massimizzare i periodi di funzionamento passivo dell'edificio e testare la risposta dell'edificio nelle condizioni più sfavorevoli.

1 Introduzione

Molte politiche energetiche intraprese dagli stati membri dell'Unione Europea negli ultimi anni hanno avuto come obiettivo la riduzione dei consumi energetici, la riduzione delle emissioni di inquinanti nell'atmosfera e la promozione di un approvvigionamento energetico sostenibile. In materia di efficienza energetica negli edifici, l'Unione Europea ha indicato agli stati membri la strada da percorrere con la Direttiva 2002/91/CE in seguito aggiornata (2010/31/UE [1]), introducendo il concetto di edifici ad energia quasi zero o nearly zero energy buildings (nZEB).

La Direttiva sulla Prestazione Energetica degli Edifici del 2010 definisce all'Art.2: *“edificio a energia quasi zero: edificio ad altissima prestazione energetica, determinata conformemente all'allegato I. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze”*. Dunque l'Art. 2, che è confermato dal processo di revisione attualmente in corso da parte delle Istituzioni Europee, (non è uno degli articoli in revisione), esprime chiaramente l'obiettivo razionale di ridurre il fabbisogno a valori molto bassi e soddisfare in modo significativo con fonti rinnovabili questi bisogni ridotti. Per quanto riguarda la definizione di nZEB, la norma EN ISO 52000 [2] propone di utilizzare come indicatori *energy needs, total primary energy, non-renewable primary energy* e definisce che sia necessario che ciascuno di essi rispetti un valore limite affinché l'edificio possa essere riconosciuto come nZEB.

Nei paesi dell'Europa settentrionale, ed in particolare in Germania, l'esperienza maturata nei decenni precedenti agli anni 2000, ha tuttavia già portato allo sviluppo di procedure standard per la progettazione e costruzione di case passive ed edifici ad alte prestazioni energetiche. A Darmstadt, in Germania, nel 1991 fu costruito il primo edificio passivo secondo lo standard Passivhaus; un protocollo formalmente definito nel 1988 [3]. Lo standard Passivhaus oltre a prevedere la limitazione dei consumi energetici degli edifici e la definizione di requisiti minimi di qualità ambientale interna, propone anche una serie di soluzioni tecnologiche passive che permettano il rispetto dei limiti e dei requisiti imposti, a costi ragionevoli.

Lo standard inizialmente sviluppato per climi freddi e quindi incentrato sul consumo energetico ed il comfort ambientale in condizioni climatiche di riscaldamento invernale, è stato successivamente esteso, grazie al progetto Passive-On [4,5], anche alle prestazioni energetiche e di comfort estive di raffrescamento, dominanti nel clima mediterraneo del sud Europa. Un edificio certificato Passivhaus, può quindi rappresentare un esempio di nZEB, nel quale il ridotto fabbisogno energetico e la qualità ambientale sono affiancati da un significativo sfruttamento di energia rinnovabile. Per il conseguimento di questo obiettivo è necessaria un'attenta analisi e progettazione dell'involucro edilizio seguita da una altrettanto attenta analisi e progettazione di sistemi impiantistici e di regolazione e controllo.

Il clima mediterraneo, caratterizzato da elevati valori di irraggiamento solare, può garantire un facile sfruttamento dell'energia solare per la produzione di energia elettrica da fotovoltaico o energia termica attraverso sistemi solari, al contempo, però, sottopone gli edifici a significativi carichi solari attraverso l'involucro, i quali devono essere accuratamente controllati da sistemi di schermatura e di ventilazione e, se necessario, controbilanciati da sistemi di climatizzazione (attivi e/o passivi), per prevenire fenomeni di surriscaldamento (sforamento dalla banda di comfort prescelta). Un sistema di gestione e controllo ambientale ed energetico, è fondamentale per il corretto funzionamento dell'edificio, mentre, un sistema di monitoraggio dà la possibilità di verificare consumi e condizioni termoisometriche all'interno dell'edificio e permette di individuare eventuali malfunzionamenti.

L'edificio oggetto del presente studio di approfondimento (Figura 1), rappresenta proprio uno dei primi esempi di nearly Zero Energy Buildings (nZEB) in clima mediterraneo, la cui progettazione edile è stata oggetto di certificazione PassivHaus. Esso è stato altresì concepito come laboratorio reale (living lab) al fine di testare differenti logiche e strategie di controllo per la gestione ottimale degli edifici e di studiare la risposta dell'occupante alla scelta di determinate logiche di controllo.

L'edificio monofamiliare ad uso residenziale, è composto da un piano fuori terra, dove si trovano tutti gli ambienti climatizzati e da un piano interrato che ospita locali tecnici, di servizio e posti auto. La

climatizzazione degli ambienti è realizzata attraverso un sistema a tutt'aria, in cui l'aria di mandata, prelevata dall'esterno, viene fatta passare in appositi canali interrati (scambiatore *terra/aria*)¹

².

Esiste inoltre una funzione di bypass integrata all'interno del sistema di recupero del calore³. Dopo il passaggio nel recuperatore di calore, l'aria di mandata attraversa una batteria ad acqua (calda in stagione di riscaldamento o fredda in stagione di raffrescamento) e viene infine distribuita in ogni locale. L'impianto è bilanciato nel suo layout (collocazione e quantità di bocchette di mandata e ripresa) e non prevede ulteriori serrande motorizzate per la regolazione delle portate d'aria negli ambienti. L'impianto di ventilazione non prevede ricircolo dell'aria⁴. Nel caso di apertura di finestre o porte sull'esterno, il sistema di ventilazione meccanica si arresta automaticamente e l'edificio passa quindi in modalità di ventilazione naturale.



Figura 1. Edificio dall'esterno, oggetto del presente studio.

L'energia termica fornita alla batteria aria/acqua dell'impianto di ventilazione e al sistema di produzione di acqua calda sanitaria è generata da un sistema integrato: un accumulo ad acqua di 500 litri alimentato dal circuito primario di un sistema solare termico e da una pompa di calore (PdC) elettrica (aria/acqua). La PdC aria/acqua è invertibile; in fase di riscaldamento essa può produrre calore scaldando il serbatoio di accumulo tecnico oppure direttamente la batteria nell'impianto di ventilazione. In modalità di raffrescamento può produrre acqua refrigerata per alimentare direttamente la batteria nell'impianto di ventilazione. L'edificio è inoltre dotato di un impianto fotovoltaico (8,14 kW di potenza elettrica di picco), installato sulle falde di copertura.

¹ Scambiatore di calore interrato (*terra/aria*) per il pre-riscaldamento in stagione di riscaldamento o pre-raffrescamento in stagione di raffrescamento dell'aria primaria dell'impianto a tutt'aria. Lo scambiatore interrato sfrutta l'andamento favorevole della temperatura del terreno in profondità (circa 3 m).

² La funzione di bypass dello scambiatore interrato ad aria viene controllato da 2 serrande motorizzate. Le regole di controllo sono definite in funzione di altre variabili monitorate (ad es. temperatura dell'aria esterna o del terreno, etc.).

³ La funzione di bypass del pacco di recupero è integrata nel gruppo macchina comprendente elementi filtranti, recuperatore a flussi incrociati, ventilatore di mandata, ventilatore di ritorno.

⁴ L'edificio può essere climatizzato per mezzo del trattamento della sola aria di rinnovo perché le potenze termiche di picco per riscaldamento e raffrescamento sono particolarmente basse come tipicamente avviene in edifici certificati Passivhaus (elevato isolamento termico dell'involucro, recupero di calore, il controllo solare, etc.).

Le superfici finestrate delle stanze sono protette da sistemi di schermatura solare meccanizzati, controllabili manualmente o attraverso un sistema automatico. In ciascun locale climatizzato sono inoltre presenti sensori di temperatura dell'aria, umidità relativa e concentrazione di CO₂, al fine di garantire un adeguato monitoraggio del microclima interno (comfort termico e indicatori indiretti di qualità dell'aria). In alcuni locali a questi si aggiungono rispettivamente un sensore di temperatura dell'aria e un globo-termometro per il calcolo della temperatura media radiante, consistenti in termo-resistenze PT100 con collegamento a 4 fili. Sul tetto è invece installata una centralina climatica che permette il monitoraggio di temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento. Il sistema di controllo e monitoraggio è costituito da due parti principali (Figura 2). La prima gestisce le funzioni più tipiche degli ambienti e degli impianti dell'edificio, e si basa sullo standard Konnex e relativo protocollo di comunicazione. La seconda parte, che integra e supervisiona la prima, si basa su protocollo di comunicazione BACnet e ha lo scopo di completare le funzioni e le potenzialità della prima parte, permettendo l'implementazione di logiche di controllo più complesse ed il monitoraggio più dettagliato delle prestazioni energetiche e di comfort.



Figura 2. Struttura schematica del sistema di controllo e monitoraggio.

La Figura 3 e la Figura 4 rappresentano due delle interfacce di supervisione del sistema di controllo e monitoraggio installato nell'edificio.



Figura 3. Interfaccia Design - Pagina iniziale della piattaforma di supervisione del sistema di controllo e monitoraggio.



Figura 4. Interfaccia Desigo - Rappresentazione degli ambienti dell'edificio con valori misurati dai principali sensori e stato di apertura delle finestre, nella piattaforma di supervisione del sistema di controllo e monitoraggio.

La campagna di lavoro in situ e tutte le attività propedeutiche di sviluppo e supporto, hanno avuto come obiettivo l'aggiornamento e il completamento del sistema di monitoraggio e controllo per consentire l'analisi delle prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio in condizioni di funzionamento estive (nel periodo analizzato: 18 giugno - 31 agosto 2017).

I seguenti capitoli caratterizzeranno le dinamiche di consumo e produzione di energia elettrica e le condizioni di benessere termoigrometrico all'interno dell'abitazione, in relazione alle forzanti climatiche esterne, alle dinamiche di occupazione e alle logiche di controllo impostate.

2 Descrizione delle attività svolte

2.1 Modifica e settaggio del sistema di acquisizione dati

Nel periodo di svolgimento dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano, sono state svolte tutte le attività per la verifica del corretto funzionamento e della stabilità del sistema di acquisizione dati, l'aggiornamento e la modifica del settaggio dello stesso sistema, al fine di favorire una completa implementazione delle logiche di controllo, e l'analisi delle prestazioni dell'edificio.

In particolare, le attività sono state sviluppate partendo dal sistema di monitoraggio e controllo nella configurazione raggiunta grazie alle attività dell'anno precedente (accordo di collaborazione PAR2015), con i componenti hardware e i loro collegamenti completati e operativi e con l'implementazione completa della parte software di supervisione del sistema Konnex. Si è quindi proceduto, con le attività oggetto del presente accordo, all'implementazione di tutte le logiche di controllo ed all'aggiornamento del sistema per consentire la memorizzazione di tutte le grandezze monitorate, lavorando sul sistema BACnet.

Alcune logiche sono state ulteriormente dettagliate per poterle attuare in modo corretto ed efficace. È il caso ad esempio delle regole per il controllo delle due serrande motorizzate per la presa dell'aria dai canali dello scambiatore interrato o in alternativa direttamente dall'esterno. Queste logiche consentono di alimentare l'impianto di ventilazione meccanica dalla sorgente più vantaggiosa rispettivamente per il raffrescamento (scegliendo l'aria a temperatura più bassa tra quella esterna e quella proveniente dallo scambiatore interrato) o per il riscaldamento (scegliendo l'aria a temperatura più alta tra quella esterna e quella proveniente dallo scambiatore interrato). Per questo si è dovuto passare da una descrizione generale della logica a una definizione più dettagliata, con l'aggiunta di cicli per l'apertura della serranda connessa allo scambiatore interrato al fine di permettere la corretta misura della temperatura dell'aria all'uscita dello scambiatore. È stata inoltre aggiunta una logica di controllo che permette di chiudere automaticamente entrambe le serrande di presa dell'aria (direttamente dall'esterno e dallo scambiatore interrato) quando la ventilazione meccanica non è richiesta o viene disattivata. Questo garantisce di evitare infiltrazioni d'aria indesiderate ad impianto di ventilazione spento.

Tutte le parti del sistema sono state ri-codificate in fase di implementazione del sistema BACnet, al fine di renderle univoche e facilmente identificabili (ad esempio per nomi e codici identificativi di finestre e rispettive schermature solari, facciate, stanze e ambienti, sensori e componenti, ecc.). Si è condivisa e migliorata questa descrizione con i programmatori informatici del sistema e con i tecnici che hanno preparato l'interfaccia grafica.

Sono stati determinati i requisiti e le caratteristiche della struttura dell'interfaccia grafica e sono stati prodotti i disegni e gli schemi per la rappresentazione dei sensori e dei misuratori negli ambienti indoor e outdoor, nelle parti degli impianti termici e di ventilazione e nell'impianto elettrico. L'interfaccia Desigo, utilizzata per questa applicazione, risulta essere ben organizzata e chiara nelle diverse funzioni. Tuttavia, essa è comunque pensata principalmente per gli utenti amministratori del sistema e non per l'occupante dell'edificio, che potrebbe non conoscere alcuni dettagli delle regolazioni e delle caratteristiche del sistema. L'interfaccia offre tutte le funzionalità necessarie alla supervisione dell'intero sistema (parti BACnet, Konnex, Meter-Bus), e in particolare permette le seguenti operazioni:

- La visualizzazione degli schemi dei sistemi impiantistici e delle grafiche degli ambienti con i sensori e misuratori installati, e i corrispondenti valori misurati in tempo reale (come da esempi in Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6);
- La visualizzazione degli stati delle finestre e delle schermature solari (Figura 7 e Figura 8);
- La visualizzazione in grafici delle grandezze monitorate (Figura 9);
- L'esportazione dei dati misurati in formato testuale *comma separated value* (csv);
- La gestione di messaggi di errore o attenzione sul funzionamento e degli stati di allarme;
- L'impostazione di tutti i valori di set-point e gli altri parametri delle logiche di controllo;

- L'impostazione di parametri e settaggi relativi al funzionamento dell'intero sistema;
- La gestione dei dispositivi hardware del sistema e della rete di collegamento;
- Altre funzionalità offerta dal software Desigo di Siemens (ad es. l'impostazione di messaggi per l'utente via mail, la produzione di documenti e file di report, etc.).

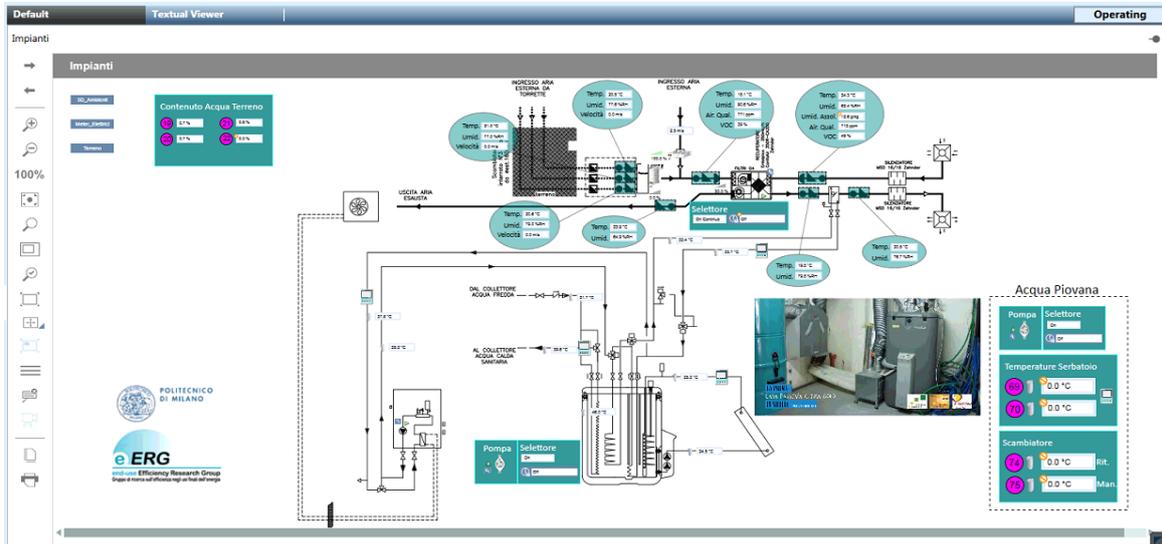


Figura 5. Interfaccia Desigo - Schema dei sistemi termici e di ventilazione con valori dei principali sensori e i componenti per il controllo, nella piattaforma di supervisione del sistema.

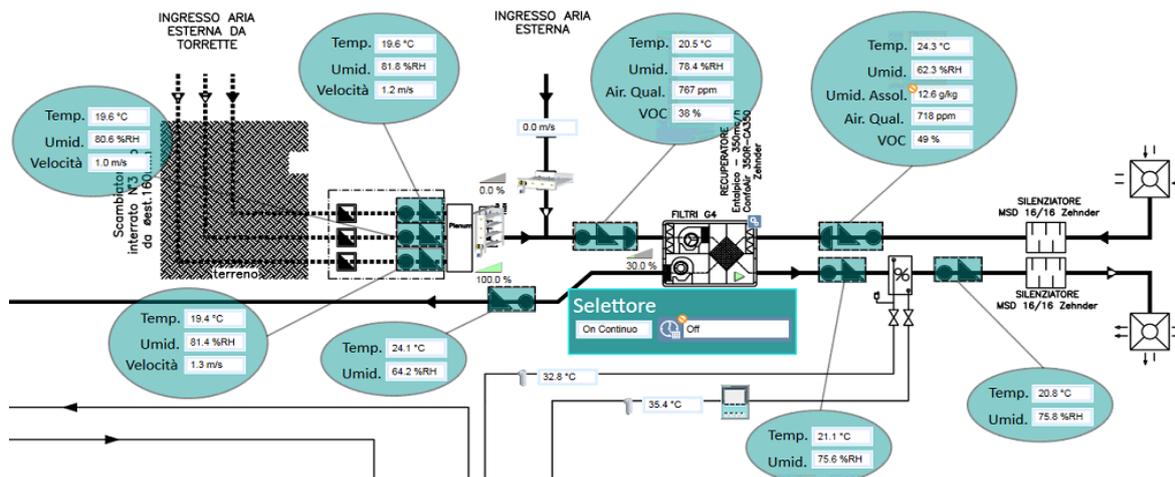


Figura 6. Interfaccia Desigo - Particolare dello schema dei sistemi termici e di ventilazione con valori dei principali sensori e i componenti per il controllo, nella piattaforma di supervisione del sistema (n.b. le valvole di alimentazione della batteria del sistema di ventilazione sono chiuse, come meglio spiegato nel successivo testo).



Figura 7. Interfaccia Design - Particolare della rappresentazione degli ambienti dell'edificio con valori misurati dai principali sensori e stato di apertura delle finestre, nella piattaforma di supervisione del sistema.

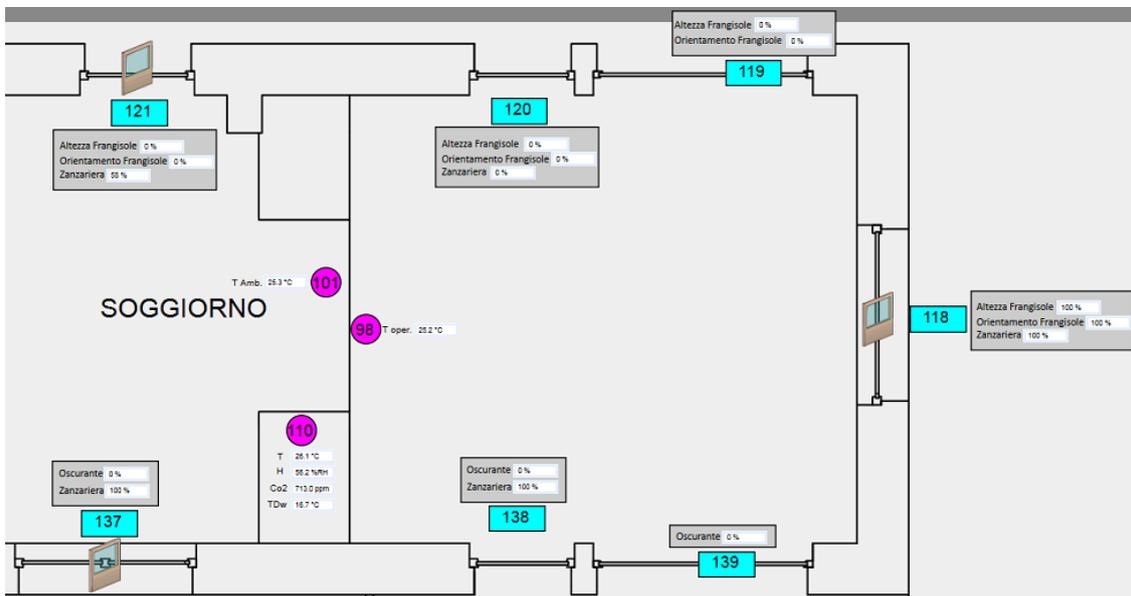


Figura 8. Interfaccia Design - Particolare della rappresentazione degli ambienti dell'edificio con valori misurati dai principali sensori, lo stato di apertura delle finestre e la posizione delle schermature solari, nella piattaforma di supervisione.

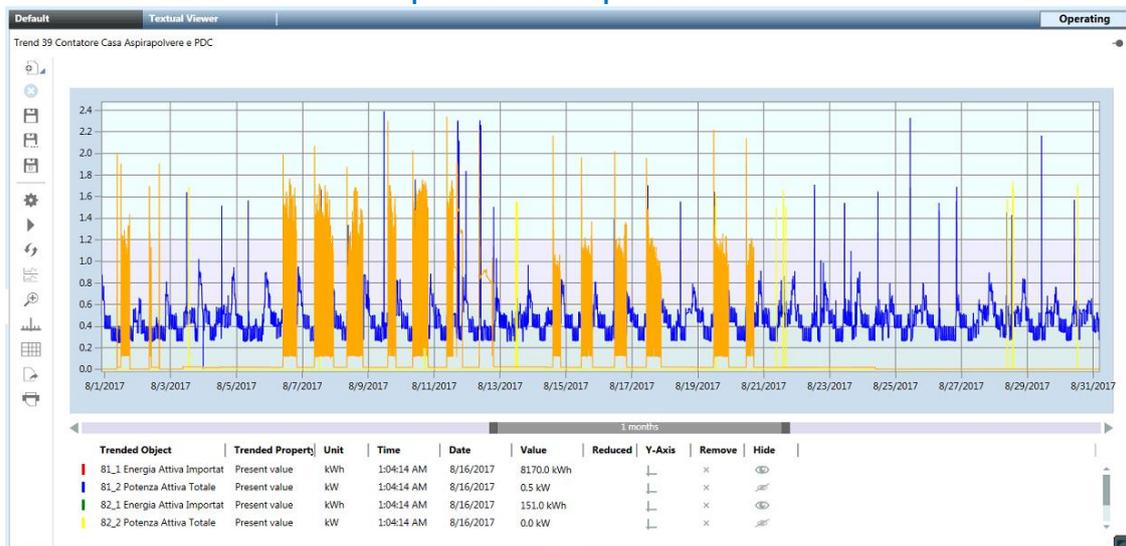


Figura 9. Interfaccia Design - Esempio di visualizzazione delle grandezze monitorate nella piattaforma di supervisione.

Oltre all'interfaccia in ambiente Desigo, sviluppata nel corso del presente accordo, rimane operativa l'interfaccia specifica della parte Konnex del sistema, che era stata sviluppata nel corso dell'anno precedente. L'interfaccia del sistema Konnex è pensata per l'occupante dell'edificio, risulta più immediata nell'uso, anche se permette solo il controllo dei parametri principali relativi alla parte Konnex del sistema di controllo e monitoraggio.

Allo scopo di sviluppare la programmazione di tutte le funzioni del sistema Desigo, si è lavorato per definire tutte le variabili necessarie per il monitoraggio e il controllo. Le grandezze da monitorare sono state organizzate e suddivise in gruppi detti *Trend Log Multiple*, i quali sono appositi oggetti informatici definiti nel protocollo BACnet (come da norme ASHRAE 135-2016 [6] e EN ISO 16484-3:2005 [7]) per la memorizzazione dei valori delle variabili selezionate. Questi permettono di definire la frequenza di memorizzazione oppure se la registrazione della misura deve essere fatta in corrispondenza di un evento specificato (ad esempio variazione del valore). Un oggetto BACnet *Trend Log Multiple* può gestire la memorizzazione di un massimo di 6 variabili. Per questo tutte le variabili previste nel sistema sono state raggruppate in diversi *Trend Log Multiple* in base ad alcuni criteri quali la tipologia della variabile, il punto di misura (ad esempio una stanza, o un punto di un sistema impiantistico, o di uno specifico misuratore nel caso questo restituisca più variabili). In questo modo il codice del programma implementato risulta leggero e ordinato, e risulta più facile impostare le frequenze di memorizzazione delle grandezze suddivise nei gruppi.

I parametri sono stati impostati in modo che tutte le grandezze siano memorizzate ad una frequenza fissa di 5 minuti, tranne l'apertura delle finestre e la posizione delle schermature solari, le quali sono memorizzate ad evento, ovvero ad ogni cambio di stato.

Dalle analisi effettuate fino ad ora, questa frequenza risulta offrire un livello di dettaglio più che adeguato. Inoltre il sistema si è dimostrato stabile e affidabile nella memorizzazione. Peraltro, con queste frequenze di memorizzazione, è anche possibile godere di un buffer di sicurezza grazie allo spazio di memoria disponibile nel controllore logico programmabile (PLC) principale del sistema (componente "PXC100-E.D"), il quale invia tutte le misure con frequenza di due ore alla postazione computer nella centrale termica dell'edificio, dove vengono memorizzati definitivamente tutti i dati su piattaforma Desigo. Tuttavia nel caso in cui l'invio dei dati al computer non possa essere temporaneamente effettuato, il PLC PXC100-E.D tiene in memoria i valori misurati fino ad un massimo di due giorni di misura. Lo spazio di memoria nel computer centrale consente invece di conservare misure relative ad un periodo di un anno, prima di attuare una sovrascrittura. Dati i vincoli di memoria dei PLC e della postazione Desigo in campo, aumentando la frequenza di memorizzazione di alcune o tutte le variabili, gli spazi di memoria verrebbero saturati più velocemente.

In seguito alle attività preparatorie, si è proceduto con la programmazione informatica di tutte le logiche di controllo non ancora implementate nel sistema. A più riprese e per i diversi ambiti da controllare (ventilazione meccanica, raffrescamento e riscaldamento, schermature solari, funzioni di monitoraggio), si è collaborato con gli specialisti informatici del sistema Desigo. Si è così completata una versione finale di tutte le parti di codice da caricare sui PLC in campo e per il funzionamento del sistema.

In questa fase, allo scopo di consentire la migliore integrazione fra la parte Konnex e quella BACnet del sistema, si è anche verificata la parte di programmazione Konnex che era già stata sviluppata in precedenza. Alcune variabili sono state aggiunte, altre rinominate e sono state riviste ed aggiornate alcune parti del file ETS relativo alla programmazione Konnex. Inoltre, in preparazione alle attività in campo per l'aggiornamento del sistema e l'implementazione delle nuove parti di programmazione, si è verificata la necessità di realizzare alcuni cablaggi aggiuntivi in centrale termica. Si sono determinate le caratteristiche di questi e si è coordinata la fase di completamento. In particolare, le due serrande motorizzate dell'impianto di ventilazione meccanica sono state scollegate dall'interfaccia Konnex (come da configurazione precedente) e sono state collegate agli opportuni moduli elettronici della parte BACnet, al fine di poter attuare tutte le logiche implementate in ambito BACnet.

Si elencano di seguito le funzioni per le quali, all'interfaccia Konnex si è aggiunta un'ulteriore interfaccia BACnet:

- Macchina di ventilazione - accensione e spegnimento (alimentazione elettrica);

- Macchina di ventilazione - controllo della velocità del ventilatore di mandata e del ventilatore di ritorno (segnale 0-10 V);
- Macchina di ventilazione - allarme blocco (contatto elettrico);
- PdC - accensione e spegnimento (alimentazione elettrica);
- PdC - commutazione in riscaldamento (contatto elettrico);
- PdC - commutazione in raffrescamento (contatto elettrico);
- PdC - allarme blocco (contatto elettrico).

Si è quindi organizzata una campagna di lavoro nell'edificio di Mascalucia per l'implementazione fisica nel sistema di quanto sviluppato nei passi descritti.

In prima battuta, si è proceduto a verificare l'integrità e la corrispondenza dei collegamenti di tutti i componenti che erano stati posizionati e cablati in precedenza. Tale revisione completa ha dato esiti positivi, con la conferma del buono stato di tutti i componenti. Si è poi proceduto all'avvio anche di quei componenti relativi alla parte BACnet e Meter-Bus che erano stati posizionati e cablati ma non erano ancora stati avviati e impostati, ad esempio i misuratori di energia termica. Si sono caricate sui rispettivi PLC le parti dei programmi informatici appositamente sviluppati e si è proceduto a monitorare sul posto il funzionamento del sistema e a verificarne tutte le funzionalità.

In questa fase si è proceduto a delle modifiche minori nei programmi e nelle caratteristiche dell'interfaccia grafica; gli occupanti dell'edificio sono stati coinvolti e hanno potuto dare indicazioni e suggerimenti su alcune caratteristiche funzionalità. Si è infine verificato che la risposta delle logiche di controllo fosse corretta e che l'acquisizione e la visualizzazione dei dati misurati fosse completa e stabile. Le verifiche hanno dato esito positivo.

Nel primo periodo di osservazione in campo del funzionamento del sistema completo, si è anche verificato che il modulo di alimentazione della linea bus Konnex fosse sufficiente a garantire adeguata alimentazione lungo tutto il bus, anche ai dispositivi più distanti dal punto di alimentazione o ai dispositivi con più alto assorbimento di corrente. Siccome la verifica ha dato esito positivo si è deciso di non aggiungere ulteriori alimentatori per il bus Konnex.

Durante la campagna di lavoro in situ si sono anche impostati tutti i valori di set-point delle variabili incluse nelle nuove logiche di controllo implementate e poi sperimentate nella fase di monitoraggio. Per maggiori dettagli si vedano i capitoli seguenti del presente documento. È stata poi impostata la connessione da remoto del sistema, in questo modo è possibile collegarsi tramite connessione internet, con opportune credenziali di sicurezza, alla postazione pc installata presso il living lab, al fine di gestire e controllare il funzionamento del sistema da remoto e di scaricare i dati misurati.

A partire da quest'ultima implementazione è stato possibile seguire l'attività del sistema in tempo reale. Il sistema ha avuto due brevi periodi di blocco, dovuti a cali di tensione nell'alimentazione dei PLC, nel corso di alcune ore del 16 luglio e tra il 24 e il 25 il luglio. In entrambi i casi, a tensione elettrica ripristinata, si è provveduto a controllare i messaggi di avvertimento generati da Desigo per il periodo di non attività dei PLC e a verificare che non fossero necessarie ulteriori azioni. La completa operatività è ripresa regolarmente dopo questi due brevi periodi.

I primi dati di misura hanno permesso di riscontrare un'anomalia relativa alla batteria di riscaldamento/raffrescamento del sistema di ventilazione, evidenziata in arancione in Figura 10.

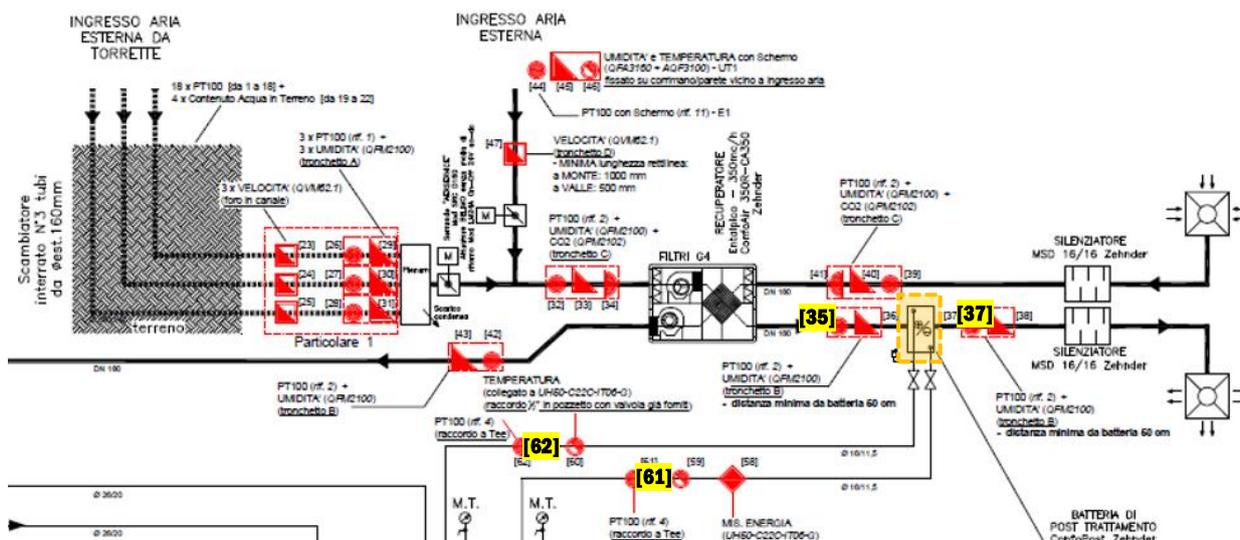


Figura 10. Dettaglio impianto di ventilazione e della batteria di post trattamento.

Questa era soggetta ad una circolazione naturale dell'acqua anche a pompa di circolazione spenta e dovuta al calore trasmesso nel circuito in modo passivo dal vicino serbatoio di accumulo termico. Il fenomeno produceva un aumento della temperatura dell'aria di circa 2 °C dopo il passaggio dalla batteria. Questo si registrava solo a pompa di calore spenta, mentre a generatore acceso in modalità raffrescamento la pompa di circolazione del circuito bloccava altre circolazioni parassite. Si è quindi valutato di inserire due elettrovalvole nel circuito ad acqua che alimenta la batteria, le quali verranno chiuse automaticamente nelle condizioni in cui ci sarà richiesta della ventilazione meccanica senza attivazione della pompa di calore. Attualmente si è deciso di chiudere manualmente le due valvole già presenti per l'intercettazione della batteria, nei periodi in cui si prevede l'uso della ventilazione meccanica senza la necessità dell'apporto termico della pompa di calore (ad esempio stagione intermedia autunnale), al fine di non interferire con l'attività di monitoraggio ed analisi. Il comportamento descritto sopra e il beneficio della chiusura delle valvole, quando necessario, sono visibili negli andamenti della temperatura dell'aria prima e dopo la batteria in Figura 11. La temperatura dell'aria dopo la batteria (T post-batteria [37]) è indicata in verde, mentre quella prima della batteria (T pre-batteria [35]) è indicata in rosso. La Figura 12 mostra invece l'andamento della temperatura dell'acqua di mandata in blu (T mandata acqua da batteria [62]) e ritorno della batteria in rosso (T ritorno acqua da batteria [61]). I numeri tra parentesi quadre [35], [37], [61] e [62] identificano i sensori di temperatura e la loro posizione all'interno dello schema di impianto riportato in Figura 10. Le temperature [35] e [37] rappresentano le temperature rilevate dai sensori immediatamente prima e dopo la batteria evidenziata in arancione in Figura 10, mentre le temperature [61] e [62] rappresentano rispettivamente la temperatura dell'acqua nel tubo di mandata e di ritorno sotto la batteria.

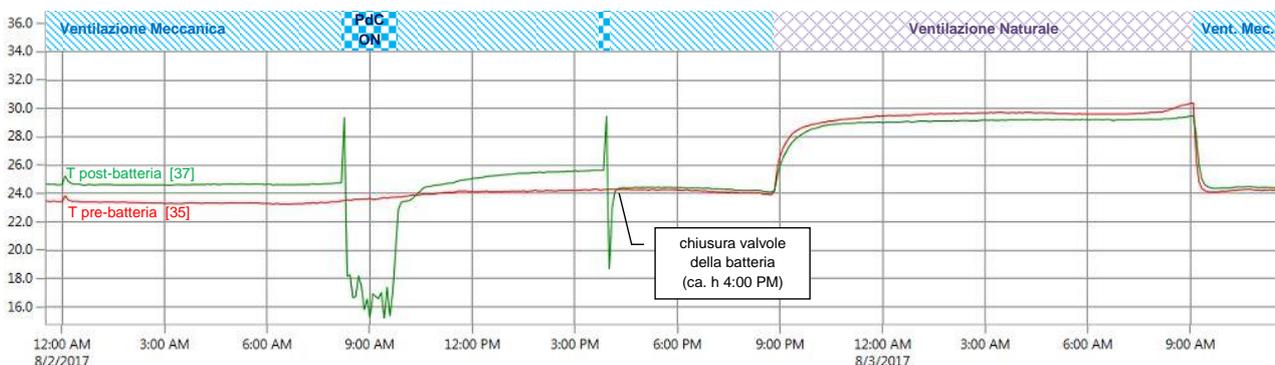


Figura 11. Andamento della temperatura dell'aria nel sistema di ventilazione meccanica prima e dopo la batteria di scambio termico, per effetto di circolazioni parassite dell'acqua e soluzione dell'anomalia.

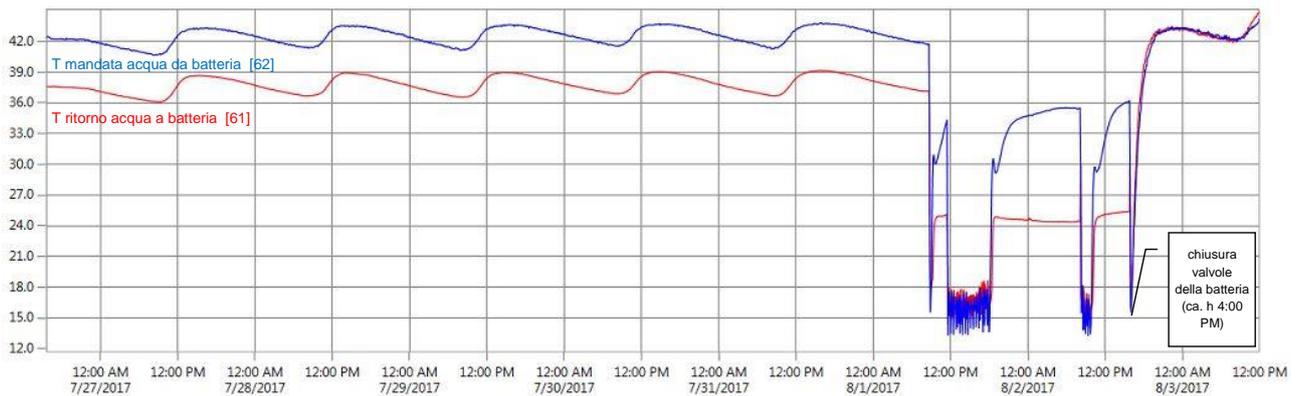


Figura 12. Andamento della temperatura dell'acqua di mandata (in blu) e di ritorno (in rosso) della batteria di scambio termico, per effetto di circolazioni parassite dell'acqua e soluzione dell'anomalia.

L'analisi dei dati durante le ore di non occupazione dell'edificio, hanno infine permesso di identificare alcuni sensori di CO₂ riportanti valori anomali e potenzialmente errati. È stata quindi predisposta la sostituzione degli stessi, da concordare con i residenti. Si sta altresì valutando la possibilità di affiancare dei nuovi sensori più accurati, al fine di migliorare la misura di questo importante parametro ambientale.

2.2 *Analisi dati di monitoraggio*

La campagna di lavoro in campo appena descritta, ha permesso di attivare l'acquisizione dei dati ed il loro monitoraggio. In particolare, l'analisi dei dati successivamente riportata parte dalle ore 00:00 del 18 giugno, poiché i dati dei giorni precedenti risultavano influenzati dalle operazioni svolte in campo per l'aggiornamento del sistema. L'analisi dei dati ha quindi riguardato il periodo estivo dal 18 giugno al 31 agosto.

2.2.1 *Descrizione delle condizioni al contorno*

Le dinamiche di consumo e produzione di energia elettrica, e le condizioni di benessere termoigrometrico all'interno dell'abitazione, sono state analizzate in relazione alle forzanti climatiche esterne, alle dinamiche di occupazione e alle logiche di controllo impostate. Le tre condizioni al contorno, appena elencate, sono descritte nei paragrafi successivi e sono state fondamentali per un'analisi critica degli aspetti energetici ed ambientali.

2.2.1.1 *Condizioni climatiche*

Il monitoraggio delle condizioni climatiche esterne è essenziale per il funzionamento e l'attivazione di diverse logiche di controllo impostate nel sistema. Al fine di mantenere condizioni climatiche interne ottimali, infatti, talune logiche d'impianto, come la ventilazione meccanica, vengono attivate e regolate in riferimento ai dati monitorati attraverso sensori posizionati all'esterno dell'edificio. Inoltre, le condizioni climatiche esterne registrate durante il periodo di monitoraggio, hanno costituito un riferimento fondamentale per tutte le analisi ambientali ed energetiche effettuate.

Si precisa, infatti, che i dati climatici monitorati sono stati acquisiti tramite la centralina climatica posizionata sulla copertura dell'edificio o da sensori all'esterno dell'edificio, allo scopo di avere dati di riferimento del luogo. La stazione climatica esterna, basata su protocolli di comunicazione Konnex (KNX), è stata utilizzata per il monitoraggio di temperatura e umidità relativa dell'aria, precipitazioni, radiazione globale, velocità e direzione del vento. Alle sonde di temperatura e umidità relativa, basate su protocolli di comunicazione BACnet, installate a livello del piano terra, è stato, infatti, preferito il monitoraggio attraverso le sonde in copertura della centralina climatica; le sonde in copertura sono, infatti, meno soggette ad effetti schermanti dell'edificio.

La Figura 13 riporta in azzurro la temperatura, registrata ogni 5 minuti, dal 18 giugno (18/6) al 31 agosto (31/8). Le due linee verticali in tratteggio in rosso, segnano la divisione tra i mesi di giugno, luglio ed agosto. Durante l'intero periodo analizzato, la temperatura esterna ha mostrato notevoli fluttuazioni registrando aumenti e diminuzioni cicliche. A seguito di un calo di temperatura avvenuto il 18/6, (dovuto ad un temporale), dal 19/6 e per tutto il mese, la temperatura esterna ha registrato un andamento crescente fino al valore massimo di 37,5 °C. A giugno il valore minimo è stato pari a 13,9 °C, mentre la temperatura media è stata pari a 25,5 °C.

In seguito agli alti valori misurati a fine giugno, le temperature hanno subito un calo per poi riprendere ad aumentare, registrando lo stesso andamento varie volte fino a fine agosto. Considerando il mese di luglio, la minima e massima temperatura registrate sono state rispettivamente di 14,5 °C e 39,3 °C, mentre, la temperatura media è stata pari a quella di giugno, ossia 25,5 °C.

Ad agosto la temperatura minima, media, e massima registrate, sono state rispettivamente di 16,5 °C, 26,5 °C, e 38,5 °C. In media, il mese di agosto è stato il più caldo tra quelli monitorati, mantenendo temperature molto elevate e più costanti, anche durante la notte, nei primi dieci giorni del mese. Il calo di temperatura verificatosi nei giorni tra il 20-23/8 è stato registrato in concomitanza di fenomeni piovosi.

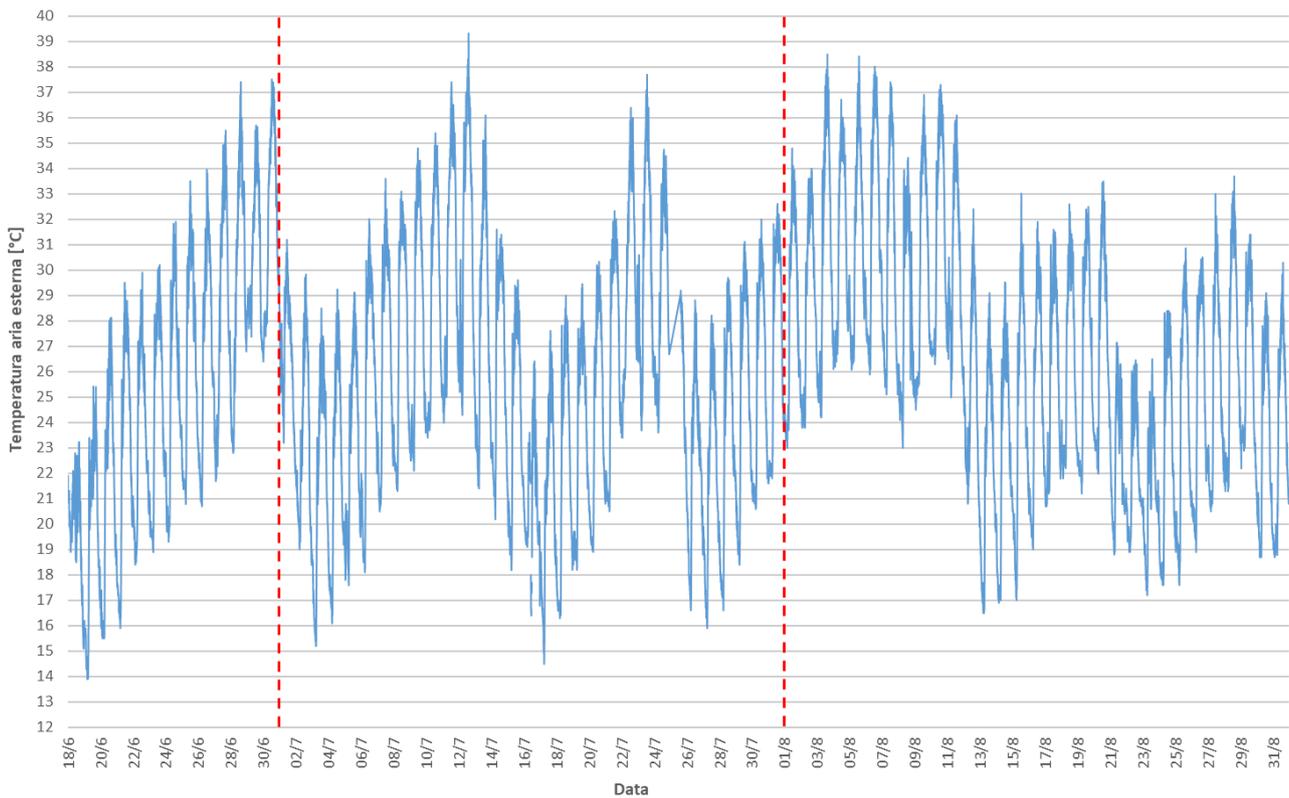


Figura 13. Temperatura aria esterna registrata dal 18 giugno al 31 agosto (intervallo di misura: 5 min).

Una migliore visione di quanto detto poc'anzi, si può avere dalla Figura 14, la quale mostra i valori giornalieri massimi, medi e minimi di temperatura esterna registrati dal 18/6 al 31/8. Anche in questo caso, come in tutti i grafici successivi, le linee tratteggiate rosse verticali fungono da divisione tra i tre mesi analizzati.

Dalla Figura 14 si può riscontrare l'andamento crescente e decrescente precedentemente descritto. L'andamento è più evidente nei mesi di giugno e luglio, mentre nel mese di agosto è stato meno accentuato.

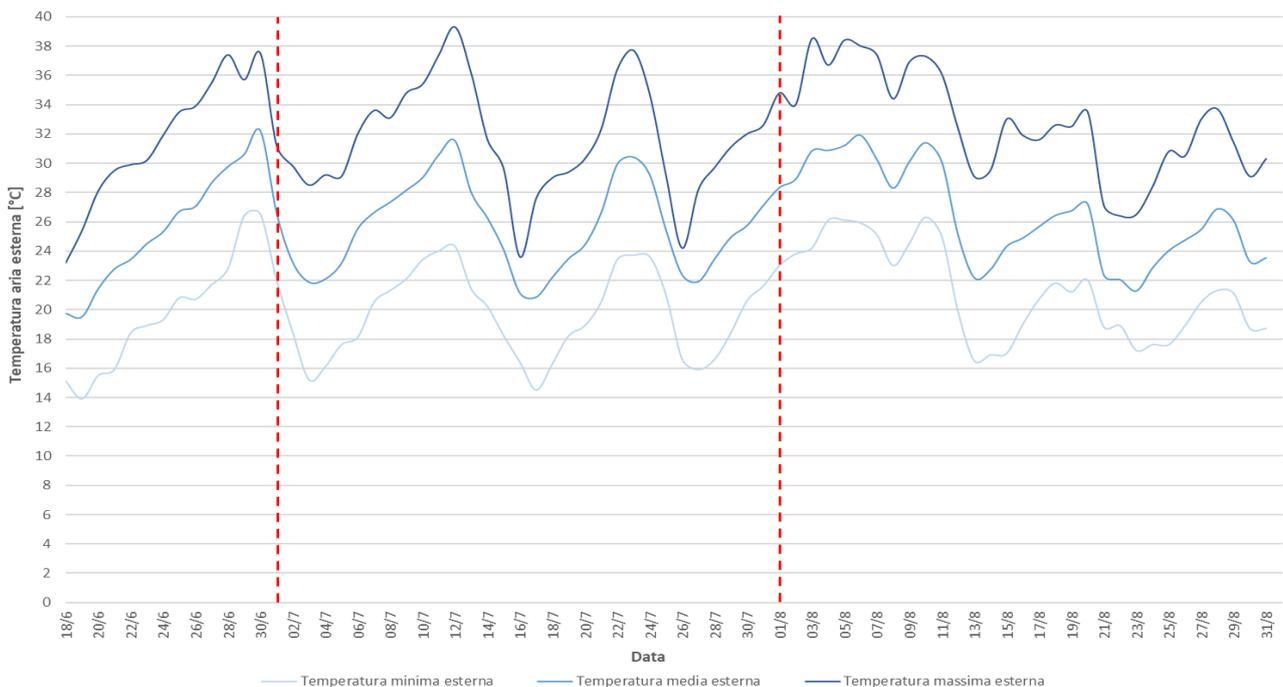


Figura 14. Massima, media, minima temperatura giornaliera esterna registrata dal 18 giugno al 31 agosto.

Allo stesso modo è stata analizzata l'umidità relativa esterna (Figura 15), che mostra un andamento correlato e contrario a quello della temperatura: a valori elevati di temperatura, corrispondono valori di umidità relativa bassi e viceversa. A giugno, il valore minimo di umidità relativa (17 %) è stato registrato a fine mese, mentre il più alto (91 %) il 18/6 in corrispondenza di un evento piovoso. Il valore medio di umidità relativa registrato durante i giorni monitorati a giugno, è stato pari al 45 %. Il valore massimo, medio e minimo registrati a luglio sono rispettivamente 13 %, 45 % e 94 %, mentre per agosto 18 %, 45 % e 95 %. Complessivamente l'umidità relativa durante i tre mesi si è mantenuta tra il 30 % e il 60 % a meno dei visibili, ma relativamente brevi, picchi registrati.

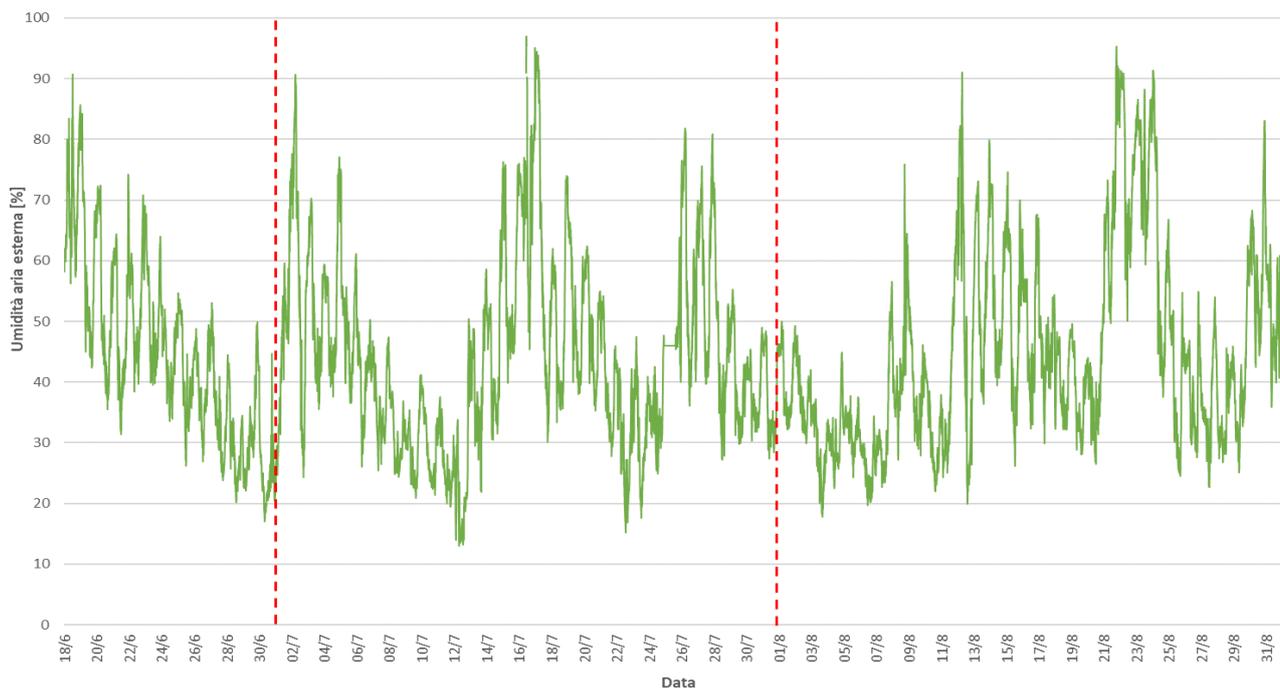


Figura 15. Umidità relativa aria esterna registrata dal 18 giugno al 31 agosto (intervallo di misura: 5 min).

Come per la temperatura, la Figura 16 mostra i valori massimi, medi e minimi giornalieri di umidità relativa registrati durante tutto il periodo di monitoraggio. L'andamento, come già detto, è contrario a quello della temperatura dell'aria esterna rappresentato precedentemente. In Figura 17, sono state analizzate le precipitazioni registrate durante il periodo di monitoraggio, la linea in blu scuro, rappresenta i millimetri di pioggia registrati. Come si può vedere, sono state registrate precipitazioni i giorni: 18/6, 16-17/7, 8/8, 21-22-23/8. I valori di temperatura e umidità relativa risultano coerenti con i dati delle precipitazioni.

La Figura 18 mostra, in giallo, l'andamento della radiazione solare globale oraria registrata dal 18/6 al 31/8. Essa mostra mediamente un andamento regolare (a campana), con valori pari a zero nelle ore di assenza di luce solare prima dell'alba, valori crescenti fino al valore massimo, registrato circa a mezzogiorno, e valori decrescenti fino allo zero dopo il tramonto. In generale la irradianza solare massima è risultata dell'ordine di 850-900 W/m², tranne nel caso di eventi piovosi come il 18/6, 16-17/7, 21-22-23/8.

Si è sviluppata anche un'analisi delle caratteristiche del vento. È stata costruita la rosa dei venti, la quale permette di mettere in relazione la direzione del vento con la sua velocità, per ciascun mese analizzato. La Figura 19 raffigura la rosa dei venti per giugno, luglio e agosto. I diversi colori plottati sui tre grafici rappresentano i diversi valori di velocità del vento registrati, in metri al secondo (m/s).

Durante i tre mesi monitorati, sono stati registrati venti provenienti prevalentemente da Sud-Ovest, ed in percentuale più alta a luglio e agosto. Le velocità maggiormente registrate sono state dell'ordine dell'1 – 2 (m/s), ed in generale si sono sempre mantenute minori di 8 (m/s).

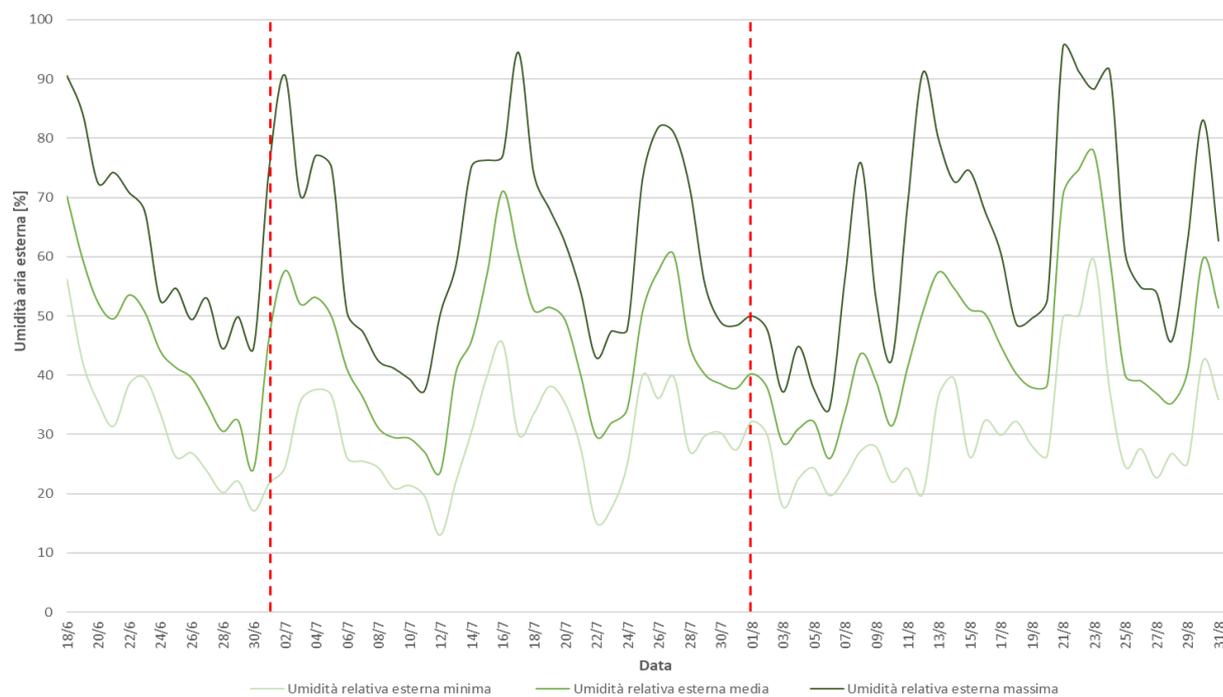


Figura 16. Massima, media, minima umidità relativa giornaliera esterna registrata dal 18 giugno al 31 agosto.

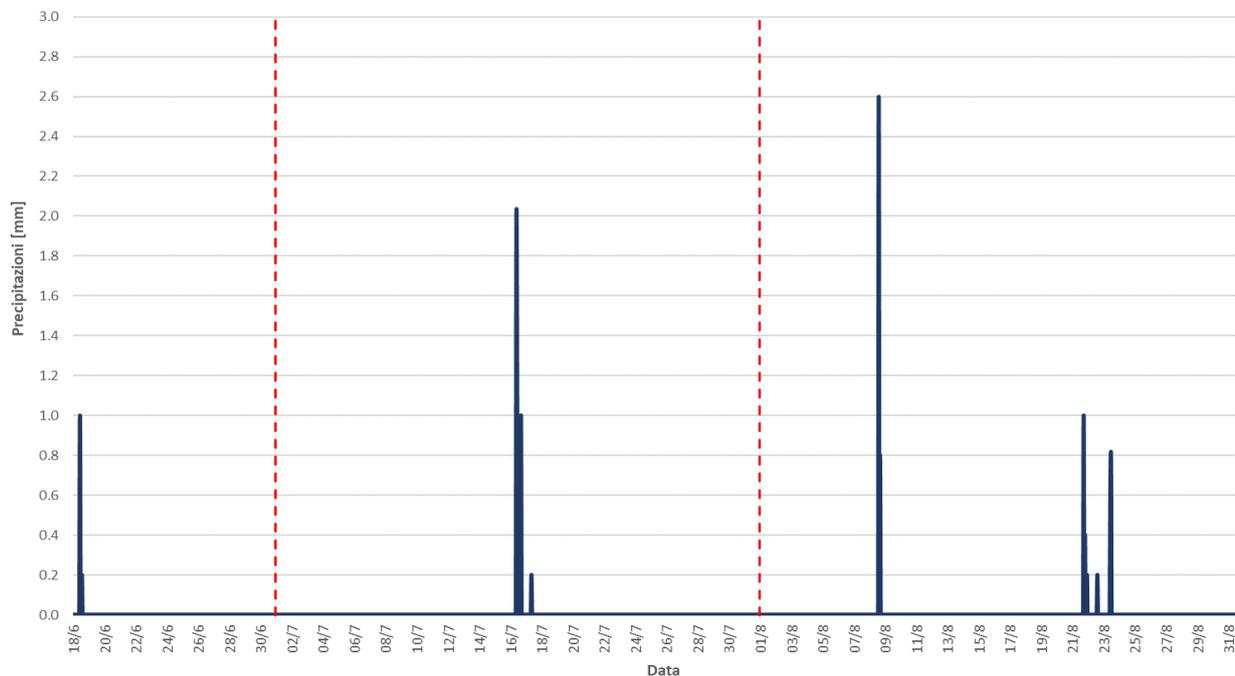


Figura 17. Precipitazioni, mm di pioggia registrati dal 18 giugno al 31 agosto.

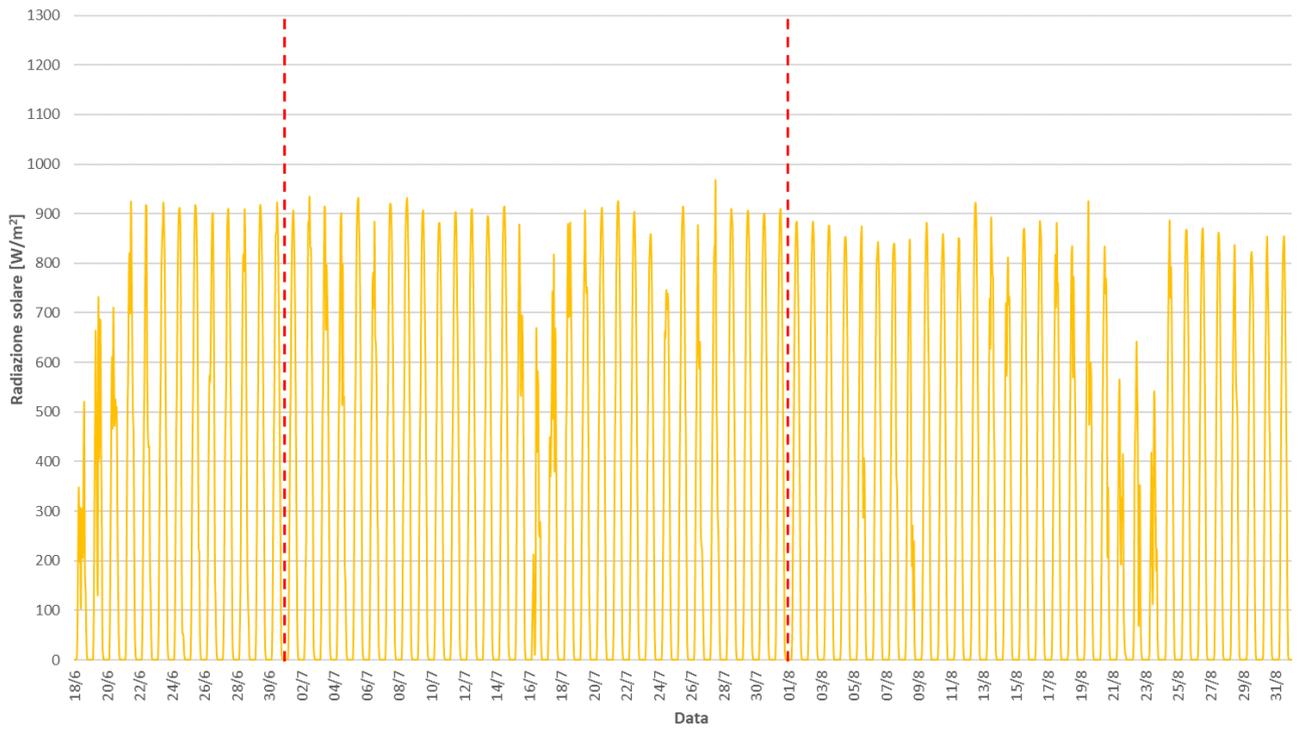


Figura 18. Radiazione solare globale registrata dal 18 giugno al 31 agosto (intervallo di misura: 5 min).

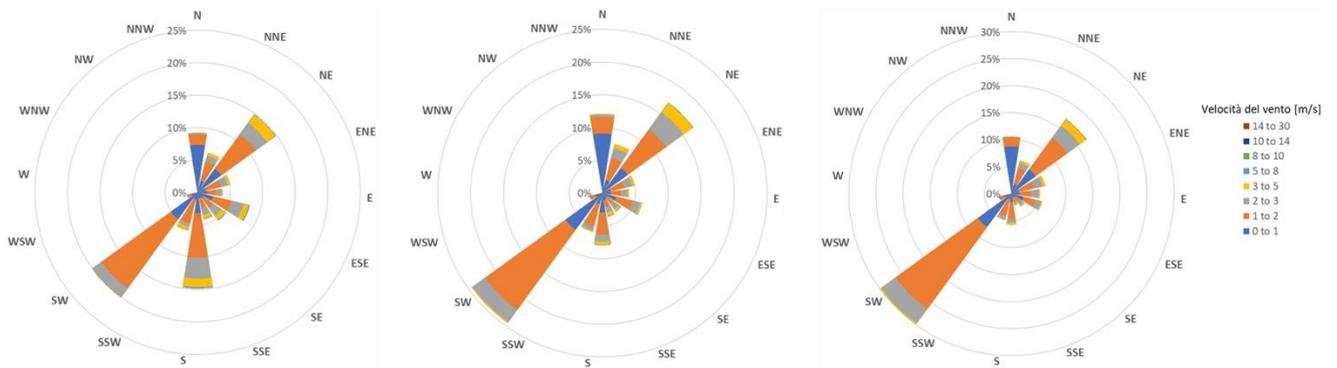


Figura 19. Rosa dei venti di giugno, luglio ed agosto

2.2.1.2 Occupazione

L'edificio oggetto di studio, concepito come living lab quindi occupato da utenti reali, ha permesso di studiare come le condizioni di occupazione ed uso possano influenzare il funzionamento e l'attivazione delle logiche impostate dal sistema di controllo e indirettamente alterare le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio. Durante il periodo in analisi, si sono susseguiti periodi con occupazione intermittente e periodi con occupazione più continua e regolare. Il numero di occupanti, inoltre, ha subito variazioni (da uno a tre occupanti). La Figura 20 riassume le condizioni registrate durante il periodo di monitoraggio.

Si evidenziano un periodo ad occupazione occasionale (dal 18/6 al 12/7) e un periodo in cui l'edificio è stato occupato in modo regolare (dal 13/7 al 31/8). Nel primo periodo l'edificio è stato occupato per brevi periodi al mattino e nella parte centrale della giornata da un solo occupante. Hanno fatto eccezione i giorni 29/6, 2/7 e 4-5/7 dove l'occupazione è stata più prolungata. Nel secondo periodo, l'edificio è stato occupato dal 13/7 al 31/08, senza considerevoli periodi di discontinuità. In questo periodo l'occupazione è stata di 3 persone, tranne nell'intervallo dal 14/8 al 18/8 in cui nell'edificio sono state presenti solo 2 persone.

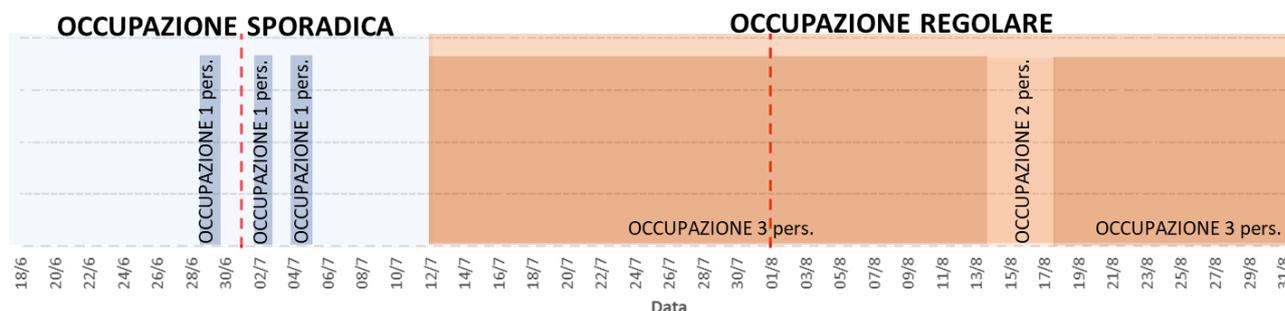


Figura 20. Condizioni di occupazione edificio tra il 18 giugno e il 31 agosto.

2.2.1.3 Logiche di controllo

Durante il periodo di monitoraggio, sono state attuate logiche di controllo per regolare l'utilizzo della ventilazione naturale e meccanica, del raffrescamento attivo con pompa di calore e delle schermature solari, con l'obiettivo di attuare soluzioni passive e a basso uso di energia, e solo in condizioni critiche per il mantenimento dei parametri ambientali, di adottare soluzioni attive con accensione della pompa di calore. Gli utenti dell'edificio, coerentemente alla logica dei living lab, hanno potuto modificare alcuni settaggi delle logiche di controllo. Il sistema di controllo, infatti, invia dei messaggi di suggerimento quando è vantaggioso attivare o disattivare la ventilazione naturale, tuttavia, l'occupante è libero di accogliere il suggerimento o di decidere di non attuare alcuna modifica. Inoltre, gli occupanti, per mezzo dell'interfaccia del sistema Konnex, possono comandare anche in modo manuale l'accensione e lo spegnimento della pompa di calore in modalità di raffrescamento e della ventilazione meccanica. Utilizzando i pulsanti negli ambienti possono anche controllare l'altezza delle schermature solari e l'angolo di rotazione delle lamelle. Prima di descrivere le logiche di controllo attuate, si precisa che nelle formule del testo verranno indicati rispettivamente:

- in verde le variabili il cui valore è stato impostato come **set-point**,
- in azzurro le variabili di controllo **misurate** dal sistema.

Si ricorda che la climatizzazione degli ambienti è realizzata attraverso un sistema a tutt'aria, in cui l'aria di mandata, prelevata dall'esterno, passando prima in uno scambiatore interrato, o direttamente da un canale collegato all'esterno, viene convogliata in un recuperatore di calore (aria/aria a flussi incrociati).

Dopo il passaggio nel recuperatore di calore, l'aria di mandata attraversa una batteria ad acqua e viene infine distribuita in ogni locale. Si riporta di seguito, in Figura 21, lo schema dell'impianto dell'edificio con i sensori installati, per facilitare la comprensione delle logiche settate e descritte nei successivi paragrafi.

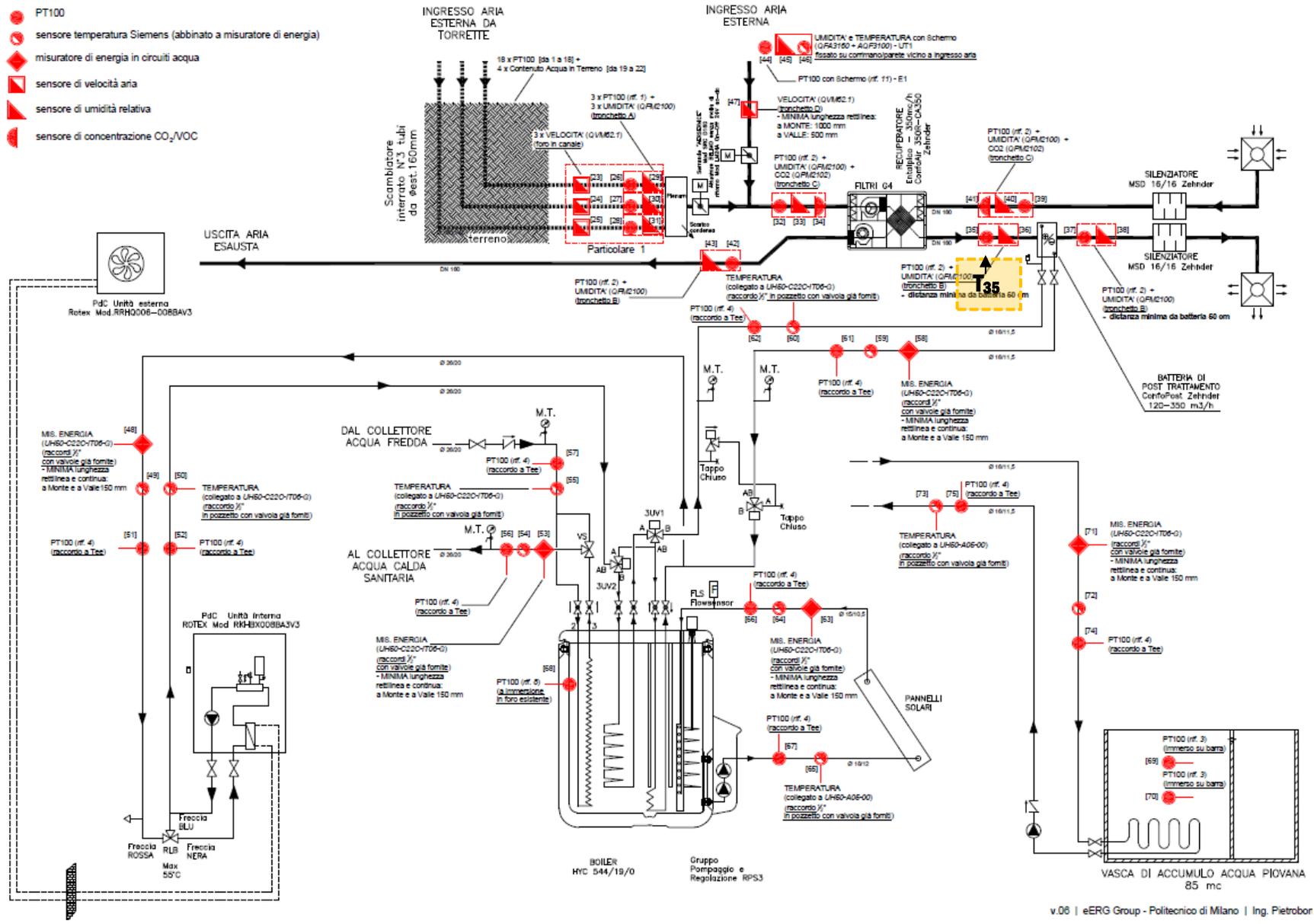


Figura 21. Schema dell'impianto e dei sensori (in rosso) installati nel sistema impiantistico dell'edificio.

VENTILAZIONE NATURALE

L’attivazione della ventilazione naturale (VN) avviene attraverso l’apertura delle finestre in modo manuale e viene rilevata e inviata sul bus Konnex per mezzo di un contatto installato su ciascuna finestra/portafinestra. Lo stato di apertura o chiusura, viene quindi rilevato e memorizzato dal sistema, che attiva o disattiva la ventilazione meccanica (VM) con un ritardo di 1 minuto (impostabile).

Se dai contatti installati sui serramenti risulta che almeno una finestra/portafinestra sull’esterno è stata aperta e rimane aperta per un tempo di durata superiore a 1 minuto, allora vengono spenti il ventilatore di mandata e il ventilatore di ripresa, passando alla modalità ventilazione naturale.

I periodi di utilizzo della ventilazione naturale o della ventilazione meccanica possono essere visualizzati attraverso la Figura 22, che riporta con la linea azzurra la potenza elettrica richiesta dalla macchina di ventilazione (ventilazione meccanica controllata - VMC). Quando il valore di potenza è pari a zero, la ventilazione meccanica risulta disattivata a favore dello sfruttamento della ventilazione naturale.

Come si può vedere dalla Figura 22, si è optato per la ventilazione naturale:

- dal 18/6 fino al 21/6 (sera) tutto il giorno;
- il 14/7 per qualche ora durante la sera/notte;
- dal 16/7 al 24/7 tutto il giorno;
- dal 26/7 all’1/8 tutto il giorno;
- dall’1/8 al 12/8 solo la notte;
- dal 13/8 al 15/8 tutto il giorno;
- dall’16/8 al 20/8 solo la notte;
- dal 21/8 al 31/8 tutto il giorno.

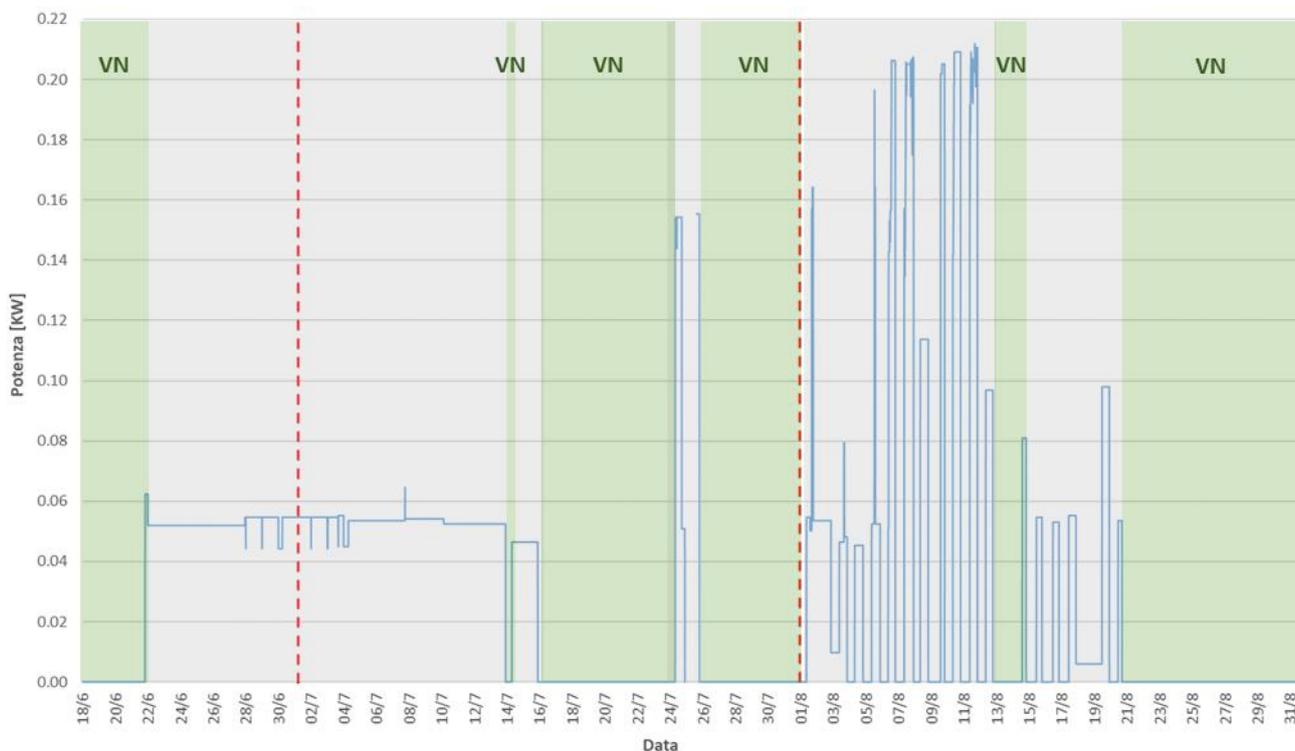


Figura 22. Potenza elettrica richiesta dalla macchina di ventilazione (linea blu), attivazione della ventilazione meccanica (grigio) e sfruttamento della ventilazione naturale (verde) durante il periodo di monitoraggio.

VENTILAZIONE MECCANICA

Come impostato nelle logiche di controllo, l'attivazione della ventilazione meccanica avviene alla chiusura delle finestre/portefinestre verso l'esterno dei locali climatizzati, con un ritardo di 1 minuto (attivazione della modalità ventilazione meccanica).

Il controllo della velocità dei ventilatori è stato possibile in continuo con segnale 0-10 V.

Per la ventilazione meccanica è stata scelta la logica di tipo *Demand controlled mechanical ventilation*, la quale ha permesso il controllo della portata della ventilazione meccanica in funzione di alcune variabili ambientali. L'accensione e la velocità dei ventilatori di mandata e ripresa sono state controllate in funzione dei valori delle seguenti variabili rappresentative delle condizioni degli ambienti interni:

- Concentrazione di CO₂ ($C_{CO_2.input}$);
- Temperatura indoor ($T_{ind.input}$).

Si ricorda che l'edificio è dotato di un sistema di ventilazione meccanica bilanciata. Per questo, il ventilatore di mandata e di quello di ritorno funzionano alla stessa velocità.

In particolare, la velocità dei ventilatori è stata controllata in modo proporzionale rispetto a valori delle due variabili elencate qui sopra e della loro distanza dai rispettivi valori di **set-point** (SP) impostabili dall'utente (che indichiamo con: $C_{CO_2.SP}$, $T_{ind.SP}$).

La Figura 23 riporta, come esempio, il diagramma di controllo della velocità dei ventilatori in funzione della concentrazione di CO₂; lo stesso diagramma può essere fatto per la temperatura dell'ambiente interno.

Il controllo proporzionale della velocità dei ventilatori avviene in funzione dei valori di temperatura e di CO₂ dell'ambiente interno. Il valore massimo di velocità (o portata) deriva dai valori limite massimi di temperatura e concentrazione di CO₂ interni impostati per garantire un adeguato livello di qualità dell'aria e comfort. La velocità dell'aria è governata in base alle condizioni più sfavorevoli, se ad esempio si registra una temperatura molto elevata ma adeguati valori di CO₂, il diagramma di controllo della velocità sarà governato in base ai valori di temperatura.

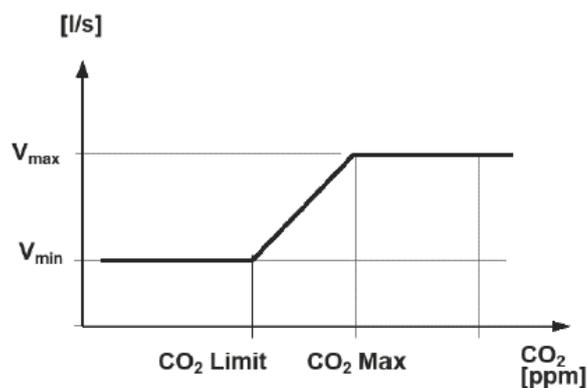


Figura 23. Esempio di diagramma di controllo in funzione della concentrazione di CO₂ (C_{CO_2}).

Per ognuna delle variabili impostate (C_{CO_2} , T_{ind}) il sistema definisce, dunque, un diagramma simile a quello riportato poc'anzi, con tutti i parametri impostabili dall'amministratore del sistema, in modo che si possano definire le forme dei diagrammi di controllo.

Sull'asse verticale (output del diagramma) viene espressa la percentuale, da 0 a 100 %, della velocità dei ventilatori (che ha corrispondenza nel segnale 0-10 V da passare alla macchina di ventilazione).

Si riportano nella Tabella 1, le caratteristiche impostate per concentrazione di CO₂ e temperatura, che hanno regolato la velocità dei ventilatori durante tutto il periodo di monitoraggio.

Tabella 1. Set-point, variabile rappresentativa dell’ambiente e costante proporzionale, impostati per l’attivazione della ventilazione meccanica.

Variabile impostata	CO ₂	Temperatura interna
Valore di set-point	1000 ppm	26 °C
Variabile rappresentativa dell’ambiente	Valore medio della concentrazione di CO ₂ misurata da tutti i sensori installati in ambiente	Valore misurato dalla termoresistenza PT100 installata nel soggiorno
Costante dell’azione proporzionale del controllo	0,2 [%/ppm]	33 [%/°C]

Il sistema installato, in funzione dei valori dei set-point impostati e delle misure di $C_{CO_2.input}$ e $T_{ind.input}$, restituisce da ciascun diagramma di controllo un valore di percentuale di velocità (e quindi di portata) dei ventilatori (V [%]). Il valore massimo dei due V [%], restituiti come output dei diagrammi, rappresenta il segnale che comanda le velocità del ventilatore:

$$V[\%]_{output} = MAX (V[\%] = f(C_{CO_2}); V[\%] = f(T_{ind}); V[\%]_{min})$$

Equazione 1. Valore massimo di V [%] in funzione delle variabili scelte.

In questo modo si è potuta controllare la portata d’aria dell’impianto di ventilazione in funzione di queste variabili, con una “logica OR”, come da schema esemplificativo in Figura 24.

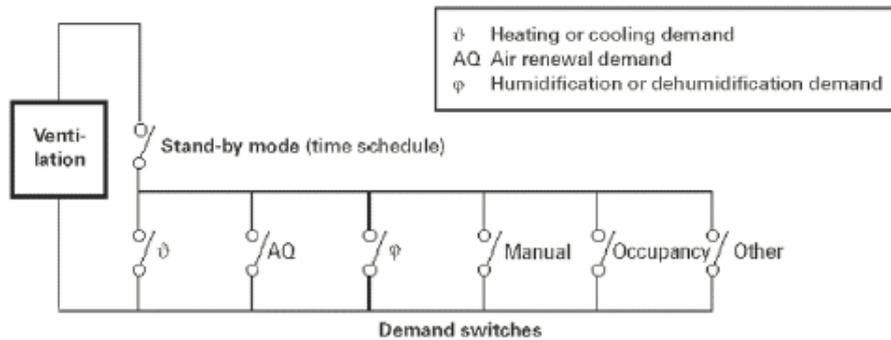


Figura 24. Schema di controllo della velocità dei ventilatori con “logica OR” in funzione delle variabili impostate.

Il sistema permette all’utente/amministratore del sistema, di selezionare le variabili in funzione delle quali si debba controllare la ventilazione meccanica (ad esempio in funzione della temperatura rappresentativa degli ambienti interni, della concentrazione di CO₂, dell’umidità relativa dell’aria interna, della differenza tra umidità assoluta tra aria interna e quella esterna, etc.).

Nel periodo analizzato, si è scelto di regolare la portata di ventilazione meccanica in funzione delle variabili riportate in Tabella 1.

MODALITÀ DI RAFFRESCAMENTO

Prima dell'attivazione del raffrescamento tramite PdC, vengono attuate due logiche di controllo che riguardano rispettivamente la verifica che le condizioni esterne non siano più favorevoli per l'uso della ventilazione naturale, e la scelta della sorgente più vantaggiosa da cui prendere l'aria da immettere in ambiente.

La prima logica è qui sintetizzata:

- quando tutte le finestre/portefinestre risultano CHIUSE, se la temperatura esterna è abbastanza fresca ($T_{out.input} < T_{ind.input} - \Delta T$ & $T_{ind.input} > T_{ind.SP.C}$), allora il sistema produce un avviso che consiglia l'APERTURA delle finestre, attraverso un messaggio per amministratori, a video e registrato in un elenco messaggi/allarmi;
- quando una o più finestre/portefinestre risultano APERTE, se la temperatura esterna NON è abbastanza fresca ($T_{out.input} > T_{ind.input} - \Delta T$ & $T_{ind.input} > T_{ind.SP.C}$), allora il sistema produce un avviso che consiglia la CHIUSURA delle finestre, con le modalità di invio descritte nel punto sopra.

Il valore di ΔT è stato impostato a 1 °C.

La Figura 25 riporta un esempio di messaggi di suggerimento di apertura delle finestre.



Cause	Source	Location	Counter	Command
Off Normal (No)	Si consiglia apertura delle finest...	Logical. SitePX. Gestione Impianto. Regolazioni. Avvisi Finestre		
Off Normal (No)	Si consiglia apertura delle finest...	Logical. SitePX. Gestione Impianto. Regolazioni. Avvisi Finestre		✓

Figura 25. Esempio di messaggio di avviso con suggerimento di apertura delle finestre.

La seconda logica, propedeutica all'attivazione del raffrescamento tramite ventilazione (ventilative cooling), riguarda il confronto delle temperature dell'aria rispettivamente alla presa d'aria direttamente dall'esterno e all'uscita dallo scambiatore interrato (EAHE).

La logica, rappresentata in Figura 26, è qui descritta per il periodo di raffrescamento:

- se la temperatura dell'aria all'uscita dello scambiatore interrato ($T_{EAHE.OUT}$) è minore della temperatura dell'aria esterna ($T_{out.input}$), allora il sistema apre la serranda dello scambiatore interrato e chiude la serranda della presa d'aria diretta dall'esterno ($T_{EAHE.OUT} < T_{out.input}$), altrimenti chiude la serranda dello scambiatore e apre la serranda della presa d'aria diretta dall'esterno ($T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$).

Questa logica consente di selezionare la sorgente più favorevole per l'approvvigionamento dell'aria primaria nel sistema di ventilazione meccanica. Infatti a seconda delle temperature misurate può selezionare in automatico se prendere l'aria dallo scambiatore interrato o direttamente dall'esterno.

Come $T_{EAHE.OUT}$ è stata impostata la media delle temperature dei 3 sensori di temperatura all'uscita dei tre canali dello scambiatore interrato (vedi Figura 21 per posizione sensori all'interno scambiatore interrato).

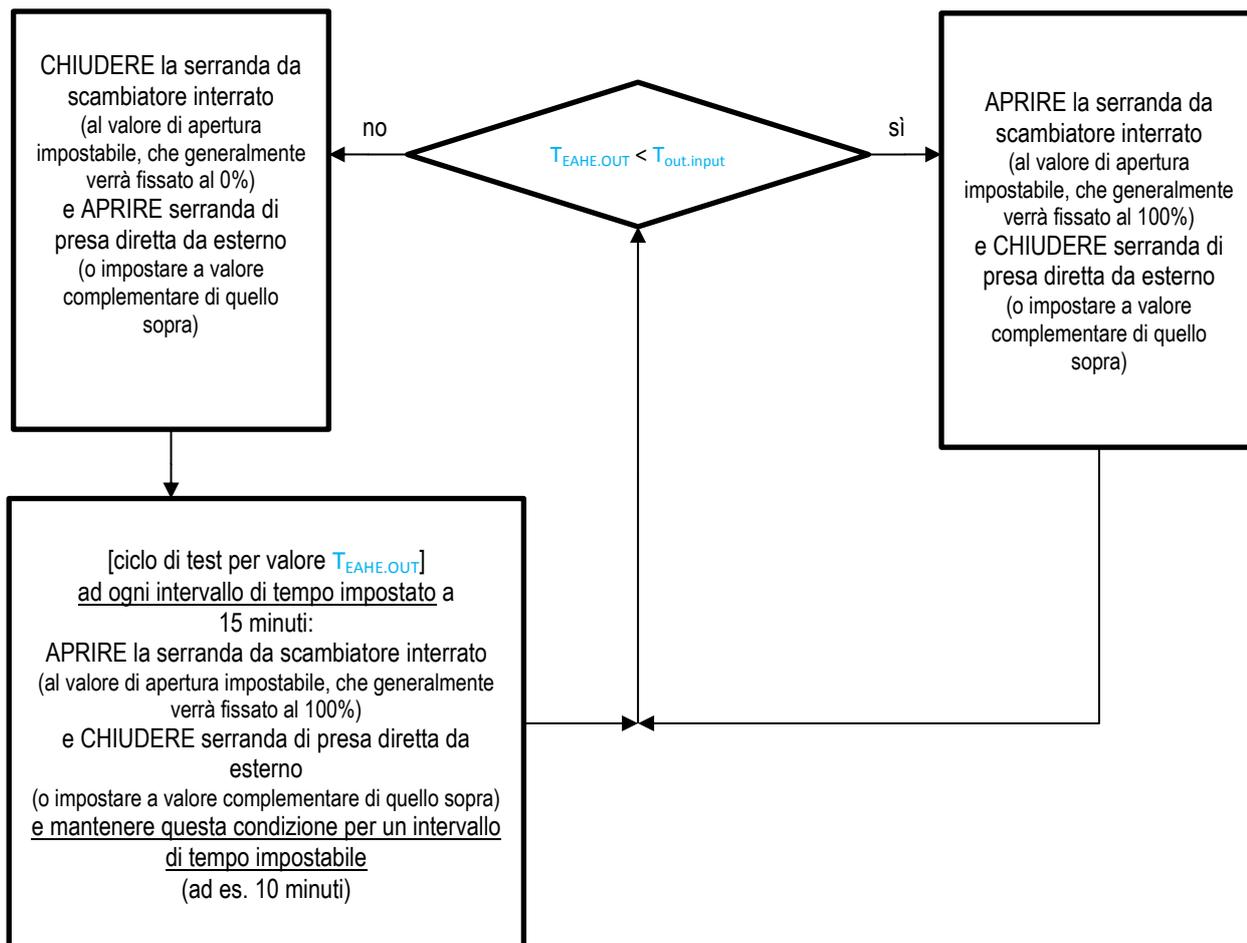


Figura 26. Serrande 1c - schema di controllo per serranda scambiatore interrato (EAHE) e serranda presa aria diretta da esterno, con ciclo di test su $T_{EAHE.OUT}$ a intervalli di tempo impostati.

La Figura 27 riporta le velocità dell’aria all’interno dei tre tubi dello scambiatore interrato, la velocità dell’aria nel canale dalla presa d’aria direttamente dall’esterno e la potenza elettrica richiesta dalla macchina di ventilazione, registrate durante l’intero periodo di monitoraggio. Le velocità dell’aria nello scambiatore sono riportate in arancione, grigio e giallo, la velocità dell’aria dalla presa diretta dall’esterno in verde, mentre, la potenza della VMC in azzurro. L’asse verticale di sinistra indica i valori di velocità dell’aria all’interno dei canali, mentre l’asse verticale a destra i valori di potenza.

Durante il periodo di monitoraggio, e nei giorni di funzionamento della VMC, si è verificata solo in pochi momenti la condizione in cui $T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$, ovvero quella in cui la temperatura dell’aria all’uscita dallo scambiatore interrato è risultata maggiore della temperatura dell’aria esterna.

Questi momenti possono essere individuati all’interno della Figura 27 tra il 2/7 e il 16/7, poiché la velocità nel canale di presa d’aria dall’esterno, riportata in verde, non è nulla. Questa condizione si è verificata in corrispondenza di ore notturne, durante le quali il sistema di controllo ha riconosciuto che fosse più vantaggioso prendere l’aria di rinnovo direttamente dall’esterno (a circa 15 °C), perché più fresca dell’aria all’uscita dello scambiatore interrato. In questa situazione il sistema di controllo ha, correttamente, aperto automaticamente la serranda motorizzata della presa d’aria direttamente dall’esterno e chiuso la serranda motorizzata dei canali dallo scambiatore interrato.

In generale, si può notare come le velocità dell’aria all’interno dei tre tubi dello scambiatore interrato si siano mantenute su valori pressoché simili tra loro. Tuttavia, confrontando i valori di velocità all’interno dei tre tubi, dell’ordine di 1,2 – 1,3 m/s, con la velocità nel canale della presa d’aria esterna, dell’ordine di 2,4 m/s, si può notare come quest’ultima sia circa il doppio rispetto alle prime. Questo è dovuto al fatto che le portate d’aria nello scambiatore interrato vengono ripartite nelle sezioni dei tre canali circolari con diametro interno pari a 142 mm ciascuno, mentre l’aria dalla presa diretta dall’esterno viene convogliata in

un unico canale circolare con diametro nominale di 160 mm. Per questo a parità di portata d'aria l'utilizzo del canale della presa diretta dall'esterno fa registrare velocità maggiori.

Nei giorni 6-13/8, sono state registrate velocità dell'aria all'interno dei tre condotti dello scambiatore interrato più elevate. La velocità dei ventilatori, come descritto precedentemente, variano in funzione dei valori delle variabili rappresentative delle condizioni degli ambienti interni ($C_{CO2.input}$ e $T_{ind.input}$). Le elevate velocità registrate in quei giorni, sono il risultato di condizioni climatiche esterne con temperature particolarmente elevate, le quali hanno portato a un aumento della temperatura interna e alla richiesta di portata di ventilazione più alte, anche con l'attivazione della pompa di calore.

L'analisi presentata in Figura 27 ha permesso di verificare la risposta della logica di controllo delle serrande del sistema di ventilazione meccanica.

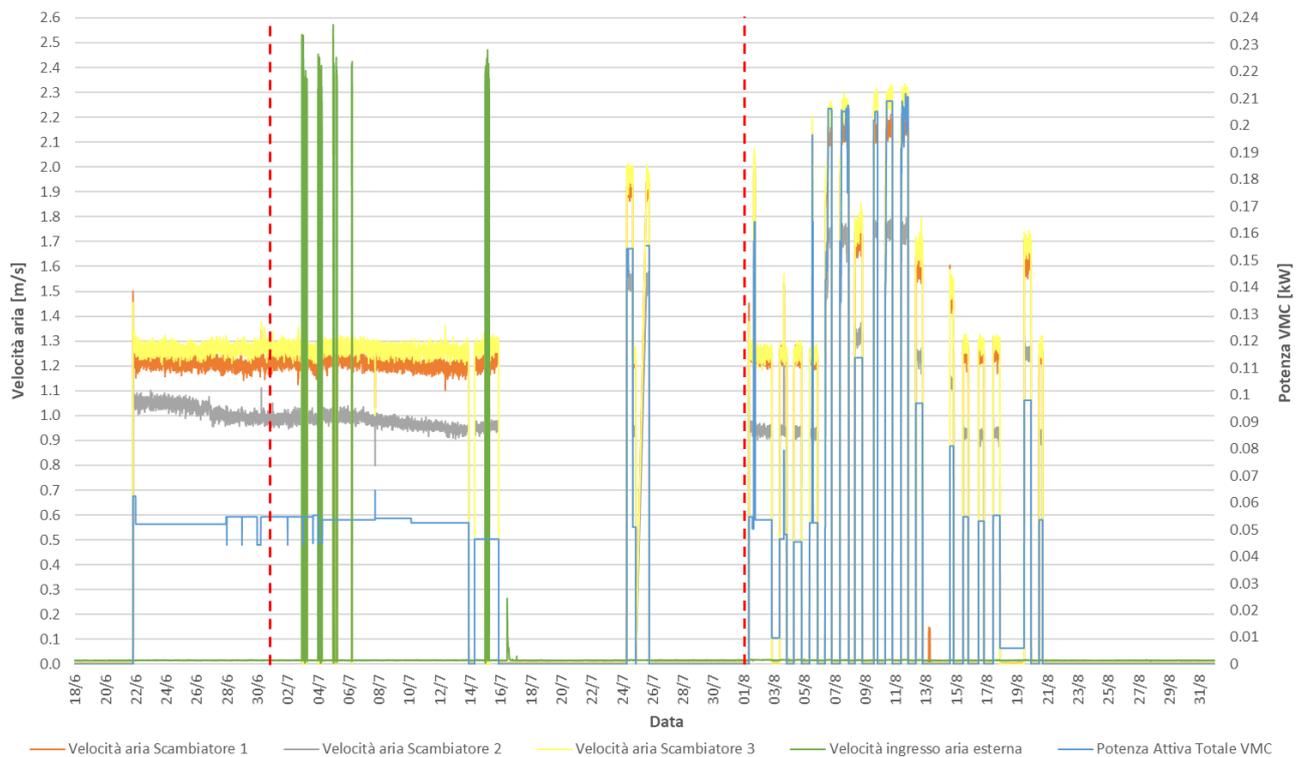


Figura 27. Velocità dello scambiatore interrato all'interno dei tre tubi (1, 2, 3), velocità dell'aria in ingresso dall'esterno, e potenza della VMC

ACCENSIONE DELLA POMPA DI CALORE (PdC)

L'accensione della PdC in modalità di raffreddamento e della pompa di circolazione integrata, è stata governata dalla logica denominata *Cooling 2*, la quale confronta la temperatura selezionata come rappresentativa dell'ambiente interno e la temperatura di set-point impostata. La logica di accensione della PdC prevede la verifica di due condizioni, rappresentate anche in Figura 28:

1. Se la temperatura rappresentativa delle stanze è maggiore della temperatura di set-point per il raffreddamento: $T_{ind.input} > T_{ind.SP.C}$

e

2. Se la temperatura dell'aria prima di passare nella batteria (misurata dal sensore in posizione [35]: $T_{[35]}$ ⁵) è minore di un valore massimo ($T_{MAX.FC1} = T_{ind.SP.C} - \Delta T$) impostabile: $T_{[35]} < T_{ind.SP.C} - \Delta T_{FC1}$

Allora vengono selezionate la velocità dei ventilatori in funzione di $T_{ind.input}$, senza attivare la pompa di calore.

- Se invece non si verifica la condizione (2), allora si attiva il circuito della batteria di raffreddamento e la pompa di calore in modalità raffreddamento;
- Se non si verifica la condizione (1), allora viene selezionata la velocità dei ventilatori secondo gli altri diagrammi di controllo (CO₂, VOC, UR).

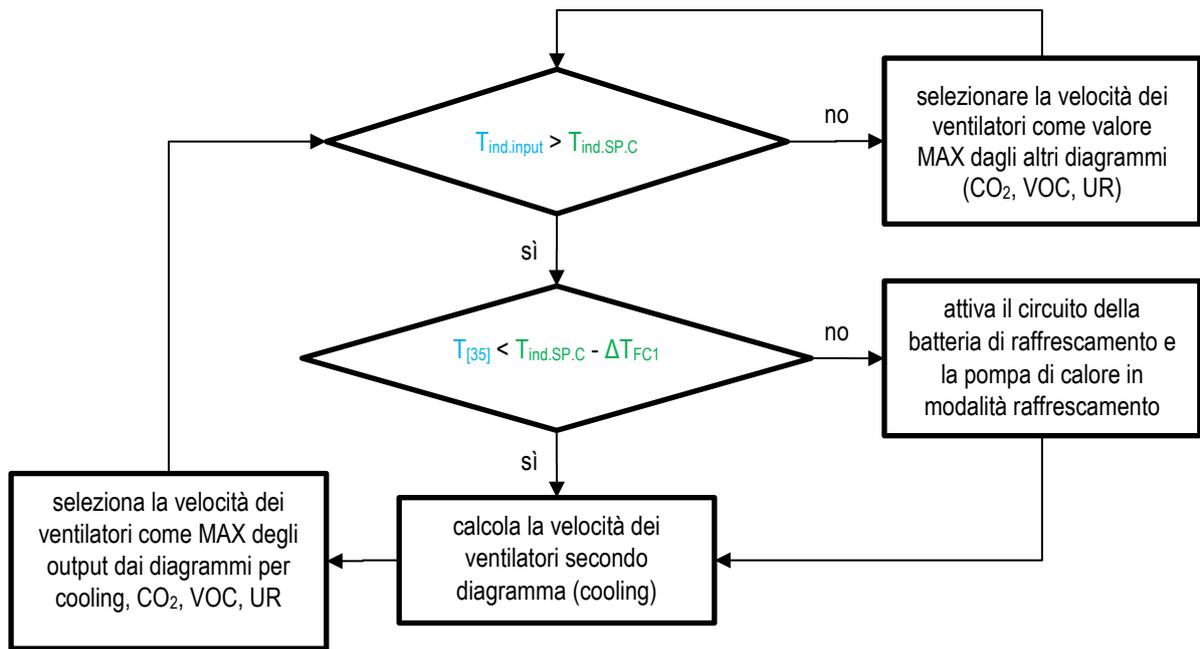


Figura 28. Schema di controllo della modalità Cooling 2 - Raffreddamento con scambiatore di calore interrato.

Durante il periodo di monitoraggio, i parametri della logica *Cooling 2* impostati, sono stati:

- $T_{ind.SP.C} = 26 \text{ °C}$;
- $T_{ind.input}$ = valore misurato dalla PT100 aria soggiorno;
- $\Delta T_{FC1} = 6 \text{ °C}$ (la pompa di calore si attiva se la temperatura dell'aria all'uscita del recuperatore è maggiore di $26-6=20\text{°C}$, altrimenti l'aria proveniente dallo scambiatore interrato non viene trattata);

⁵ Posizione sensore evidenziato in arancione in Figura 21, temperatura aria all'uscita del recuperatore di calore e prima della batteria di trattamento dell'aria.

- Punto effettivo di spegnimento Pdc per $T_{ind.SP.C} = 25,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$
(valore impostato per evitare eccessivo pendolamento acceso/spento della PdC).

La Figura 29 mostra in azzurro la potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore. In giallo è rappresentata la temperatura di input ($T_{ind.input}$), ovvero la temperatura registrata dalla termoresistenza PT100 installata in soggiorno. Infine in arancione, è rappresentata la temperatura registrata alla posizione 35 dello schema in Figura 21, ovvero la temperatura dell'aria all'uscita dal recuperatore di calore ($T_{[35]}$), integrato nella macchina di ventilazione. L'asse delle ordinate di sinistra riporta i valori di potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore in kW, mentre l'asse a destra i valori di temperatura in $^{\circ}\text{C}$.

Si precisa che dal 18/6 fino al 31/7 e tra il 3/8 e il 7/8 l'accensione della PdC è stata governata secondo la preferenza dell'utente e non secondo le logiche di controllo automatico impostate. Come detto all'inizio del paragrafo, in un living lab, l'attuazione delle strategie e delle logiche di controllo interagisce con le preferenze e le scelte degli utenti. Questo da una parte può portare a condizioni meno controllate, dall'altra consente il monitoraggio del comportamento degli occupanti e l'osservazione delle loro reazioni. Questo rappresenta un aspetto di valore negli studi sulle prestazioni reali energetiche e di comfort.

I giorni di agosto nei quali la PdC ha funzionato secondo logica di controllo impostata sono stati 1-2/8, 7-13/8 e 19-21/8. Durante questi giorni, si è deciso di far lavorare l'edificio nelle ore diurne con ventilazione meccanica e, se necessario, anche con raffrescamento attivo con accensione della pompa di calore. Invece nelle ore notturne si è scelta una strategia passiva con lo sfruttamento della ventilazione naturale attraverso le finestre. Dal grafico si può notare questo andamento dal calo regolare della potenza della PdC e dall'aumento in contemporanea della temperatura alla posizione 35, la quale, a impianto di ventilazione spento, si porta al valore di equilibrio con l'ambiente della centrale termica, dove è situato il canale dell'aria.

In tutti i casi di accensione della PdC, si nota che la temperatura interna di input ($T_{ind.input}$), ovvero la temperatura misurata dalla PT100 nel soggiorno, è maggiore di $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$, e la temperatura alla posizione 35 non è mai minore di $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{[35]} < T_{ind.SP.C} - \Delta T_{FC1}$ ovvero $< 26 - 6$), condizione necessaria per l'accensione della PdC.

Dal 22/8 al 31/8 la ventilazione meccanica è stata disattivata a favore dello sfruttamento della ventilazione naturale, infatti non sono state registrate accensioni della PdC in modalità di raffrescamento.

Inoltre, fino ai primi giorni di agosto si nota l'attivazione di una logica di controllo che è stata implementata per evitare che la pompa di calore entri in funzione per la preparazione dell'acqua calda sanitaria e riscaldi l'intero accumulo termico, anche quando non necessario. La regola è attivabile da parte dell'utente tramite interfaccia del sistema Konnex e prevede che la pompa di calore non entri in funzione in modalità di produzione di acqua calda sanitaria in un intervallo selezionabile. Questo consente che l'energia termica presente nell'accumulo, grazie all'apporto di energia del sistema solare termico, venga utilizzata completamente anche nel caso di richiesta di acqua calda nelle prime ore del mattino. In caso di poca radiazione solare, e quindi uno scarso contributo da parte del sistema solare termico, alla fine dell'intervallo temporale impostato, la pompa di calore si attiva regolarmente per la produzione di acqua calda sanitaria.

Come si vede dalla Figura 29, la logica è stata attivata dagli utenti nel primo periodo oggetto dall'analisi, fino ai primi giorni di agosto, generalmente per l'intervallo di tempo dalle ore 6 alle ore 11 del mattino.

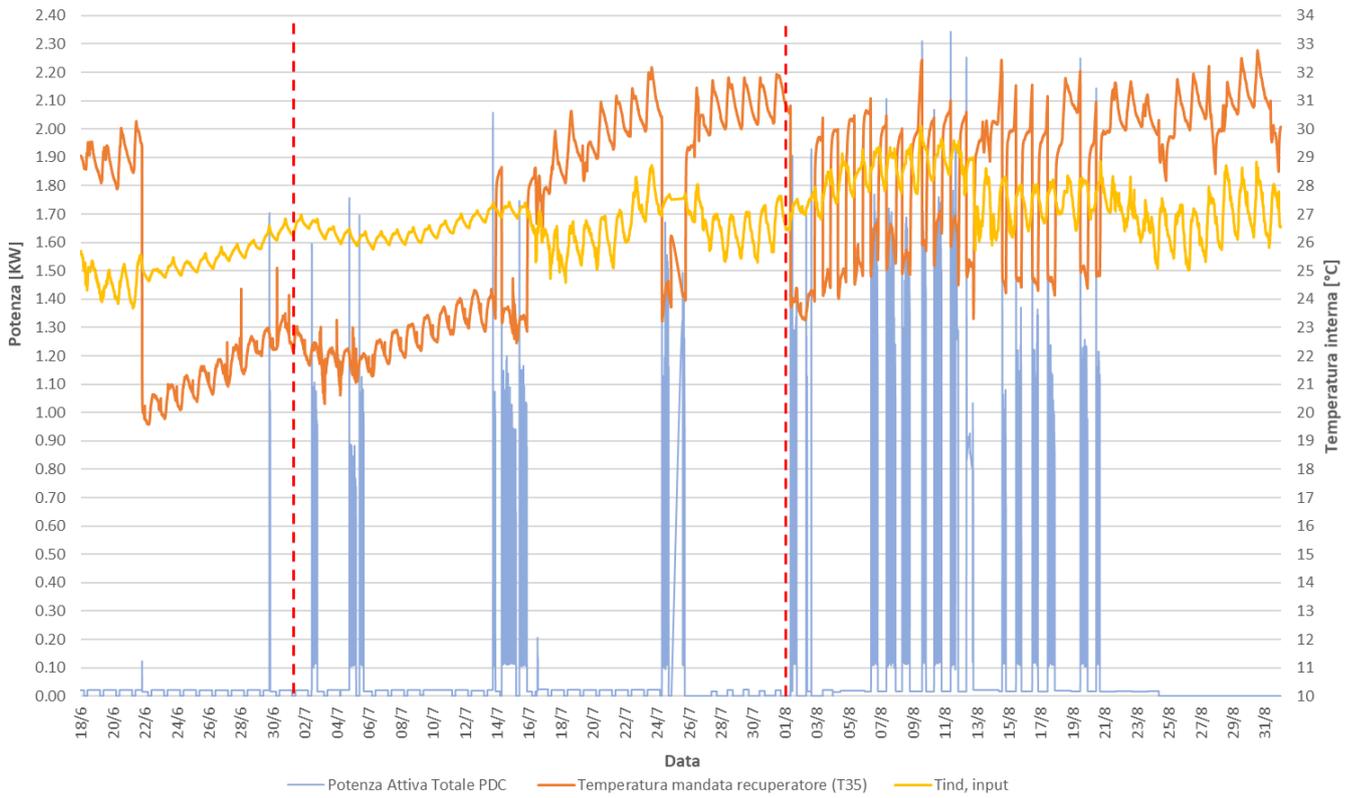


Figura 29. Accensione pompa di calore in relazione con la temperatura di set point e la temperatura alla posizione 35 (vedi Figura 21).

2.2.2 Dati di benchmarking

All'interno dell'EU il settore delle costruzioni è responsabile per circa il 40% dei consumi di energia e il 36% delle emissioni di CO₂ [8]. Direttive (e.g. direttiva europea 2010/31/EU [1]) e protocolli hanno fissato quindi degli obiettivi di efficienza energetica, dettando requisiti minimi di prestazione energetica sia per gli edifici di nuova costruzione sia per quelli esistenti che subiscono una ristrutturazione di grande portata.

La maggiore criticità relativa al patrimonio edilizio esistente, è il fatto che spesso le sue prestazioni non sono note, poiché non si conoscono le caratteristiche impiantistiche e/o edilizie dell'edificio; inoltre sia per gli edifici esistenti che per le nuove costruzioni, le prestazioni non vengono verificate in opera. Le prestazioni energetiche dipendono sia dalle caratteristiche fisiche dell'edificio che dal comportamento dell'utente finale e del gestore. Da ciò deriva la grande importanza della raccolta dei dati in campo e dello sviluppo di statistiche sull'uso dell'energia e sui consumi degli edifici. La valutazione di consumi e le informazioni sull'uso dell'energia permettono, infatti, di comparare tra loro gli edifici attraverso "indici di prestazione", di stimare i consumi di edifici simili, ed anche di stimare i potenziali miglioramenti a seguito di una riqualificazione.

Generalmente si confronta il consumo energetico dell'oggetto edilizio posto sotto analisi con valori presenti in letteratura che, tuttavia, spesso, sono poco coerenti con le caratteristiche climatiche ed edilizie dell'edificio in esame. Per l'oggetto di studio di questo rapporto si è pertanto cercato di reperire ed analizzare dati di riferimento coerenti con le caratteristiche del living lab, studiando i database per il settore residenziale siciliano e i dati riferiti ad edifici certificati Passivhaus, specialmente costruiti in clima mediterraneo. I dati riportati di seguito dimostrano tuttavia che esiste, purtroppo, ancora poca letteratura (e quindi dati di benchmarking) al riguardo. Si deve inoltre considerare che l'analisi sugli usi energetici contenuta in questo report riguarda solo il periodo di raffrescamento ed il valore di energia elettrica generale comprende la totalità degli usi energetici dell'edificio, anche quelli relativi agli spazi esterni e all'autorimessa interrata. Ulteriori analisi di dettaglio sui singoli usi energetici sono presentate nel capitolo seguente.

Per quanto riguarda il settore residenziale siciliano, il Rapporto sull'energia 2016 [9] ed i dati dell'Istituto nazionale di statistica (Istat) non riportano alcun indice di riferimento per i consumi energetici riferiti alla stagione di raffrescamento. L'Istat [10], riporta alcuni dati di consumo di energia elettrica per uso domestico per Catania riferiti all'anno 2011. I valori riportati sono:

- valore di energia elettrica per uso domestico di 1315 kWh/abitante/anno,
- valore di consumo per utenza di energia elettrica pari a 2425 kWh/utenza/anno.

Considerando lo standard Passivhaus, esso nasce per rispondere alle esigenze connesse a climi dell'Europa centrale. I criteri affinché un edificio sia certificato Passivhaus sono vari e stringenti; in particolare riguardo il *fabbisogno di energia termica (utile)*⁶ per riscaldamento e il *fabbisogno annuo di energia primaria*⁷ sono stati fissati due valori di energia da rispettare:

- *fabbisogno di energia termica (utile)* per il riscaldamento degli ambienti (*energy need*) non superiore a 15 kWh per m² di superficie netta climatizzata per anno;
- *fabbisogno annuo di energia primaria* per tutti i servizi energetici, inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricità per l'abitazione e gli ausiliari, non superiore a 120 kWh per m² di superficie netta abitabile per anno.

Considerando gli indici di benchmark e le prestazioni energetiche delle Passivhaus, i valori trovati in letteratura sono poco calzanti con le caratteristiche climatiche dell'edificio in esame sito in Sicilia. Il concetto di Passivhaus è stato, infatti, introdotto prevalentemente per rispondere alle esigenze connesse al clima relativamente freddo dell'Europa Centrale.

⁶ Definita in (UNI TS UNI/TS 11300-1:2008 [11])

⁷ Definito in (UNI TS UNI/TS 11300-2:2008 [11])

Attraverso il progetto CEPHEUS [12,13], sono stati analizzati 221 edifici residenziali secondo lo standard Passivhaus in cinque paesi europei (Francia, Germania, Austria, Svizzera, Svezia). Il progetto ha avuto l'obiettivo di dimostrare la qualità delle prestazioni energetiche e la fattibilità tecnica di edifici passivi.

Tuttavia il report [13], analizzando edifici situati in climi freddi, presenta solo il monitoraggio dei consumi degli edifici durante il periodo ottobre – marzo, mostrando i risultati di fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento e acqua calda sanitaria (ACS). I risultati ottenuti, mostrano un fabbisogno di energia termica utile per il riscaldamento variabile tra 11,9 kWh/m²/anno e 32,8 kWh/m²/anno in base alle caratteristiche degli edifici e la zona geografica di appartenenza. I risultati di fabbisogno di energia termica utile per ACS varia invece tra 9,4 kWh/m²/anno e 32,2 kWh/m²/anno, infine i consumi elettrici variano tra 14 kWh/m²/anno e 49,9 kWh/m²/anno.

Il concetto di Passivhaus è stato adattato ai climi caldi negli anni anche grazie al progetto Passive-On [10], allo scopo di promuovere la progettazione di case a basso impatto energetico anche nell'Europa meridionale. In questo clima, infatti, sebbene una Passivhaus necessiti di essere riscaldata d'inverno, di frequente l'esigenza predominante è quella di assicurare condizioni confortevoli durante la stagione calda. Passive-On ha proposto, infatti, alcune aggiunte allo Standard Passivhaus per adattarlo alle regioni climatiche calde; tra le modifiche principali si trova l'introduzione di un limite esplicito al *fabbisogno di energia termica utile* per raffrescamento estivo che si deve mantenere inferiore a 15 kWh per m² di superficie netta abitabile all'anno. Tale valore limite è stato poi ufficialmente integrato nei requisiti del protocollo per la certificazione Passivhaus. Nell'ambito del progetto Passive-On, e nelle "Linee guida progettuali per case confortevoli a basso consumo energetico" [5] sono stati analizzati alcuni casi di edifici residenziali a basso consumo energetico in Spagna, Portogallo e Italia. Sono stati sviluppati modelli di Passivhaus attraverso software di modellazione energetica ed è stato simulato il comportamento durante un intero anno, ricavando così il fabbisogno di energia termica utile (energy needs) annuale per riscaldamento e raffrescamento in due edifici in Spagna, uno in Portogallo e tre in Italia. Nel caso di Spagna e Portogallo, i consumi ricavati dalle simulazioni sono stati confrontati con i consumi di edifici residenziali standard. I risultati delle analisi sono riportati nelle tabelle di seguito. La Tabella 2 riporta i risultati ottenuti per il caso della Spagna nel quale sono state analizzati due edifici residenziali, uno a Siviglia e l'altro a Granada, la Tabella 3 riporta i risultati ottenuti per il Portogallo e la Tabella 4 riporta i risultati ottenuti per l'Italia in tre città, Milano, Roma e Palermo.

Tabella 2. Fabbisogno di energia termica utile (energy need) annuale per riscaldamento e raffrescamento per una casa standard e per una PassivHaus a Siviglia e Granada

	Energy need per riscaldamento [kWh/m ² /anno]	Energy need per raffrescamento [kWh/m ² /anno]
PassivHaus Siviglia	2,8	21,7
Casa Standard Siviglia	25,8	31,5
PassivHaus Granada	8,7	7,9
Casa Standard Granada	52,2	16,7

Tabella 3. Fabbisogno di energia termica utile (energy need) annuale per riscaldamento e raffrescamento per una casa standard e per una PassivHaus in Portogallo

	Energy need per riscaldamento [kWh/m ² /anno]	Energy need per raffrescamento [kWh/m ² /anno]
PassivHaus	5,9	3,7
Casa Standard	73,5	32

Tabella 4. Fabbisogno di energia termica utile (energy need) per riscaldamento e raffrescamento per tre PassivHaus in Italia

	Energy need per riscaldamento [kWh/m ² /anno]	Energy need per raffrescamento [kWh/m ² /anno]
PassivHaus Milano	10,4	3,2

PassivHaus Roma	6,2	6,6
PassivHaus Palermo	2,4	9,6

Le simulazioni fatte per il progetto Passive-On mostrano che le PassivHaus ipotizzate in Italia, Portogallo ed a Granada per la Spagna, rispettano i limiti imposti per ottenere una certificazione PassivHaus. Tuttavia, come detto, si tratta di valori ricavati da simulazioni energetiche e non di dati di edifici reali.

2.2.3 Analisi energetica

Le successive analisi fanno riferimento alle misure di uso di energia elettrica per tutti gli usi finali e di produzione di energia elettrica dal sistema fotovoltaico. Le misure sono state effettuate in termini di energia e di potenza.

Si ricorda che tutti gli usi energetici dell'edificio sono di tipo elettrico, compresi quelli relativi alla cottura dei cibi. Inoltre, quando si considera la potenza elettrica o l'uso di energia totale, si comprende la totalità dei servizi dell'edificio, anche quelli relativi agli spazi esterni e all'autorimessa interrata.

Alla fine della sezione viene presentata un'analisi dettagliata delle potenze elettriche e dell'uso di energia dei principali apparecchi elettrici installati nell'edificio, al fine di fornire una scomposizione dettagliata per usi finali.

Nel periodo oggetto di studio, si è complessivamente registrata una produzione di energia elettrica pari a 3 086,4 kWh ed un uso di energia elettrica pari a 1 275,9 kWh. Globalmente, la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è stata quindi maggiore dell'uso di energia per la totalità degli usi energetici. In particolare, considerando i due mesi monitorati nella loro interezza, si nota che in luglio (Figura 37) la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata pari a 1 298,5 kWh (corrispondente a 9,0 kWh/m² di superficie netta climatizzata) mentre l'uso di energia elettrica per tutti i servizi è stata pari a 440,4 kWh (corrispondente a 3,1 kWh/m² di superficie netta climatizzata). In agosto (Figura 43) la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata pari a 1 244,8 kWh (corrispondente a 8,6 kWh/m² di superficie netta climatizzata) mentre l'uso di energia elettrica è stata pari a 682,5 kWh (corrispondente a 4,7 kWh/m² di superficie netta climatizzata).

In generale, l'uso di energia risulta contenuto e, se rapportato ad un intero periodo annuale, in linea con i limiti di uso totale di energia primaria per un edificio Passivhaus (limite della certificazione Passivhaus classica pari a 120 kWh/m² all'anno). Questo è valido anche concentrandosi sul solo mese di agosto, in cui l'occupazione è stata completa e regolare. Si deve anche considerare che il limite Passivhaus considera tutti gli usi relativi al confine dell'involucro termico, mentre nelle analisi del presente documento sono considerati anche usi relativi all'area esterna, per esempio per l'irrigazione.

In termini di potenza elettrica richiesta (per tutti i servizi), notiamo (Figura 30) che i valori monitorati non scendono mai sotto i 500 W circa, anche nelle ore notturne o di occupazione. Infatti, dall'analisi dei singoli servizi energetici se ne riconoscono alcuni per i quali si è misurata una richiesta di potenza elettrica quasi continua e con poche variazioni nel corso della giornata e del periodo di analisi: il frigorifero della cucina, le apparecchiature per la domotica e l'anti-intrusione e per il sistema di controllo e monitoraggio (PLC, moduli elettronici, alimentatori, computer per supervisione, etc.), gli stand-by di alcuni apparecchi in centrale termica o dei circolatori idraulici, gli stand-by degli apparecchi elettrici tipici dell'abitazione (televisioni, elettrodomestici, etc.).

Si individuano poi dei picchi di potenza elettrica richiesta, i quali nei periodi di non occupazione, come le ultime settimane di giugno (Figura 30) e il primo periodo di luglio (Figura 36) sono intorno al valore di 2 kW. I più frequenti di questi picchi corrispondono all'attivazione delle pompe di circolazione dell'impianto di irrigazione del giardino, le quali si attivano con programmazione regolare ogni 2 giorni per un periodo di circa 1,5 ore nel corso della mattina. Nei periodi di occupazione e in particolare di accensione della pompa di calore, si raggiungono valori di 4 kW con picchi fino a circa 6 kW.

Nei grafici seguenti, rispettivamente per giugno (Figura 30), luglio (Figura 36) e agosto (Figura 42), dagli andamenti della domanda di potenza elettrica (in bordeaux) si riconoscono i periodi di occupazione a partire dal 13 luglio. In particolare, nel mese di agosto notiamo una maggiore domanda di potenza elettrica per un utilizzo regolare di forno, piano cottura a induzione, lavastoviglie e lavatrice. Nella prima metà di agosto inoltre si è utilizzata la pompa di calore per il raffrescamento, soprattutto nelle ore diurne, mentre nelle ore notturne generalmente si è optato per la ventilazione naturale tramite apertura delle finestre.

Riguardo la produzione di energia elettrica da fotovoltaico, possiamo notare l'andamento istantaneo che segue quello della radiazione solare incidente, riconoscendo i giorni di cielo coperto. La produzione effettiva raggiunge picchi tra i 5 e i 6 kW. In alcuni casi questi vengono superati raggiungendo valori superiori ai 7 kW. Queste punte più elevate sembrano corrispondere a momenti di cielo più limpido in

alcuni casi probabilmente anche in seguito a temporali e precipitazioni piovose, come si riconosce in taluni giorni dall'andamento più frastagliato della produzione da fotovoltaico.

Considerazioni analoghe si possono esprimere sui valori in termini di energia elettrica prodotta e richiesta per ogni giorno. Vediamo come nei giorni di ridotta occupazione, in particolare di giugno (Figura 31) e luglio (Figura 37) l'uso di energia elettrica sia compreso tra gli 8 e i 16 kWh al giorno, mentre nei giorni di occupazione maggiore, in particolare in agosto (Figura 43) tra i 20 e i 35 kWh al giorno. La produzione di energia da fotovoltaico è compresa nella maggior parte dei casi tra i 40 e i 50 kWh al giorno.

Per analizzare l'interazione dell'edificio con la rete si è calcolato il rapporto fra la produzione e l'uso di energia elettrica. In giugno (Figura 34) e luglio (Figura 40) il rapporto tra la produzione e l'uso giornaliero è più alto. Generalmente la produzione di energia giornaliera è tra le 2 e le 5 volte l'uso di energia elettrica. In agosto (Figura 46) il rapporto è più contenuto, ma sempre maggiore di uno, raggiungendo un massimo di circa 3,5. Anche l'analisi del rapporto produzione sull'uso di energia mostra come l'edificio produca più energia di quella che consuma, sia considerando il bilancio mensile sia quello giornaliero.

Questo rapporto è stato calcolato anche su base oraria, come mostrato in Figura 33, Figura 39, Figura 45. Il rapporto orario mostra una maggiore variabilità e segue le variazioni e i picchi dell'uso di energia e l'andamento della produzione di energia da fotovoltaico durante le ore del giorno. Per questo, il rapporto produzione sull'uso di energia risulta pari a zero nelle ore notturne e con produzione nulla, mentre nel resto delle ore la produzione oraria può arrivare a essere pari a 18 volte la domanda.

Per analizzare l'interazione tra edificio e rete elettrica, è stato anche calcolato un indicatore utilizzato per lo studio di edifici nZEB [14], come il *Load Cover Factor* [15], che rappresenta il rapporto fra la produzione e l'uso di energia con limite superiore a 1 (o 100% in percentuale), definito come segue:

$$\gamma_{load} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} \min[g(t) - S(t) - \zeta(t), l(t)] dt}{\int_{\tau_1}^{\tau_2} l(t) dt}$$

Dove

$l(t)$ uso di energia,

$g(t)$ generazione di energia in situ,

$S(t)$ accumulo di energia,

$\zeta(t)$ dispersioni di energia.

Nel nostro caso abbiamo termini nulli relativi ad accumulo e dispersione di energia.

Nel periodo analizzato, nelle Figura 32, Figura 38 e Figura 44, notiamo come l'indice *Load Cover Factor*, calcolato con frequenza oraria, assuma valore pari a 100% per la totale copertura dell'uso ("load") di energia dalla produzione da fotovoltaico nel corso della maggior parte delle ore diurne. Valori minori del 100% si registrano nelle prime ore del mattino e in quelle prima del tramonto alla sera.

Si è condotta anche una prima analisi per valutare il potenziale di utilizzo di sistemi di accumulo di energia elettrica. Per ogni giorno, si è determinato l'uso di energia elettrica nelle ore notturne (dalle ore 20 alle ore 7) e la sovrapproduzione di energia elettrica da fotovoltaico ottenuta durante le ore diurne (dalle ore 7 alle ore 20). Questa è una prima analisi semplificata che non tiene conto dell'effettivo bilancio istantaneo, ma che sulla base dei valori misurati considera un bilancio giornaliero. In Figura 47 possiamo vedere per il mese di agosto che l'uso di energia nelle ore notturne assume valori intorno ai 5 kWh al giorno, mentre la sovrapproduzione nelle ore diurne varia fra 10 e 35 kWh al giorno. I valori di sovrapproduzione diurna aumentano fino a 40 kWh al giorno nei periodi di giugno (Figura 35) e luglio (Figura 41). L'edificio dunque, se integrato con un accumulo elettrico, e facendo un uso ottimizzato dell'accumulo termico data dalla capacità termica dell'edificio potrebbe giungere, almeno durante i mesi estivi, ad essere autonomo, senza necessità di scambio con la rete.

Giugno 2017 (inizio periodo di monitoraggio con sistema aggiornato il 18/6/2017)

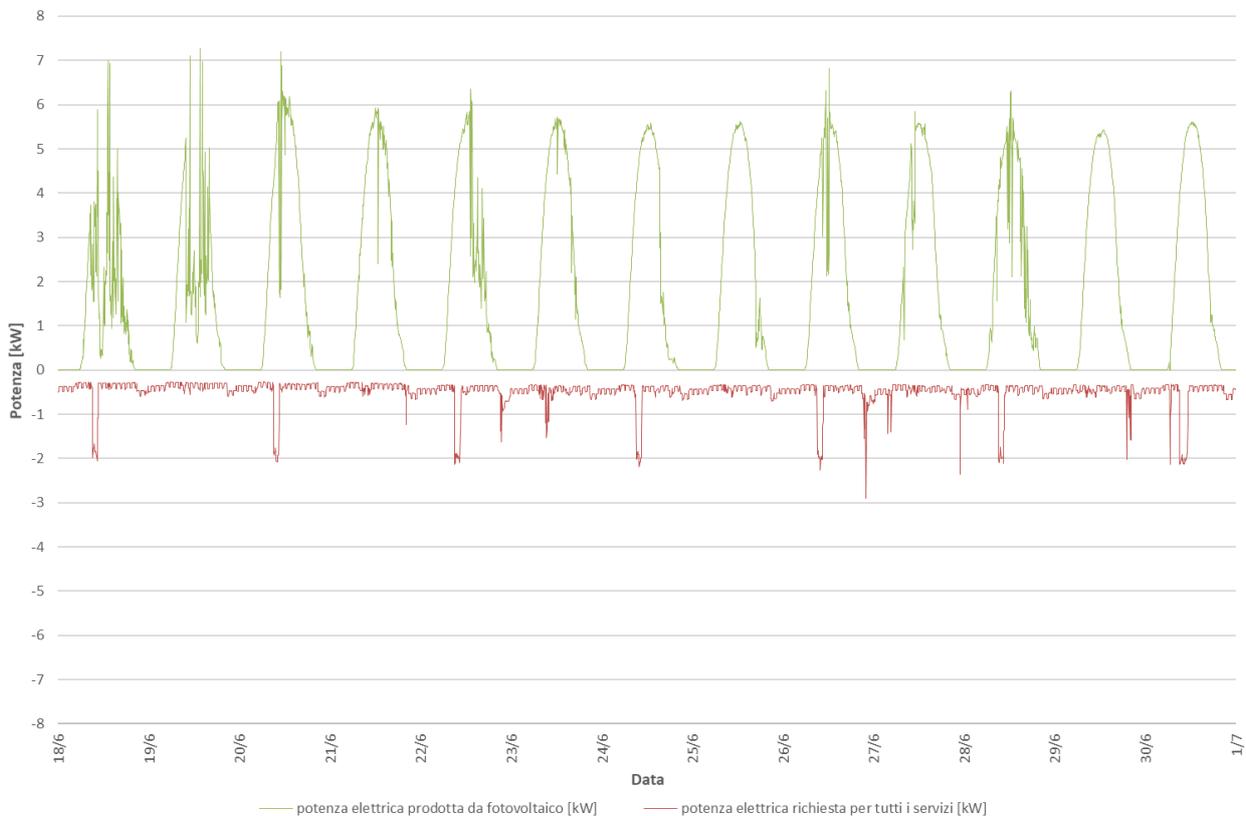


Figura 30. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti i servizi dell'edificio - giugno 2017 (inizio periodo di monitoraggio con sistema aggiornato il 18/6/2017).

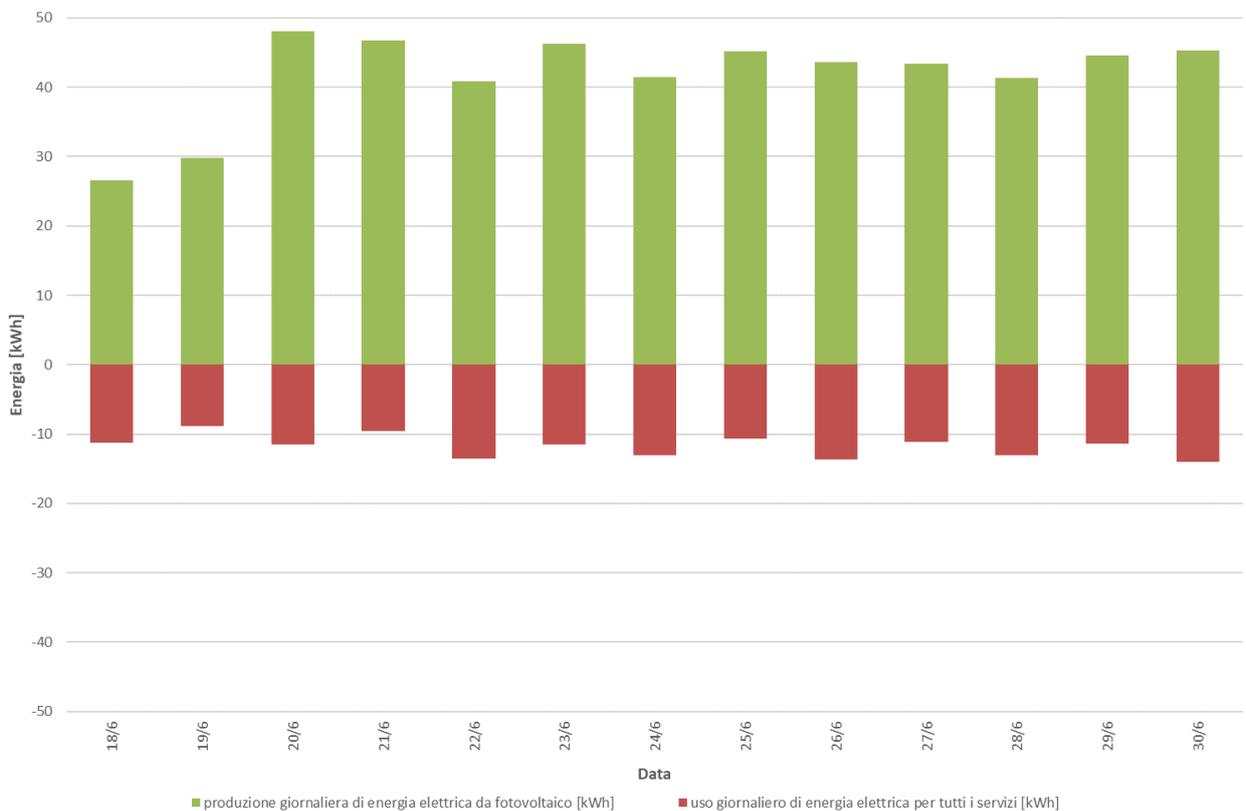


Figura 31. Produzione e uso di energia elettrica giornaliera per tutti i servizi dell'edificio - giugno 2017.

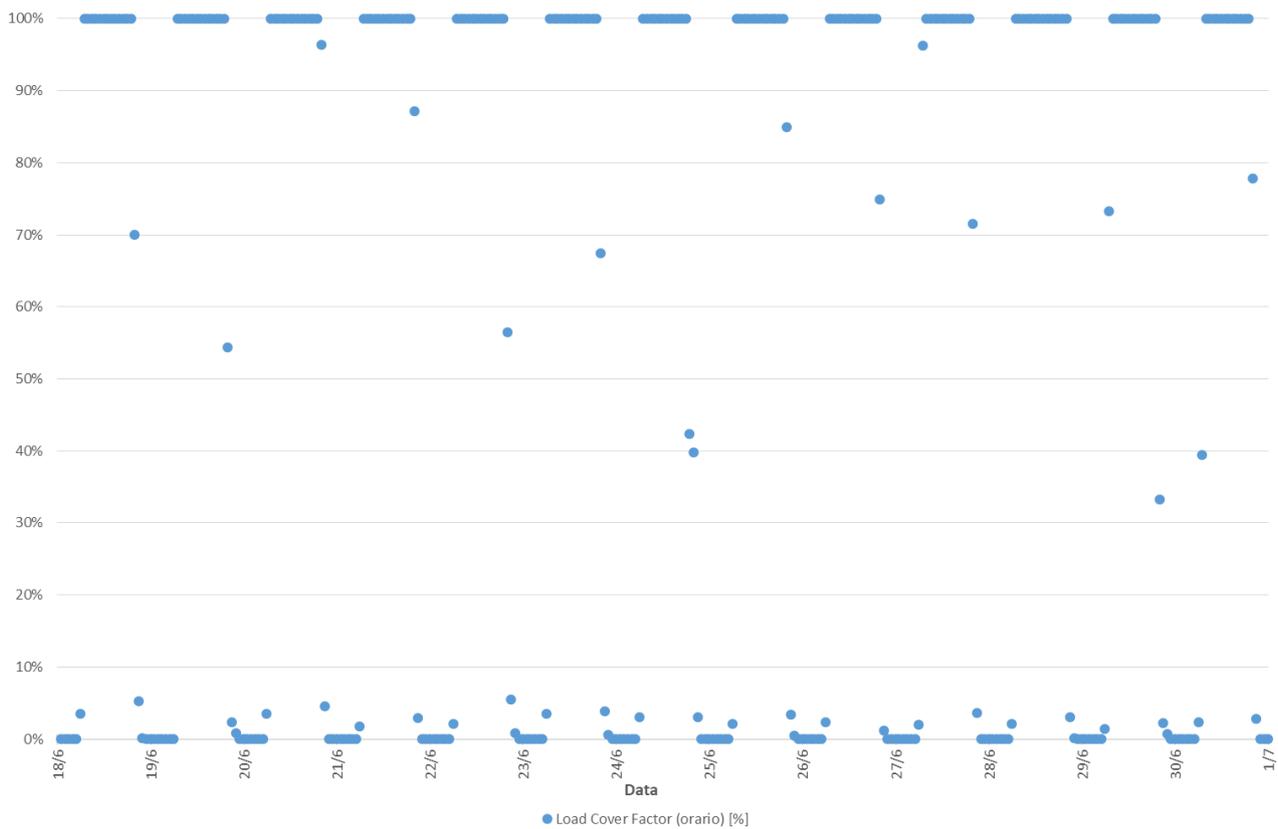


Figura 32. Load cover factor calcolato su frequenza oraria - giugno 2017.

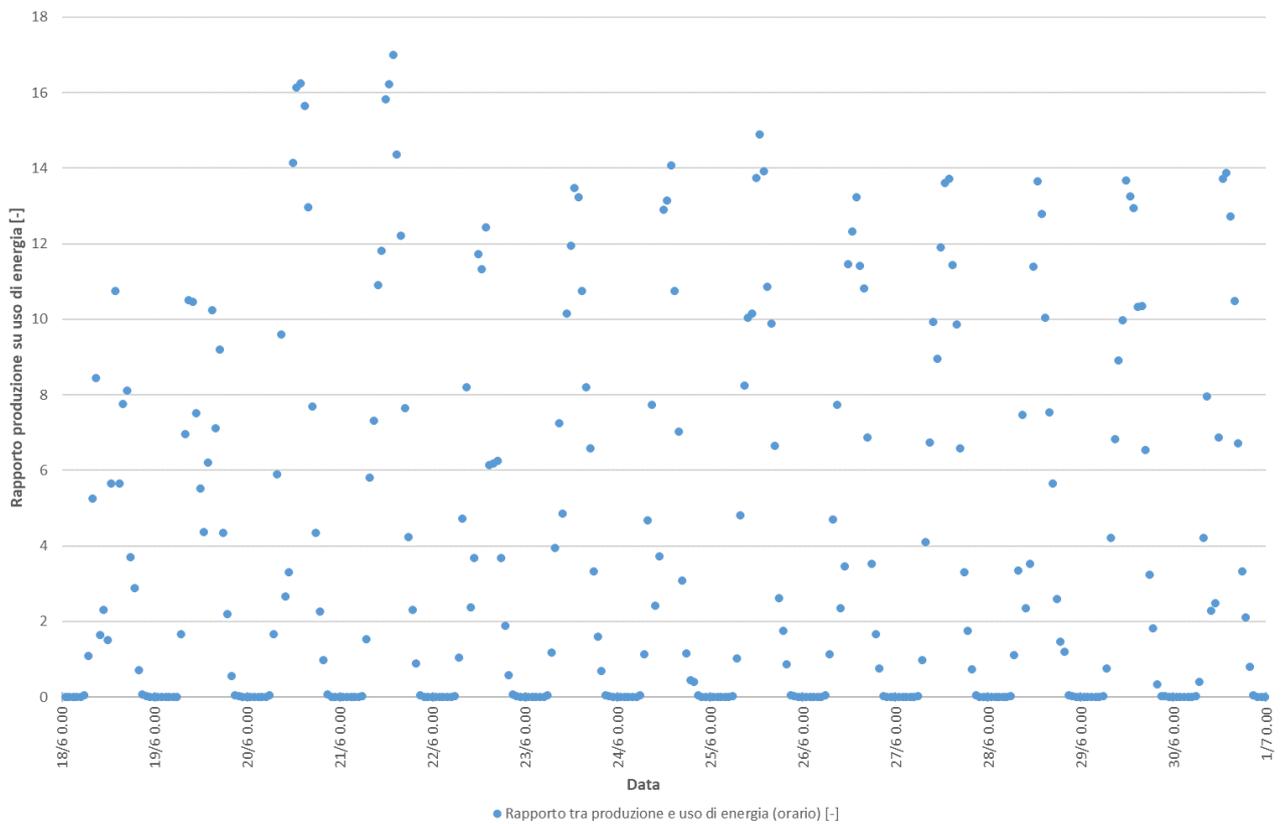


Figura 33. Rapporto tra produzione oraria di energia da fotovoltaico e uso orario di energia per tutti i servizi dell'edificio - giugno 2017.

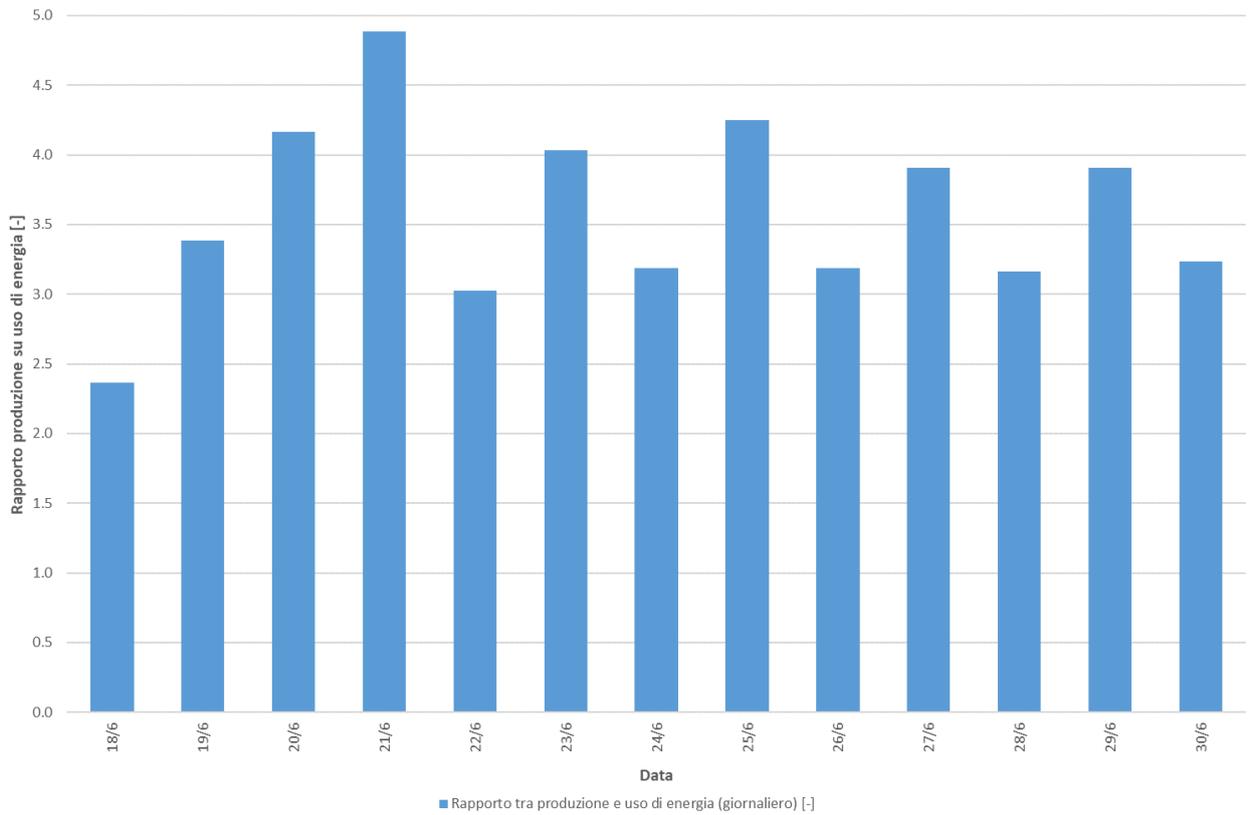


Figura 34. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia per tutti i servizi dell'edificio - giugno 2017.

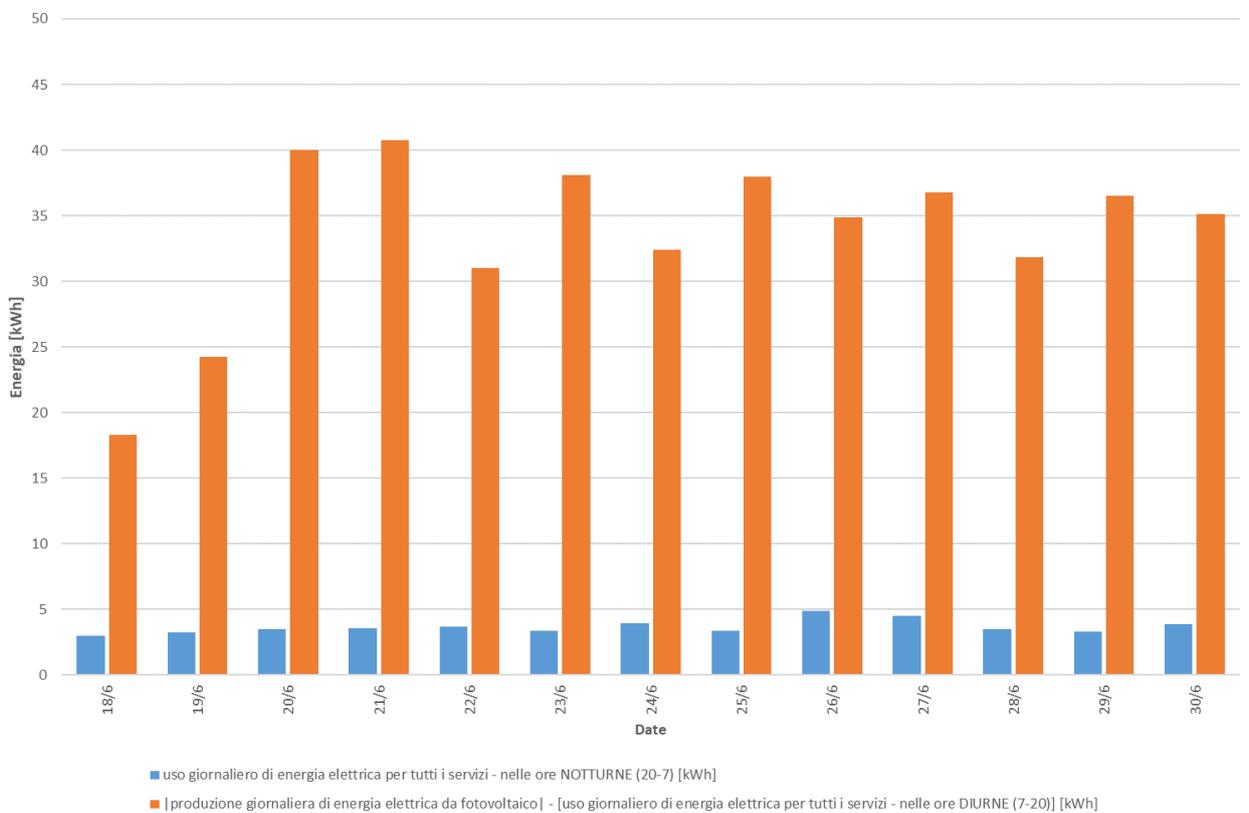


Figura 35. Daily electrical storage potential - giugno 2017.

Luglio 2017

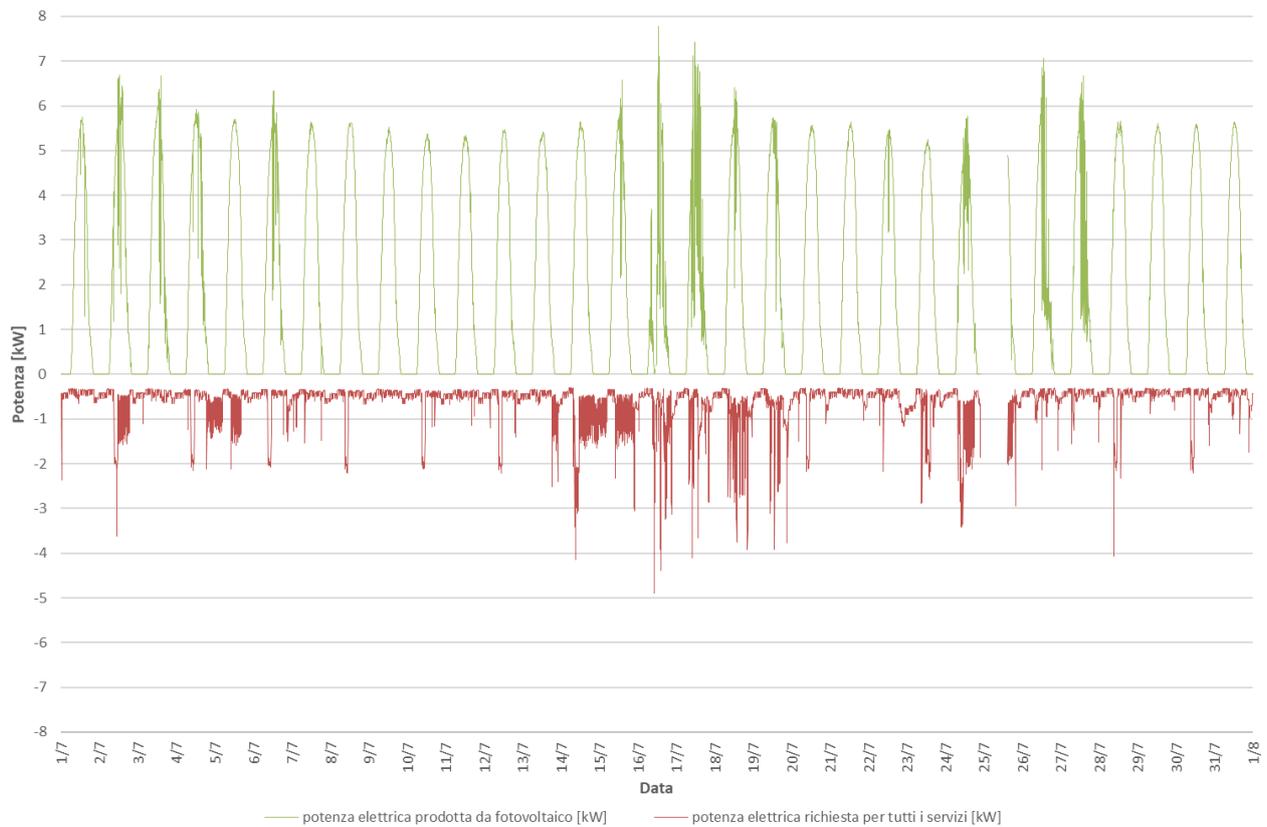


Figura 36. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti i servizi dell'edificio - luglio 2017.

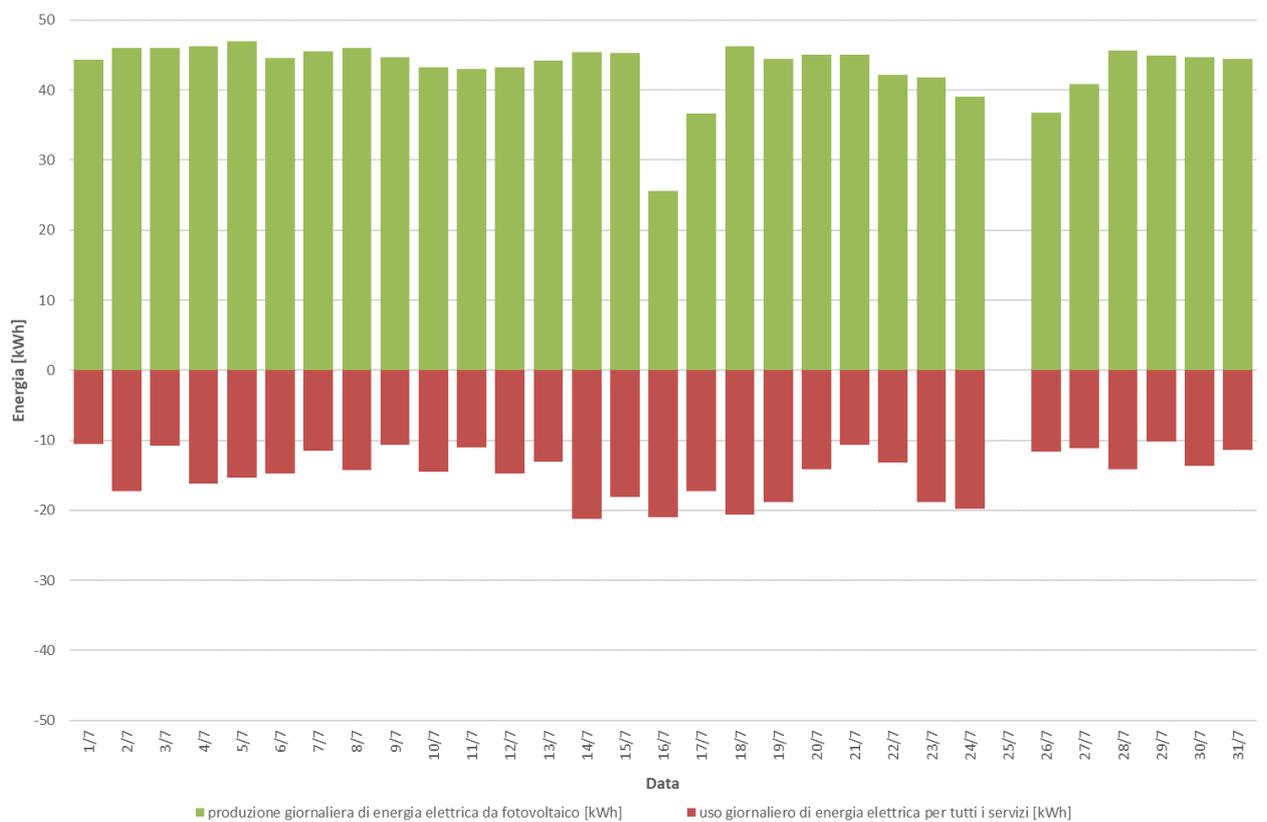


Figura 37. Produzione e uso di energia elettrica giornaliera per tutti i servizi dell'edificio - luglio 2017.

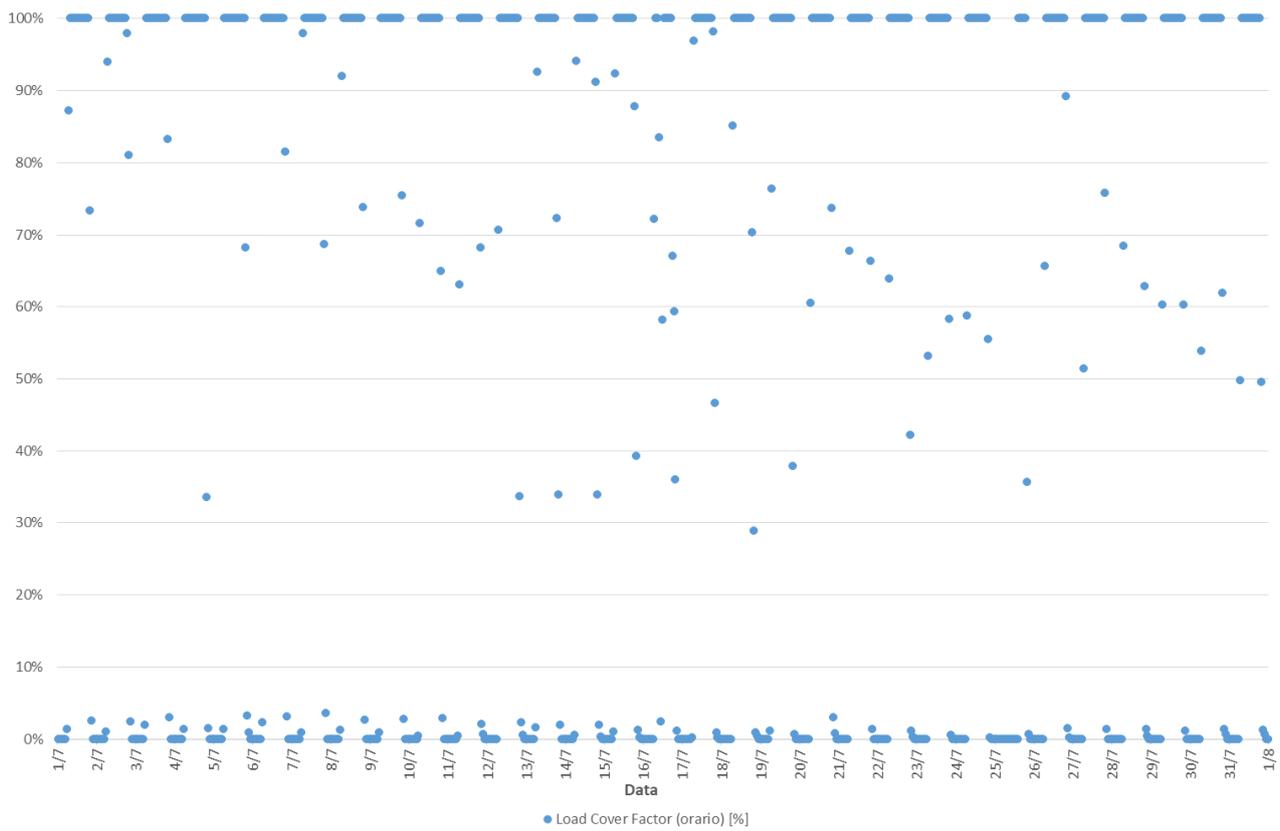


Figura 38. Load cover factor calcolato su frequenza oraria - luglio 2017.

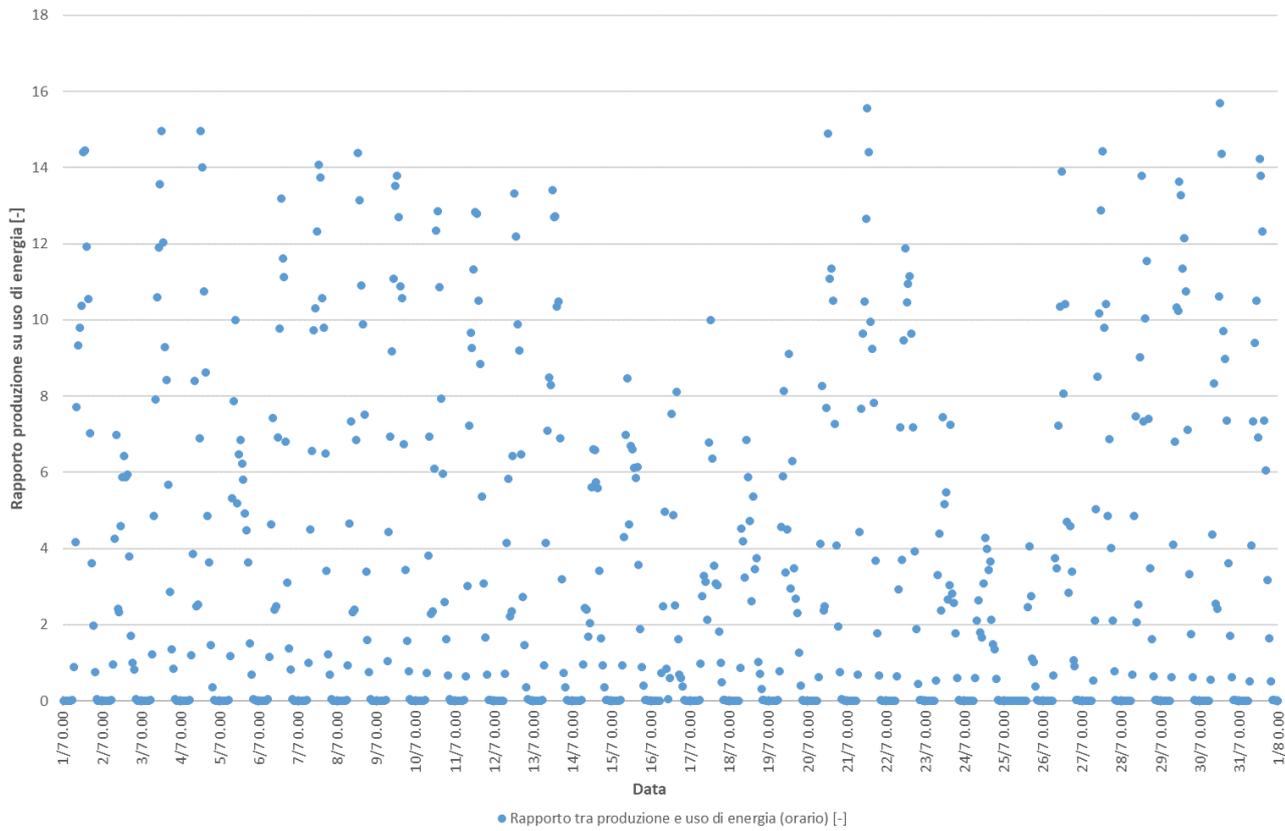


Figura 39. Rapporto tra produzione oraria di energia da fotovoltaico e uso orario di energia per tutti i servizi dell'edificio - luglio 2017.

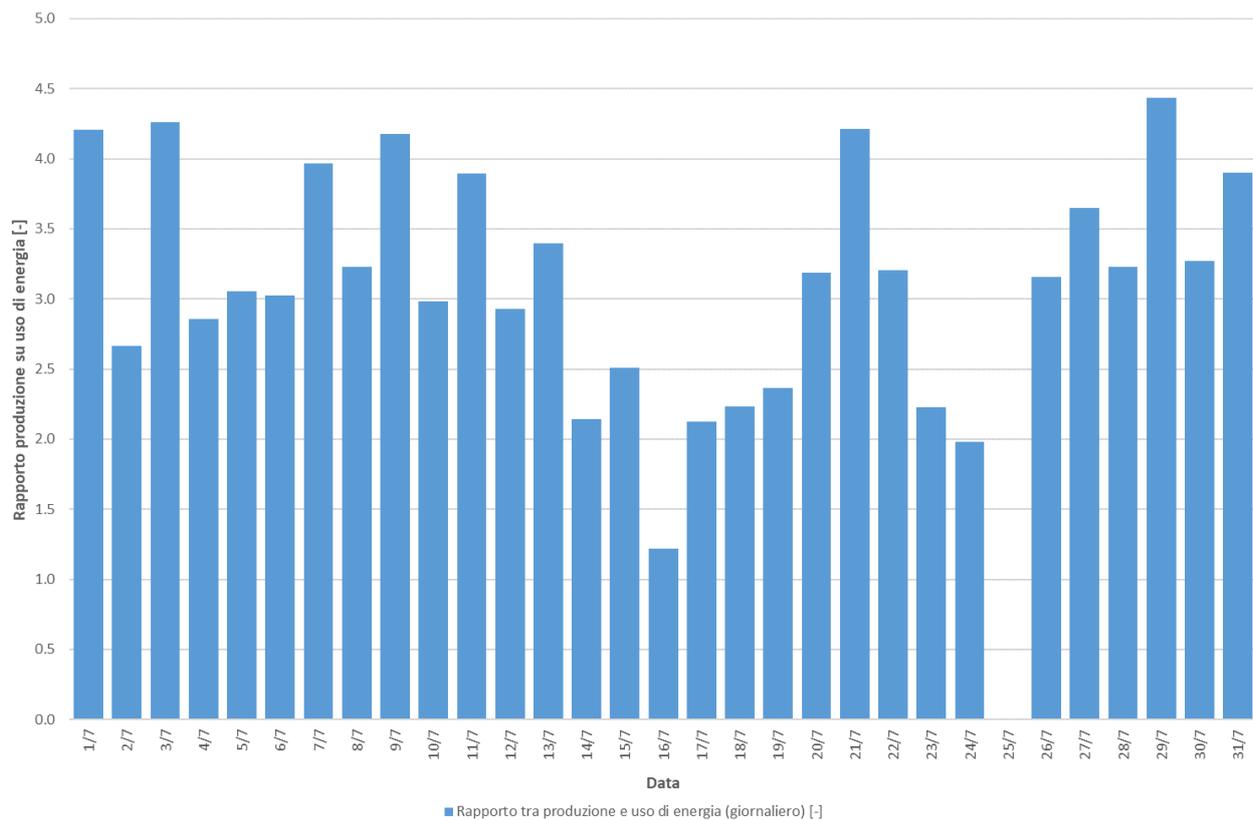


Figura 40. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia per tutti i servizi dell'edificio - luglio 2017.

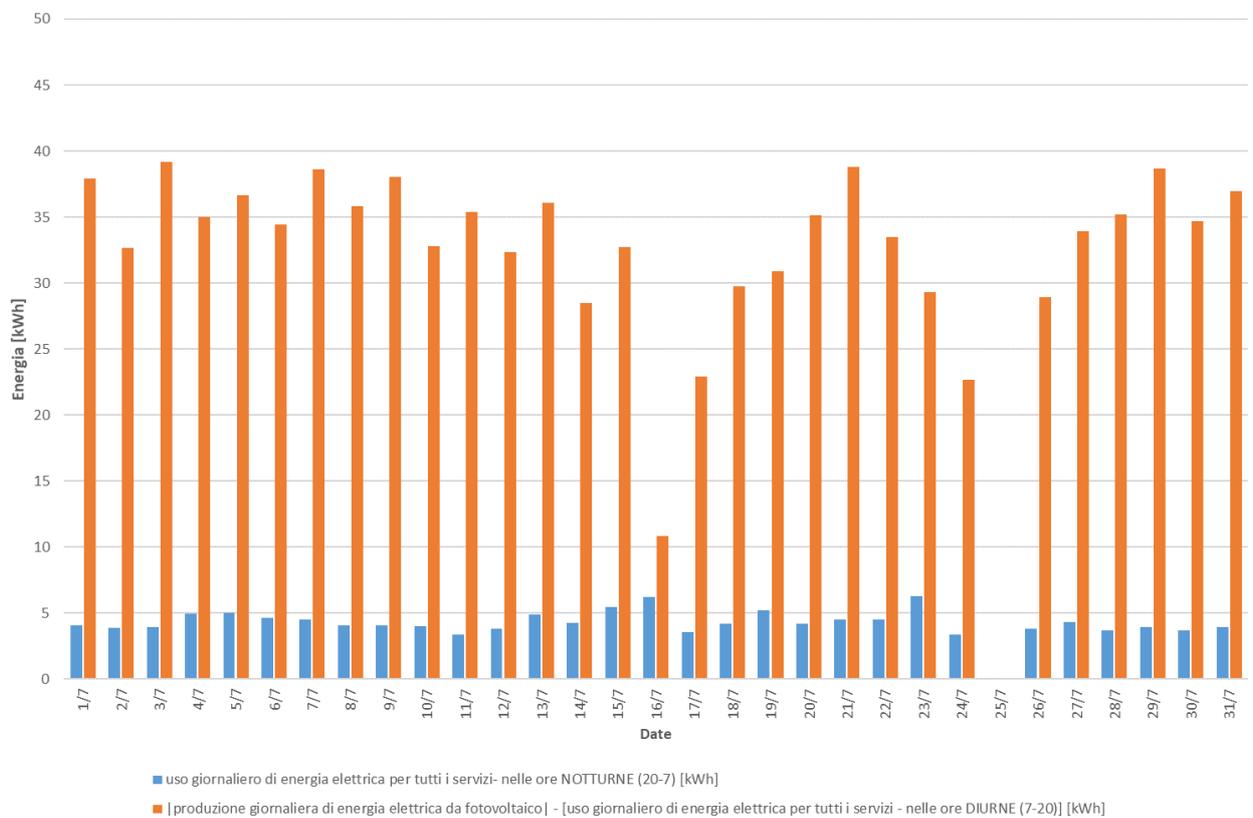


Figura 41. Daily electrical storage potential - luglio 2017.

Agosto 2017

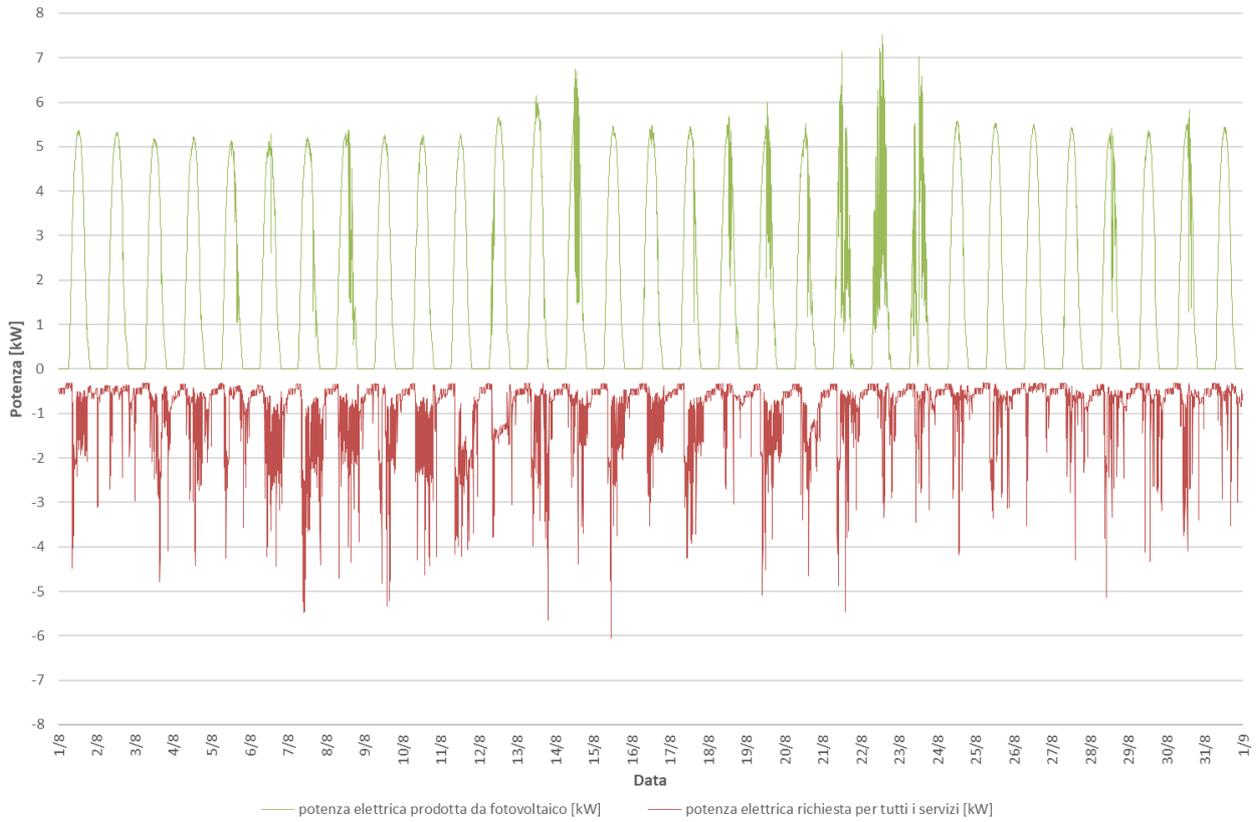


Figura 42. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti gli i servizi dell'edificio - agosto 2017.

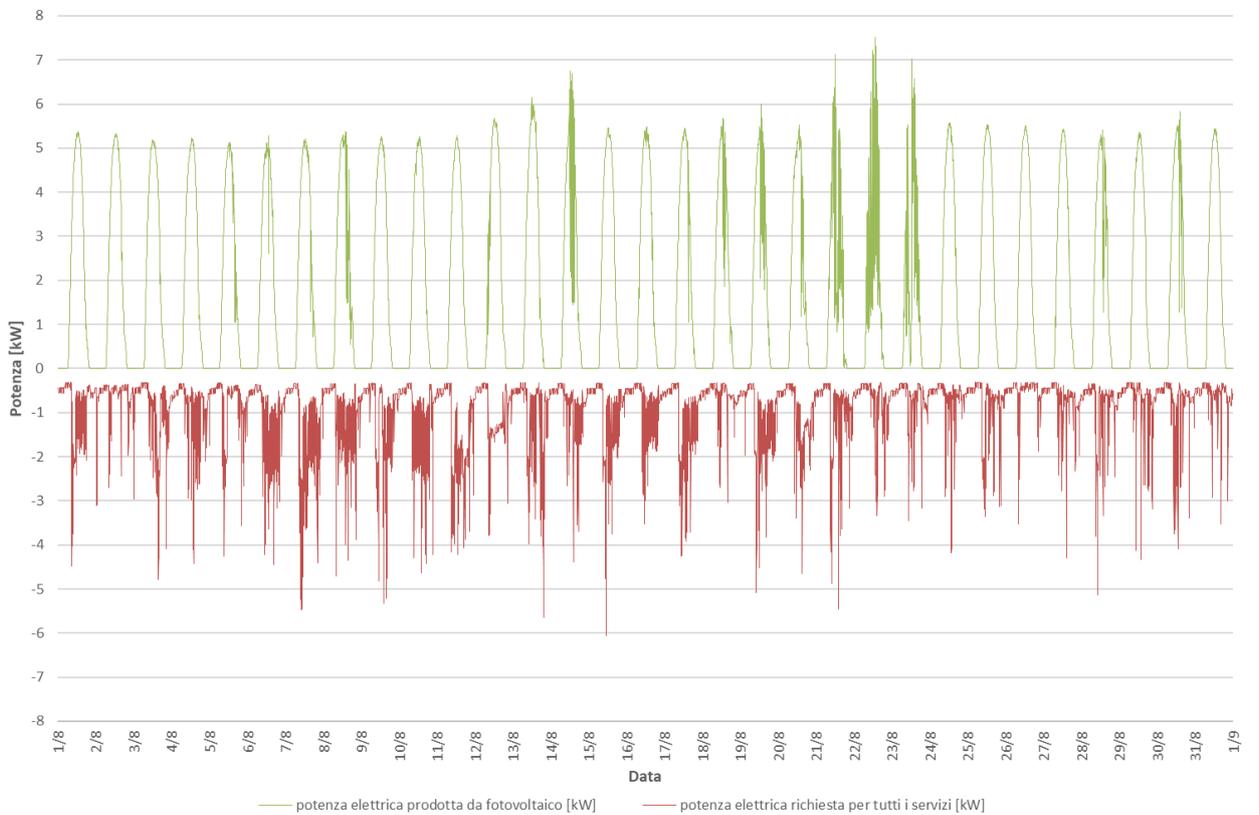


Figura 43. Produzione e uso di energia elettrica giornaliera per tutti i servizi dell'edificio - agosto 2017

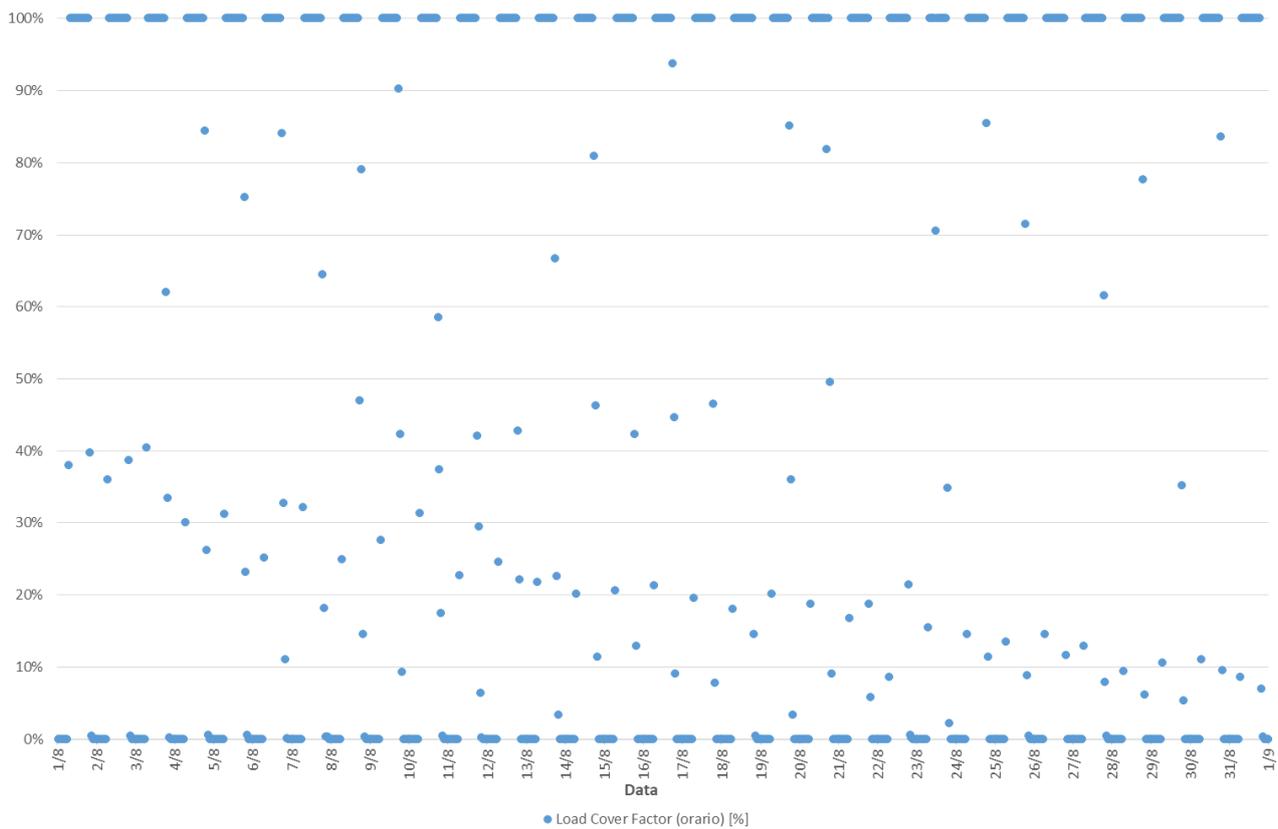


Figura 44. Load cover factor calcolato su frequenza oraria - agosto 2017.

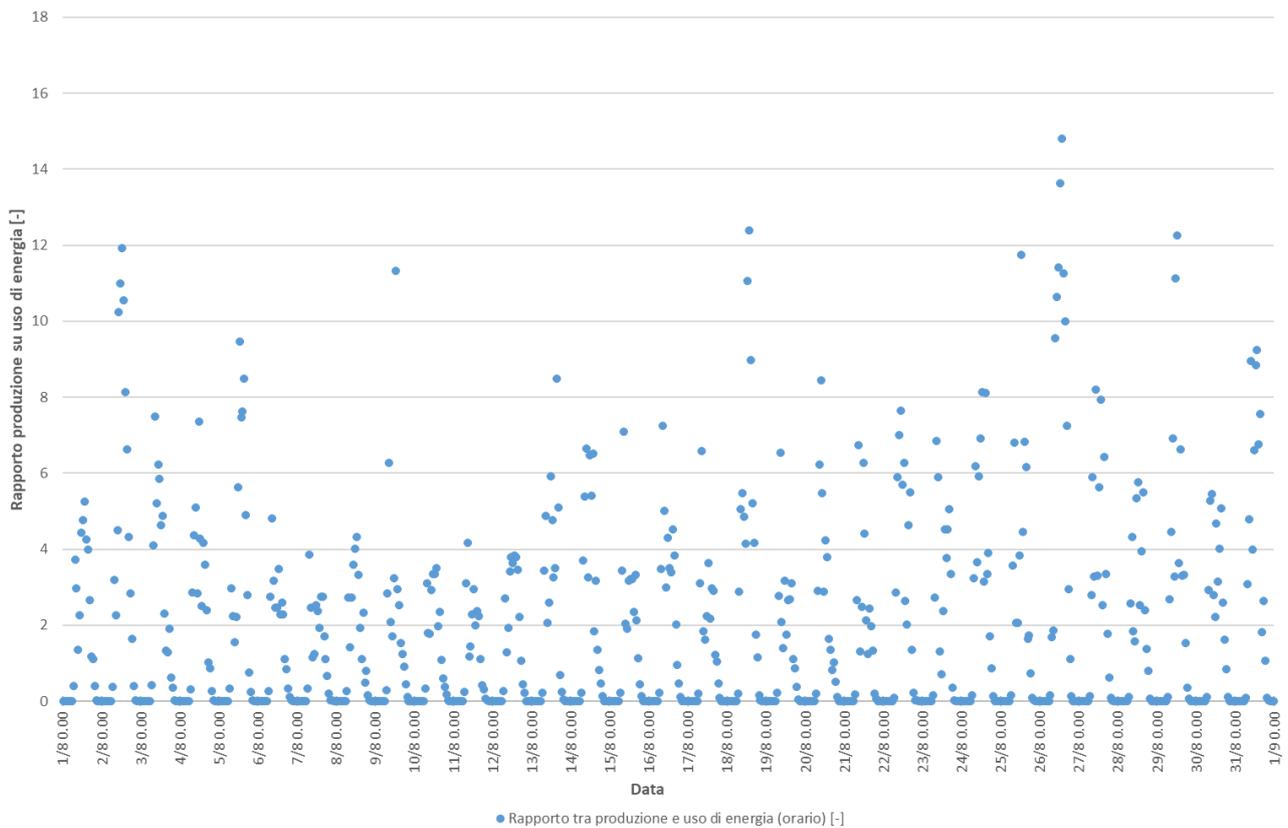


Figura 45. Rapporto tra produzione oraria di energia da fotovoltaico e uso orario di energia per tutti i servizi dell'edificio - agosto 2017.

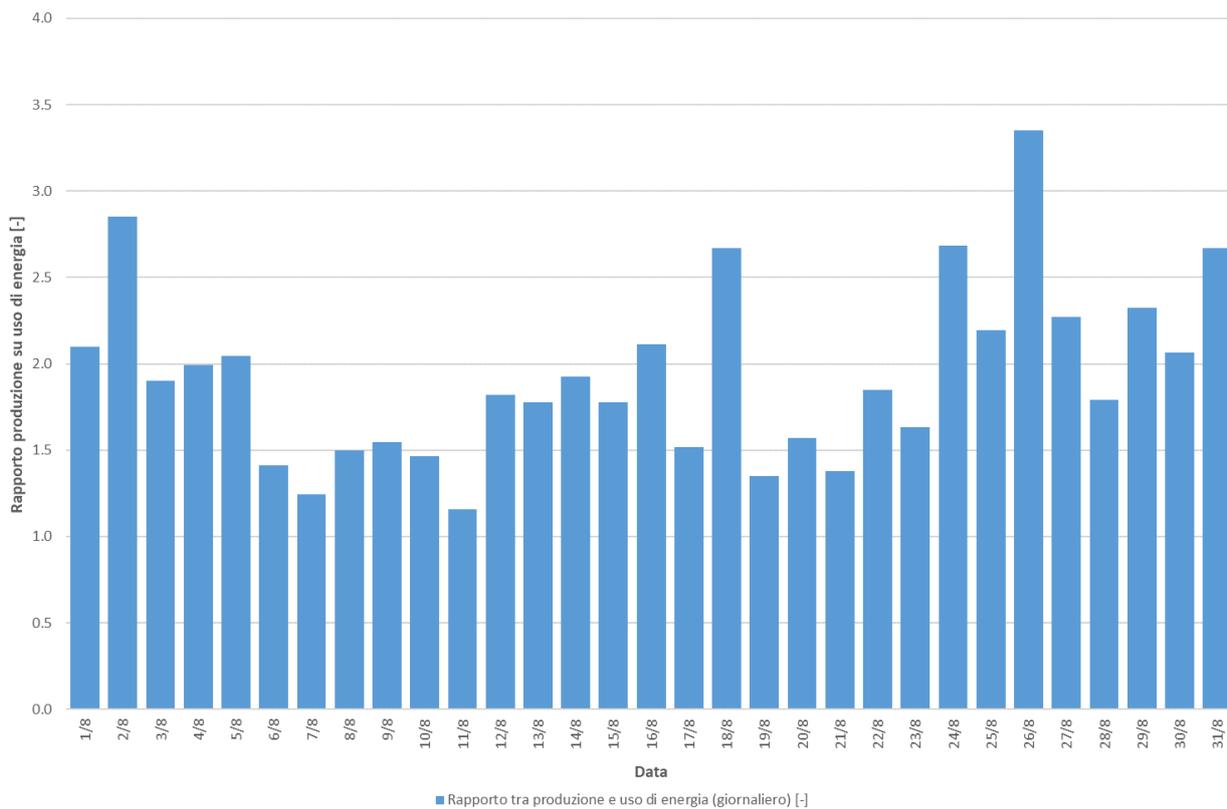


Figura 46. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia per tutti i servizi dell'edificio - agosto 2017.

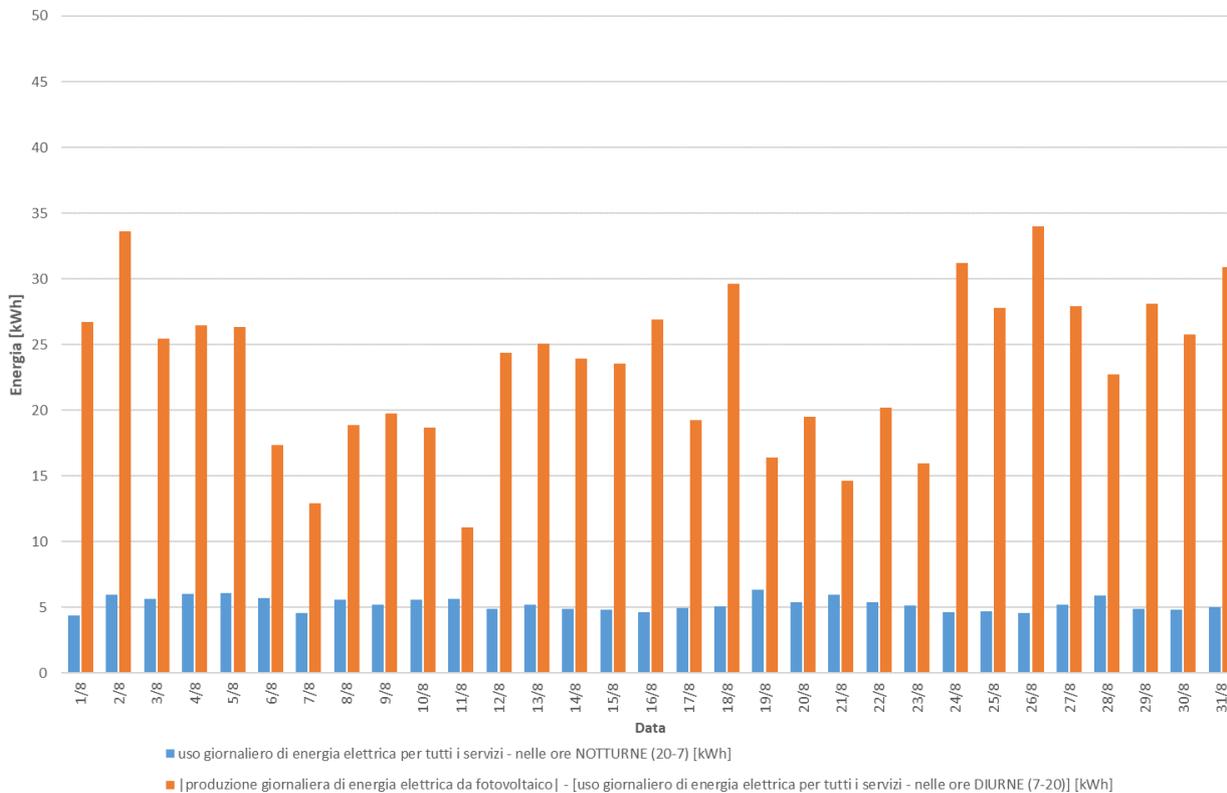


Figura 47. Daily electrical storage potential - agosto 2017.

In Figura 48 è riportata la suddivisione dell'uso di energia per i diversi servizi principali per il mese di agosto, in cui si è registrata una occupazione ed uso regolare dell'edificio. Notiamo che hanno un peso maggiore nell'uso di energia elettrica totale la pompa di calore (15,4 %), il frigorifero della cucina (7,1 %), il piano cottura a induzione (3,8 %), il forno (2,2 %). Seguono poi in valore gli altri elettrodomestici principali misurati. La macchina di ventilazione pur essendo in funzione per periodi di tempo prolungati pesa solo per il 3,0 %. Da notare sono anche le pompe di circolazione per i principali circuiti idraulici, come le pompe per l'adduzione dell'acqua sanitaria - "autoclave" (2,9 %) e le pompe di circolazione del sistema solare termico (1,4 %), le quali risultano comunque di peso ridotto pur essendo in funzione durante la mattina di tutti i giorni. È considerevole invece il peso delle pompe per l'irrigazione del giardino (5,5 %).

Anche l'alimentazione elettrica dei sistemi domotici, di antifurto e antintrusione pesa in modo considerevole, per il 17,4 %. Si deve considerare che questi comprendono il sistema domotico e di controllo e monitoraggio in tutte le sue parti, sia quella per le esigenze della residenza, sia quella concepita al fine del monitoraggio scientifico. La potenza elettrica richiesta da questa pluralità di funzioni in generale risulta tra i 100 e i 160 W. Si deve comunque considerare che l'uso di energia totale dell'edificio risulta ridotta ed in linea con i riferimenti Passivhaus riportati nella precedente sezione. In generale, in Figura 48 si vede anche come i restanti servizi elettrici pesino per il 37,0 %. Questi comprendono l'illuminazione degli spazi interni ed esterni, gli elettrodomestici non monitorati singolarmente, le televisioni, le apparecchiature elettriche collegate temporaneamente alle prese elettriche (come ad esempio i computer portatili, telefoni cellulari e simili, asciugacapelli, etc.).

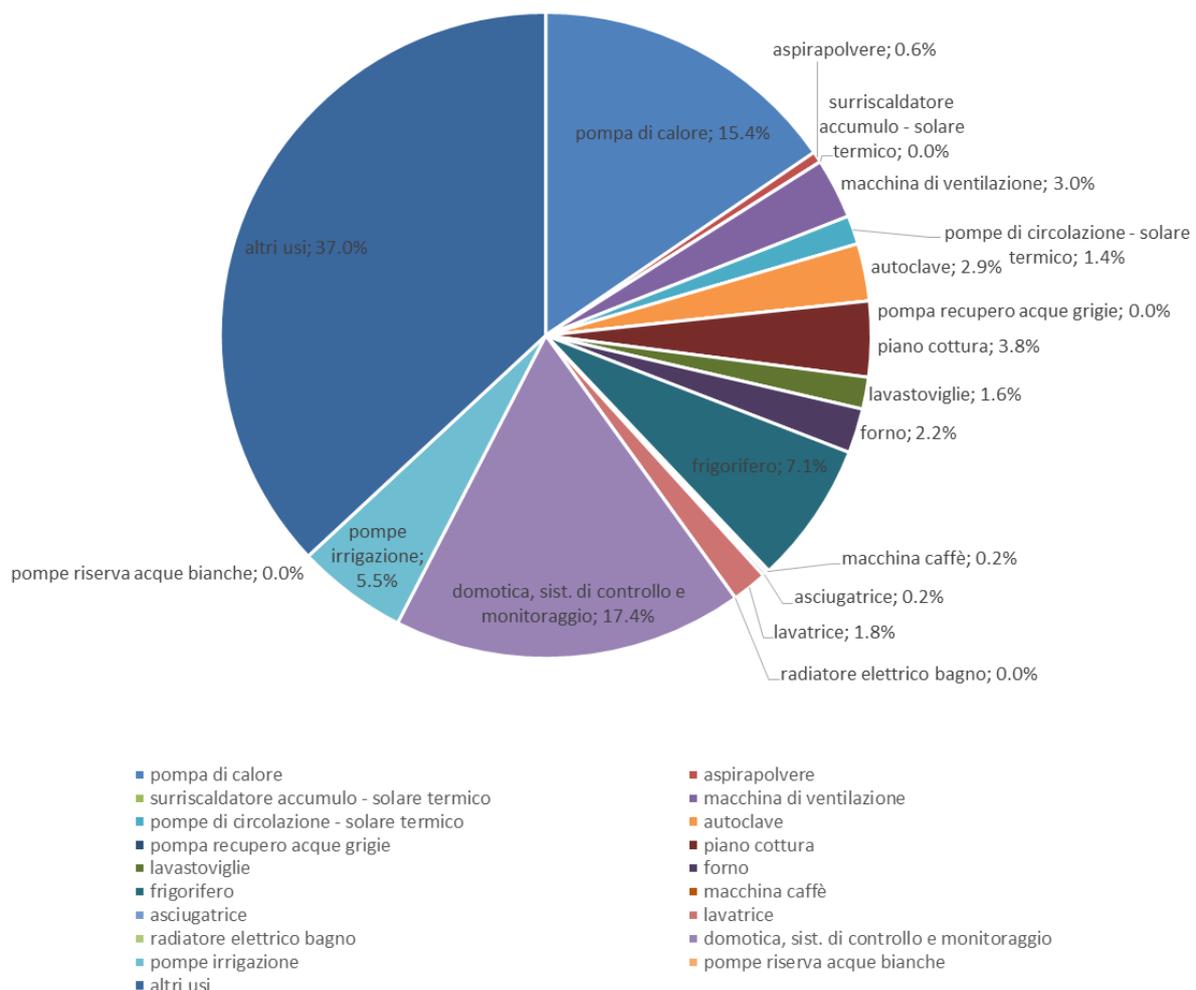


Figura 48. Suddivisione dell'uso di energia per i diversi servizi dell'edificio - agosto 2017.

Le potenze elettriche richieste rispettivamente dalla pompa di calore e dalla macchina di ventilazione sono rappresentate in Figura 49 per il mese di agosto e per il dettaglio di una settimana (dal 7 al 13 agosto) in Figura 50. Si ricorda che la pompa di calore è di tipo aria-acqua e la potenza come l'energia elettrica misurate comprendono l'alimentazione delle unità interne ed esterne e le pompe di circolazione del circuito ad acqua. Nel periodo in analisi la pompa di calore ha funzionato solo in raffrescamento, mentre la domanda di calore per l'acqua calda sanitaria è stata coperta dal contributo del sistema solare termico. Considerato questo, vediamo come la pompa di calore correttamente funzioni solo quando la macchina di ventilazione è attiva. Nella prima parte di agosto si è utilizzata la ventilazione meccanica nelle ore diurne, in alcuni casi senza l'attivazione del raffrescamento attivo da parte della pompa di calore, mentre nella maggior parte dei giorni con l'uso della pompa di calore. Nelle ore notturne si è utilizzata la ventilazione naturale tramite l'apertura delle finestre. L'uso della ventilazione meccanica nelle ore diurne ha permesso di sfruttare il contributo di pre-raffreddamento dell'aria da parte dello scambiatore interrato. Utilizzare la ventilazione naturale anche nelle ore diurne avrebbe introdotto aria a temperatura più alta negli ambienti interni. Si vede che la potenza elettrica richiesta dalla macchina di ventilazione (250 W) è ridotta rispetto a quella necessaria per il funzionamento della pompa di calore, che raggiunge picchi superiori ai 2 kW. La velocità dei ventilatori e quindi la potenza elettrica che richiedono, varia in funzione della logica di controllo proporzionale, come descritto nel paragrafo 2.2.1.3. La pompa di calore presenta generalmente un picco di potenza all'inizio del periodo di attivazione; mostra poi un andamento oscillante per mantenere la temperatura dell'acqua di mandata alla batteria di raffrescamento. Solo in alcuni periodi l'andamento non risulta essere oscillante. Potrebbe quindi essere utile ottimizzare il controllo della pompa di calore, interfacciandosi con la sua regolazione interna.

In Figura 51 e Figura 52, è rappresentata la potenza elettrica richiesta dalle pompe di circolazione del sistema solare termico. Notiamo dei picchi intorno ai 150 W, coerenti con la stazione di pompaggio integrata nel sistema, costituita da 2 circolatori in serie di piccola taglia. I profili di potenza richiesta dipendono dalla logica di controllo del sistema solare termico che prevede l'attivazione della circolazione di acqua tra collettori solari e serbatoio di accumulo in funzione della temperatura misurata nei due componenti. La velocità delle pompe e quindi la portata d'acqua non è costante e dipende dalla differenza di temperatura.

In generale le pompe di circolazione si attivano dalle prime ore di sole fino alla fine della mattina. È questo il periodo in cui l'accumulo termico può essere ricaricato dopo che ha ceduto calore per gli usi domestici nelle ore serali e precedenti l'alba.

In Figura 53 e Figura 54, sono riportate la potenza elettrica richiesta per gli altri sistemi di pompaggio. Le pompe per la riserva dell'acqua dall'acquedotto e le pompe di presa dal serbatoio di recupero delle acque grigie non sono state attivate in agosto. Le pompe di irrigazione richiedono una potenza elettrica intorno a 1,5 kW per l'irrigazione dell'intero giardino. Queste sono attivate da un timer a frequenza fissa per una durata di circa 1 ora ogni 2 giorni (durante le ore mattutine). In alcuni casi, poi, viene attivato in modo manuale dall'utente in base alle condizioni meteorologiche. Il sistema di pompaggio per aumentare la pressione dell'adduzione da acquedotto richiede potenze elettriche più contenute e viene attivato in funzione della pressione presente e della domanda di acqua nell'edificio o per il giardino. Vediamo infatti come in alcuni casi l'attivazione sia coordinata o successiva all'irrigazione del giardino.

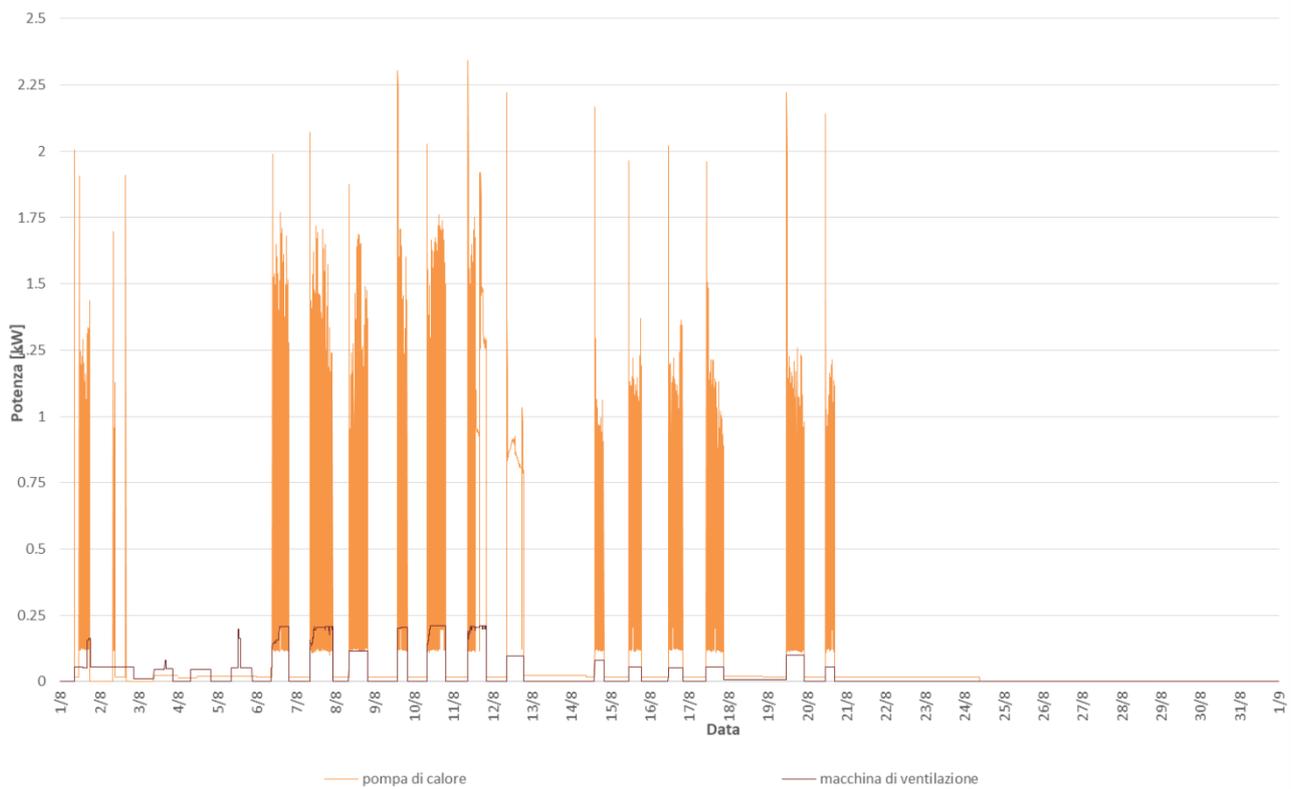


Figura 49. Potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore in raffreddamento e dalla macchina di ventilazione - agosto 2017.

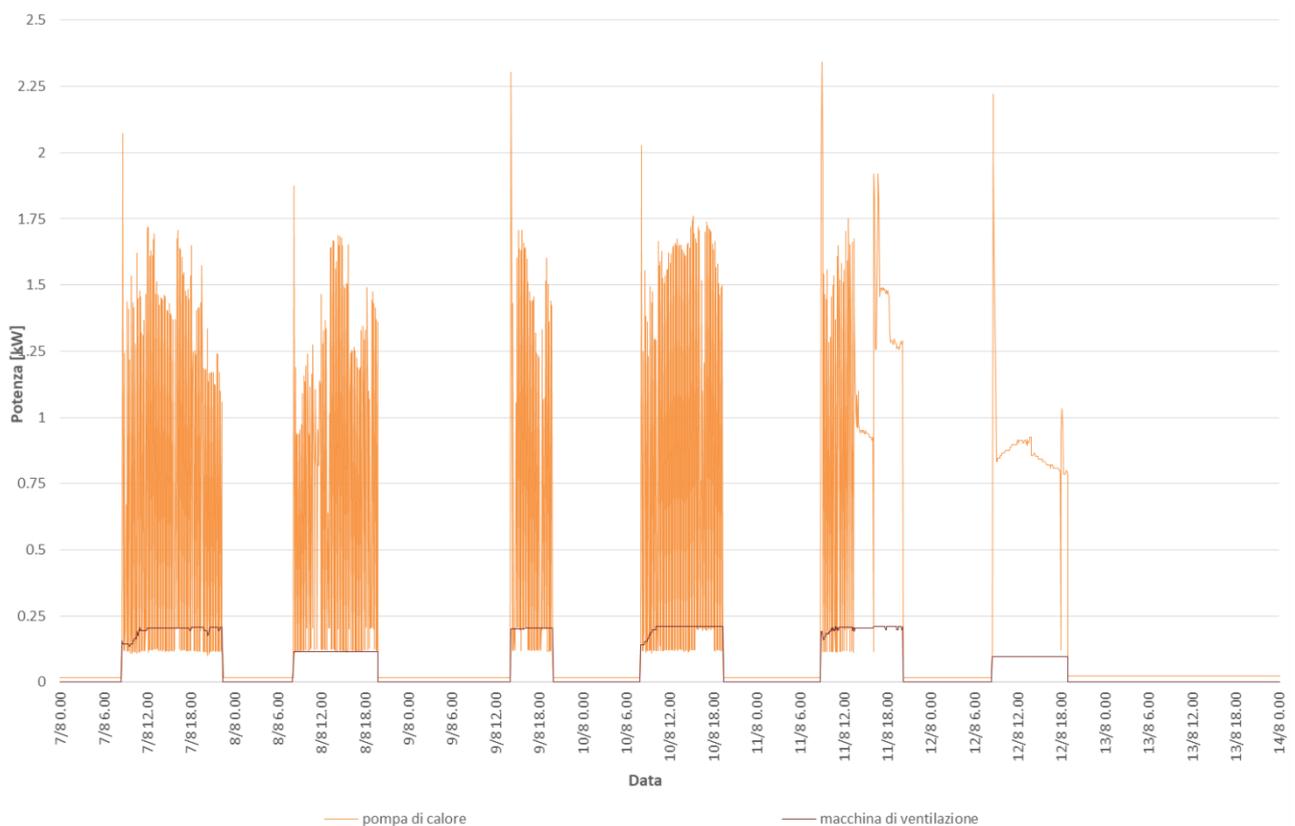


Figura 50. Potenza elettrica richiesta dalla pompa di calore in raffreddamento e dalla macchina di ventilazione - Settimana dal 7 al 13 agosto 2017.

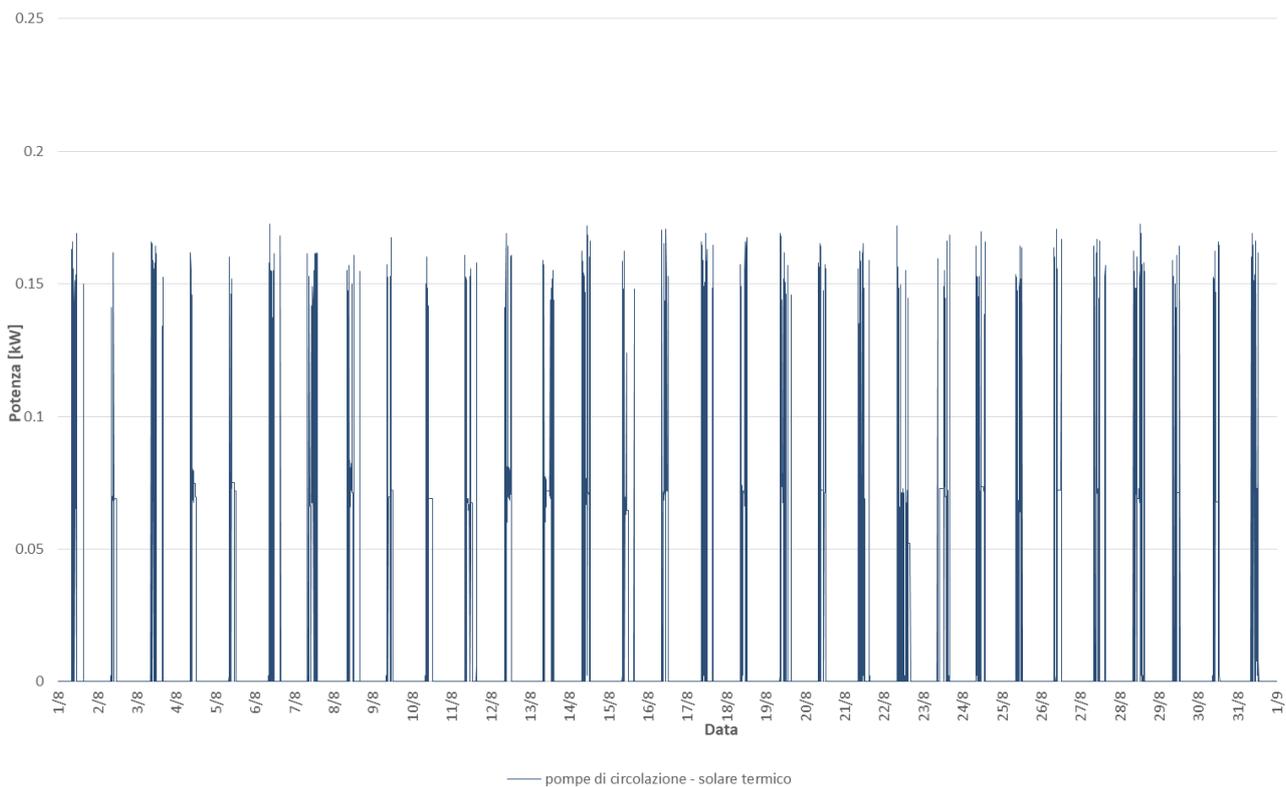


Figura 51. Potenza elettrica richiesta dalle pompe di circolazione del sistema solare termico - agosto 2017.

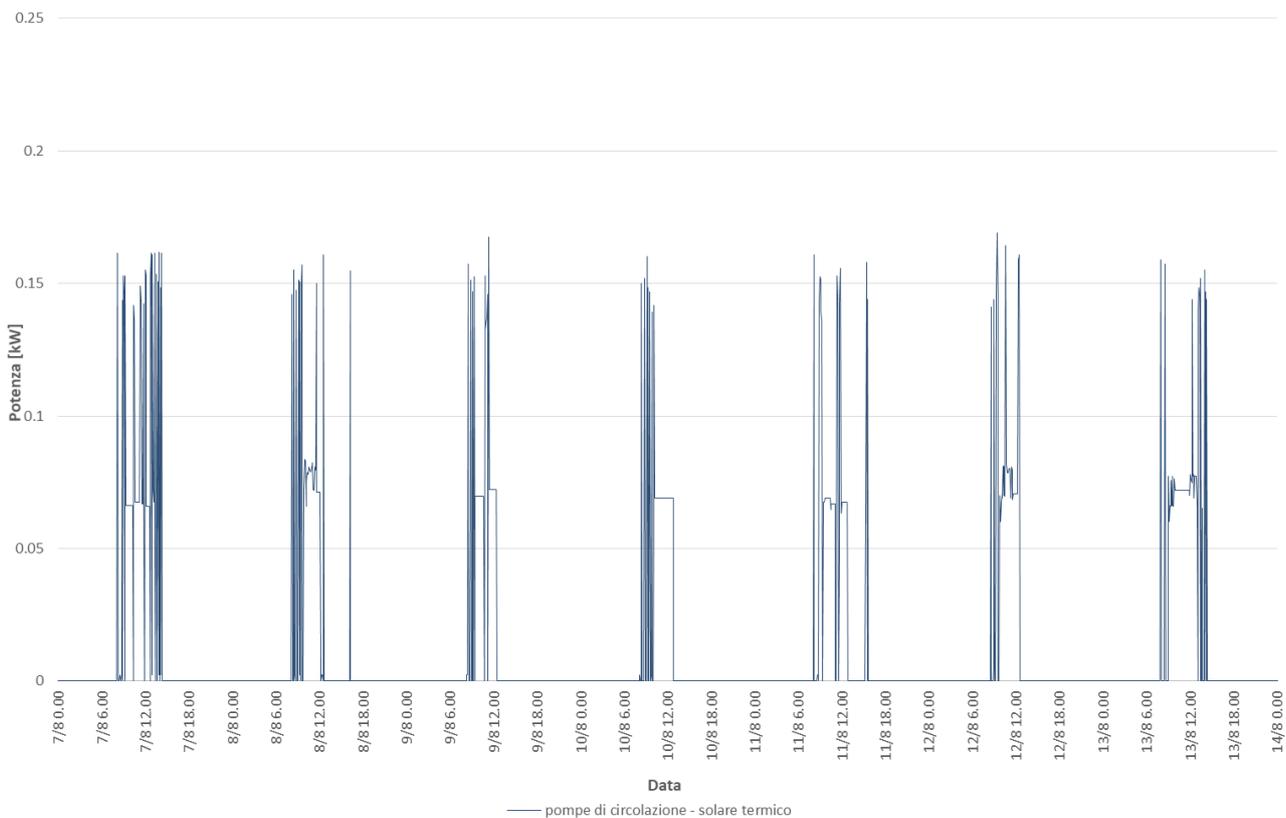


Figura 52. Potenza elettrica richiesta dalle pompe di circolazione del sistema solare termico - Settimana dal 7 al 13 agosto 2017.

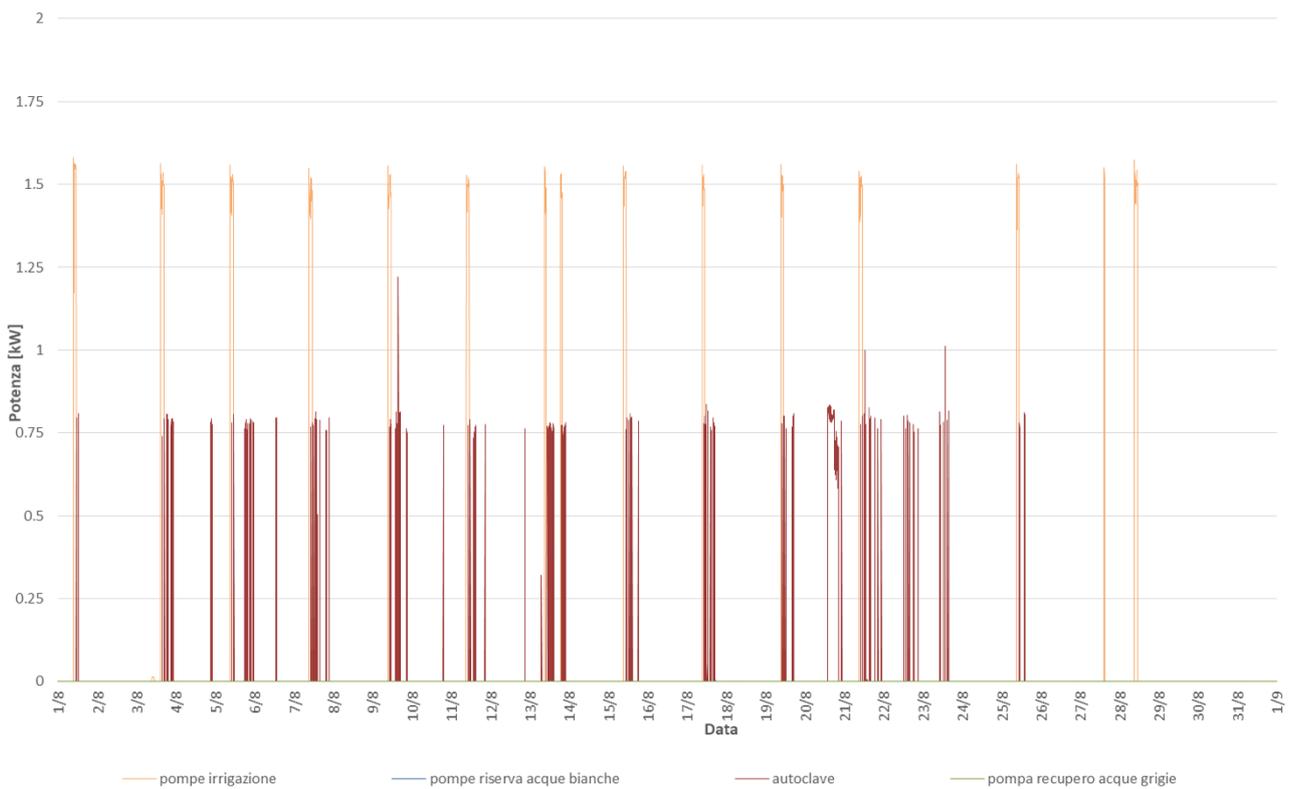


Figura 53. Potenza elettrica richiesta per sistemi di pompaggio rispettivamente per irrigazione, carico della riserva delle acque bianche, adduzione acqua sanitaria (autoclave), recupero acque grigie - agosto 2017.

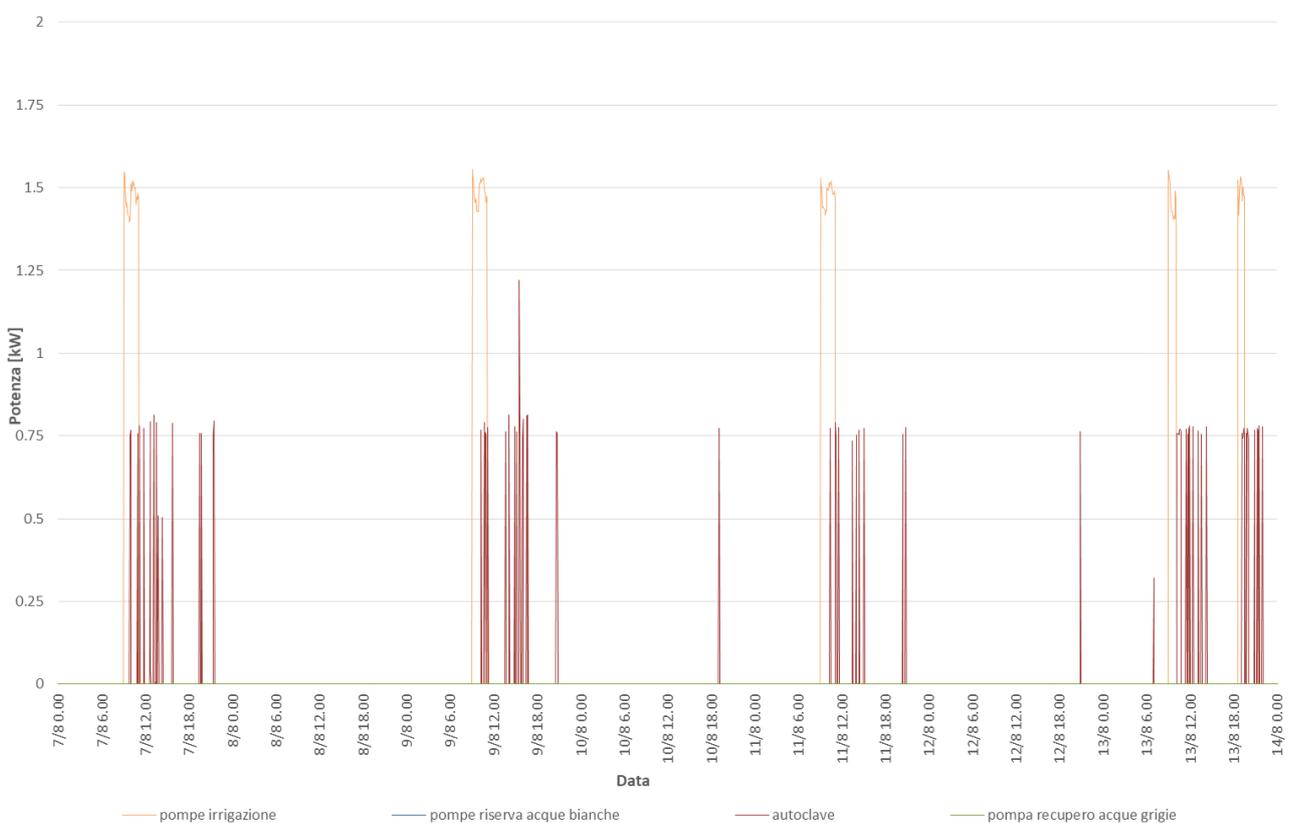


Figura 54. Potenza elettrica richiesta per sistemi di pompaggio rispettivamente per irrigazione, carico della riserva delle acque bianche, adduzione acqua sanitaria (autoclave), recupero acque grigie - Settimana dal 7 al 13 agosto 2017.

In Figura 55 e Figura 56, è rappresentata la potenza elettrica richiesta dagli elettrodomestici principali. Il frigorifero presenta un comportamento che si ripete nel tempo, ovvero un assorbimento elettrico compreso tra i 100 e i 130 W per una durata di circa 30 minuti, intervallati a periodi di 50-55 minuti alla potenza quasi nulla di standby.

Gli altri elettrodomestici monitorati presentano invece picchi con valori maggiori di potenza e tempi di utilizzo ridotti. Il piano cottura a induzione viene usato con regolarità in corrispondenza dei pasti, con potenze elettriche comprese fra circa 0,5 e 2,3 kW. Anche il forno viene utilizzato ma con frequenze più ridotte.

La lavastoviglie viene usata con regolarità in seguito ai pasti. È da segnalare che l'assenza di misure relative alla lavastoviglie nella seconda parte di agosto è da imputare ad un malfunzionamento del corrispondente misuratore, sul quale si sta intervenendo.

La lavatrice viene utilizzata con frequenza più ridotta, così come il sistema di aspirapolvere centralizzato. Questi apparecchi con cicli differenti presentano picchi di potenza intorno a 2 kW ciascuno.

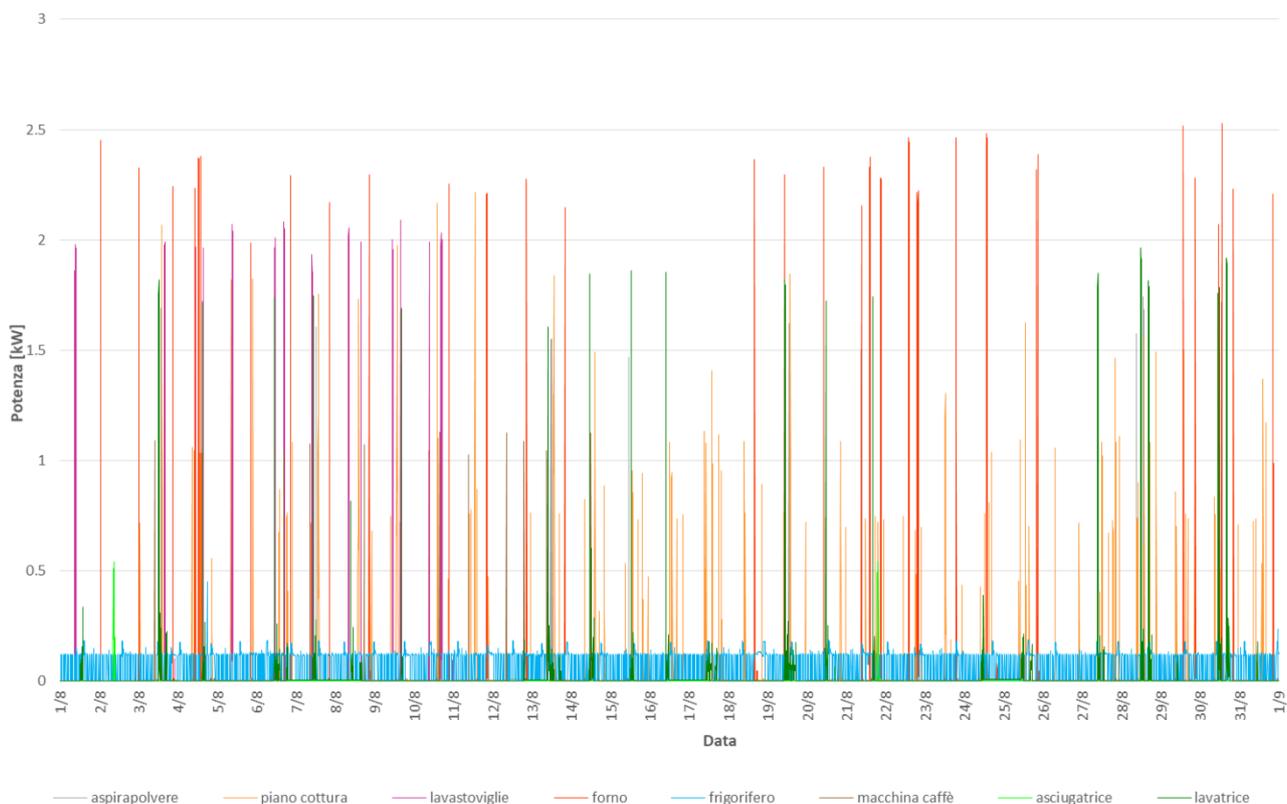


Figura 55. Potenza elettrica richiesta per elettrodomestici principali - agosto 2017.

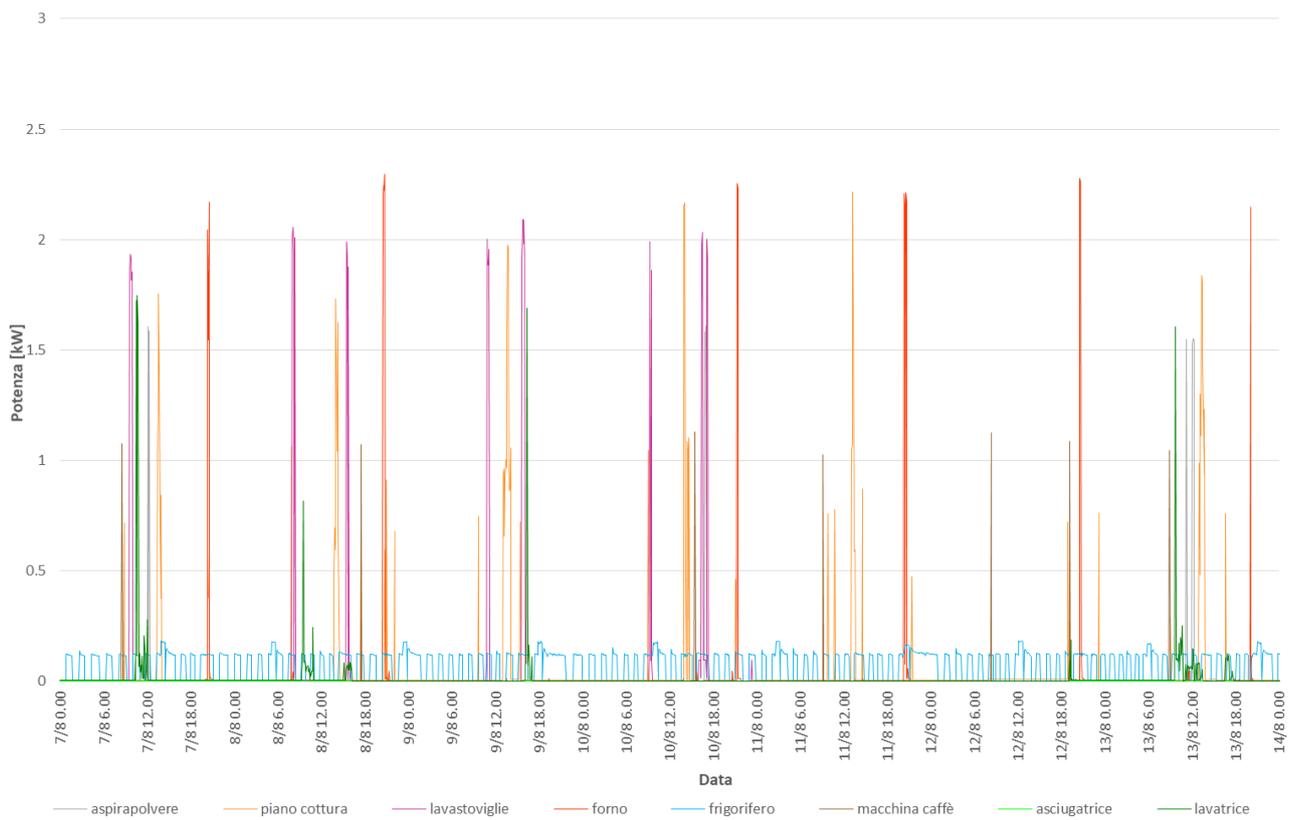


Figura 56. Potenza elettrica richiesta per elettrodomestici principali - Settimana dal 7 al 13 agosto 2017.

2.2.4 Analisi ambientale

Un edificio ad alte prestazioni deve garantire elevati livelli di qualità ambientale agli occupanti, nel rispetto di un uso di energia ridotto, realizzato significativamente attraverso lo sfruttamento di energia rinnovabile. Il conseguimento di questo obiettivo anche nei periodi caldi diventa più difficile con climi particolarmente impegnativi come quello Mediterraneo. Questo clima offre elevati valori di irraggiamento solare a favore di una maggiore capacità di sfruttamento di energia rinnovabile da fonte solare, tuttavia le elevate temperature e quindi carichi termici significativi richiedono particolari attenzioni progettuali e di gestione/controllo.

Il monitoraggio dei dati di temperatura, umidità relativa e concentrazione di CO₂ nelle varie stanze dell'edificio ha reso possibile una prima analisi ambientale ed una più dettagliata analisi di comfort in tre singoli ambienti, in periodo estivo.

La Figura 57 mostra la pianta del piano terra dell'edificio e identifica la posizione di tutti gli ambienti della casa.

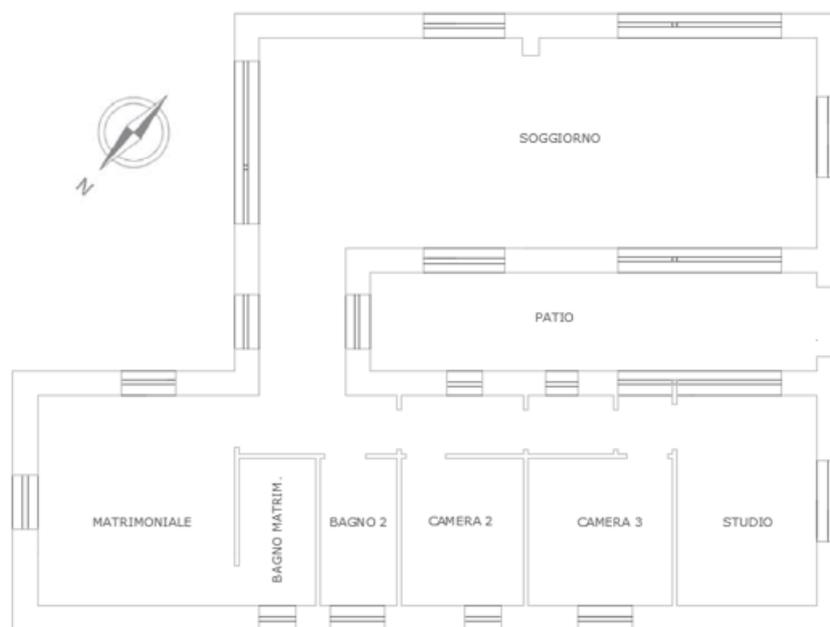


Figura 57. Pianta piano terra edificio

In tutti gli ambienti della casa è stata condotta un'analisi di temperatura (T), umidità relativa (RH) e concentrazione di CO₂.

La Figura 58 mostra, invece, i sensori installati all'interno dei singoli ambienti; in tutti gli ambienti sono stati installati sensori multiparametro T-RH-CO₂, mentre nel soggiorno, camera matrimoniale, camera 3 e studio sono additionally presenti delle termoresistenze PT100 a 4 fili, con l'obiettivo di un monitoraggio più accurato della temperatura. Infine, nel soggiorno, camera matrimoniale e studio è stato installato anche un globotermometro che permette il calcolo della temperatura media radiante, e quindi della temperatura operativa dell'ambiente.

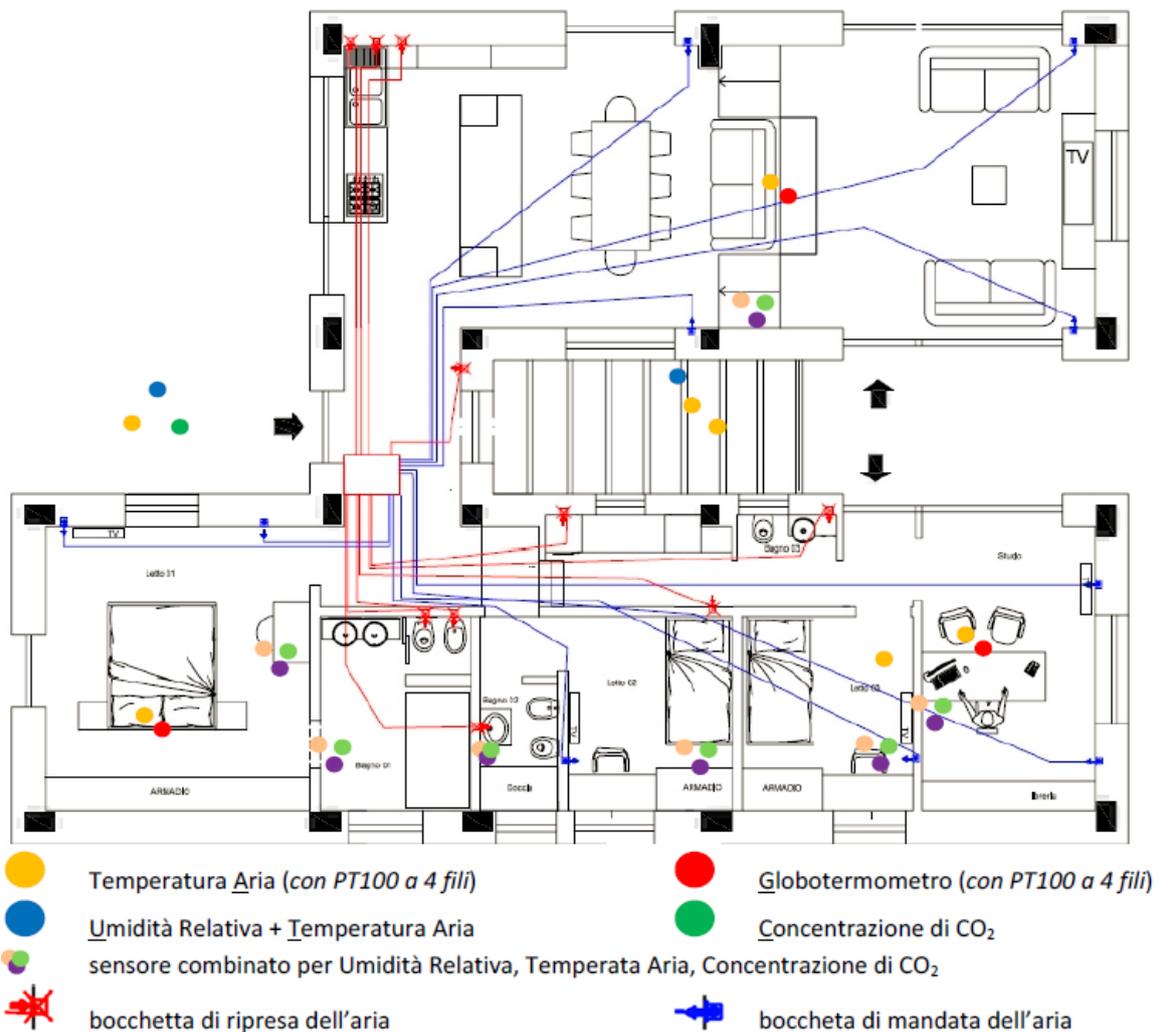


Figura 58. Pianta piano terra edificio – sensori ambientali installati

Negli ambienti dove sono presenti sia la termoresistenza PT100 per la misura della temperatura dell'aria e il globo termometro, essi sono stati posizionati alla stessa altezza e nella stessa posizione (distanziati solo dallo spazio sufficiente per non perturbare le misure effettuate da ciascuno). Si può vedere un esempio di questa configurazione nella Figura 59.



Figura 59. Sensori di temperatura dell'aria interna: termoresistenza PT100 e sonda globotermometrica.

Siccome i dati di soggiorno, camera matrimoniale e studio sono più ricchi ed accurati, e significativamente rappresentativi dell'edificio, si è deciso di riferire le analisi di comfort a questi tre ambienti di riferimento.

Il sensore multiparametro T-RH-CO₂, installato in ogni ambiente, dialoga con la dorsale Konnex, mentre le termoresistenze PT100 e i globotermometri (anch'essi contenenti delle PT100 a 4 fili), che permettono una misura della temperatura dell'aria più accurata, dialogano con i moduli elettronici specifici della dorsale BACnet.

Nei quattro ambienti nel quale è presente una termoresistenza PT100 si è deciso di utilizzare i dati monitorati grazie dalla suddetta sonda poiché dispone di maggiore accuratezza. La Figura 60 mostra le temperature misurate dai due sensori, in azzurro dalla PT100 e in giallo dal sensore Konnex. Oltre a una differenza di temperatura, quello che si può notare è che il sensore Konnex restituisce un valore sul bus di comunicazione solo se si supera una determinata soglia di variazione rispetto al valore precedente. Proprio per questo la linea viene rappresentata a gradini. Il trend di misura è però analogo e quindi il sensore Konnex pare adeguato a svolgere le funzioni di controllo. Non può invece essere assunto come un riferimento per le analisi dettagliate di comfort.

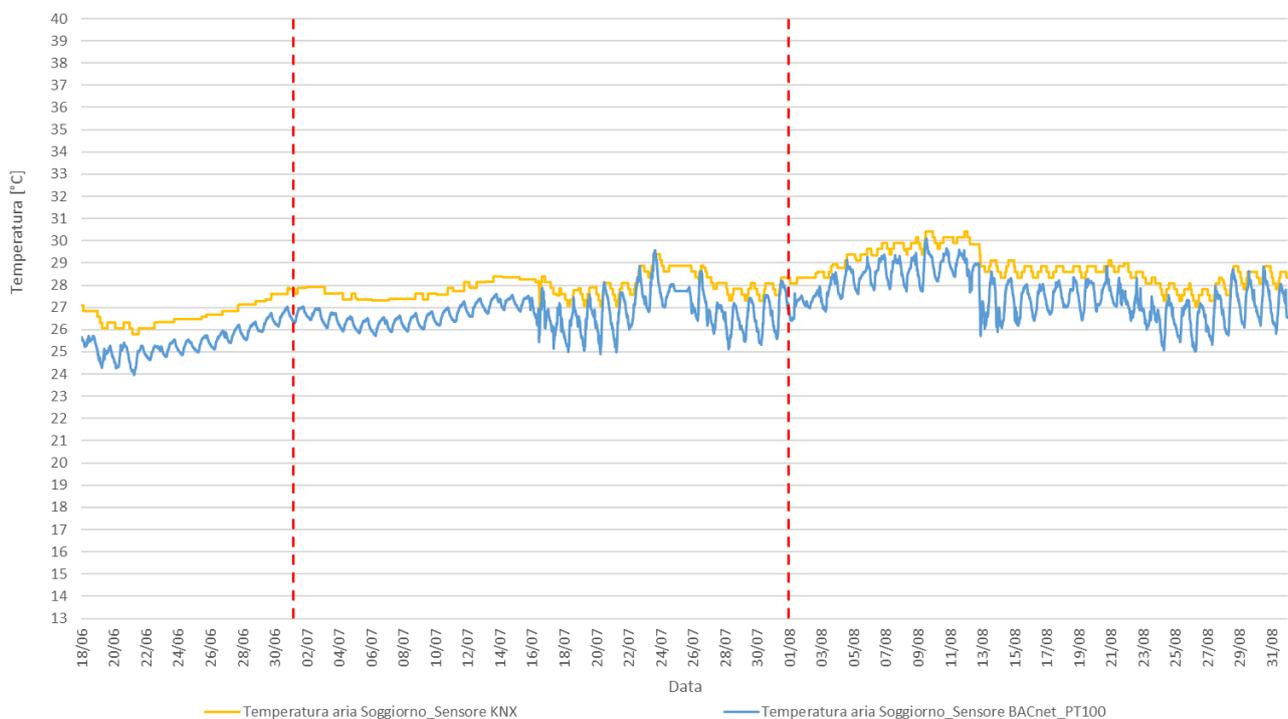


Figura 60. Temperature dell'aria del soggiorno misurate attraverso il sensore collegato al sistema Konnex e il sensore (PT100) collegato al sistema BACnet.

La Figura 61 mostra le temperature dell'aria degli ambienti interni con linee colorate continue ed in grigio (puntinato) la temperatura esterna registrata, durante tutto il periodo in esame. Si ricorda che, per il soggiorno, lo studio, la camera 3 e la camera matrimoniale si è scelto di plottare le temperature monitorate attraverso le PT100 (misure dettagliate su cui verrà costruita l'analisi di comfort), mentre per tutti gli altri ambienti della casa, le temperature sono state monitorate attraverso un sensore multiparametro T-RH-CO₂ in ambito Konnex.

La temperatura esterna durante il periodo di monitoraggio è variata tra i 14 °C e i 39 °C, con una fluttuazione media giornaliera (giorno-notte) di circa 12 °C. Come si può vedere dalla Figura 61, le temperature degli ambienti a giugno e luglio si mantengono abbastanza costanti durante il periodo di accensione della ventilazione meccanica (21/6 al 16/7, a meno del 14/7).

In questo periodo, le fluttuazioni di temperatura tra giorno e notte, infatti, sono state di circa 1 °C e la temperatura interna ha sempre registrato valori tra 25 °C e i 27 °C. Si ricorda che in questi giorni la pompa di calore è stata attivata manualmente solo il 29/6, 2/7, 5-6/7, 14/7.

In agosto, durante il periodo di accensione della ventilazione meccanica (01/8-13/8 e 15/8-21/8), la temperatura dell'aria degli ambienti interni ha subito maggiori fluttuazioni durante l'arco della giornata poiché durante la notte, la ventilazione meccanica è stata disattivata per permettere un uso passivo dell'edificio, seguendo la preferenza degli occupanti. Comunque, anche in questi casi la fluttuazione giornaliera di temperatura dell'aria interna non supera mai i 3 °C.

Infine, anche nei periodi in cui l'edificio è stato ventilato naturalmente, nonostante la temperatura interna dell'aria sia stata meno costante poiché maggiormente influenzata dalle forzanti climatiche esterne, si può vedere che le temperature non hanno subito fluttuazioni maggiori di 3 °C.

A condizioni esterne molto calde, come quelle registrate durante i primi giorni di agosto, sono conseguite condizioni interne con temperature dell'aria più alte. L'edificio è stato ventilato meccanicamente e climatizzato durante il giorno, e ventilato naturalmente durante la notte. Tuttavia, durante quei giorni le temperature esterne, anche durante la notte, sono rimaste molto vicine al valore di set-point del sistema di climatizzazione (26 °C), condizionando le capacità di raffrescamento notturno della ventilazione naturale. L'utente ha preferito optare per la ventilazione naturale anche durante quelle notti con temperature più alte, sebbene sarebbe stato più vantaggioso utilizzare la ventilazione meccanica con il beneficio offerto dal pre-raffrescamento dello scambiatore interrato. Peraltro, l'edificio in quei giorni è stato sottoposto a condizioni al contorno particolarmente difficili anche in termini di occupazione, più continua e regolare, con un controllo manuale delle schermature solari da parte degli utenti. Il settaggio non ottimale delle lamelle ha, infatti, impedito il funzionamento ideale della ventilazione naturale durante le ore notturne.

La stessa analisi è stata effettuata per l'umidità relativa. In Figura 62 è rappresentato l'andamento dell'umidità relativa durante tutto il periodo di monitoraggio: la linea in grigio puntinato rappresenta l'umidità relativa registrata durante il periodo in esame, mentre le linee continue colorate rappresentano i valori di umidità relativa registrati nei vari ambienti della casa.

Come per le temperature, durante il funzionamento della ventilazione meccanica, i valori di umidità relativa si mantengono abbastanza costanti, mentre subiscono fluttuazioni maggiori e continue durante i giorni di sfruttamento della ventilazione naturale o nei giorni di sfruttamento della ventilazione meccanica di giorno e ventilazione naturale di notte.

In generale si nota che i valori di umidità relativa dell'aria interna rimangono sempre intorno al 50% e non superano mai il 65%.

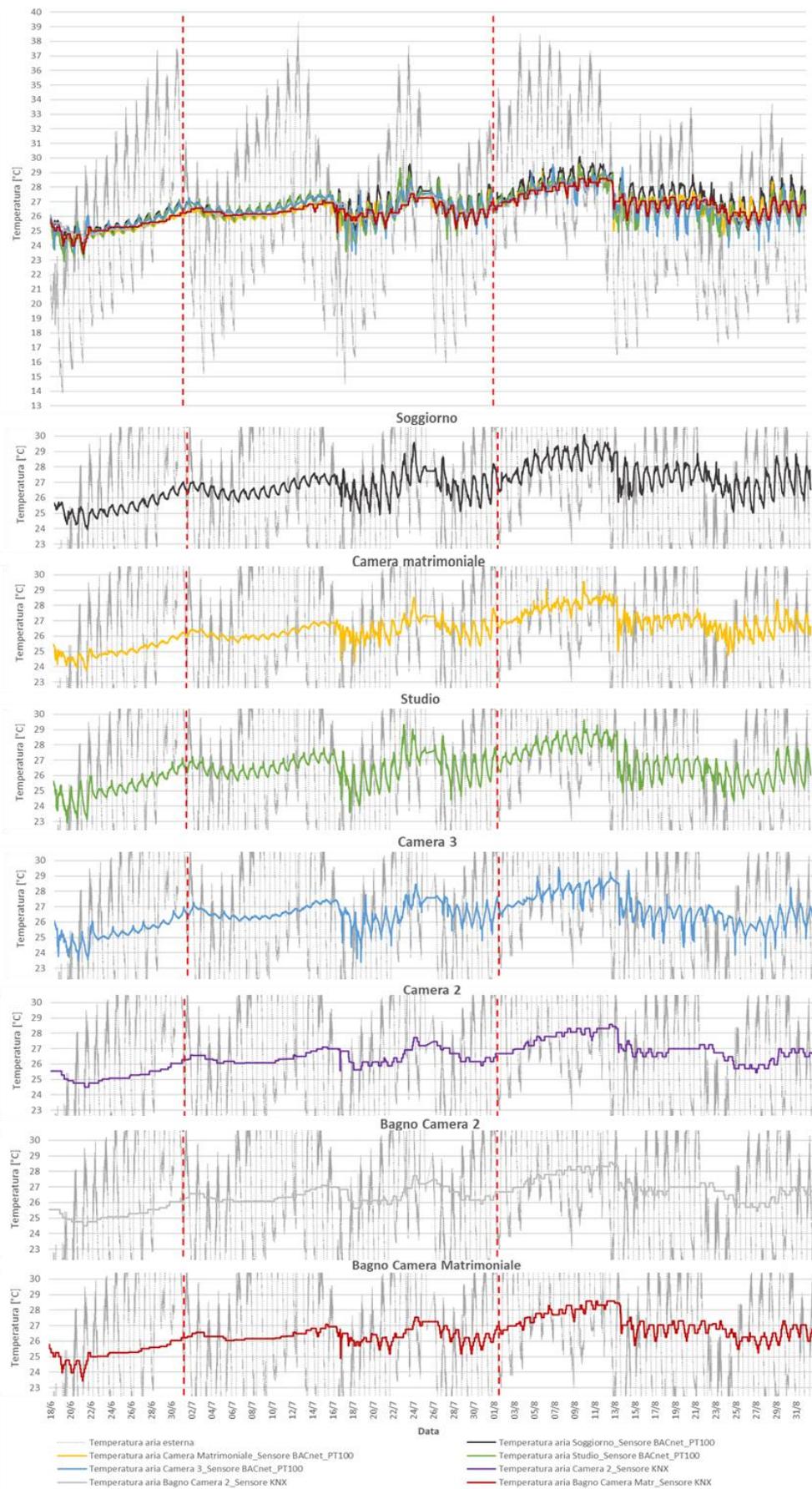


Figura 61. Temperature dell'aria degli ambienti monitorate dal 18 giugno al 31 agosto.

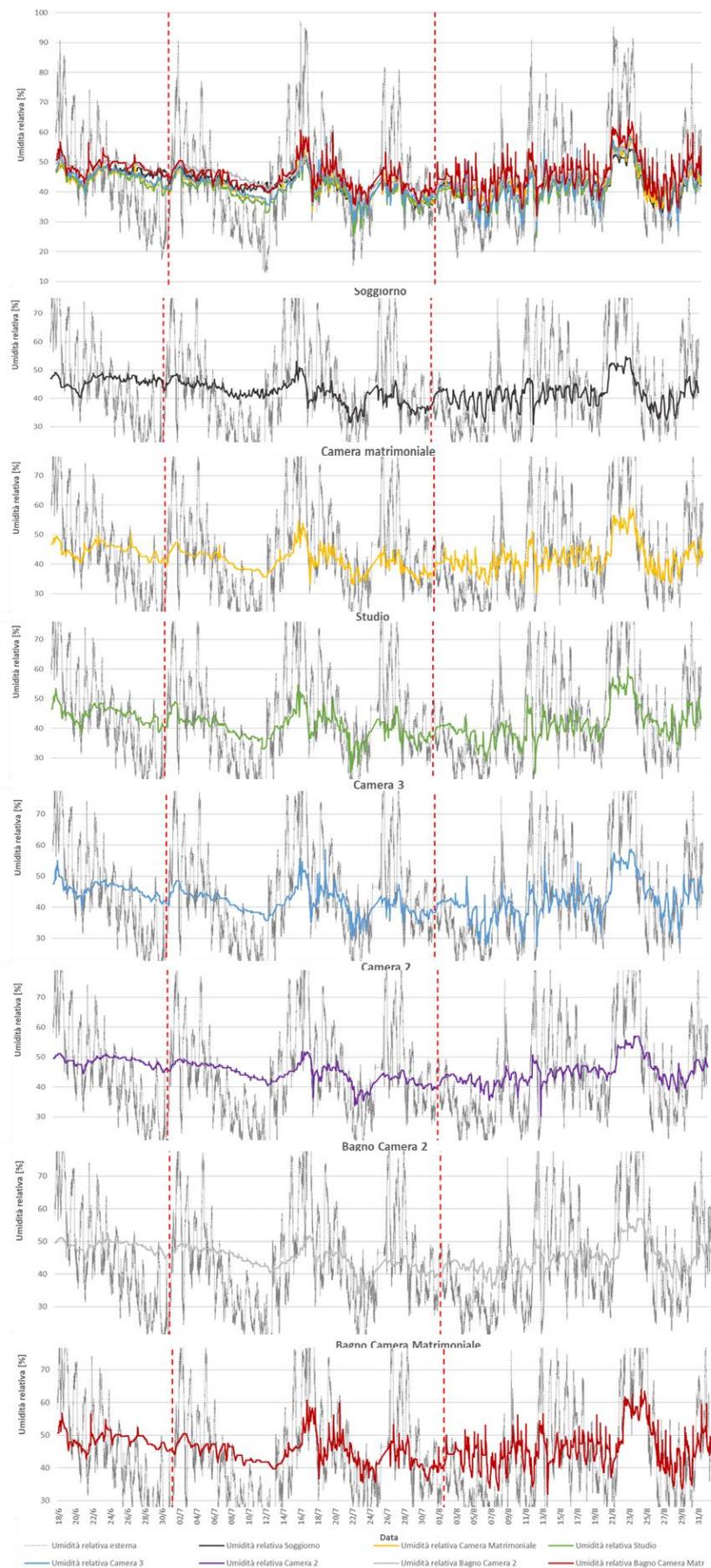


Figura 62. Umidità relativa degli ambienti dal 18 giugno al 31 agosto.

L'analisi della concentrazione di CO₂ negli ambienti interni ha evidenziato possibili problemi di taratura dei sensori installati, sui quali si interverrà. La Figura 63 riporta l'andamento della concentrazione di CO₂ all'interno di un ambiente dell'edificio. L'andamento della concentrazione ha un andamento coerente con le logiche di occupazione descritte nei paragrafi precedenti. Durante giugno e durante la prima metà del mese di luglio, l'edificio è stato occupato sporadicamente, mentre dalla seconda metà di luglio circa, l'occupazione è stata più regolare e continua. Tuttavia, non si può dire con certezza quale sia il valore reale medio di CO₂ registrato negli ambienti, quindi si dovrà prevedere un intervento sui sensori che hanno mostrato valori anomali.

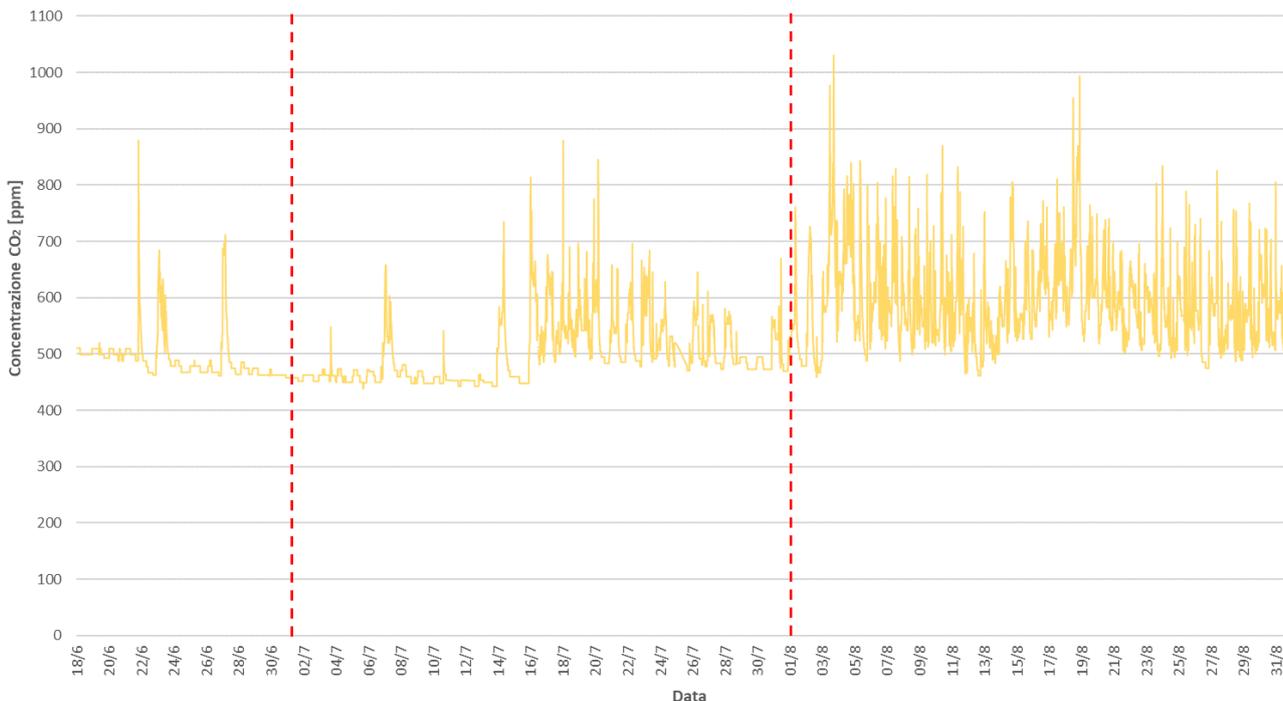


Figura 63. Rappresentazione della concentrazione di CO₂ di un ambiente, per tutto il periodo di monitoraggio.

ANALISI DI COMFORT

Gli ambienti del soggiorno, camera matrimoniale e studio sono stati valutati dal punto di vista del comfort estivo, secondo la norma EN 15251 [16]. La presenza di sensori più accurati, come PT100 a 4 fili per la misura della temperatura dell'aria e delle sonde globotermometriche, ha permesso il calcolo della temperatura media radiante e della temperatura operativa dei tre ambienti.

La norma EN 15251 fornisce i criteri per la progettazione dell'ambiente interno e per la valutazione della prestazione energetica degli edifici, in relazione alla qualità dell'aria interna, all'ambiente termico, all'illuminazione e all'acustica. I criteri per la progettazione dell'ambiente interno, vengono definiti in base a quattro categorie corrispondenti a tipologie di edifici ed al livello di benessere che si vuole garantire. Le quattro categorie (Cat. I, Cat. II, Cat. III, Cat. IV), vengono, infatti, utilizzate per fornire una valutazione globale dell'ambiente interno, considerando diversi parametri rappresentativi. La Tabella 5 descrive le quattro categorie, prese in considerazione dalla norma, in base al livello di comfort che si vuole garantire. L'edificio oggetto di studio, è rappresentato dalla Cat. II, la quale include edifici di nuova realizzazione e riqualificazioni.

Tabella 5. EN 15251 - Applicabilità delle categorie utilizzate.

Categoria	Descrizione
I	Livello alto, soggetti particolarmente sensibili o con requisiti particolari
II	Livello normale, edifici di nuova realizzazione o riqualificazioni
III	Livello moderato, edifici esistenti
IV	Classe accettabile solo per una parte limitata dell'anno

Secondo la norma EN 15251, i limiti di temperatura accettabili affinché l'ambiente venga percepito come confortevole, dipendono dal tipo di sistema usato nell'edificio per fornire il comfort. Queste temperature vengono definite attraverso modelli di comfort (Fanger e adattivo) che descrivono quantitativamente in quali intervalli gli utenti dovrebbero trovarsi in condizioni confortevoli all'interno dell'edificio, in relazione alle logiche di controllo usate.

Se, ad esempio, il raffrescamento è fornito mediante un sistema attivo, allora le temperature interne devono rispettare i limiti (inferiore e superiore) definiti dal modello di Fanger. Se invece il comfort estivo è mantenuto mediante strategie di raffrescamento passivo, in particolare con la possibilità di aprire le finestre da parte degli utenti, allora i limiti di temperatura sono dettati dal modello adattivo.

Il Modello di Fanger vede le persone come soggetti passivi di scambio termico, all'interno di ambienti climatizzati e chiusi verso l'esterno. Tale modello prescrive degli intervalli di temperatura di comfort (Tabella 6), dipendenti da alcune variabili ambientali e personali. Spesso, però, nella pratica si assumono dei valori di default per l'isolamento termico del vestiario, per il livello di attività metabolica, per la velocità dell'aria e per l'umidità relativa. Ne risultano degli intervalli di temperatura fissati una volta per tutte per tutta la stagione estiva per le tre categorie di comfort.

Tabella 6. EN 15251 – Modello di Fanger, intervalli di temperatura per il calcolo del comfort in condizioni di funzionamento estivo ed in caso di raffrescamento attivo (estratto da tabella A.3).

Categoria	Intervalli di temperatura
I	23,5 – 25,5 °C
II	23,0 – 26,0 °C
III	22,0 – 27,0 °C

Nel tempo, è stato introdotto il concetto di adattamento, il quale, al contrario del modello di Fanger, tiene conto del contesto, e quindi dell'effetto che ha l'evoluzione della temperatura esterna delle ultime settimane, nel modificare le sensazioni e le preferenze termiche degli occupanti.

Nel modello di comfort adattivo, l'occupante di un edificio non è più semplicemente inteso come un soggetto passivo, ma come un agente attivo che interagisce con l'ambiente che lo circonda. Rispetto al

modello di Fanger, nel modello adattivo l'intervallo di temperature valutate come confortevoli evolve col clima esterno e pertanto permette una più agevole integrazione di tecnologie di raffrescamento passivo. Il modello di comfort adattivo propone una correlazione tra la temperatura di comfort e la temperatura running mean dell'aria esterna (T_{rm}). Quest'ultima temperatura, rappresenta una combinazione lineare delle temperature medie giornaliere dei giorni precedenti. Il modello adattivo utilizza correlazioni derivate da misure e interviste in edifici reali che forniscono la temperatura di comfort in funzione della media mobile della temperatura:

$$T_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8$$

Equazione 2. Temperatura di comfort (operativa) giornaliera.

Dove

T_{rm} media mobile della temperatura (running mean temperature) è approssimata come:

$$T_{rm} = \frac{(T_{ed-1} + 0,8 \cdot T_{ed-2} + 0,6 \cdot T_{ed-3} + 0,5 \cdot T_{ed-4} + 0,4 \cdot T_{ed-5} + 0,3 \cdot T_{ed-6} + 0,2 \cdot T_{ed-7})}{3,8}$$

Equazione 3. EN 15251, running mean temperature.

Dove

T_{ed-n} temperatura media giornaliera dei giorni precedenti.

Infine, gli intervalli di temperatura ammissibili per il modello di comfort adattivo sono ricavati attraverso le correlazioni espresse in Tabella 7, in funzione della temperatura operativa di comfort. Si ricorda che, per le caratteristiche dell'edificio oggetto di studio, la categoria di riferimento per le successive analisi di comfort è la Cat. II.

Tabella 7. EN 15251 – Modello adattivo, intervalli di temperatura per il calcolo del comfort in condizioni di funzionamento estivo ed in caso di raffrescamento passivo.

Categoria	Intervalli di temperatura operativa accettabili per categoria	
I	Limite massimo	$T_{op,max} = T_{comf} + 2$
	Limite minimo	$T_{op,min} = T_{comf} - 2$
II	Limite massimo	$T_{op,max} = T_{comf} + 3$
	Limite minimo	$t_{op,min} = T_{comf} - 3$
III	Limite massimo	$T_{op,max} = T_{comf} + 4$
	Limite minimo	$t_{op,min} = T_{comf} - 4$

Una volta definiti i limiti dei due modelli, sono state calcolate le temperature operative dei tre ambienti per la verifica di comfort.

La temperatura operativa (T_{op}), nei casi di differenze non elevate tra temperatura media radiante (T_r) e temperatura dell'aria in ambiente (T_a), può essere ottenuta mediante la seguente equazione:

$$T_{op} = \frac{(T_r + T_a)}{2}$$

Equazione 4. Temperatura operativa in funzione della temperatura media radiante e temperatura dell'aria.

Dove

T_r temperatura media radiante,

T_a temperatura dell'aria.

La temperatura media radiante è definita dalla norma ISO 7726 [17], la quale ne fornisce la formula per il calcolo in funzione della temperatura dell'aria (T_a), e della temperatura globotermometrica (T_g) per globotermometri standard neri, con emissività della pittura $\epsilon_g=0,95$ e con diametro pari a 15 cm:

$$T_r = \left[(T_g + 273,15)^4 + 0,4 \cdot 10^8 \cdot |T_g - T_a|^{\frac{1}{4}} \cdot (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273,15$$

Equazione 5. ISO 7726, Temperatura media radiante con globotermometro nero ($\epsilon_g=0,95$, $D=15$ cm).

Dove

T_g temperatura globotermometrica,

T_a temperatura dell'aria.

Le logiche di controllo utilizzate (i.e. ventilazione naturale, VMC e PdC), e le conseguenti condizioni climatiche interne, sono state analizzate dal punto di vista di entrambi i modelli di comfort descritti finora. Questa scelta è stata dettata dal fatto che, in ogni mese analizzato, c'è stata un'alternanza nell'uso di strategie attive e passive. Questo ha permesso anche di trarre considerazioni importanti sulla reale applicabilità dei modelli più restrittivi, come quello di Fanger, costruiti principalmente su destinazioni d'uso non residenziali.

Sia per il modello adattivo, che per il modello di Fanger, sono stati rappresentati due grafici differenti, il primo in cui la temperatura operativa è stata plottata in funzione del giorno, il secondo, in cui la temperatura operativa è stata plottata in funzione della temperatura running mean (modello adattivo), o temperatura media giornaliera esterna (modello di Fanger).

Infine, è stato prodotto un grafico rappresentante la frequenza relativa e cumulata delle misure di temperatura effettuate, in grado di dare una visione d'insieme dei risultati ottenuti in questo primo periodo di monitoraggio. Si precisa che le analisi riportate in ogni grafico sono state effettuate considerando tutte le ore di occupazione e non occupazione dell'edificio e di tutte le ore diurne e notturne, soluzione ritenuta più adatta ad un edificio residenziale che non presenta rigidi schemi di occupazione.

Si è deciso in particolare di svolgere analisi di comfort sia adottando il modello di Fanger che quello adattivo, poiché le modalità di utilizzo dell'edificio, tal volta attive e tal volta passive, non permettevano di definire un modello di riferimento certo. Ci si è trovati spesso in condizioni ibride, in cui, pur in assenza di climatizzazione meccanica, era presente un sistema di ventilazione controllato dal sistema automatico. Tale condizione non fa pienamente riferimento né al modello di Fanger, né al modello adattivo. Questo studio è stato quindi l'occasione per valutare l'applicabilità di questi due modelli di comfort al caso dell'edilizia residenziale ed in particolare ad un edificio passivo in clima mediterraneo.

La Figura 64 mostra la temperatura operativa misurata nei tre ambienti di riferimento durante il mese di giugno (dal 18/6 al 30/6) in relazione ai limiti di temperatura imposti dal modello adattivo. In grigio scuro è rappresentata la temperatura operativa del soggiorno, in giallo quella della camera matrimoniale e in verde quella dello studio. I limiti di temperatura, secondo il modello adattivo, sono invece rappresentati con i colori rosso, arancione, giallo chiaro per i tre limiti massimi, mentre le temperature limite minime sono rappresentate con i colori blu, azzurro, celeste chiaro.

Poco sopra l'asse delle ascisse, rappresentante la data, sono state indicate le strategie di ventilazione utilizzate: con la freccia azzurra il periodo di ventilazione naturale (VN), con la freccia viola la ventilazione meccanica (VM). Il trattino e la scritta in marrone indicano i momenti di accensione della PdC.

Durante il mese di giugno, l'analisi di comfort dei tre ambienti analizzati, dovrebbe essere effettuata secondo il modello adattivo almeno fino al giorno 22/6, giorno nel quale viene attivata la ventilazione meccanica. Prima di tale data, la temperatura ha subito maggiori fluttuazioni poiché maggiormente influenzata dalle forzanti climatiche esterne. Tuttavia, la temperatura operativa si mantiene durante tutto il

mezzo mese all'interno dei limiti di comfort di ciascuna categoria, rispettando pienamente i limiti imposti dalla categoria II, di riferimento per l'edificio oggetto di analisi. Si ricorda però, che la temperatura operativa registrata durante il mese di giugno, non è stata considerevolmente influenzata dalla presenza degli occupanti, poiché l'occupazione è stata prevalentemente sporadica.

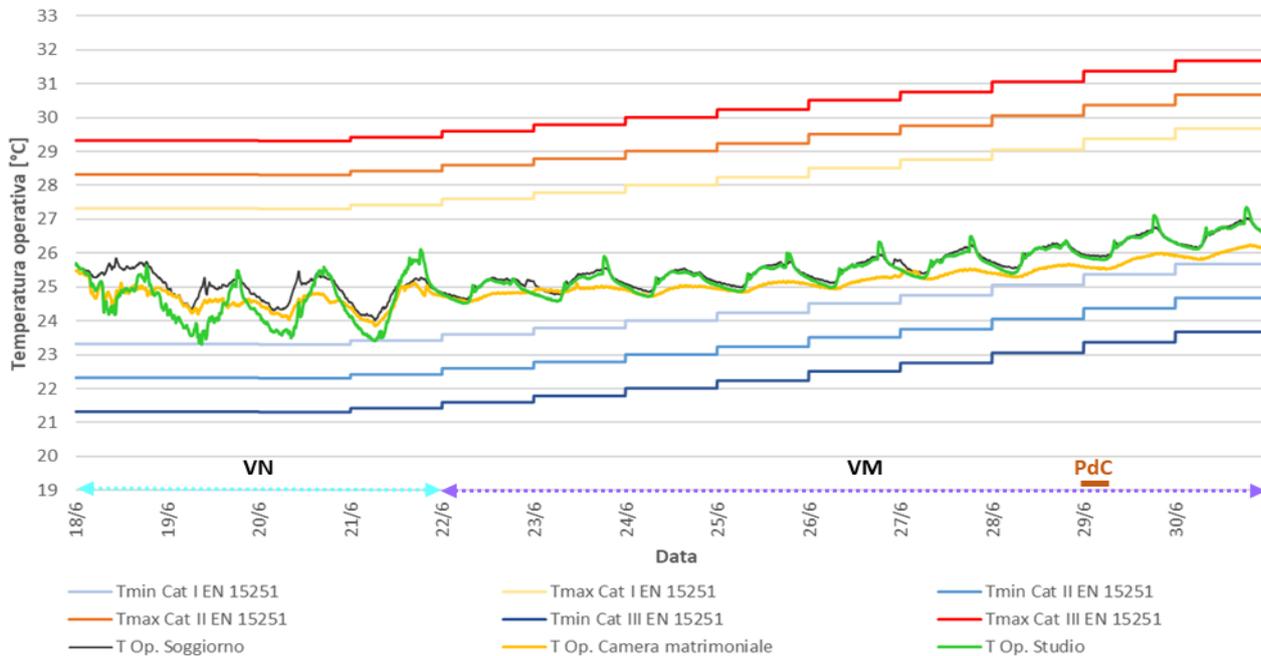


Figura 64. Modello adattivo, temperatura operativa soggiorno, camera matrimoniale, studio, giugno 2017.

La Figura 65, mostra la temperatura operativa in funzione della media mobile della temperatura esterna (running mean temperature), registrata durante il mese di giugno. La temperatura operativa del soggiorno è rappresentata con un triangolo nero, quella della camera matrimoniale con un rombo giallo e quella dello studio con un triangolo verde. La Figura, evidenzia come tutti i valori di temperatura operativa rispettano i limiti del modello adattivo per la Cat. II. Inoltre, si può notare come le temperature operative interne minori del mese di giugno, siano state registrate in corrispondenza di valori della media mobile della temperatura esterna dell'ordine di 19-20 °C. Mentre, le temperature operative interne maggiori, sono state registrate per valori della media mobile della temperatura esterna dell'ordine di 26-27 °C, e temperature esterne massime dell'ordine di 35-36 °C.

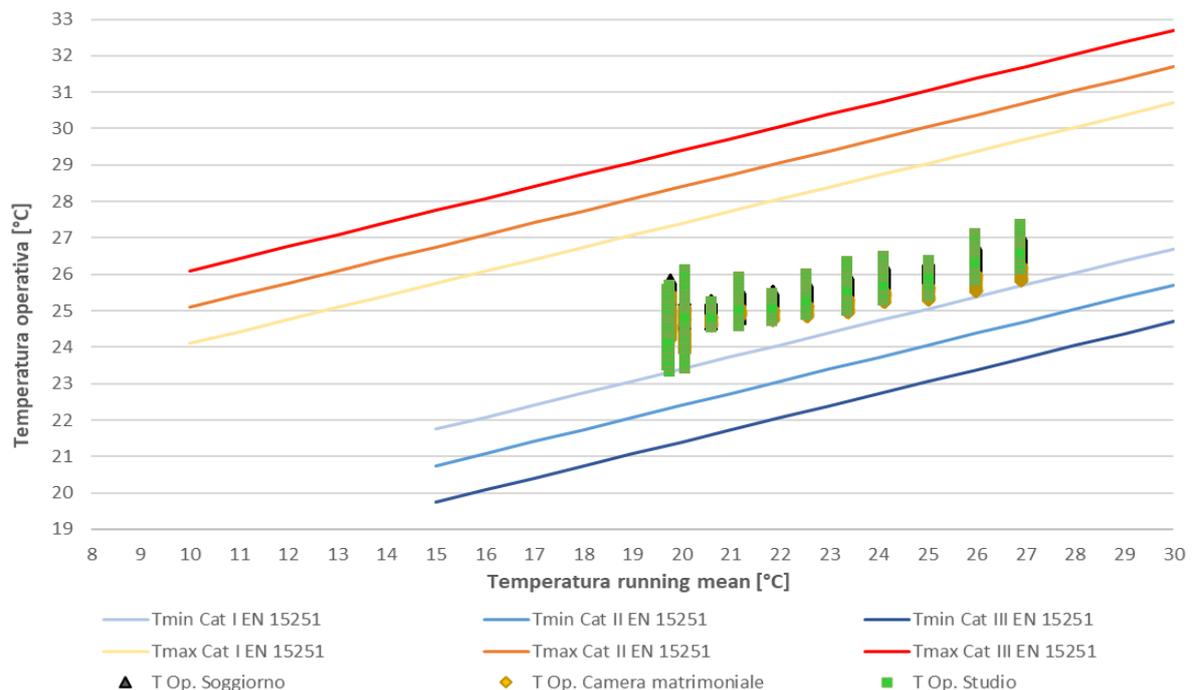


Figura 65. Modello adattivo, temperatura operativa soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della T_{rm}, giugno 2017.

La Figura 66 mostra la temperatura operativa dei tre ambienti in funzione dei limiti di Fanger. Si può notare, come detto precedentemente, che i limiti risultano più restrittivi e fissi nel tempo.

Questo modello, utilizzato nel caso di presenza/operazione di sistemi di climatizzazione attivi, dovrà dunque essere considerato nel periodo 22-30/6. Le temperature operative degli ambienti, si mantengono all'interno del limite massimo di temperatura della Cat. II (26 °C), per la maggior parte del tempo. Temperature più alte di questo limite, sono state registrate a fine mese, in corrispondenza di temperature esterne elevate. Tuttavia, la camera matrimoniale ha registrato il comportamento migliore, registrando valori di temperatura operativa maggiori di 26 °C solo l'ultimo giorno del mese. Lo studio e il soggiorno, infatti, sono caratterizzati da un'esposizione simile (Sud-Est soggiorno, Sud-Ovest studio), opposta a quella della camera matrimoniale (Nord-Ovest), che ne ha influenzato l'andamento della temperatura operativa. Pertanto, la camera matrimoniale risulta essere l'ambiente che rispetta maggiormente questi limiti, mentre soggiorno e studio sfiorano il limite massimo della Cat. II per poche ore il 27-28/6 e principalmente durante il 29/6 e il 30/6. Si ricorda anche che in questo periodo si è ricorso alla pompa di calore per il raffrescamento estivo solo in poche ore del giorno 29/6.

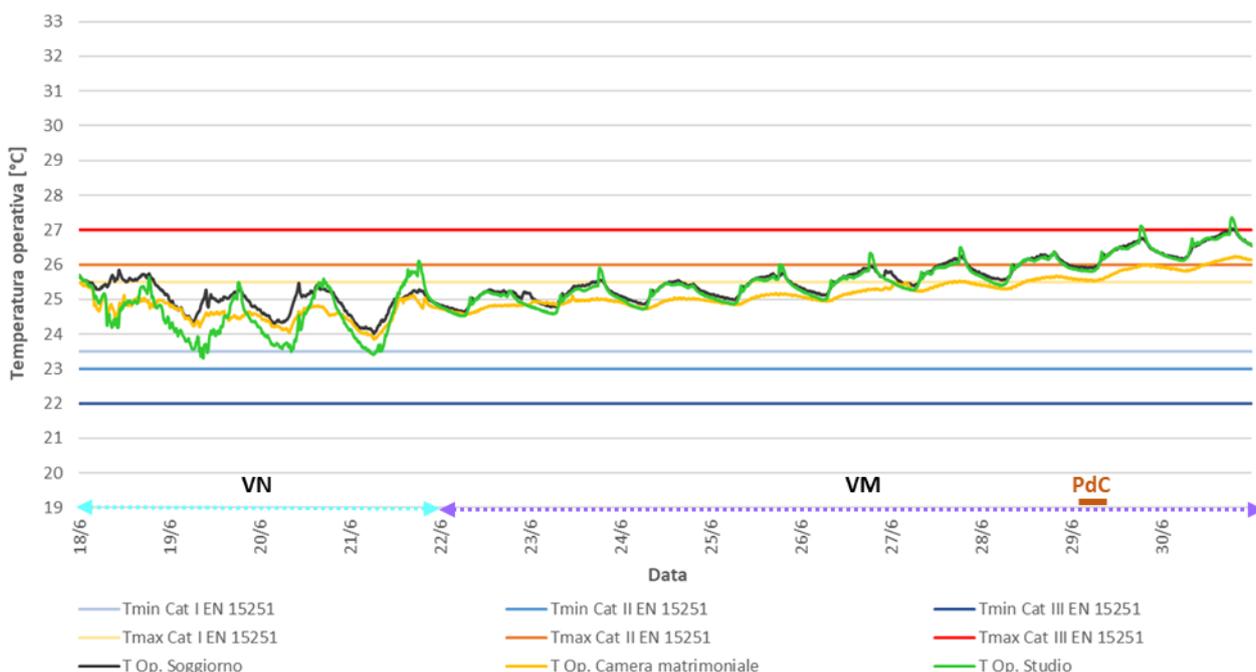


Figura 66. Modello di Fanger, temperatura operativa soggiorno, camera matrimoniale, studio, giugno 2017.

La stessa analisi, in Figura 67, è stata effettuata considerando la temperatura operativa del soggiorno, camera matrimoniale e studio, in funzione della temperatura media giornaliera esterna.

Questa analisi mostra come valori di temperatura operativa interna di poco maggiori di 26 °C, siano stati registrati in corrispondenza di temperature medie giornaliere maggiori di 27 °C, e fino a 30 °C.

La Figura 68 riporta l’analisi di comfort secondo il modello adattivo effettuata per luglio. La temperatura, sia nei periodi di ventilazione naturale che meccanica, ha rispettato abbondantemente i limiti della Cat. II. L’unica criticità, è stata registrata il 17/7, quando sono state misurate temperature operative minori del limite minimo della Cat. II, a causa di un evento piovoso, il quale ha fatto decrescere la temperatura esterna fino a circa 14 °C. Si tratta comunque di temperature interne di 24-25 °C, cui si può porre rimedio con un vestiario con valore isolante leggermente maggiore. In letteratura è presente dibattito sulla opportunità di considerare come discomfort estivo le temperature inferiori alla banda di comfort (indicatori di lungo termine simmetrici ed asimmetrici).

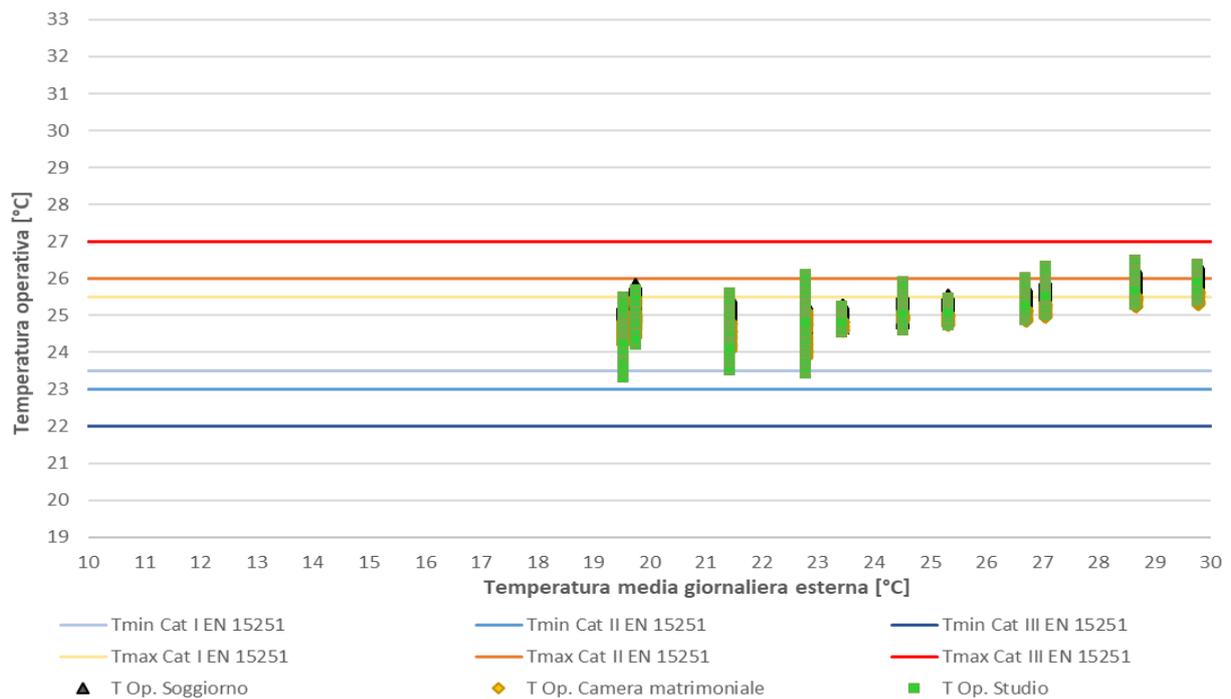


Figura 67. Modello adattivo, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della temperatura media giornaliera esterna, giugno 2017.

Si ricorda che l'edificio, a luglio, è stato occupato sporadicamente fino al 12/7 mentre dal 13/7 l'occupazione è stata più regolare e continua. L'occupazione più regolare, durante la seconda metà del mese, coincide con uno sfruttamento maggiore della ventilazione naturale. In questo periodo, la temperatura, maggiormente influenzata dalle forzanti climatiche esterne, ha registrato maggiori fluttuazioni, mantenendosi, tuttavia, all'interno dei limiti più restrittivi imposti dal modello adattivo (Cat. I).

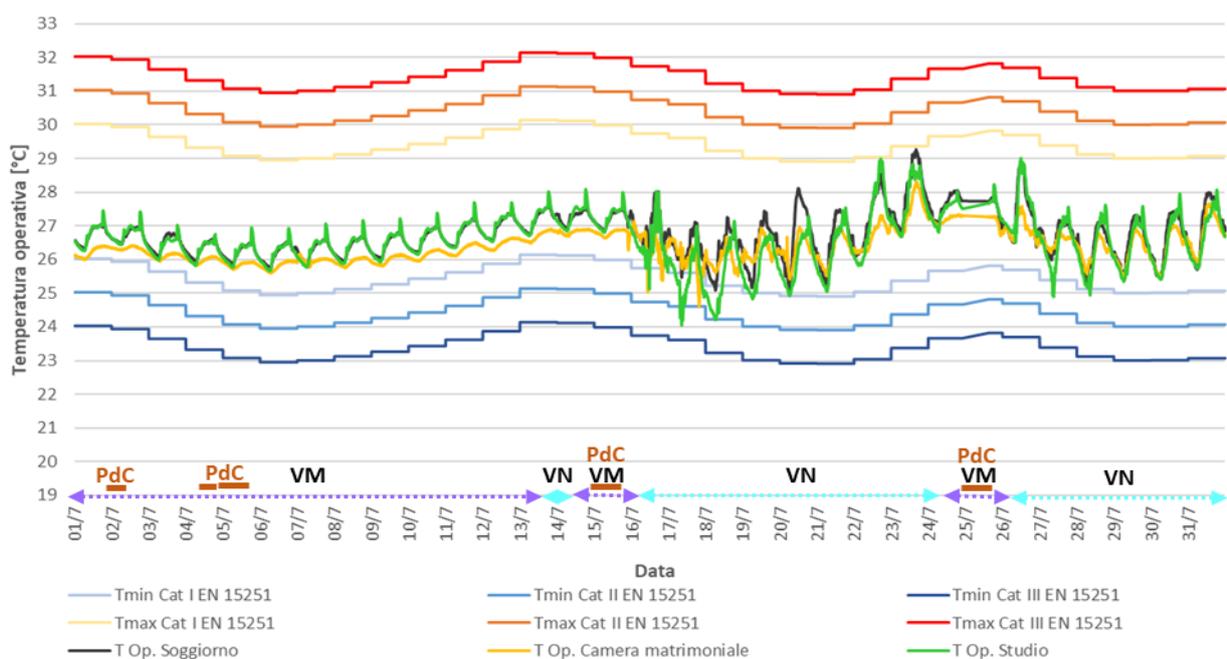


Figura 68. Modello adattivo, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, luglio 2017.

La Figura 69 riporta la temperatura operativa registrata nei tre ambienti in funzione della T_{rm} . Si noti come, la temperatura operativa rispetti per l'intero periodo i limiti di temperatura operativa della Cat. Il imposto dal modello adattivo, salvo poche ore per il soggiorno.

Durante queste ore, la temperatura operativa interna ha registrato valori di circa 24 °C in corrispondenza di temperature esterne inferiori a 15 °C, ma T_{rm} comprese tra 25 °C e 27 °C, le quali tengono conto delle temperature medie giornaliere dei giorni precedenti.

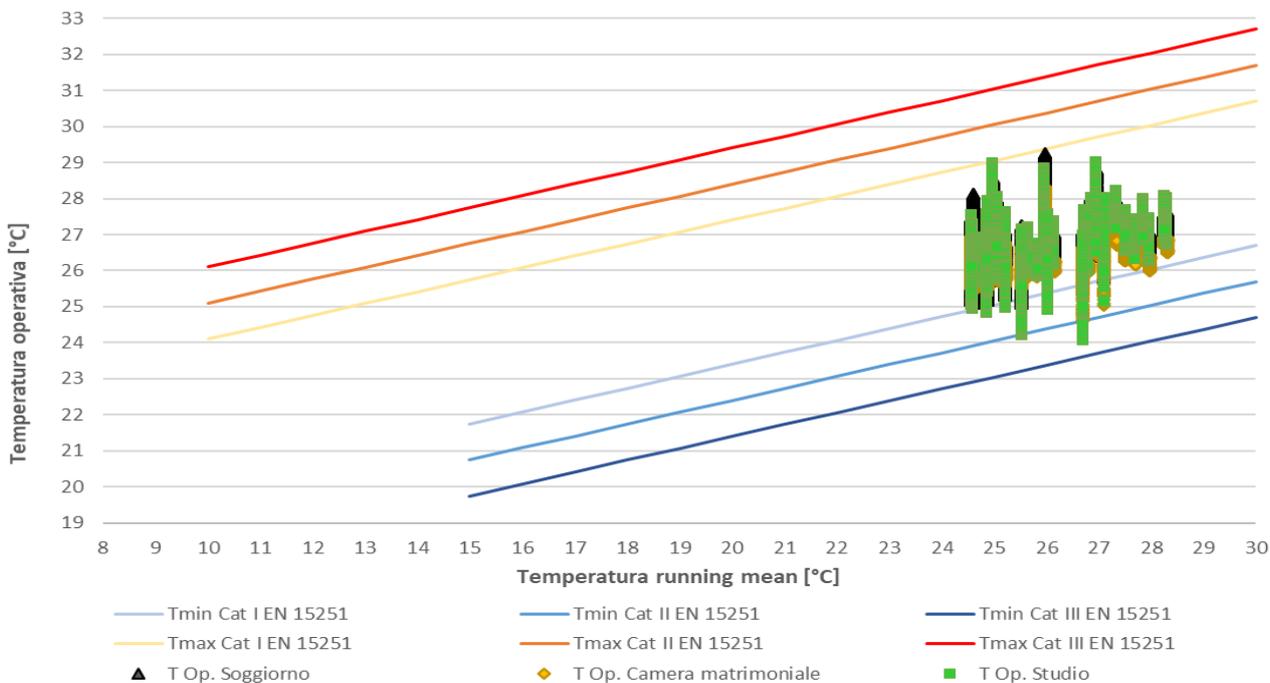


Figura 69. Modello adattivo, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della T_{rm} , luglio 2017.

Considerando il modello di Fanger per luglio (Figura 70), le temperature operative, registrate durante i giorni di funzionamento della ventilazione meccanica, si mantengono per lo più all'interno dei limiti della Cat. III, ma per la maggior parte del tempo oltre i limiti della Cat. II.

Come si può vedere dalla Figura 70, la temperatura operativa della camera matrimoniale, esposta a Nord-Ovest, si mantiene sempre all'interno del limite massimo della Cat. III, mentre le temperature delle altre due stanze, aventi esposizioni simili (Sud-Est Soggiorno e Sud-Ovest studio), hanno registrato temperature più alte e molto simili. Va ricordato che il modello di Fanger fa riferimento a condizioni al contorno perfettamente controllate e pertanto risulta molto restrittivo nelle fasi di ventilazione naturale. Il fatto che l'edificio, pur in condizioni completamente passive, non si sia allontanato di molto dai restrittivi limiti di Fanger, dimostra la qualità del controllo passivo delle condizioni ambientali.

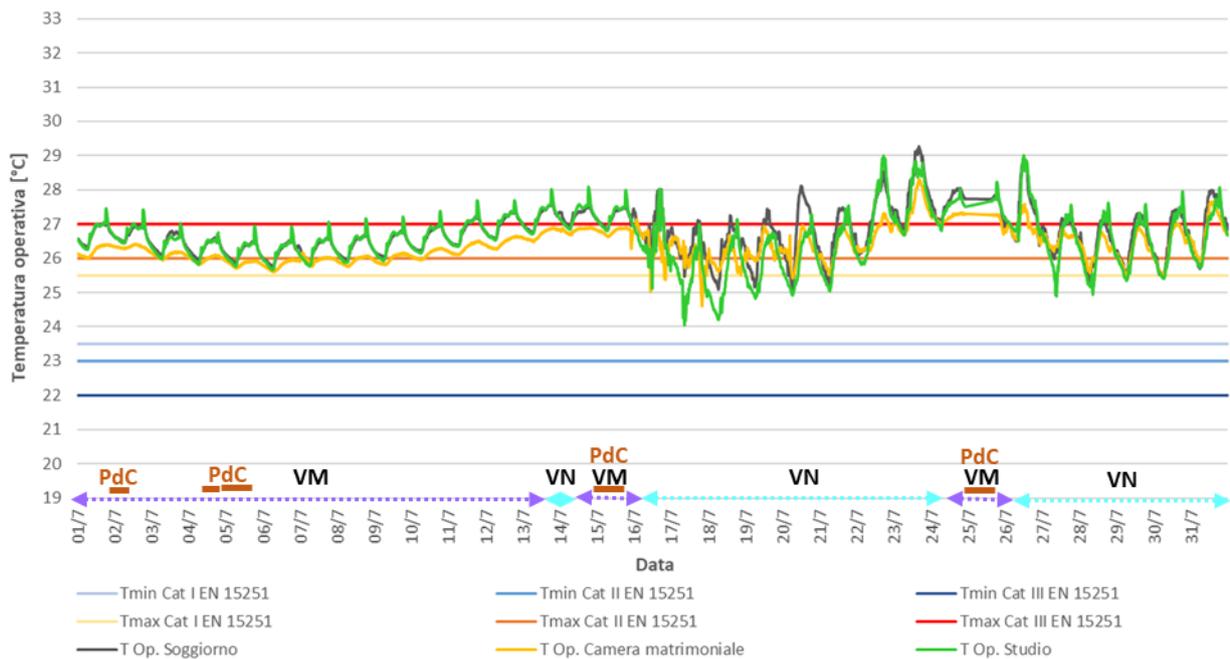


Figura 70. Modello di Fanger, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, luglio 2017.

Considerando la temperatura operativa dei tre ambienti, in funzione della temperatura media giornaliera esterna in Figura 71, si nota maggiormente la quantità di valori di temperatura più elevati rispetto al limite massimo imposto dalla Cat. II, secondo il modello di Fanger, il quale, come già detto, non va tuttavia considerata come un riferimento per i periodi di ventilazione naturale.

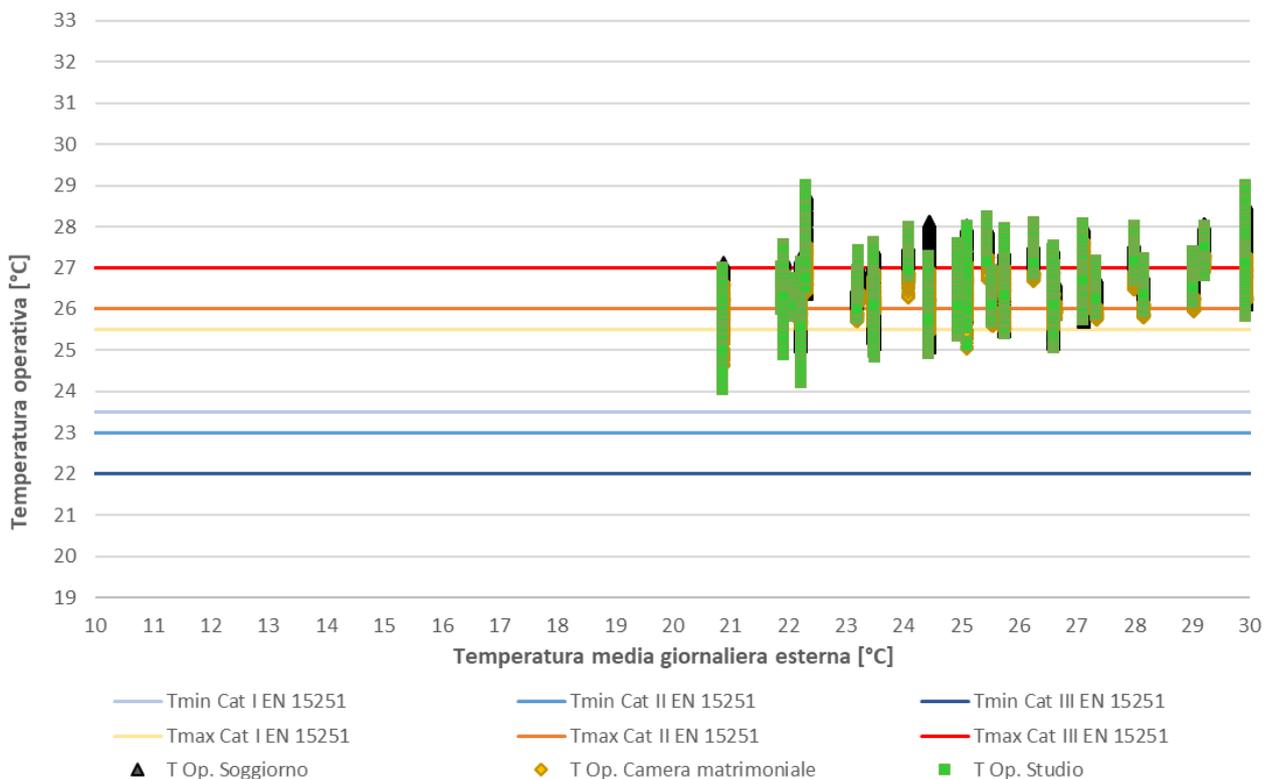


Figura 71. Modello di Fanger, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della temperatura media giornaliera esterna, luglio 2017.

La Figura 72 riporta l'andamento delle temperature operative dei tre ambienti, registrate ad agosto, ed i limiti di temperatura operativa dettati dal modello adattivo.

Durante il mese di agosto, l'edificio è stato ventilato naturalmente tra il 13/8 e il 15/8 e dopo il 21/8, mentre nella restante parte del mese è stato ventilato e raffrescato secondo una combinazione più complessa di logiche. Nei primi giorni di agosto (01-02/8) è stata utilizzata la ventilazione meccanica con accensione della PdC secondo logica *Cooling 2*. Nei giorni successivi 03-13/8, 15-18/8 e 19-21/8 è stata utilizzata la stessa logica durante il giorno, ma si è optato per la ventilazione naturale durante la notte. Questa strategia di ventilazione è stata indicata in Figura 72 con la freccia verde.

Si ricorda, per completezza, che tra il 04/8 e il 07/8 la PdC è stata disattivata dall'utente, per sua preferenza. La descrizione delle condizioni al contorno verificatesi durante i primi giorni di agosto è fondamentale per la comprensione delle condizioni di comfort registrate all'interno dell'edificio durante gli stessi giorni.

Il mese di agosto è stato, infatti, caratterizzato da condizioni al contorno particolarmente difficili, non solo in termini di clima esterno ma anche di occupazione, che è stata più continua e regolare. Le temperature esterne elevate anche durante le ore notturne, soprattutto nelle prime due settimane, hanno condizionato abbondantemente le temperature interne e sfavorito un pieno sfruttamento della ventilazione naturale durante le ore notturne.

Inoltre, il settaggio non ottimale delle lamelle delle schermature solari durante la notte, ha diminuito l'efficacia della ventilazione naturale. Per buona parte delle ore notturne, le schermature solari sono infatti rimaste completamente chiuse, impedendo il passaggio di una portata d'aria sufficiente in grado di contrastare i carichi termici interni e raffrescare le strutture dell'edificio.

Nonostante condizioni al contorno molto sfavorevoli, la temperatura operativa registrata ad agosto in ogni ambiente, ha rispettato i limiti di comfort adattivo imposti sia per la Cat. II che per la Cat. I, a meno di poche ore tra il 12-13/8. Gli occupanti dell'edificio, infatti, non hanno riportato particolari sensazioni di discomfort.

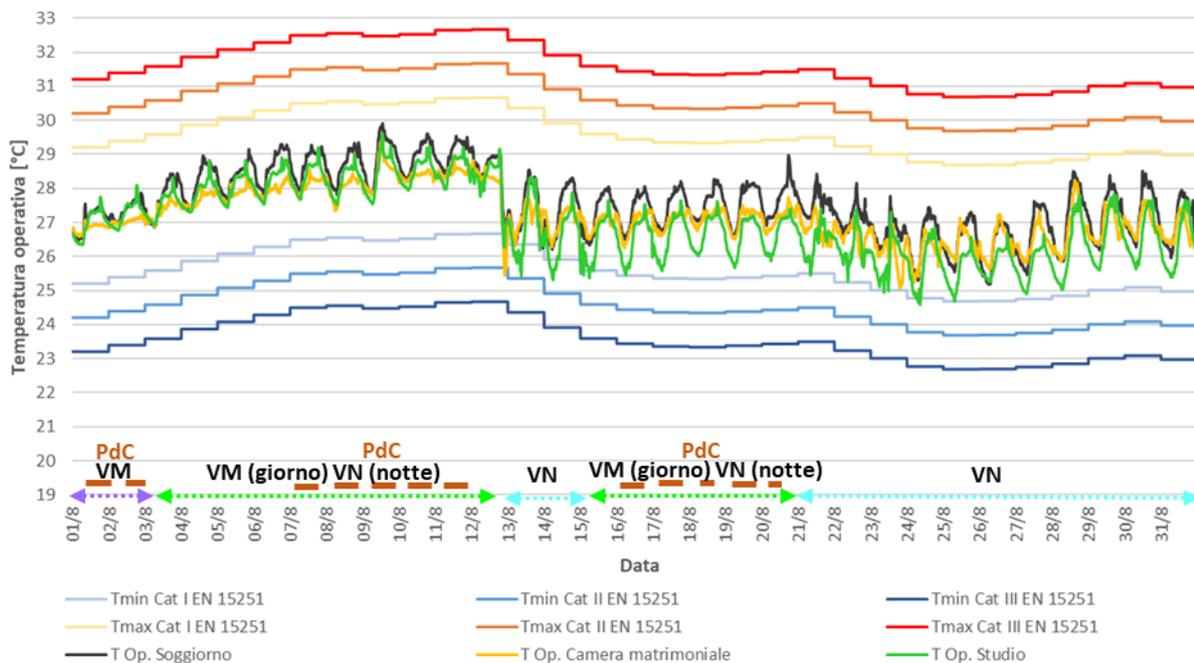


Figura 72. Modello adattivo, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, agosto 2017.

La Figura 73 mette in relazione la temperatura operativa registrata all'interno degli ambienti con la T_{rm} ed evidenzia come i limiti di temperatura operativa imposti dal modello adattivo, siano stati soddisfatti per buona parte del mese, nonostante condizioni al contorno particolarmente sfavorevoli.

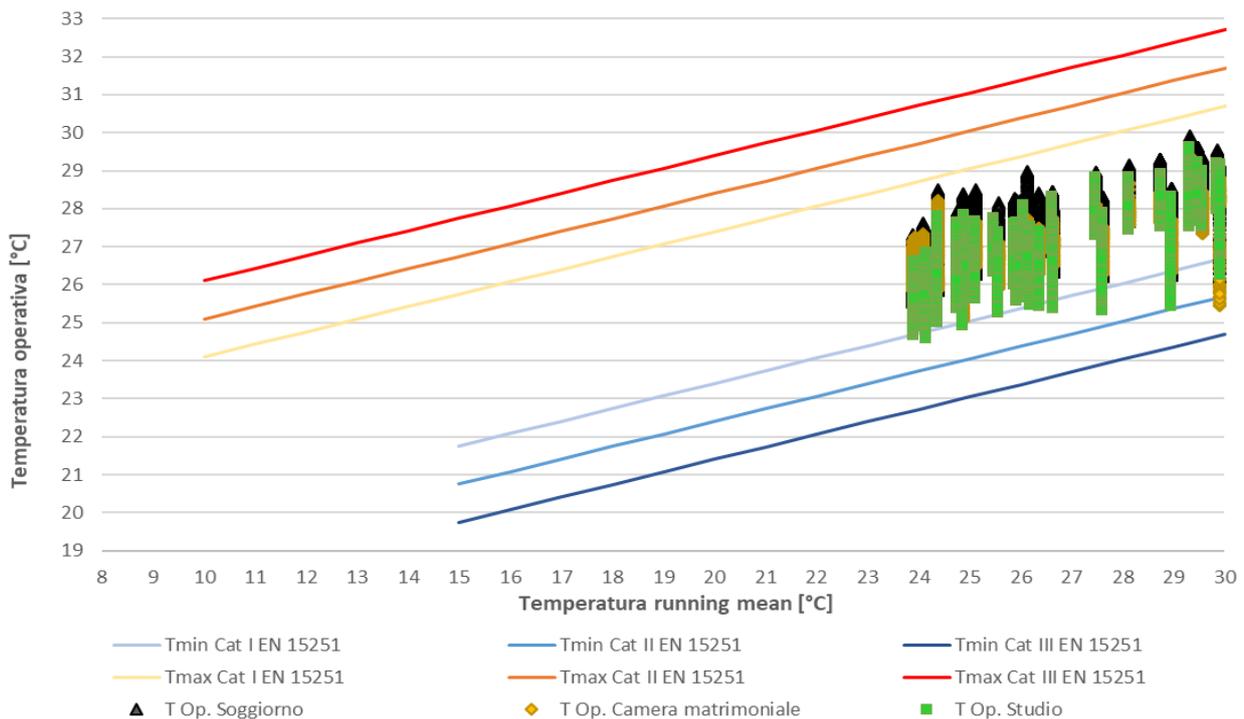


Figura 73. Modello adattivo, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della T_{rm} , agosto 2017.

Considerando il più restrittivo modello di Fanger, la temperatura operativa non rispetta i limiti massimi imposti dal modello. La Figura 74 ne mostra l'andamento. Fino al 12/8, la temperatura operativa dei tre ambienti, è al di sopra del limite massimo imposto dal modello di Fanger. Il 13/8, in corrispondenza di un brusco calo delle temperature esterne, è stata riattivata la ventilazione naturale fino al 15/8, ristabilendo temperature operative più confortevoli, anche se maggiori del limite massimo per la Cat. II, all'interno degli ambienti (che tuttavia non si applica in caso di ventilazione naturale, per cui vale il modello adattivo).

Come per il mese di luglio, l'edificio è stato in grado, in condizioni passive, di rispettare i limiti del modello adattivo e di non scostarsi molto dai limiti, particolarmente stringenti del modello di Fanger. La prima settimana di agosto dimostra invece che, in caso di condizioni climatiche estreme, il controllo dei sistemi dell'edificio risulta essere fondamentale per gestire il microclima interno. In particolare il controllo delle schermature, della ventilazione, dello scambiatore interrato e della pompa di calore. Le scelte dell'utente, in questa specifica settimana non hanno permesso di adottare un controllo ottimale, tuttavia, come già detto, gli occupanti non hanno riportati particolari sensazioni di discomfort, nonostante le elevate temperature esterne.

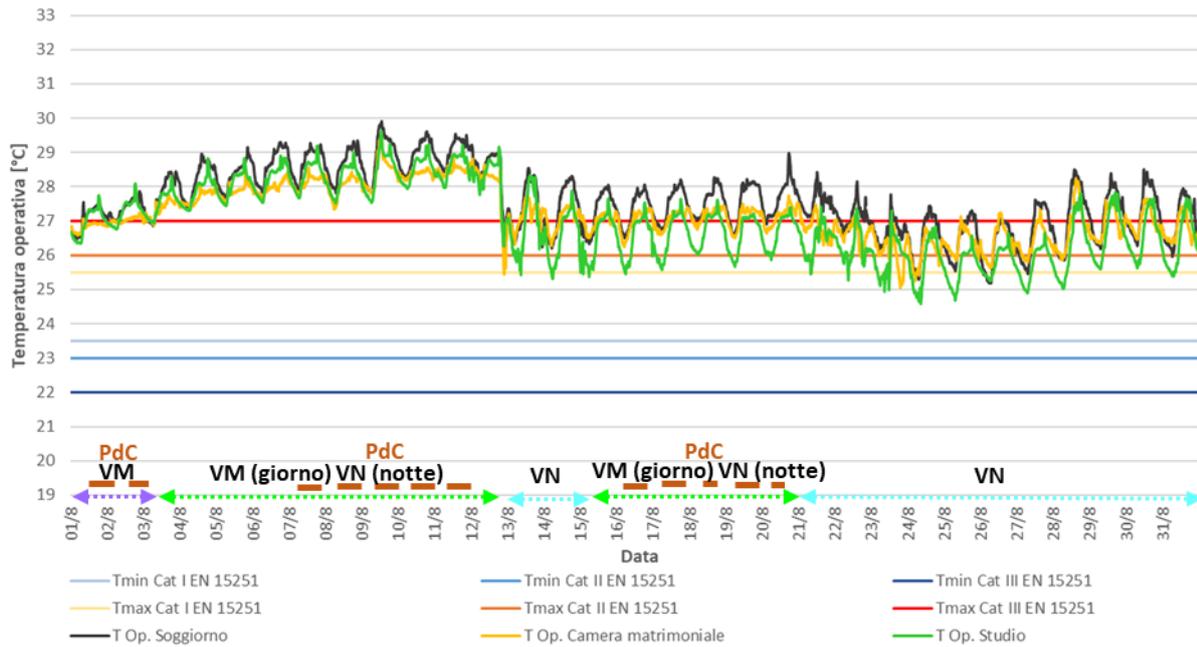


Figura 74. Modello di Fanger, temperatura operativa di soggiorno, camera matrimoniale, studio, agosto 2017.

La Figura 75 riporta l'analisi della temperatura operativa dei tre ambienti in funzione della temperatura media giornaliera esterna e ribadisce le considerazioni fatte poc'anzi. Per la maggior parte del mese, la temperatura operativa degli ambienti interni, è risultata essere maggiore di 26 °C, tuttavia non sono riscontrabili picchi particolarmente alti e quindi critici per gli utenti, che anzi hanno preferito perseguire azioni di climatizzazione passiva, tramite ventilazione naturale.

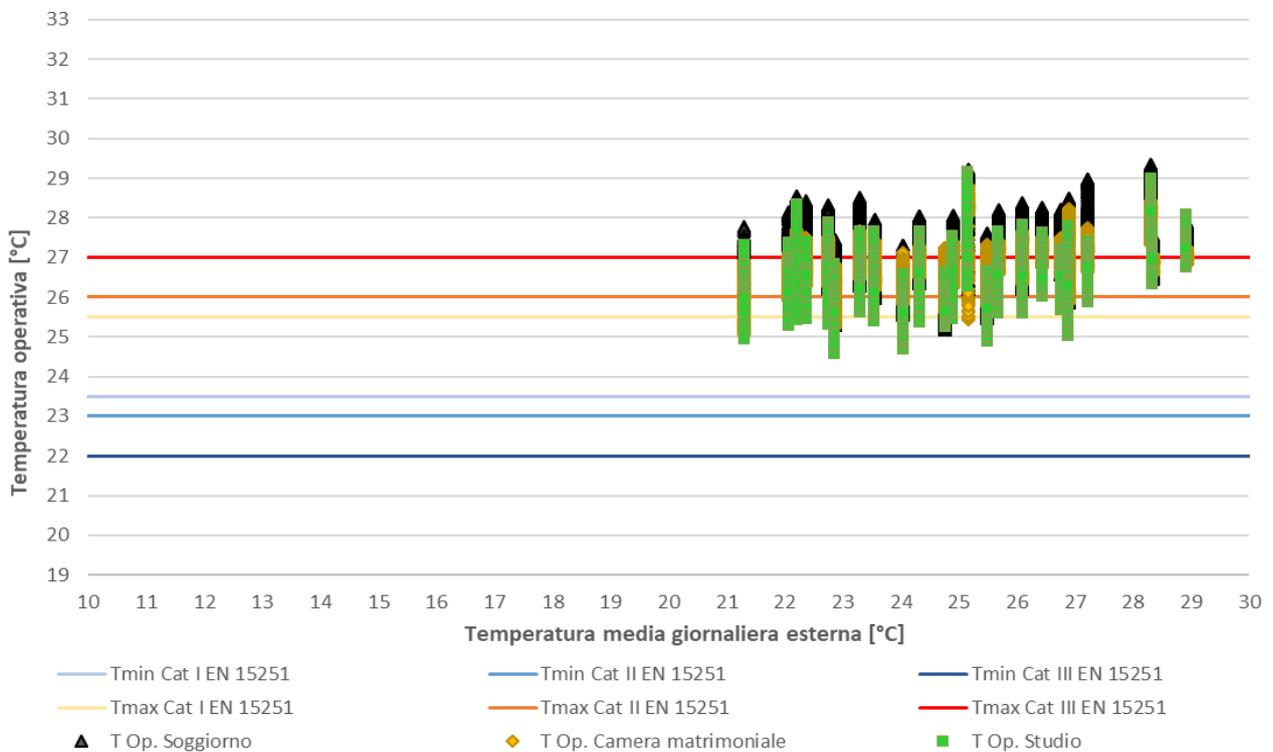


Figura 75. Modello di Fanger, temperatura operativa soggiorno, camera matrimoniale, studio, in funzione della temperatura media giornaliera esterna, agosto 2017.

3 Conclusioni

Il rapporto tecnico ha presentato le analisi svolte riguardo le prestazioni, in condizioni di funzionamento estive, di un edificio residenziale certificato Passivhaus, in esercizio in clima mediterraneo. La verifica e l'aggiornamento del sistema di acquisizione dati, oltreché l'implementazione delle logiche di controllo, hanno permesso il monitoraggio dei dati energetici ed ambientali dell'edificio.

Sono state analizzate le dinamiche di consumo e produzione di energia elettrica e le condizioni climatiche e di benessere termico all'interno dell'abitazione oggetto di studio. Queste sono state analizzate in relazione alle condizioni al contorno, ovvero condizioni climatiche esterne, condizioni di occupazione e logiche di controllo impostate, dal 18 giugno al 31 agosto.

Le logiche di controllo attuate, hanno favorito per quanto possibile, soluzioni passive e a basso uso di energia. Solo quando le soluzioni passive non sono state sufficienti a mantenere i valori stabiliti dei parametri ambientali, sono state attivate soluzioni di tipo attivo. Tutte le logiche di controllo impostate, possono prevedere il settaggio dei principali parametri e permettono l'interazione con le scelte e le preferenze degli occupanti. Questa caratteristica tipica per living labs, quale l'edificio oggetto di studio, permette di osservare anche la risposta dell'utente alle logiche impostate; se da una parte ciò può portare a condizioni meno controllate, dall'altra consente il monitoraggio del comportamento degli occupanti e l'osservazione delle loro reazioni.

La ventilazione meccanica ha seguito una logica di controllo di tipo *Demand controlled mechanical ventilation* che ha permesso il controllo della portata d'aria in funzione di alcune variabili ambientali (CO_2 e temperatura in questo caso), mentre l'accensione della PdC è stata governata dalla logica denominata *Cooling 2*, operante secondo condizioni derivanti dalla temperatura selezionata come rappresentativa dell'ambiente interno e della temperatura di set point impostata ($26\text{ }^\circ\text{C}$).

Le attività di analisi svolte, hanno permesso di studiare gli effetti che le differenti logiche di controllo impostate, le condizioni climatiche e le condizioni di occupazione, hanno sulle prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio.

Complessivamente si è registrata, nel periodo oggetto di studio, un uso di energia elettrica pari a $1\,275,9\text{ kWh}$, più basso della produzione di energia elettrica pari a $3\,086,4\text{ kWh}$. Si riscontra pertanto che globalmente la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è stata maggiore dell'uso di energia per la totalità dei servizi energetici. Questo è visibile in termini di energia elettrica giornaliera prodotta e usata, nel grafico in Figura 77. In particolare, considerando i due mesi monitorati nella loro interezza, si nota che in luglio la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata pari a $1\,298,5\text{ kWh}$ (corrispondente a $9,0\text{ kWh/m}^2$ di superficie netta climatizzata) mentre l'uso di energia elettrica per tutti i servizi è stata pari a $440,4\text{ kWh}$ (corrispondente a $3,1\text{ kWh/m}^2$ di superficie netta climatizzata). In agosto la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata pari a $1\,244,8\text{ kWh}$ (corrispondente a $8,6\text{ kWh/m}^2$ di superficie netta climatizzata) mentre l'uso di energia elettrica è stata pari a $682,5\text{ kWh}$ (corrispondente a $4,7\text{ kWh/m}^2$ di superficie netta climatizzata).

Considerazioni analoghe possono essere sviluppate anche in termini di potenza elettrica prodotta e richiesta, come visibile nella Figura 76, dove si vede che il mese di agosto è stato quello con profilo di potenza elettrica richiesta più elevato, per l'occupazione continuativa e le più le più critiche condizioni climatiche esterne.

Si è visto come la produzione giornaliera di energia dal sistema fotovoltaico in copertura sia sempre stata maggiore dell'uso giornaliero di energia per tutti i servizi, come rappresentato esplicitamente in Figura 77 ed implicitamente dal valore del rapporto di queste due grandezze in Figura 77.

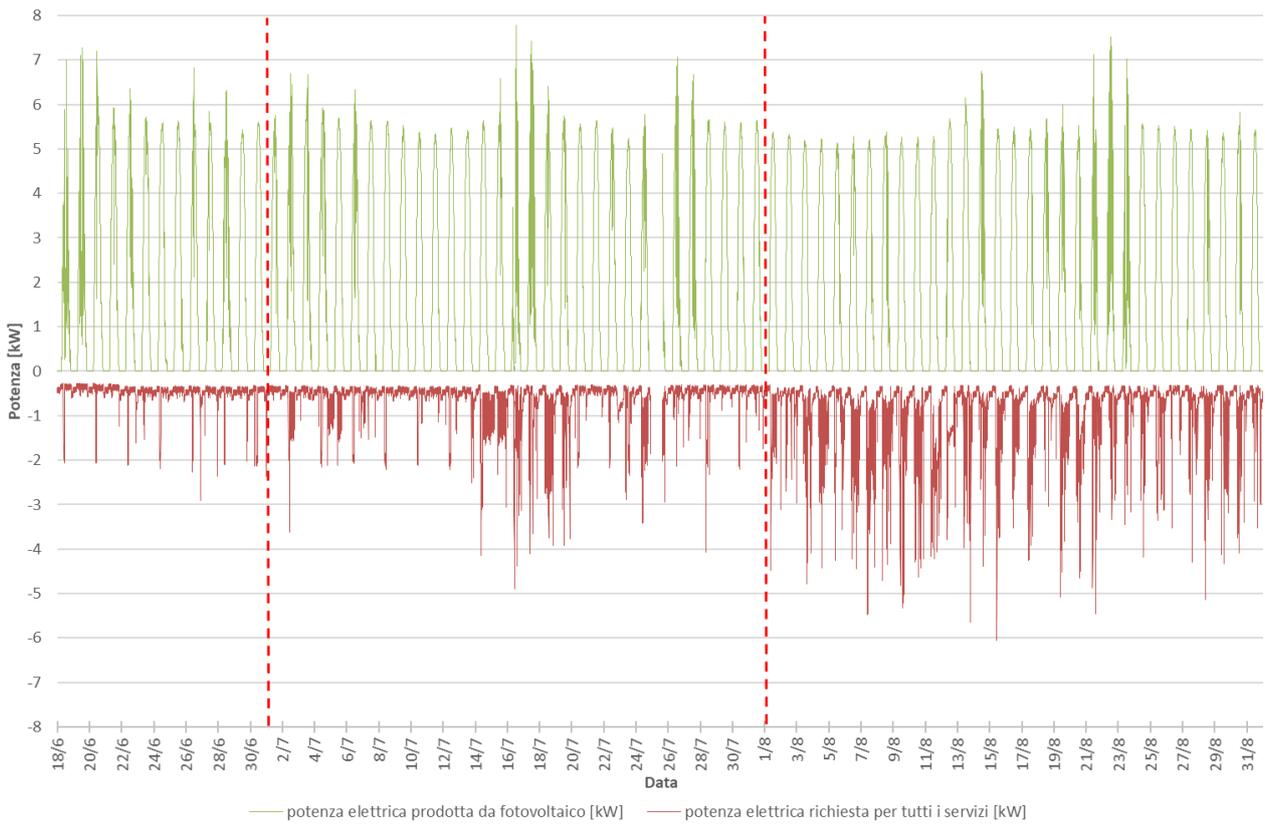


Figura 76. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti i servizi dell'edificio.

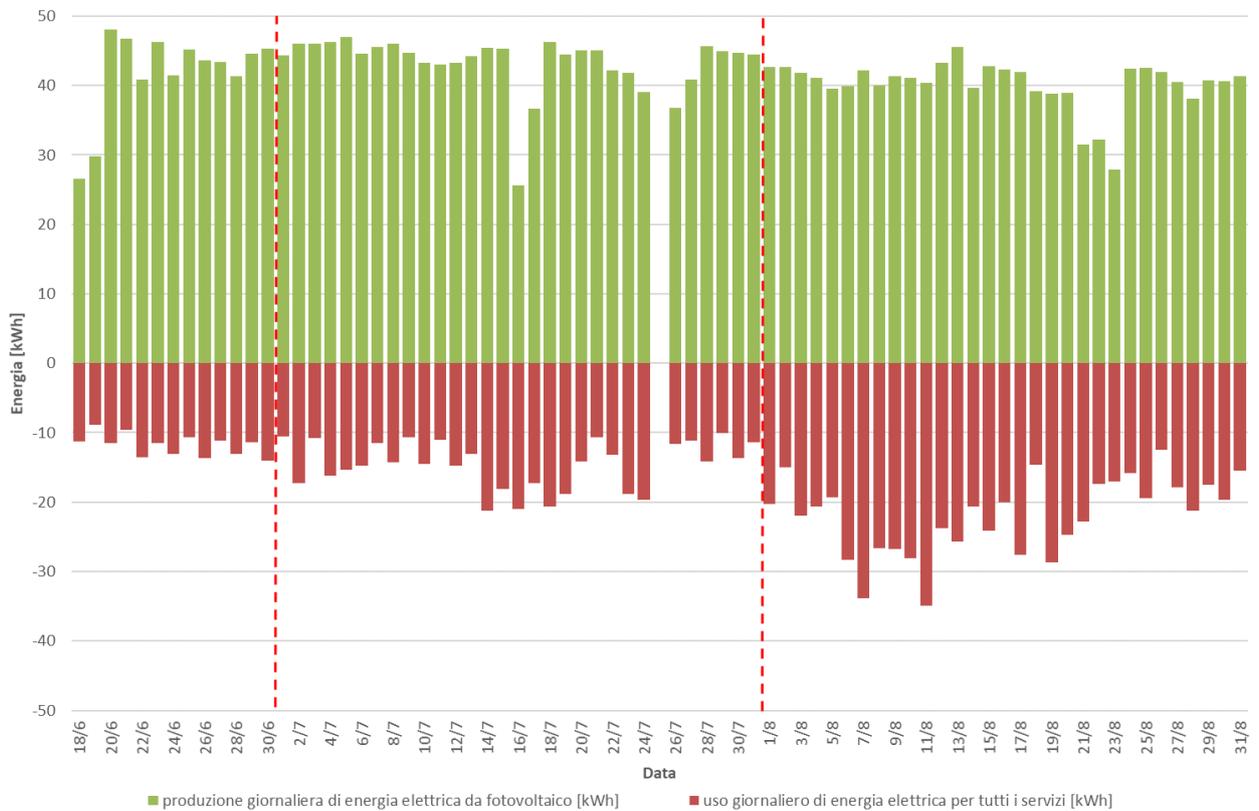


Figura 77. Produzione ed uso di energia elettrica giornaliera per tutti i servizi.

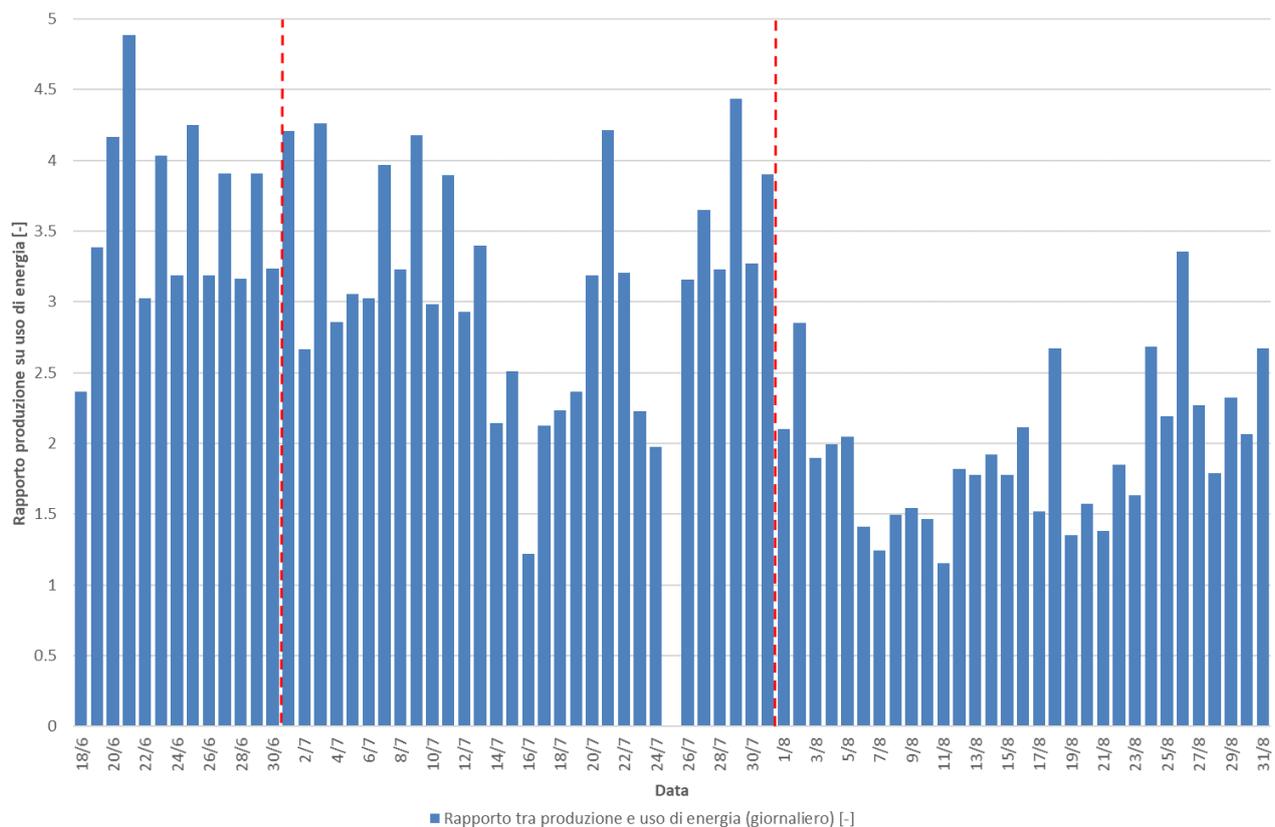


Figura 78. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia per tutti i servizi.

Le analisi dei dati ambientali interni e di comfort, estese a tutto il periodo, hanno permesso di trarre importanti indicazioni sulle prestazioni dell'edificio in condizioni di funzionamento estive.

Durante il periodo di monitoraggio, le temperature esterne sono state poco costanti, registrando ciclici aumenti e diminuzioni. Tuttavia, l'edificio ha registrato buone condizioni di comfort interno, anche con temperature esterne superiori ai 36 °C e durante periodi prolungati in cui l'edificio è stato gestito in regime completamente passivo (free-floating).

Le condizioni esterne più sfavorevoli sono state registrate nella prima parte di agosto, quando, anche durante la notte, le temperature esterne sono rimaste molto vicine al valore di set-point del sistema di climatizzazione (26 °C). L'edificio in quei giorni è stato sottoposto a condizioni al contorno particolarmente difficili, non solo in termini di clima esterno, ma anche di occupazione, che è stata più continua e regolare. Inoltre, anche il settaggio non ottimale delle lamelle delle schermature solari durante la notte ha reso il raffrescamento passivo dell'edificio particolarmente difficile e inefficace.

I risultati ottenuti dall'analisi di comfort ambientale dei tre mesi, ed in particolare per il mese di agosto, ha evidenziato, tuttavia, che l'edificio è in grado di rispettare, anche in condizioni passive, le indicazioni del modello adattivo e di non scostarsi troppo del modello di Fanger, sviluppato per destinazioni d'uso diverse da quella residenziale e per condizioni al contorno strettamente controllate.

Sebbene nel mese di agosto, le temperature operative si siano allontanate dai limiti di comfort suggeriti dal modello di Fanger, gli occupanti dell'edificio non hanno riportato particolari sensazioni di discomfort. Inoltre, la stessa analisi effettuata con il modello adattivo, ha mostrato il pieno rispetto dei limiti di temperatura, rispecchiando maggiormente la percezione che gli occupanti hanno mostrato nei confronti dell'ambiente circostante.

L'analisi condotta mostra quindi, come il modello adattivo, che vede l'occupante come un soggetto attivo che interagisce con l'ambiente che lo circonda, possa rispecchiare maggiormente la percezione delle persone, nella destinazione d'uso residenziale, anche se il comfort estivo è mantenuto per certi periodi, mediante strategie di raffrescamento attivo.

Un quadro generale delle condizioni di temperatura operativa interna registrate nei tre ambienti rappresentativi dell’edificio durante l’intero periodo di monitoraggio, possono essere riassunte attraverso la Figura 79, che riporta la frequenza relativa (a sinistra) e cumulata (a destra) delle temperature operative interne.

I risultati ottenuti mostrano come la concentrazione principale delle temperature all’interno dei tre ambienti sia risultata nell’intervallo tra 26 °C e 27 °C (poco più del 35 % dei valori per il soggiorno e studio, e del 43 % circa per la camera matrimoniale), temperature operative adeguate in condizioni estive.

Sul totale delle misure, il soggiorno ha registrato il 58 % dei valori di temperatura sotto i 27 °C e circa l’85 % dei valori sotto i 28 °C. La camera matrimoniale e lo studio hanno registrato, invece, rispettivamente il 71 % e il 69 % di temperature minori di 27 °C, ed il 91 % e 90 % di temperature sotto i 28 °C.

I periodi di potenziale discomfort, per altro non percepito dagli occupanti, si limitano a valori nettamente al di sotto del 5 %, e permettono di concludere che l’edificio ha mostrato condizioni confortevoli durante l’intero periodo estivo. Un’ulteriore raffinazione del sistema di controllo potrebbe condurre a risultati ancora migliori.

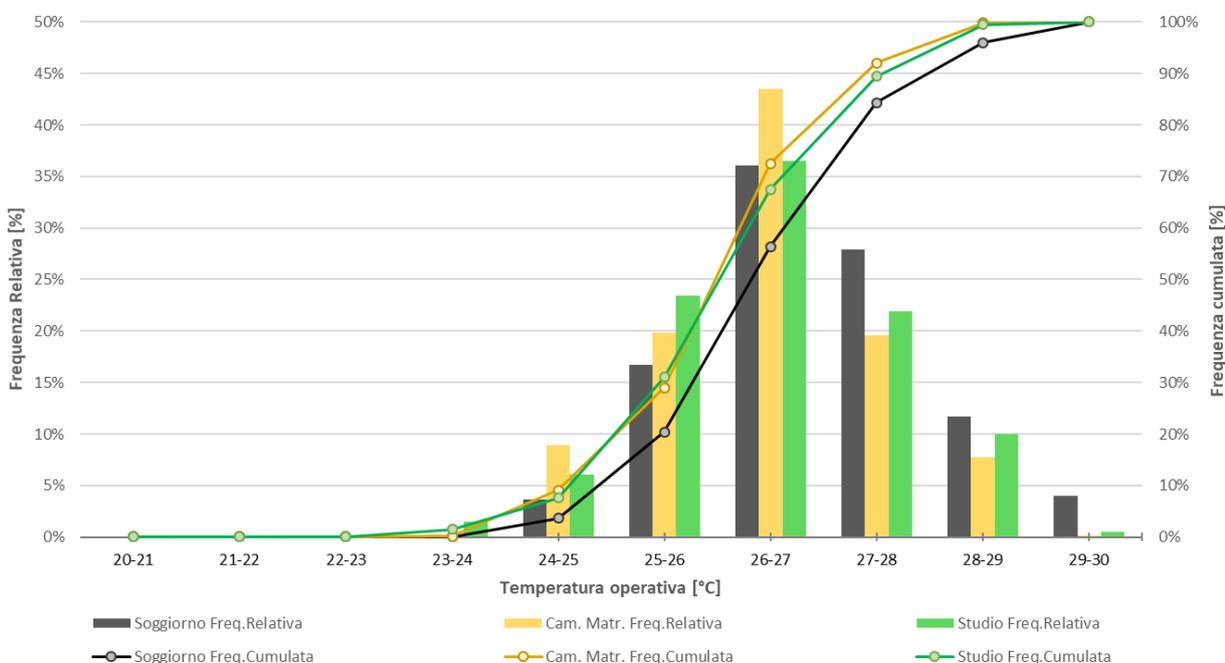


Figura 79. Frequenza relativa e cumulata delle temperature registrate durante il periodo di studio.

Gli sviluppi futuri dell’attività potranno includere l’analisi delle prestazioni energetiche e di comfort dell’edificio anche nelle condizioni di riscaldamento e nelle stagioni intermedie, così da valutare il comportamento dell’edificio nelle diverse condizioni climatiche e da avere un quadro complessivo relativo all’intero anno.

Sarà importante continuare ad applicare le logiche di controllo implementate, ottimizzandone il settaggio dei parametri.

Potranno anche essere approfondite le analisi di interazione con la rete per valutare l’implementazione di un sistema di accumulo dell’energia elettrica e le logiche di controllo per il suo sfruttamento ottimale.

4 Riferimenti bibliografici

1. European Parliament (2010). EPBD recast, Directive 2010/31/EU of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union.
2. EN ISO 52000 (2017). Energy performance of buildings - Overarching EPB assessment -- Part 1: General framework and procedures; Part 2: Explanation and justification of ISO 52000-1. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
3. Christina, J. Hopfe, Robert, S. McLeod. (2015). The Passivhaus Designer S Manual: A Technical Guide to Low and Zero Energy Buildings. London : Routledge.
4. eERG. 2007. <http://www.eerg.it/passive-on.org/it/>
5. Ford, B., Schiano-Phan, R., Zhongcheng, D. (2007). Lo standard PassivHaus nei climi caldi europei. Linee guida progettuali per case confortevoli a basso consumo energetico. Parte 1: principi e concetti. School of the Built Environment, Università di Nottingham.
6. ASHRAE 135-2016. Standard 135-2016 - BACnet-A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks.
7. EN ISO 16484-3:2005. Building automation and control systems (BACS) - Part 3: Functions
8. EC 2013. Report from the Commission to the European Parliament and the Council on financial support for energy efficiency in buildings. Disponibile in: http://www.eib.org/epec/ee/documents/report_financing_ee_buildings_com_2013_225_en.pdf
9. Assessorato dell'energia e dei servizi di pubblica utilità. Dipartimento dell'Energia-Osservatorio regionale ed Ufficio statistico per l'energia (2016). Rapporto Energia 2016 – Monitoraggio sull'energia in Sicilia. Regione Sicilia.
10. http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCCV_CNSENRG
11. UNI/TS 11300 (2008). Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale. - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria. Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
12. Schnieders J, Hermelink A. (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. Energy Policy; 34:151e71.
13. Feist, W., Peper, S. and Gorg, M. (2001). CEPHEUS Project Information No. 36: Final technical report. Darmstadt: Passive House Institute.
14. Salom, J., Marszal, A. J., Widén, J., Candanedo, J., & Lindberg, K. B. (2014). Analysis of load match and grid interaction indicators in net zero energy buildings with simulated and monitored data. Applied Energy, 136, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.018>
15. Salom, J., Widén, J., Candanedo, J. a, Sartori, I., Voss, K., & Marszal, A. J. (2011). Understanding Net Zero Energy Buildings: Evaluation of load matching and grid interaction indicators. Proceedings of Building Simulation, 6, 14–16. <https://doi.org/ISBN:9870646565101>
16. EN 15251. 2007. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, Brussels.
17. ISO 7726. 1998. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

5 Appendice

Il gruppo di lavoro impegnato nell'attività:

eERG è il Gruppo di ricerca sull'efficienza negli usi finali dell'energia, attivo dal 1996 presso il Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano. eERG è stata ed è attualmente impegnata in attività di ricerca sui edifici Passive House e nearly Zero Energy, partecipando a diversi progetti di ricerca europei e internazionali, occupandosi di monitoraggio di edifici a energia zero, supporto all'ottimizzazione dei controlli per impianti ed edifici, simulazione energetica dinamica, supporto alla progettazione, applicazione di tecniche di ottimizzazione per la progettazione. - www.eerg.it.