



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi annuale delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche in clima mediterraneo

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

ANALISI ANNUALE DELLE PRESTAZIONI DI UN EDIFICIO AD ALTE PERFORMANCE ENERGETICHE IN CLIMA MEDITERRANEO

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

(Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: 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

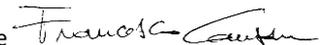


Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione per una attività di ricerca dal titolo "Analisi annuale delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche in clima mediterraneo"

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 CONDIZIONI AL CONTORNO.....	8
2.1 CONDIZIONI CLIMATICHE.....	8
2.2 OCCUPAZIONE.....	12
2.3 LOGICHE DI CONTROLLO.....	13
3 ANALISI DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE SU BASE ANNUALE E STAGIONALE.....	23
4 ANALISI DI DETTAGLIO DEI PRINCIPALI USI ENERGETICI FINALI.....	30
5 STUDIO PRELIMINARE PER UN SISTEMA DI ACCUMULO ELETTRICO.....	40
6 ANALISI DELLE CONDIZIONI DI COMFORT AMBIENTALE SU BASE ANNUALE E STAGIONALE.....	48
7 CONCLUSIONI.....	53
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	56
9 APPENDICE.....	58

Sommario

Il documento presenta i risultati dell'analisi annuale e stagionale di un edificio ad alte performance energetiche in clima mediterraneo. L'edificio, situato nel comune di Mascali (CT) in Sicilia, rappresenta un esempio di laboratorio vivente (living lab) e di nearly Zero Energy Building (nZEB) per le elevate prestazioni dell'involucro e dei sistemi installati. Esso ha infatti raggiunto la certificazione Passivhaus.

L'attività svolta ha permesso di monitorare ed analizzare le dinamiche di uso e di produzione di energia elettrica oltreché le prestazioni di comfort termico nell'edificio in condizioni di funzionamento estive e invernali, nel periodo compreso tra luglio 2017 e giugno 2018. Le analisi energetiche ed ambientali sono state svolte in relazione alle reali condizioni di occupazione dell'edificio, alle condizioni climatiche esterne e alle logiche di controllo impostate per la regolazione della ventilazione naturale, meccanica, e del raffrescamento e riscaldamento attivo con pompa di calore. In tutti i mesi dell'anno, tranne che in quelli invernali più freddi (da novembre a febbraio), la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata maggiore dell'uso per la totalità dei servizi dell'edificio. I mesi invernali sono infatti caratterizzati da un maggior uso di energia elettrica per il riscaldamento e la produzione acqua calda sanitaria da pompa di calore e allo stesso tempo da una più bassa produzione di energia elettrica da fotovoltaico per minor disponibilità di radiazione solare. L'analisi di dettaglio dei principali usi dell'edificio ha evidenziato però che, nonostante l'attivazione più frequente della pompa di calore durante i mesi invernali più freddi, il sistema che comprende le funzioni di domotica, monitoraggio, antifurto e videosorveglianza, per il suo funzionamento in continuo, pesa annualmente in modo quantitativamente analogo sulla totalità degli usi di energia. Dato il rapporto vantaggioso tra produzione in situ ed uso e al fine di valutare strategie per migliorare l'accordo temporale tra generazione e uso di energia, sono stati definiti oltre al profilo annuale, quelli tipici (medi mensili) di uso di energia elettrica giornalieri dell'edificio, per ciascun mese monitorato. Questi, insieme a quelli di produzione del fotovoltaico, possono essere utili per il dimensionamento di accumuli realizzati per massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta in situ, o per ottimizzare il funzionamento delle reti energetiche a livello di quartiere e città, nel caso di scenari futuri in cui la diffusione di edifici ad alte prestazioni incrementi significativamente. In particolare, è stato condotto uno studio preliminare per l'individuazione della taglia ottimale di un sistema di accumulo elettrico da installarsi a supporto del sistema fotovoltaico, considerando il profilo annuale di produzione di energia elettrica da fotovoltaico ed il profilo annuale dell'uso di energia elettrica per tutti i servizi dell'edificio.

Dal punto di vista del comfort ambientale l'edificio è stato verificato secondo il metodo di Fanger durante la stagione di riscaldamento e secondo il metodo adattivo per tutto il resto dell'anno. L'edificio ha presentato un buon comportamento durante tutti i mesi, riscontrando qualche criticità in regime invernale solo all'interno di una stanza all'estremità nord-ovest della casa, dove sono stati registrati valori di temperatura operativa considerevolmente oscillanti sia verso i limiti inferiori che superiori. Tuttavia, questo ambiente è sporadicamente occupato e presenta un rapporto tra superfici di involucro trasparente e opaco di gran lunga maggiore rispetto agli altri ambienti della casa, i quali hanno presentato un buon comportamento anche in caso di condizioni climatiche molto sfavorevoli durante tutto l'anno.

1 Introduzione

Il tema della riduzione dei consumi energetici degli edifici è diventato di primaria importanza all'interno dell'Unione Europea, poiché il settore edilizio è responsabile di circa il 40 % dell'uso totale di energia e di un terzo delle emissioni di CO₂ [1]. La promozione di edifici ad alte prestazioni energetiche, il cui fabbisogno di energia deve essere coperto in maniera significativa da fonti rinnovabili, è diventata pertanto un'azione centrale nelle politiche di ogni stato membro, in particolare dopo l'entrata in vigore della direttiva europea 2010/31 [2] sulle prestazioni energetiche degli edifici. La direttiva mira infatti alla diffusione di edifici energeticamente sempre più autonomi ed in grado di produrre energia in sito massimizzandone l'autoconsumo, anche con ricorso a sistemi di accumulo elettrico e/o termico.

Se l'aumento dello sfruttamento delle fonti di energia rinnovabile è un fattore indubbiamente positivo, esso potrebbe però comportare in futuro una crescente complessità nella gestione delle reti energetiche, poiché l'energia rinnovabile è per sua natura aleatoria e difficilmente programmabile. Questo è un tema particolarmente rilevante in Italia, infatti, secondo il report sulle energie rinnovabili 2018 redatto da REN21 [3], l'Italia è la quinta nel mondo per potenza elettrica installata e la quarta per capacità fotovoltaica pro-capite.

Il dimensionamento di una rete di distribuzione dell'energia a servizio di edifici in grado di produrre energia (oltre che di usarla), richiede studi approfonditi sulle dinamiche di consumo e produzione degli stessi in previsione di una loro ampia diffusione. In un'ottica di demand-response, gli edifici dovranno essere in grado di gestire i propri carichi elettrici o termici in modo coordinato con i requisiti di funzionamento della rete di approvvigionamento energetico. Gli edifici del futuro dovranno pertanto essere flessibili e capaci di adattare l'uso di energia e la produzione in loco in base al contesto climatico, alle esigenze dell'utente e alle richieste della rete. La flessibilità dovrà diventare quindi una caratteristica fondamentale sia degli edifici che delle reti energetiche del futuro.

È in questo scenario che si inserisce l'attuale tema della Smart Grid, un'infrastruttura in grado di monitorare e gestire l'uso di energia a livello di città e/o distretto. Tuttavia, una rete energetica può definirsi propriamente "intelligente" solo quando questa intelligenza si estende sino agli edifici, luogo degli usi finali, che essa connette. Questo presuppone la diffusione di sistemi di controllo degli edifici capaci di impostare logiche attive per la loro gestione sulla base di sensori propriamente installati e logiche predittive sulla base di scenari simulati, serie temporali di uso monitorate, condizioni ambientali al contorno e richieste dei gestori delle reti energetiche. Lo studio e il monitoraggio di edifici reali ad alte prestazioni rappresentano dunque una importante fonte di dati, utile per lo sviluppo e l'implementazione di scenari di consumo per il futuro oltre che per la diffusione di dati di benchmark tuttora difficili da reperire in letteratura, soprattutto per edifici localizzati in clima mediterraneo.

L'intento della presente analisi è la verifica delle prestazioni energetiche e ambientali su base annuale e stagionale di un edificio, certificato Passivhaus, situato a Mascalucia (CT) in Sicilia, con l'obiettivo di studiarne il comportamento rispetto alle logiche di produzione e uso dell'energia e analizzare in dettaglio i principali usi energetici finali, al fine di creare profili sperimentali d'uso energetico ed indici di consumo. L'edificio è stato monitorato da luglio 2017 a giugno 2018 anche dal punto di vista del comfort termico, rispettivamente nei periodi invernale, estivo, e in quelli intermedi. Mascalucia, secondo la classificazione climatica del DPR n°412 del 26-08-1993 [4] è situata in zona climatica C, caratterizzata da 1271 gradi giorno (GG) e periodo di accensione del riscaldamento dal 15 novembre al 31 marzo.

L'edificio ad elevate performance energetiche ed ambientali (Figura 1, Figura 2), è stato concepito come un living lab e permette di testare differenti logiche e strategie di controllo e di studiare la risposta dell'occupante alle stesse. L'edificio accoglie tutti gli ambienti climatizzati nel piano fuori terra, il piano interrato comprende i locali tecnici, di servizio e garage. 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 uno scambiatore interrato terra/aria prima di essere convogliata in un recuperatore di calore a flussi incrociati. Dopo il passaggio nel recuperatore di calore, l'aria di mandata attraversa una batteria ad acqua calda o fredda in base alla stagione e viene infine distribuita in ogni locale. L'impianto è bilanciato e non prevede

ulteriori serrande motorizzate per la regolazione delle portate d'aria nei singoli ambienti o ricircolo dell'aria. Il sistema è concepito in modo da lasciare libero l'utente di scegliere la strategia di ventilazione preferita. Nel caso di apertura delle finestre il sistema di ventilazione meccanica si arresta automaticamente e l'edificio passa quindi in modalità di ventilazione naturale. La batteria aria/acqua dell'impianto di ventilazione e l'impianto di acqua calda sanitaria (ACS) sono serviti da un sistema integrato di un accumulo termico ad acqua (500 litri) alimentato dal circuito primario del sistema solare termico e da una pompa di calore (PdC) elettrica (aria/acqua invertibile). L'edificio è inoltre dotato di un impianto fotovoltaico (8,14 kW di potenza elettrica di picco), installato sulle falde di copertura.

Le superfici finestrate delle stanze sono protette da sistemi di schermatura solare meccanizzati con controllo automatico o manuale. Al fine di garantire un adeguato monitoraggio del microclima interno e qualità dell'aria, in ciascun locale climatizzato sono presenti sensori di temperatura dell'aria, umidità relativa e concentrazione di CO₂, in tre ambienti della casa sono presenti inoltre sensori addizionali (sensore di temperatura dell'aria - PT100 e un globo-termometro) per il calcolo della temperatura media radiante utile per la verifica del comfort termico. Sul tetto è invece installata una centralina climatica che permette il monitoraggio di temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare, precipitazioni, velocità e direzione del vento.

Il sistema di controllo e monitoraggio gestisce le funzioni più tipiche degli ambienti e degli impianti dell'edificio, permette l'implementazione di logiche di controllo più complesse ed il monitoraggio più dettagliato delle prestazioni energetiche e di comfort. La prima parte di gestione delle funzioni tipiche degli ambienti e degli impianti si basa sullo standard Konnex e relativo protocollo di comunicazione, la seconda parte sul protocollo di comunicazione BACnet.



Figura 1. Vista esterna dell'edificio oggetto di studio.

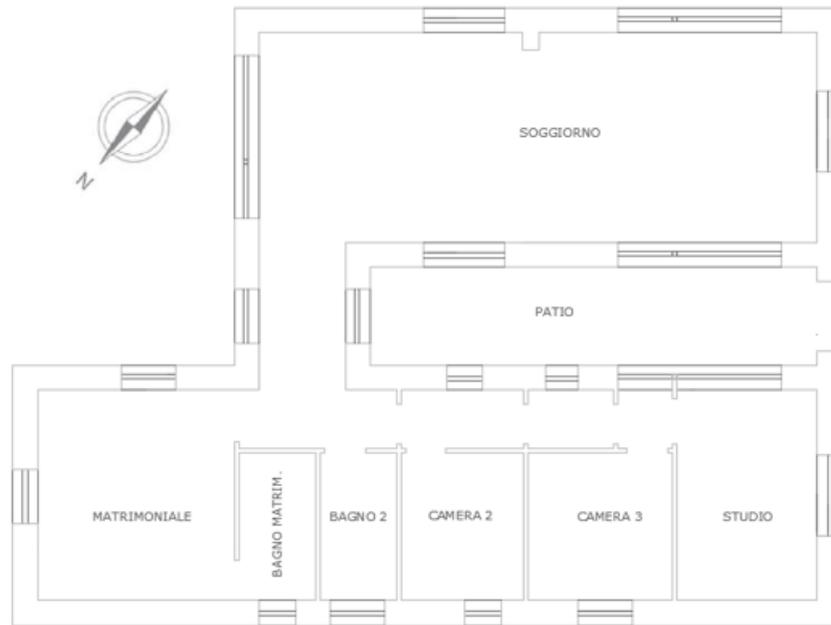


Figura 2. Pianta piano terra edificio

I seguenti capitoli caratterizzeranno le dinamiche di uso e produzione di energia elettrica (Capitolo 3), i profili di carico giornalieri medi per ogni mese monitorato e gli indici specifici di consumo dei principali usi energetici (Capitolo 4), l'analisi preliminare per un sistema di accumulo elettrico (Capitolo 5) e le condizioni di benessere termoigrometrico all'interno dell'abitazione (Capitolo 6). Le analisi sono state sviluppate in relazione alle forzanti climatiche esterne, alle dinamiche di occupazione e alle logiche di controllo descritte nel Capitolo 2.

2 Descrizione delle condizioni al contorno

La campagna di monitoraggio, che ha riguardato il periodo luglio 2017 – giugno 2018, ha permesso di studiare le prestazioni energetiche e ambientali dell'edificio durante i periodi estivo, invernale ed intermedio. Il comportamento dell'edificio è stato analizzato in relazione alle condizioni climatiche esterne, alle condizioni di occupazione dell'edificio e alle logiche di controllo applicate durante tutto il periodo di monitoraggio. L'analisi delle condizioni al contorno registrate nel periodo di monitoraggio rappresenta quindi il riferimento per un'analisi critica degli aspetti energetici ed ambientali.

Tutti i dati analizzati sono stati registrati per mezzo del sistema di monitoraggio e controllo che gestisce sia le funzioni più tipiche degli ambienti che quelle degli impianti. Tutte le grandezze monitorate vengono registrate ogni 5 minuti e sono visualizzabili in tempo reale attraverso l'interfaccia del sistema di controllo e monitoraggio *Desigo™* (Figura 3).



Figura 3. Interfaccia *Desigo™*.

2.1 Condizioni climatiche

Le condizioni climatiche esterne sono state misurate tramite la centralina climatica posizionata sulla copertura dell'edificio, la quale registra i valori di temperatura dell'aria, l'umidità relativa, precipitazioni, radiazione solare e condizioni del vento.

La Figura 4 riporta l'analisi della temperatura massima, minima e i quartili intermedi per ogni mese da luglio 2017 a giugno 2018 e la massima, media e minima temperatura giornaliera registrata durante il periodo di monitoraggio. La Figura 5 riporta invece l'andamento della temperatura registrato ogni 5 minuti durante tutto il periodo di monitoraggio. Le linee verticali in tratteggio rosso presenti all'interno di questa e delle successive figure, individuano la suddivisione dei mesi. Come si può vedere, la temperatura massima (39.3 °C) è stata registrata a luglio 2017. Tuttavia, agosto ha registrato le temperature mediamente più elevate, soprattutto durante la prima parte del mese, quando le temperature si sono mantenute elevate anche durante la notte. A partire dalla prima metà di agosto le temperature, con qualche fluttuazione, hanno subito un calo fino a raggiungere i mesi invernali nei quali sono state registrate le temperature più rigide (0.5 °C) a dicembre 2017 e febbraio 2018. Il mese di marzo ha registrato temperature più alte durante tutta la prima parte del mese, raggiungendo temperature dell'ordine di 24 °C circa. Durante la seconda parte del mese la temperatura ha poi subito un brusco calo raggiungendo un minimo di 2.1 °C, per poi crescere fino agli inizi di maggio e di nuovo fino agli inizi di giugno. Deve essere inoltre notato che l'intervallo di variazione della temperatura (massimo-minimo) è considerevolmente più ampio nei mesi

estivi che in quelli invernali (Figura 4), questo indica condizioni al contorno favorevoli alla ventilazione naturale notturna in fase di climatizzazione estiva.

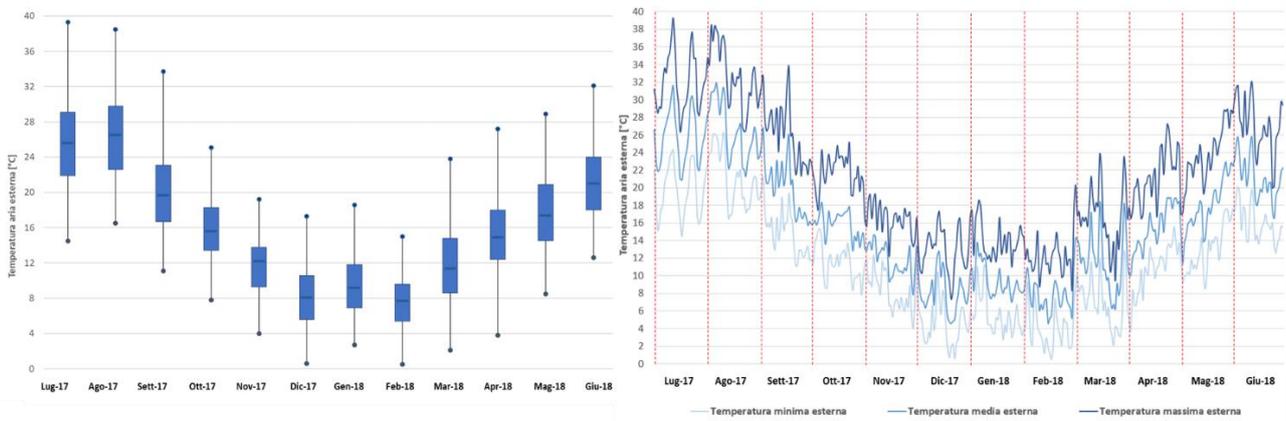


Figura 4. Temperatura aria esterna: massima, media e quartili intermedi per ogni mese (sinistra); massima, media, minima temperatura giornaliera esterna registrata da luglio 2017 a giugno 2018 (destra).

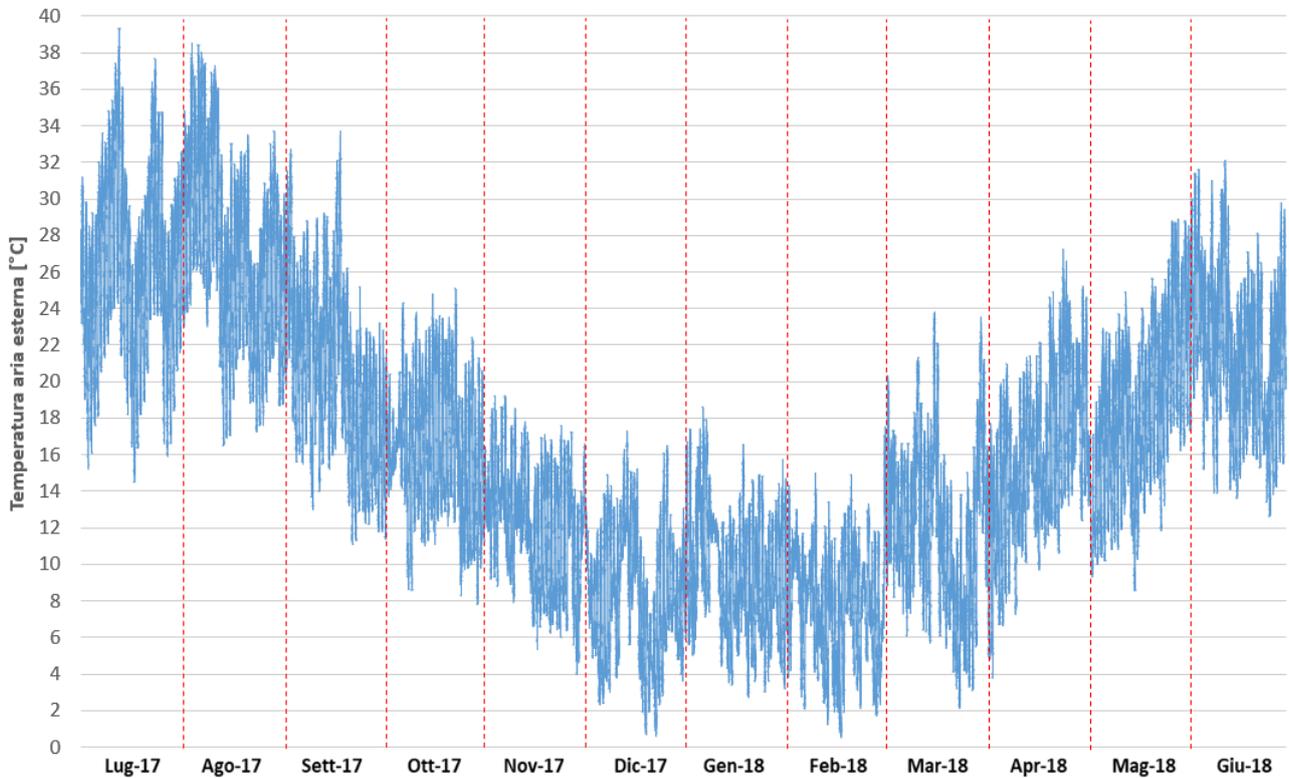


Figura 5. Temperatura aria esterna registrata da luglio 2017 a giugno 2018.

L'andamento dell'umidità relativa esterna (Figura 6, Figura 7) è correlato a quello della temperatura ed influenzato in modo evidente anche dagli eventi di precipitazione registrati durante tutto il periodo di monitoraggio. Durante i mesi di luglio e agosto 2017, quando sono state registrate temperature molto elevate, l'umidità relativa si è mantenuta per la maggior parte del tempo tra il 13 % e il 60 % circa, con esclusione dei periodi in cui si sono verificati eventi piovosi, durante i quali l'umidità relativa è aumentata bruscamente. Tra settembre e ottobre l'umidità relativa si è mantenuta sempre su valori elevati a causa dei frequenti rovesci (Figura 8). Infine, in corrispondenza delle elevate temperature registrate a fine aprile e all'inizio di maggio, l'umidità relativa ha registrato valori molto bassi prossimi al 20-30 %.

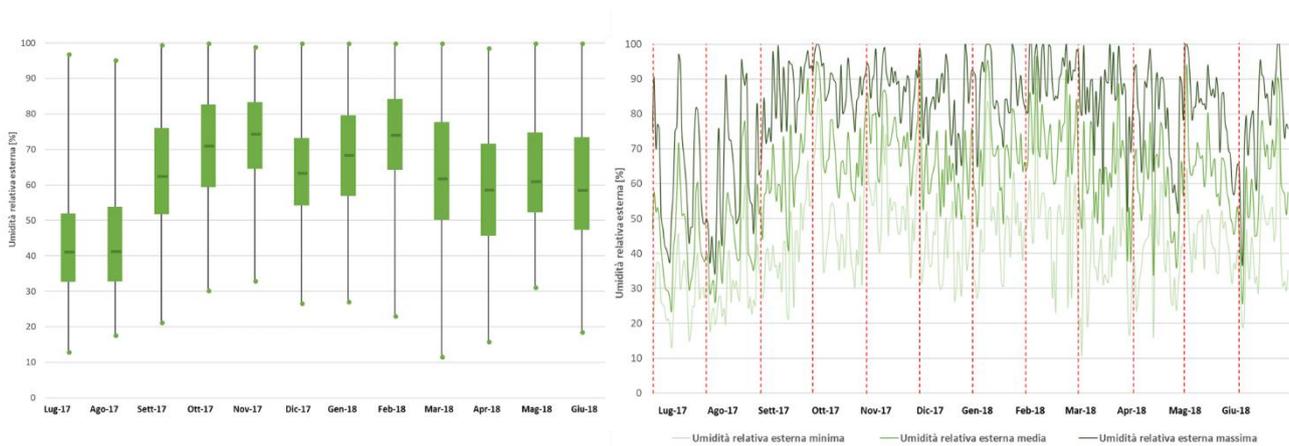


Figura 6. Umidità relativa aria esterna: massima, media e quartili intermedi per ogni mese (sinistra); massima, media, minima umidità relativa giornaliera esterna registrata da luglio 2017 a giugno 2018.

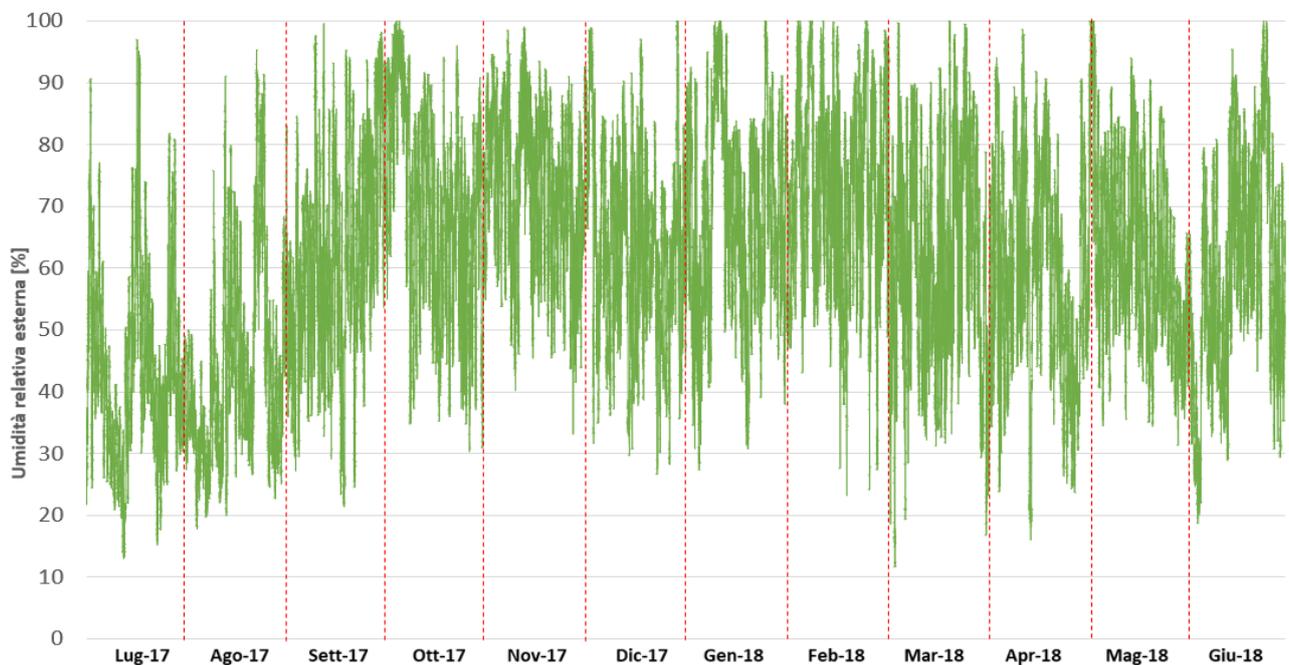


Figura 7. Umidità relativa aria esterna registrata da luglio 2017 a giugno 2018.

La Figura 8 mostra, in blu, i millimetri di pioggia orari registrati durante tutto il periodo di monitoraggio. Tra settembre ed ottobre si sono registrati intensi eventi piovosi raggiungendo circa 23 mm di pioggia orari. Frequenti precipitazioni sono state registrate nei mesi di novembre, gennaio e febbraio.

I valori di radiazione solare globale sul piano orizzontale (Figura 9), oltre a dipendere dal ciclo stagionale, mostrano un andamento correlato alla presenza di precipitazioni a causa dell'elevato indice di copertura del cielo durante gli eventi piovosi. Si veda, ad esempio, l'oscillazione dei valori di radiazione solare nei mesi di novembre, gennaio e febbraio, oltre che tra settembre e ottobre. In presenza di cielo sereno la radiazione solare mostra invece un andamento abbastanza 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. Il valore di radiazione solare massima è stato registrato a maggio 2018 ed è pari a 997 W/m^2 .

Sono state infine analizzate le caratteristiche del vento durante tutto il periodo di monitoraggio attraverso la costruzione di una rosa dei venti riportata in Figura 10. I diversi colori rappresentano i valori di velocità del vento registrati, in metri al secondo (m/s), come da legenda a destra della figura. Durante i mesi monitorati, sono stati registrati venti provenienti prevalentemente da Sud-Ovest e Sud con velocità medie dell'ordine di 1 – 2 (m/s), ed in generale sempre minori di 8 (m/s).

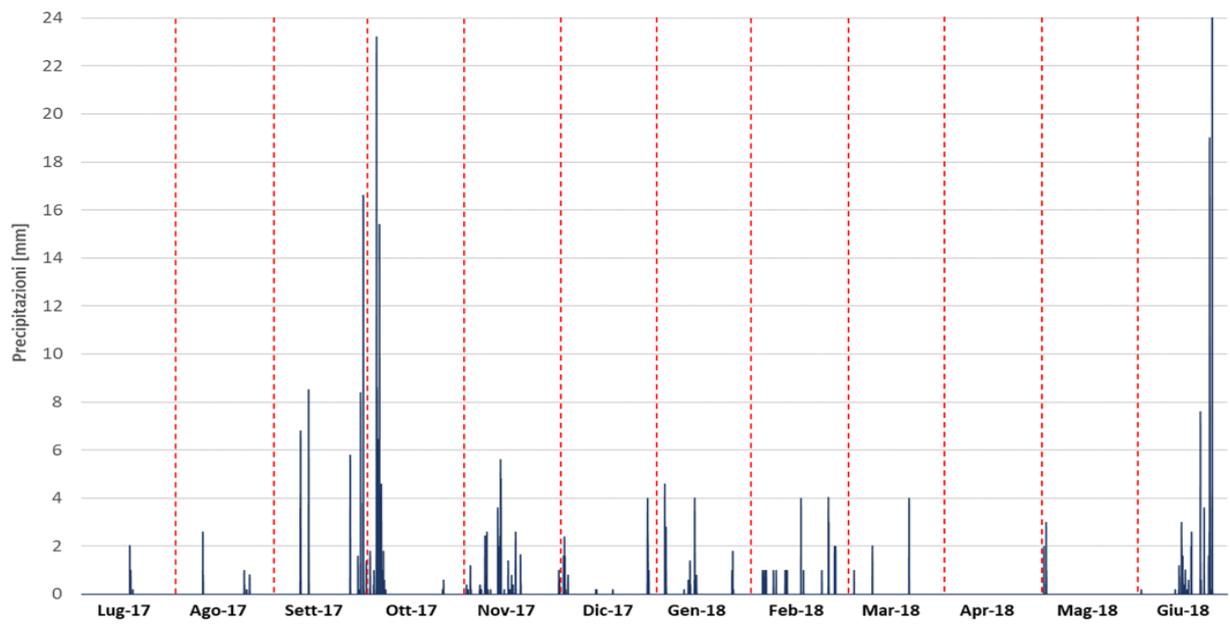


Figura 8. Precipitazioni, mm di pioggia registrati da luglio 2017 a giugno 2018.

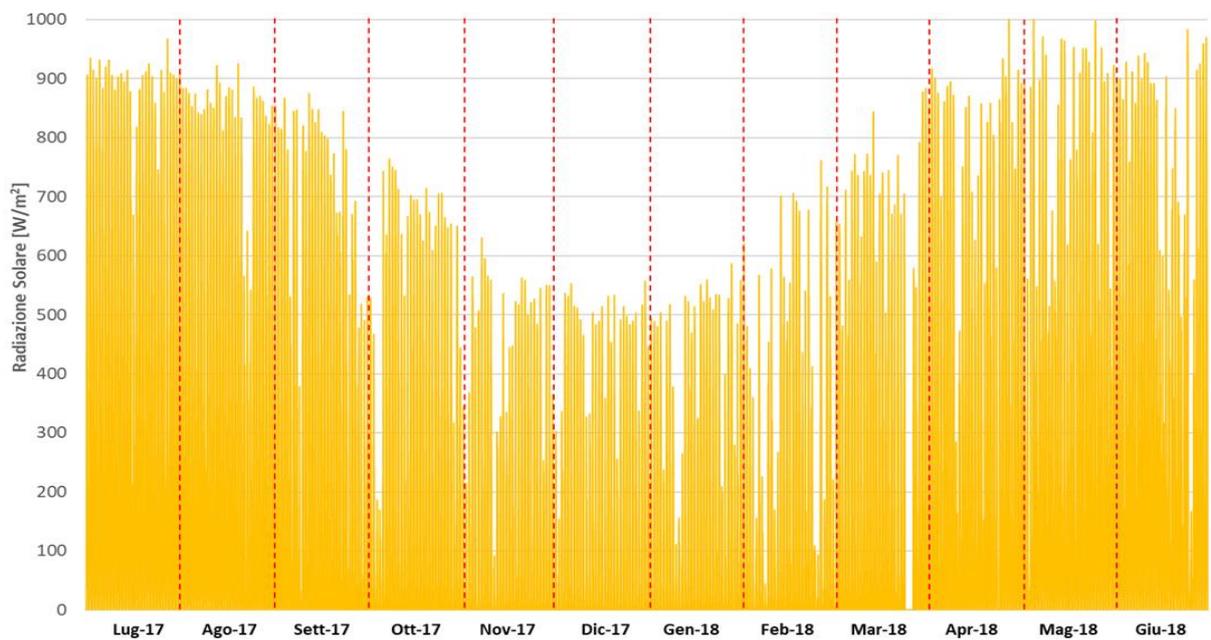


Figura 9. Radiazione solare globale registrata da luglio 2017 a giugno 2018.

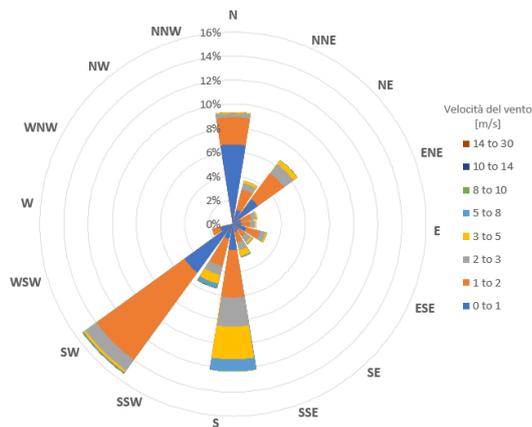


Figura 10. Rosa dei venti.

2.2 Occupazione

Le prestazioni dell'edificio durante il periodo di monitoraggio sono state studiate anche in relazione alle condizioni di occupazione. Gli utenti infatti, coerentemente con la logica di funzionamento di un living lab, possono condizionare le prestazioni dell'edificio modificando le logiche di controllo impostate secondo le loro preferenze.

Dall'analisi dei dati di monitoraggio dell'uso di energia elettrica di alcuni elettrodomestici (e.g. si veda in Figura 11 la potenza richiesta per il forno e la lavatrice da luglio 2017 a giugno 2018) e attraverso l'intervista degli occupanti dell'edificio, sono state definite le condizioni di occupazione dell'edificio durante il periodo di monitoraggio. Tali condizioni sono state riassunte per semplicità in Figura 12. L'occupazione è stata abbastanza regolare e continua nei mesi invernali, primaverili e autunnali (di seguito chiamati periodi intermedi), mentre è stata più variabile durante i mesi estivi. A luglio 2017 e a giugno 2018 infatti, si è registrata un'occupazione sporadica, mentre ad agosto 2017 l'occupazione è stata più regolare. L'edificio non è stato occupato durante alcuni giorni di settembre (7-11 settembre).

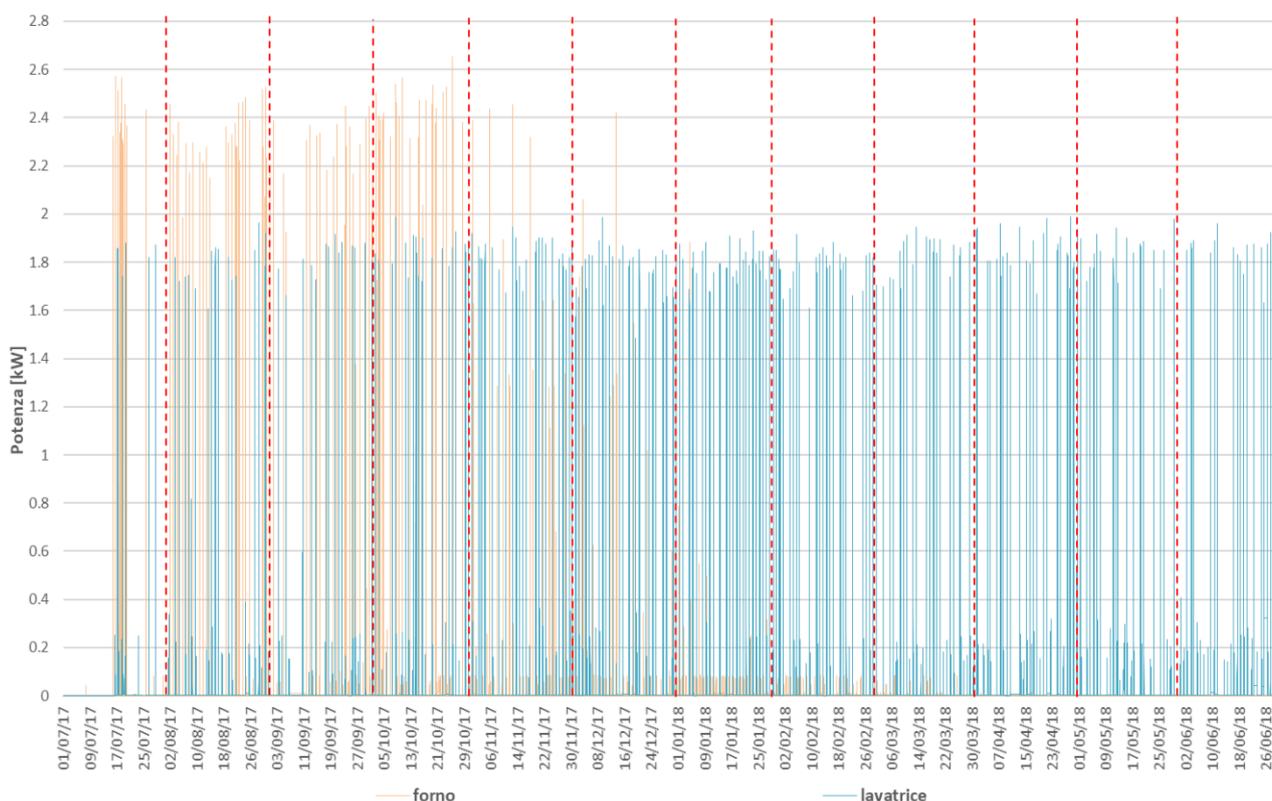


Figura 11. Potenza elettrica richiesta per forno (arancione) e lavatrice (azzurro) – luglio 2017 – giugno 2018.



Figura 12. Condizioni di occupazione dell'edificio registrate durante il periodo di monitoraggio

2.3 Logiche di controllo

Durante il periodo di monitoraggio, sono state impostate logiche di controllo per regolare l'utilizzo della ventilazione naturale e meccanica, del raffrescamento nei mesi estivi e del riscaldamento nei mesi invernali, in modo da impiegare in primis soluzioni passive e a basso uso di energia. Le regole di funzionamento sono state determinate in modo da adottare soluzioni attive con accensione della pompa di calore in condizioni di possibile discomfort per il mantenimento dei parametri ambientali, solo quando necessario. Gli utenti dell'edificio hanno potuto modificare alcuni settaggi, soprattutto nei mesi estivi e nei periodi intermedi, nei quali la ventilazione naturale risulta più sfruttabile; invece, i mesi invernali sono stati tipicamente regolati ricorrendo a logiche di riscaldamento attivo con accensione della pompa di calore.

Il sistema di controllo è settato in modo da suggerire quando l'attivazione della ventilazione naturale risulta più vantaggiosa dell'uso di quella meccanica e 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 di controllo, sono sempre in grado di comandare anche in modo manuale l'accensione e lo spegnimento della pompa di calore in modalità di raffrescamento e riscaldamento. Utilizzando gli appositi interruttori, gli occupanti possono anche controllare l'altezza delle schermature solari e l'angolo di rotazione delle lamelle. Si ricorda che il sistema di controllo e monitoraggio è costituito da due parti principali (Figura 13), quella che gestisce le funzioni più tipiche degli ambienti e degli impianti dell'edificio basata sullo standard Konnex e la seconda, basata su protocollo di comunicazione BACnet, che integra e supervisiona la prima allo scopo di implementare le logiche di controllo più complesse ed attuare il monitoraggio più dettagliato delle prestazioni energetiche e di comfort.



Figura 13. Struttura schematica del sistema di controllo e monitoraggio.

Si precisa che nelle formule del testo che descrivono le logiche di controllo verranno indicate rispettivamente:

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

Si riporta inoltre in Figura 14, lo schema dell'impianto dell'edificio con i sensori installati, per facilitare la comprensione delle logiche descritte nei successivi paragrafi.

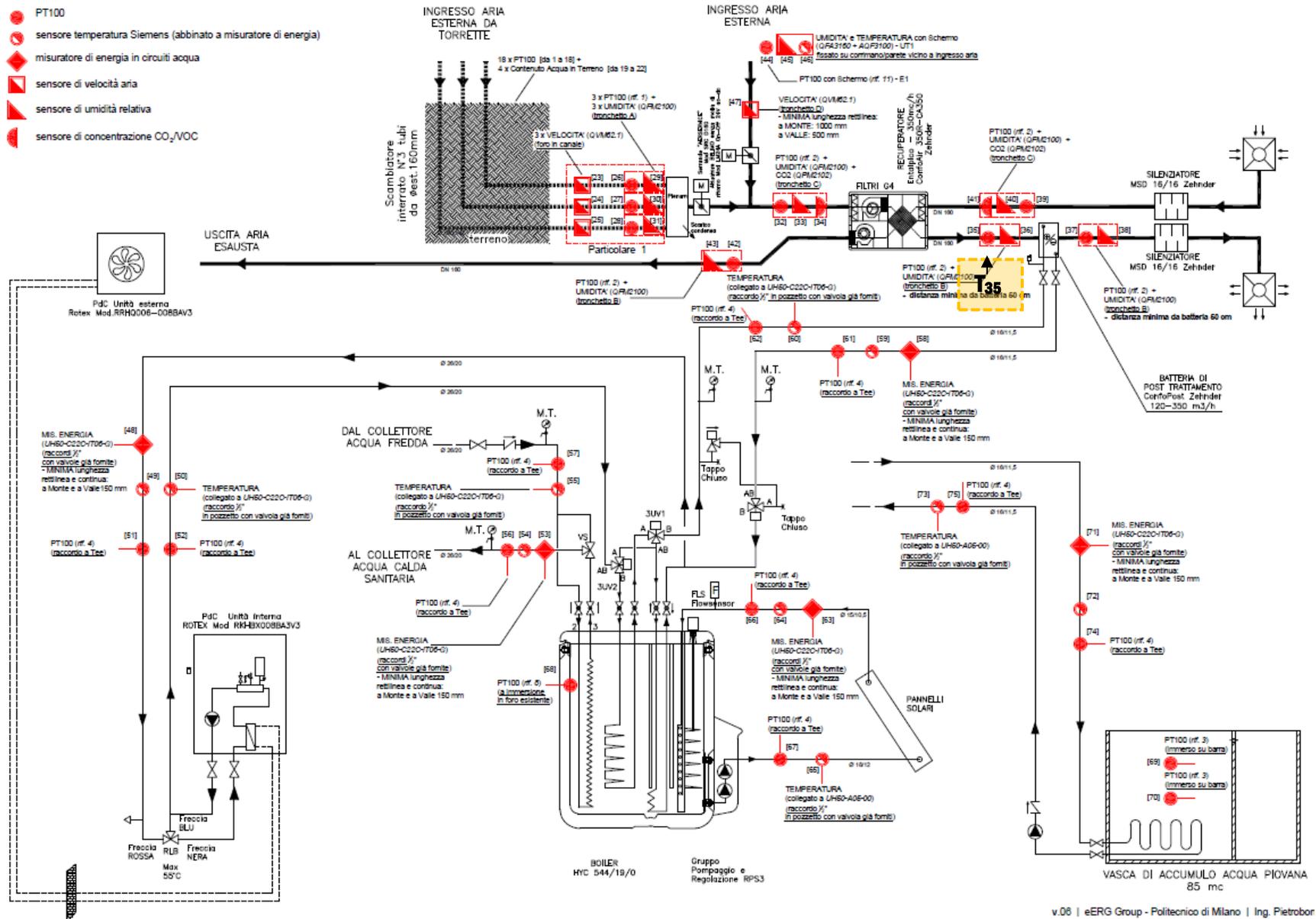


Figura 14. Schema dell'impianto e dei sensori (in rosso) installati nel sistema impiantistico dell'edificio.

v.06 | eERG Group - Politecnico di Milano | Ing. Pietrobor

VENTILAZIONE NATURALE

L'attivazione della ventilazione naturale (VN) avviene attraverso l'apertura delle finestre in modo manuale, la quale 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.

VENTILAZIONE MECCANICA

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 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 consente 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 determinate 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 sopra elencate e della loro distanza dai rispettivi valori di **set-point** (SP) impostabili dall'utente (che indichiamo con: $C_{CO_2.SP}$, $T_{ind.SP}$).

Il controllo proporzionale della velocità dei ventilatori avviene in funzione dei valori di temperatura e di concentrazione di CO₂ nell'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. La Figura 15 riporta, come esempio, il diagramma di controllo della velocità dei ventilatori in funzione della concentrazione di CO₂; lo stesso diagramma può essere considerato per la temperatura dell'ambiente interno.

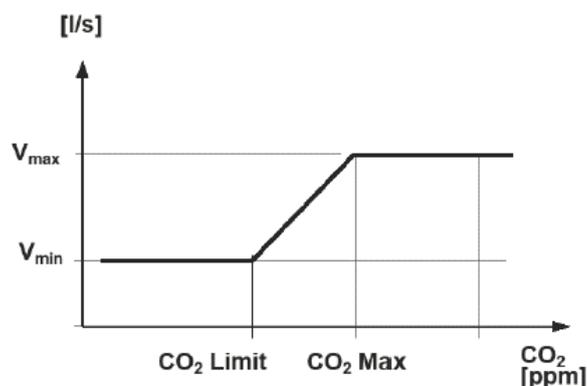


Figura 15. Esempio di diagramma di controllo in funzione della concentrazione di CO₂ (C_{CO_2}).

Per ognuna delle variabili impostate (C_{CO_2} , T_{ind}) il sistema definisce, dunque, un diagramma simile a quello riportato in Figura 15, con tutti i parametri impostabili dall'amministratore del sistema, in modo che si possano definire le forme dei diagrammi di controllo.

Sull'asse delle ordinate (output del diagramma) viene espressa la percentuale, da 0 a 100 %, della velocità dei ventilatori (che ha corrispondenza nel segnale 0-10 V inviato 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 - raffrescamento	Temperatura interna - riscaldamento
Valore di set-point	1000 ppm	26 °C	19 °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	Valore minimo delle misure di tutti i sensori Konnex negli ambienti indoor
Costante dell'azione proporzionale del controllo	0,2 [%/ppm]	33 [%/°C]	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 per 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.

Il sistema permette all'utente/amministratore del sistema, di selezionare le variabili in funzione delle quali si vuole 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.

CICLI DI VERIFICA PER L'ATTIVAZIONE DELLA VENTILAZIONE MECCANICA/NATURALE (STAGIONE ESTIVA-PERIODI INTERMEDI)

Prima dell'attivazione del raffrescamento tramite PdC, vengono attuati due cicli di controllo che riguardano la verifica che le condizioni esterne non siano favorevoli all'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 seconda logica, propedeutica all'attivazione del raffrescamento tramite PdC, riguarda il confronto delle temperature dell'aria alla presa estera del sistema di ventilazione e all'uscita dallo scambiatore interrato (EAHE).

La logica, rappresentata in Figura 16, 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 ($T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$).

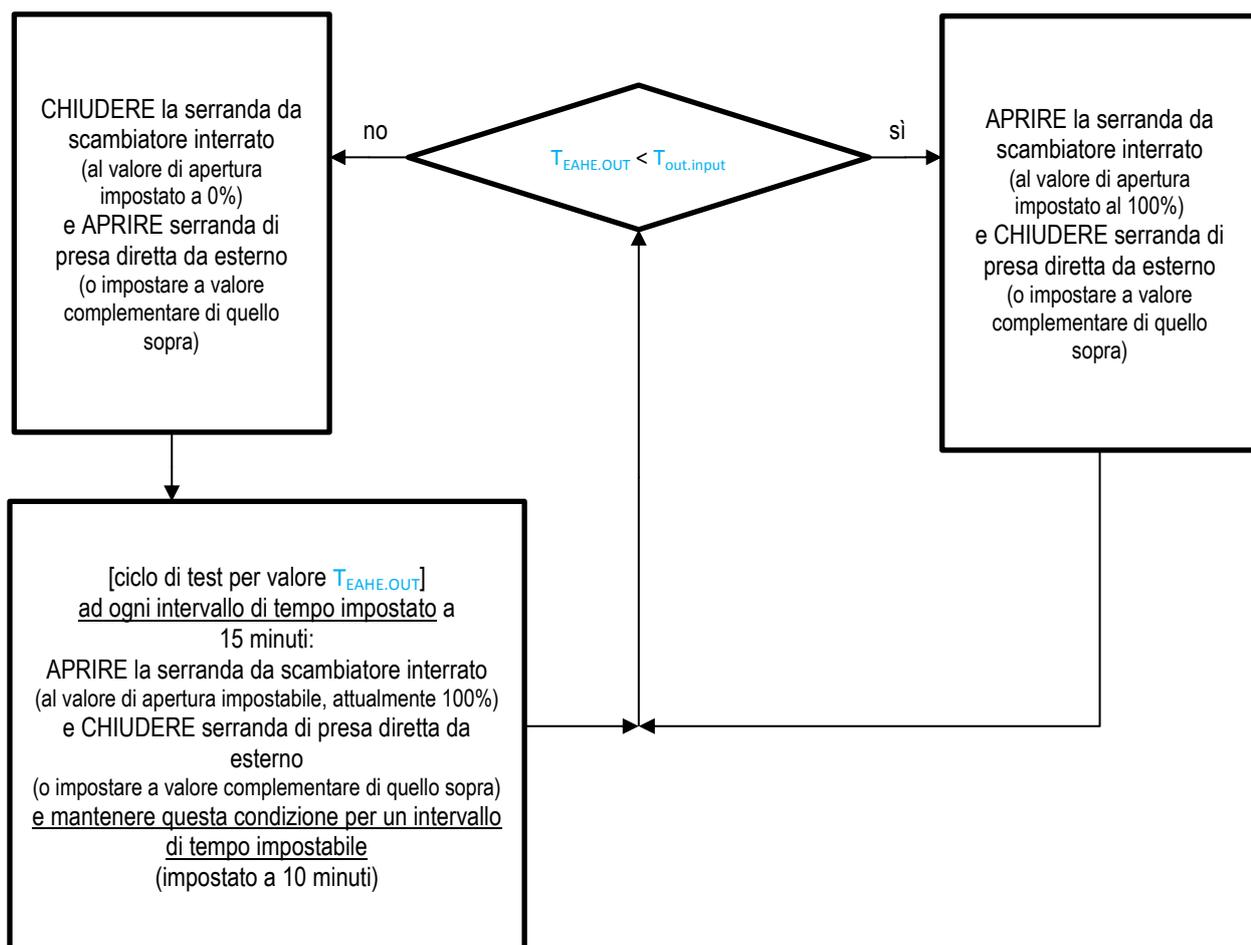


Figura 16. Serrande 1c - schema di controllo per serranda scambiatore interrato (EAHE) e serranda presa aria diretta da esterno, con ciclo di test su $T_{EAHE.OUT}$ a intervalli di tempo impostati.

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

Tale logica viene attuata nel dettaglio secondo lo schema di Figura 16, e una volta verificata la condizione di chiusura della serranda del canale che convoglia l'aria dallo scambiatore interrato, consente dei cicli di apertura della stessa (con frequenza impostata ad ogni 15 minuti e tempo di apertura a 10 minuti), allo scopo di verificare che non siano sopraggiunte le condizioni termiche per l'utilizzo dello scambiatore interrato.

Come $T_{EAHE.OUT}$ è stata impostata la media delle temperature dei 3 sensori di temperatura all'uscita dei rispettivi canali dello scambiatore interrato (vedi Figura 14 per posizione sensori all'interno scambiatore interrato).

ACCENSIONE DELLA POMPA DI CALORE (PdC) IN MODALITÀ RAFFRESCAMENTO

L'accensione della PdC in modalità di raffrescamento e della pompa di circolazione integrata, è 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 17:

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

e

2. Se la temperatura dell'aria prima di passare nella batteria (misurata dal sensore in posizione [35]: $T_{[35]}^1$) è minore di un valore massimo impostabile ($T_{MAX.FC1} = T_{ind.SP.C} - \Delta T$): $T_{[35]} < T_{ind.SP.C} - \Delta T_{FC1}$

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 raffrescamento e la pompa di calore in modalità raffrescamento;

Se non si verifica la condizione (1), allora viene selezionata la velocità dei ventilatori secondo gli altri diagrammi di controllo (CO_2 , VOC, UR).

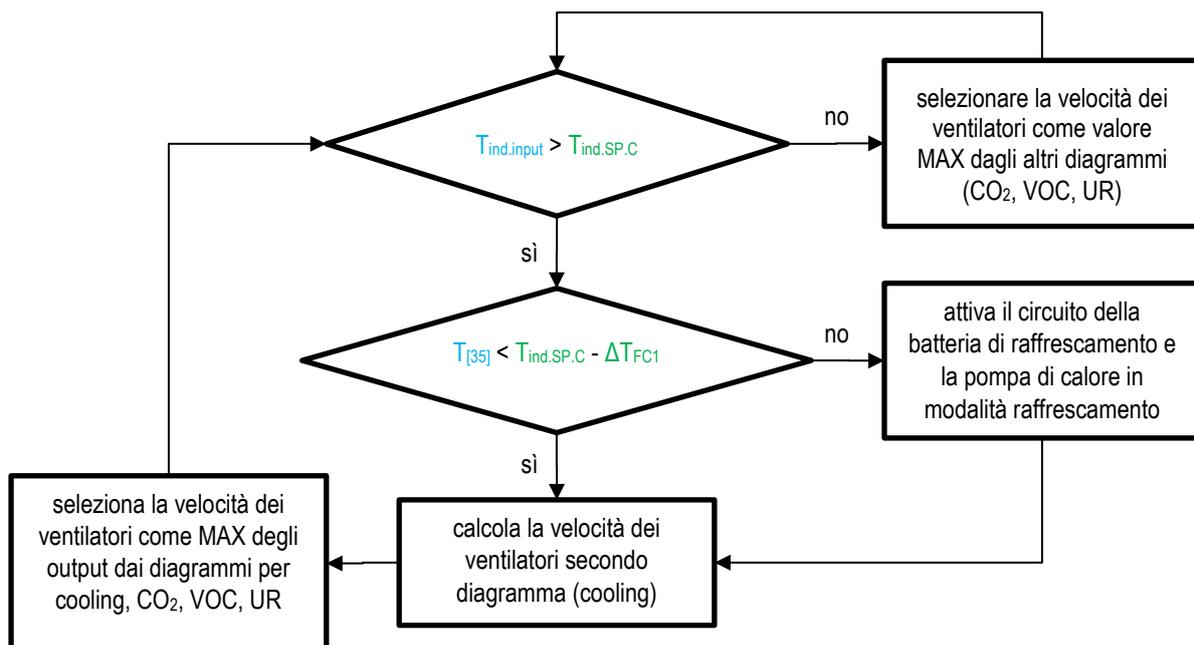


Figura 17. Schema di controllo della modalità Cooling 2 - Raffrescamento con scambiatore di calore interrato.

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

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

¹ Posizione sensore evidenziato in arancione in Figura 14, temperatura aria all'uscita del recuperatore di calore e prima della batteria di trattamento dell'aria.

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

CICLI DI VERIFICA PER L'ATTIVAZIONE DELLA VENTILAZIONE MECCANICA/NATURALE (STAGIONE DI RISCALDAMENTO)

Nel periodo di riscaldamento, secondo la legislazione italiana [4] dal 15 novembre al 31 marzo, il sistema di ventilazione meccanica e riscaldamento ha seguito le logiche di funzionamento descritte qui di seguito.

L'utente, come nella stagione di raffrescamento, è assistito per agevolare un miglior uso della ventilazione naturale. Infatti, quando una o più finestre sono aperte, se la temperatura interna scende sotto il valore di set-point per il riscaldamento ($T_{ind.input} < T_{ind.SP.H}$), allora il sistema produce un avviso che consiglia la chiusura delle finestre, per mezzo di un messaggio per gli utenti, a video e registrato in un elenco messaggi / allarmi. Quando tutte le finestre sono chiuse, il sistema attiva (con un ritardo di 1 minuto) la ventilazione meccanica secondo le regole descritte in precedenza; in aggiunta, in modalità di riscaldamento il funzionamento segue altre regole di seguito descritte e illustrate in Figura 18.

Il sistema determina se sia termicamente preferibile far passare l'aria di rinnovo dallo scambiatore interrato oppure se prelevarla direttamente dall'esterno, applicando la seguente logica: se la temperatura dell'aria all'uscita dello scambiatore interrato ($T_{EAHE.OUT}$) è maggiore 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 dell'esterno, ovvero:

- se $T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$ allora viene aperta la serranda da scambiatore interrato e viene chiusa la serranda della presa d'aria diretta dell'esterno;
- al contrario, se $T_{EAHE.OUT} < T_{out.input}$ allora viene chiusa la serranda da scambiatore interrato e viene aperta la serranda della presa d'aria diretta dell'esterno.

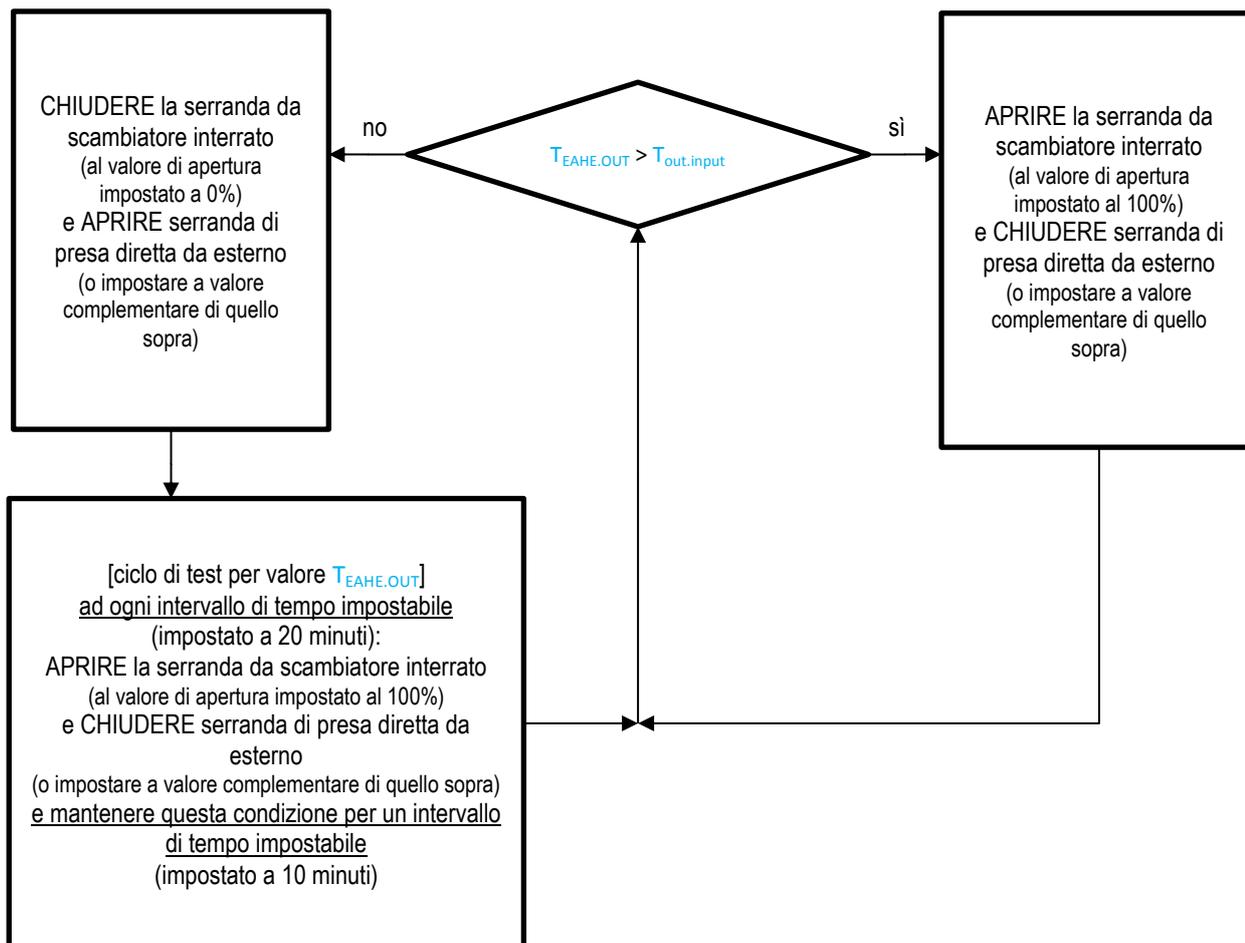


Figura 18. Serrande 1h - schema di controllo per serranda scambiatore interrato (EAHE) e serranda presa aria diretta da esterno, con ciclo di test su $T_{EAHE.OUT}$ a intervalli di tempo impostati.

Come temperatura all'uscita dello scambiatore è stato considerato il valore medio dei tre sensori all'uscita dello scambiatore interrato.

ACCENSIONE DELLA POMPA DI CALORE (PdC) IN MODALITÀ RISCALDAMENTO

L'accensione della PdC in modalità di riscaldamento e della pompa di circolazione integrata, è governata dalla logica denominata *Heating*, come da schema in Figura 19: se la temperatura rappresentativa degli ambienti interni ($T_{ind.input}$) risulta minore della temperatura impostata come set-point per riscaldamento ($T_{ind.SP.H}$) allora si attiva il circuito della batteria di riscaldamento e la pompa di calore in modalità riscaldamento con velocità dei ventilatori determinata dalle logiche proporzionali spiegate in precedenza. Inoltre, la logica di controllo prevede che: se la temperatura degli ambienti interni è maggiore del valore di set-point di raffrescamento ($T_{ind.SP.C}$), il sistema verifica la possibilità di attivare il raffrescamento tramite la sola ventilazione meccanica (senza attivazione della batteria in raffrescamento). Questo consente di controllare la temperatura dell'ambiente interno in modo che rimanga compresa fra i valori di set-point di riscaldamento e una soglia superiore per evitare surriscaldamento nelle giornate invernali più miti o in presenza di maggiori apporti solari e interni.

Come temperatura rappresentativa degli ambienti interni si è selezionato il valore minimo di tutti i sensori di temperatura dell'aria indoor della parte Konnex del sistema.

Per il periodo di riscaldamento, anche sulla base delle preferenze degli occupanti, i valori sono stati impostati come segue:

- set-point di heating $T_{ind.SP.H} = 19^{\circ}\text{C}$
- set-point di cooling $T_{ind.SP.C} = 28^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T_{FC1} = 10^{\circ}\text{C}$

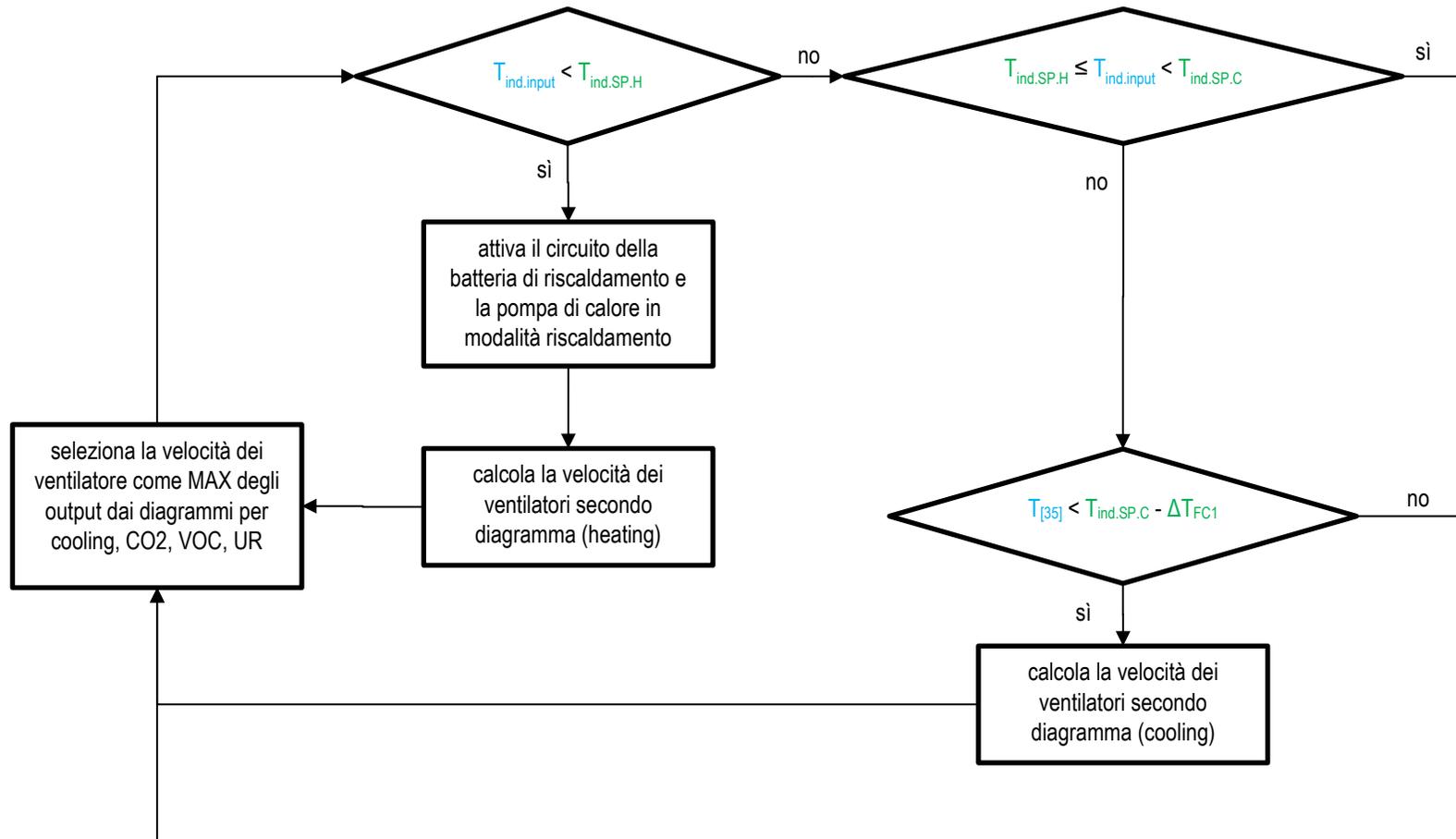


Figura 19. Schema di controllo della modalità riscaldamento (*Heating*).

3 Analisi delle prestazioni energetiche su base annuale e stagionale

Si presentano in questo capitolo i valori misurati di energia prodotta dal sistema fotovoltaico integrato nella copertura dell'edificio e di energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, lungo un periodo di 12 mesi dal 1 luglio 2017 al 30 giugno 2018. Le analisi condotte su questi dati hanno consentito di studiare le prestazioni energetiche dell'edificio in condizioni climatiche e di utilizzo reali, nel corso delle diverse stagioni, allo scopo di approfondirne il comportamento come edificio ad energia quasi zero. In particolare, si è potuto quantificare il rapporto fra produzione e uso di energia, confrontando i valori d'uso reali con i riferimenti dello schema di certificazione Passivhaus.

L'energia elettrica richiesta per la totalità degli usi dell'edificio è stata pari a 8598.7 kWh/anno corrispondenti a 59.7 kWh/m²/anno, con riferimento all'unità di superficie netta climatizzata. L'energia elettrica prodotta da fotovoltaico è stata pari a 10946.4 kWh/anno corrispondenti a 76.0 kWh/m²/anno, sempre in riferimento all'unità di superficie netta climatizzata (Tabella 2, Figura 20, Figura 21, Tabella 3). Considerando il periodo annuale su cui si è svolta la presente analisi, la produzione di energia risulta maggiore della richiesta per la totalità degli usi energetici, tutti elettrici nel caso dell'edificio oggetto di studio.

Nel solo periodo di riscaldamento, dal 15 novembre al 31 marzo, la richiesta di energia elettrica per tutti gli usi è stata pari a 4333.2 kWh corrispondenti a 30.1 kWh/m² con riferimento alla sola stagione di riscaldamento. Nello stesso periodo, l'energia elettrica prodotta da fotovoltaico è stata pari a 2932.6 kWh corrispondenti a 20.4 kWh/m² sempre con riferimento alla sola stagione di riscaldamento.

Considerando i singoli mesi, la produzione di energia elettrica è stata sempre maggiore alla richiesta di energia elettrica per tutti gli usi, ad esclusione dei mesi invernali di novembre, dicembre, gennaio e febbraio. In questi mesi la richiesta di energia è stata più alta a causa di un uso maggiore della pompa di calore per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria (purtroppo i due usi non possono essere separati), rispetto al resto dell'anno. Nello stesso tempo, la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata più bassa per una minore disponibilità di radiazione solare, come già visto in Figura 9. Pertanto, per 8 mesi la produzione di energia in situ è stata maggiore degli usi totali, mentre nei restanti 4 mesi (novembre, dicembre, gennaio e febbraio) essa è stata leggermente minore degli usi.

La richiesta mensile di energia elettrica per la totalità degli usi varia dai 2.9 kWh/m² del mese di luglio (in cui la presenza degli occupanti nell'edificio è stata ridotta) ai 7.5 kWh/m² a dicembre nel quale sono state registrate temperature esterne minime di 0 °C e medie di circa 8 °C. La produzione mensile di energia elettrica da fotovoltaico ha presentato invece valori minimi di 3.6 kWh/m² del mese di febbraio e massimi di 9.1 kWh/m² a luglio. Tutti i valori fanno sempre riferimento all'unità di superficie netta climatizzata.

Se si moltiplica il valore annuale misurato di energia elettrica complessivamente assorbita dall'edificio, per il fattore di conversione nazionale dell'energia elettrica in energia primaria, pari a 2.42 [5], si ottiene un valore di energia primaria pari a 144.5 kWh/m²/anno. Questo valore risulta in linea con l'indicatore di benchmark, pari a 120 kWh/m²/anno, fornito dal criterio "Premium" del protocollo Passivhaus e applicabile nel caso in cui il fabbisogno energetico dell'edificio sia bilanciato dallo sfruttamento di fonti di energia rinnovabile. Si deve considerare infatti che i valori misurati, per l'edificio oggetto di studio, dipendono dalle condizioni al contorno reali registrate nell'anno di monitoraggio, mentre il limite previsto dallo schema di certificazione si riferisce alla procedura di calcolo standard, relativa alla certificazione del progetto, che si basa su ipotesi di utilizzo e di condizioni climatiche tipiche e medie. I gradi giorno calcolati per il periodo di riscaldamento nell'anno di analisi sono infatti risultati maggiori rispetto ai gradi giorno standard riportati in normativa (1455 GG calcolati contro 1271 GG secondo il DPR n°412 del 26-08-1993 [4]), questo indica che le condizioni climatiche registrate nel periodo di riscaldamento analizzato sono state più rigide rispetto le condizioni di riferimento. Inoltre, va anche considerato che il valore misurato di energia primaria comprende la totalità degli usi energetici legati all'edificio, inclusi quelli per l'illuminazione del giardino e del garage interrato e quelli per le pompe del sistema di irrigazione, che non sono invece presi in considerazione nel calcolo di certificazione della casa passiva, e quindi nel limite dei 120 kWh/m²/anno. Sfortunatamente questi usi non sono scomputabili dal totale misurato, poiché collegati ad un contatore che

monitora altri usi elettrici. È tuttavia plausibile che escludendo questi usi e riportando i gradi giorno reali ai valori standard, l'indice prestazionale reale dell'edificio non superi il limite dei 120 kWh/m²/anno. Deve infine essere osservato che un ampio margine di incertezza è correlato al comportamento dell'utente, che raramente corrisponde alle impostazioni standard di calcolo.

Tabella 2. Energia elettrica prodotta da fotovoltaico ed energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, valori mensili e totali annuali.

Mese	Energia elettrica prodotta da fotovoltaico [kWh/mese]	Energia elettrica richiesta per tutti gli usi [kWh/mese]
lug-17	1305.9	411.6
ago-17	1243.1	645.8
set-17	992.3	506.2
ott-17	817.3	662.7
nov-17	568.1	786.3
dic-17	570.0	1084.1
gen-18	588.5	1040.9
feb-18	515.1	1034.9
mar-18	944.4	741.3
apr-18	1042.8	572.4
mag-18	1210.6	556.7
giu-18	1148.2	555.8
Tot [kWh/anno]	10946.4	8598.7

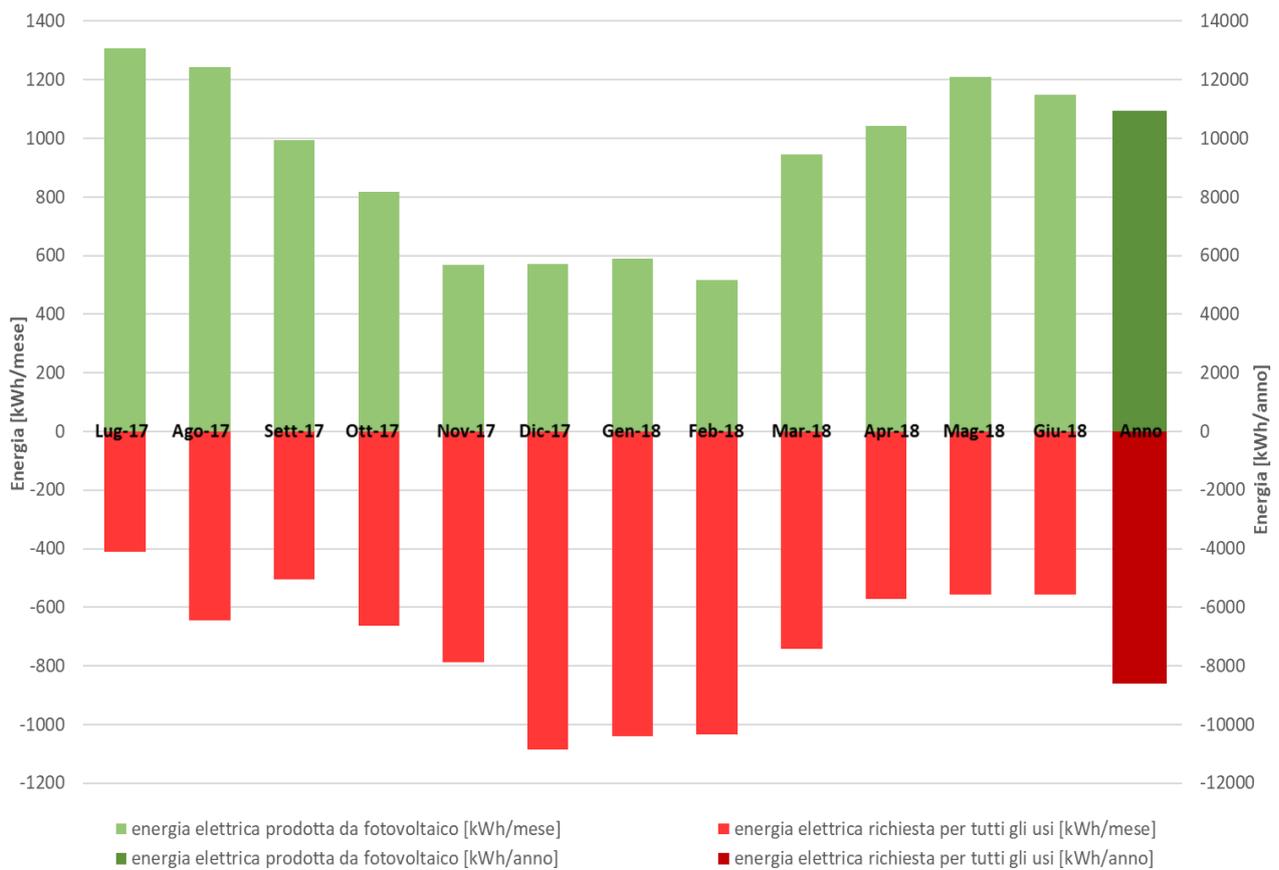


Figura 20. Energia elettrica prodotta da fotovoltaico ed energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, valori mensili e totali annuali.

Tabella 3. Energia elettrica prodotta da fotovoltaico ed energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, valori mensili e totali annuali, per unità di superficie netta climatizzata.

Mese	Energia elettrica prodotta da fotovoltaico [kWh/m ² /mese]	Energia elettrica richiesta per tutti gli usi [kWh/m ² /mese]
lug-17	9.1	2.9
ago-17	8.6	4.5
set-17	6.9	3.5
ott-17	5.7	4.6
nov-17	3.9	5.5
dic-17	4.0	7.5
gen-18	4.1	7.2
feb-18	3.6	7.2
mar-18	6.6	5.1
apr-18	7.2	4.0
mag-18	8.4	3.9
giu-18	8.0	3.9
Tot [kWh/m²/anno]	76.0	59.7

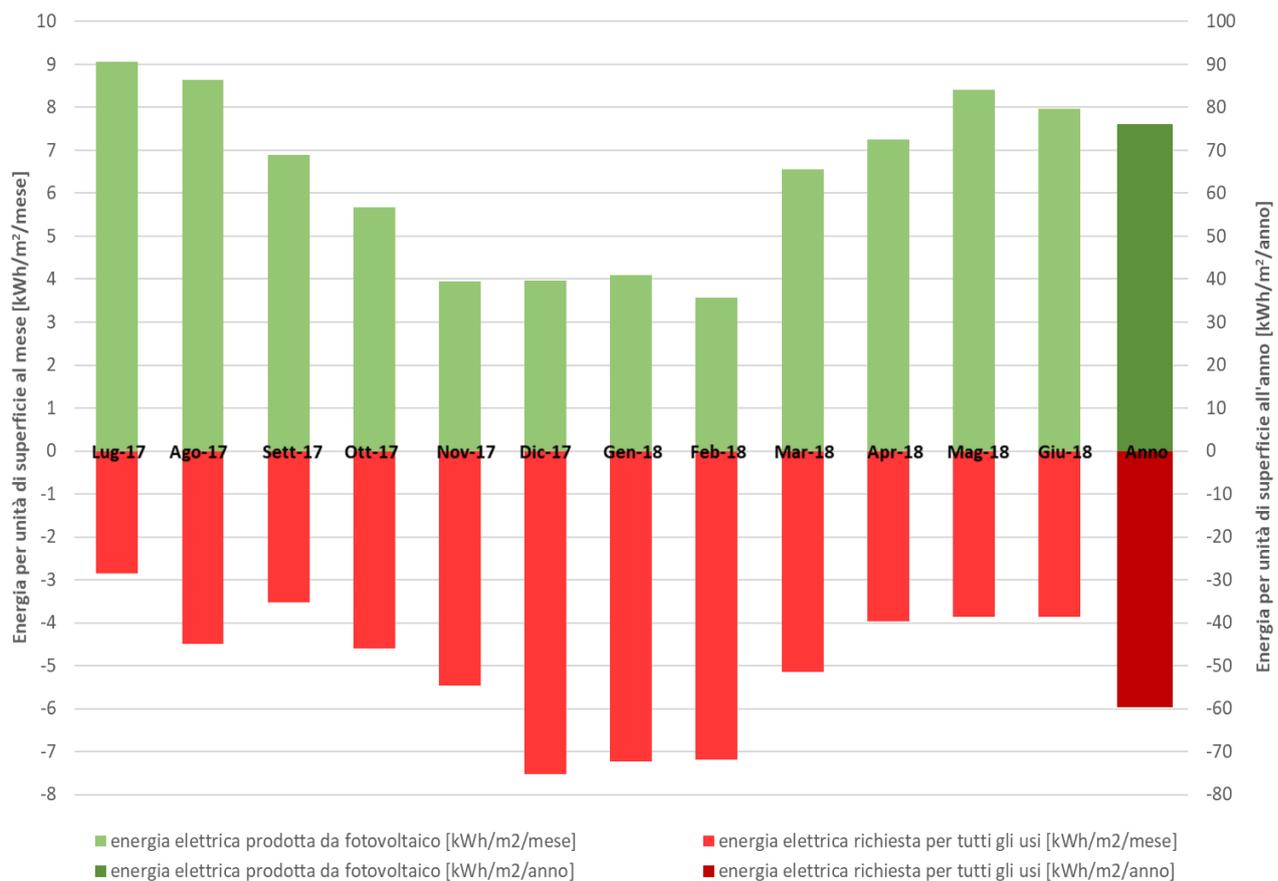


Figura 21. Energia elettrica prodotta da fotovoltaico ed energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, valori mensili e totali annuali, per unità di superficie netta climatizzata.

Il valore di potenza elettrica richiesta per tutti gli usi (Figura 22 e Figura 23), non scende mai sotto un valore soglia di circa 400 W, il quale dipende da quegli usi finali che richiedono un assorbimento costante come il sistema di controllo e monitoraggio o il frigorifero. I picchi massimi di potenza richiesta variano tra i 5 e i 7 kW, principalmente nei mesi invernali, a causa del forte uso della pompa di calore.

L'andamento della potenza elettrica prodotta dal sistema fotovoltaico segue l'andamento giornaliero e stagionale della radiazione solare già riportato in Figura 9. Si nota come nei periodi estivi e intermedi la potenza prodotta sia maggiore durante le ore di presenza di radiazione solare, mentre nei mesi invernali la potenza prodotta ha registrato valori minori anche a causa dei più frequenti periodi con cielo coperto.

Dalla Figura 22 si evince chiaramente che nei periodi di massima produzione di energia da fotovoltaico, l'edificio presenta i valori d'uso energetico minori, mentre nei mesi invernali, in cui l'assorbimento elettrico è massimo, a causa della pompa di calore e della maggior presenza degli occupanti in casa, la produzione di energia rinnovabile è minima.

Esiste spesso anche uno sfasamento giornaliero tra produzione massima di energia rinnovabile (intorno alle ore 12) e massimo assorbimento per gli usi energetici (ore serali 19 - 22), come ben evidenziato in Figura 24, nella quale si riporta, come esempio, la potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti gli usi dell'edificio dal 22 dicembre (00:00) al 26 dicembre (00:00). Le linee tratteggiate in azzurro evidenziano le ore 00:00 e quelle in giallo le ore 12:00 dei giorni analizzati. La scansione verticale aiuta a visualizzare lo sfasamento giornaliero tra produzione massima di energia e massimo assorbimento per gli usi energetici.

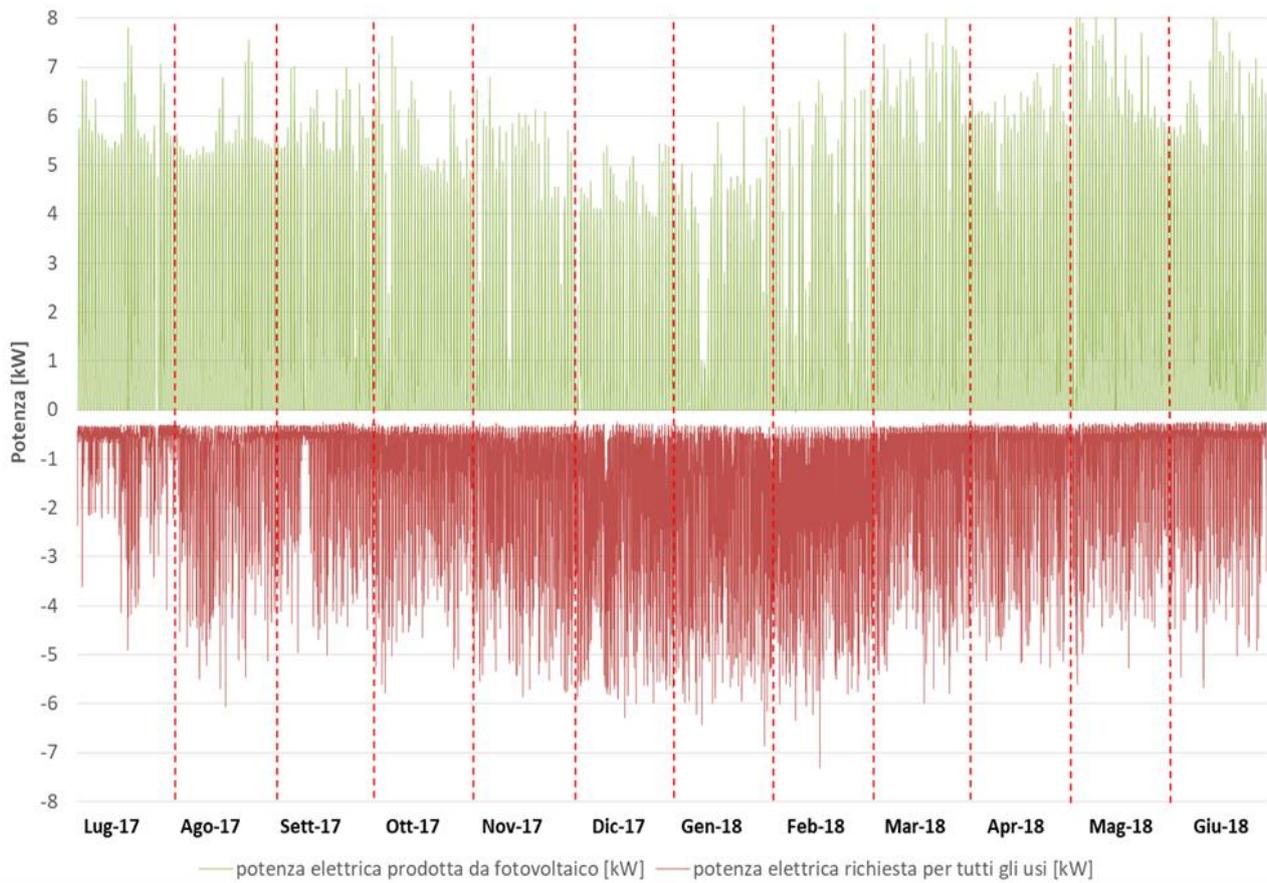


Figura 22. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti gli usi dell'edificio, luglio 2017 - giugno 2018.

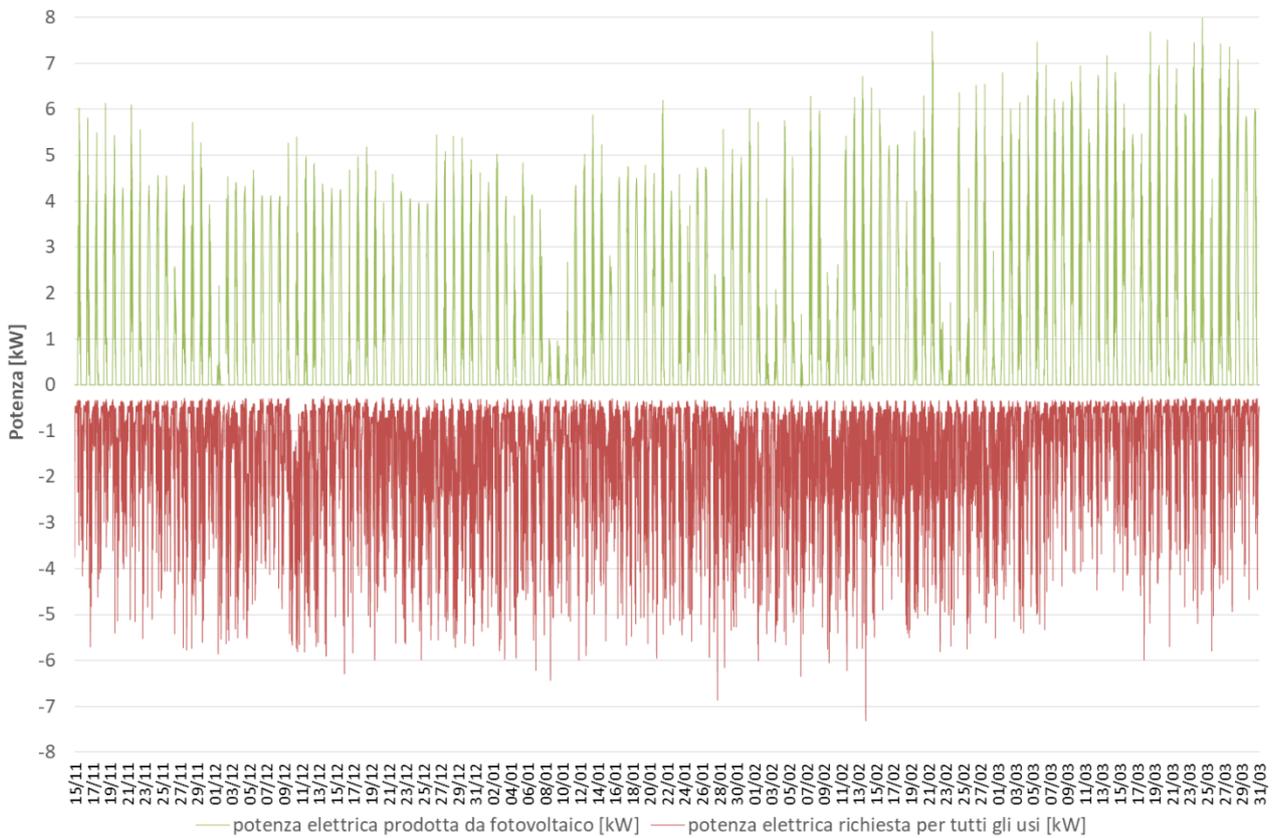


Figura 23. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti gli usi dell'edificio, nel periodo di riscaldamento (15 novembre 2017 - 31 marzo 2018).

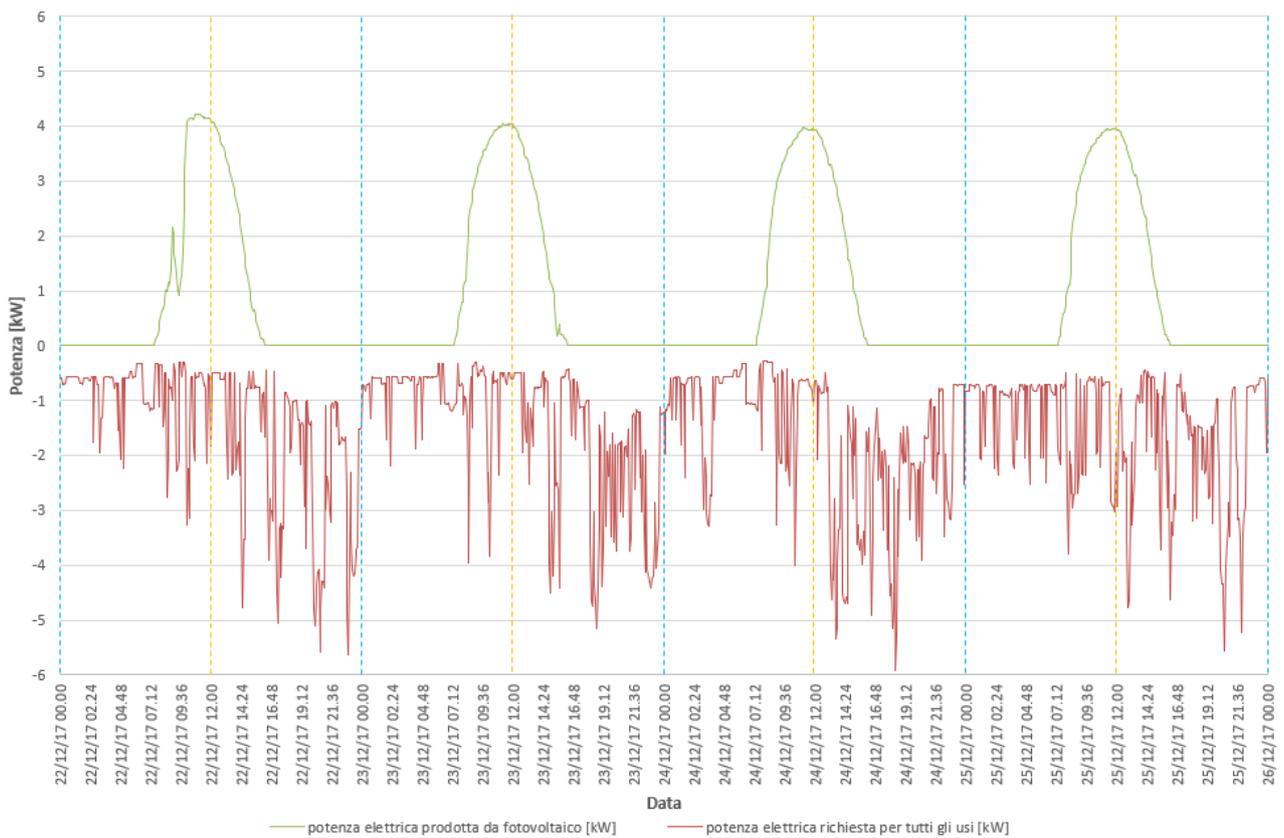


Figura 24. Potenza elettrica prodotta da fotovoltaico e richiesta per tutti gli usi dell'edificio, nel periodo di riscaldamento (22 dicembre 2017 - 26 dicembre 2017).

Una visione di sintesi degli sfasamenti tra produzione ed uso di energia è fornita anche dal grafico in Figura 25 che rappresenta il rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico ed assorbimento giornaliero di energia per tutti gli usi o *Load Cover Factor* [6]. Dalla figura si può vedere come nei mesi estivi il rapporto assuma in tutti i giorni valori superiori a 1, con un massimo di quasi 4.5, mentre nei mesi centrali dell'inverno si registrino valori quasi sempre inferiori a 1 (Figura 26). Ovvero in estate la produzione da fotovoltaico giornaliera eccede fino a 4.5 volte l'uso energetico, mentre tra novembre e febbraio (Figura 26) l'energia prodotta giornalmente non è sufficiente a coprire tutti gli usi energetici. Considerando l'intero anno di monitoraggio il 63 % dei valori del Load Cover Factor eccede il valore di 1, mentre durante la stagione di riscaldamento solo il 20 % dei valori di tale fattore risulta maggiore di 1.

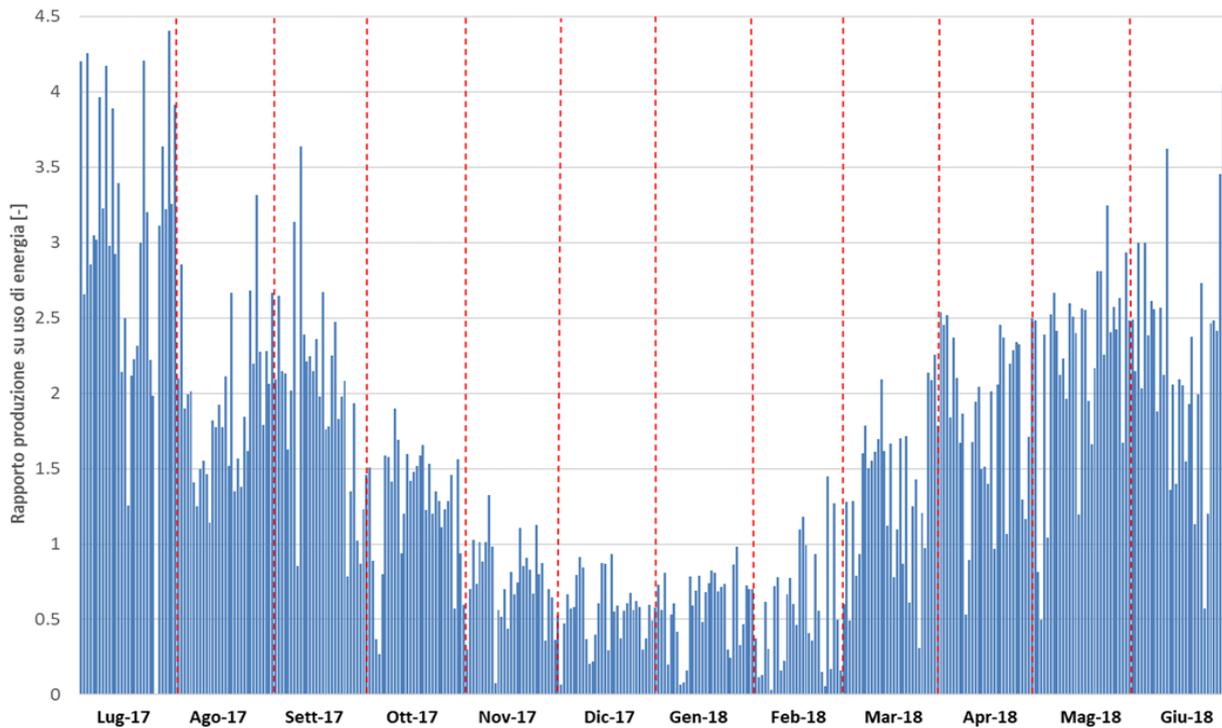


Figura 25. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia totale, luglio 2017 - giugno 2018.

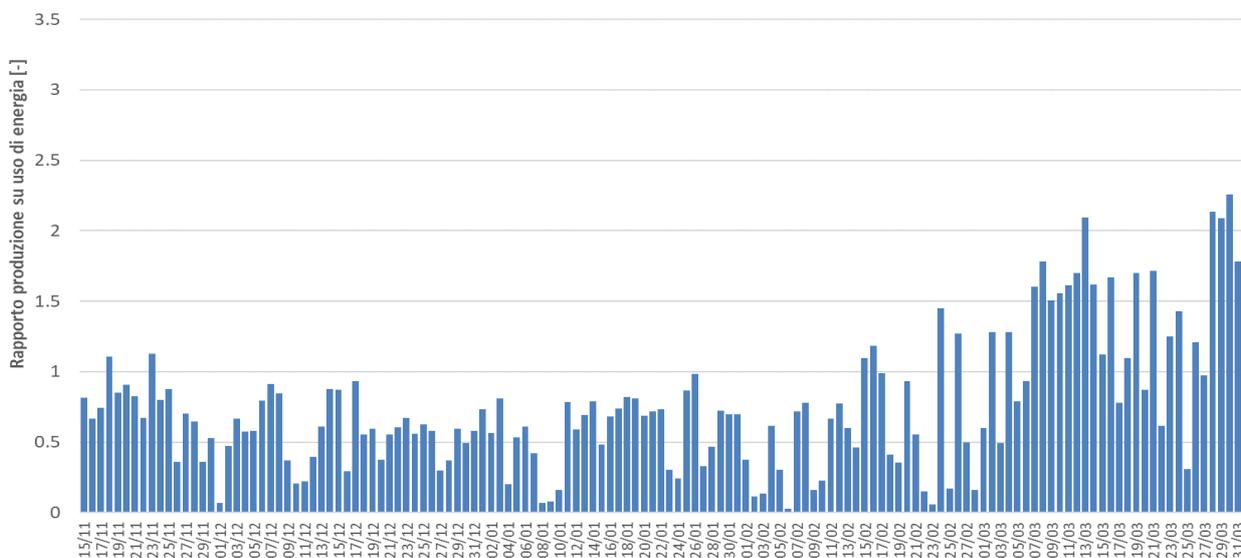


Figura 26. Rapporto tra produzione giornaliera di energia da fotovoltaico e uso giornaliero di energia totale, nel periodo di riscaldamento (15 novembre 2017 - 31 marzo 2018).

4 Analisi di dettaglio dei principali usi energetici finali

Lo studio dei profili di carico di edifici ad alte prestazioni energetiche è utile per comprendere meglio le loro dinamiche, migliorarne la gestione, e per analisi che riguardano il dimensionamento e la progettazione delle reti energetiche del futuro, le quali dovranno servire comunità composte da edifici energeticamente più flessibili, più autonomi e con profili d'uso potenzialmente differenti da quelli degli edifici esistenti.

La costruzione di profili di carico tipici è inoltre importante per il dimensionamento di sistemi di accumulo che, in combinazione con sistemi di gestione dell'energia, possono permettere di massimizzare l'uso di energia rinnovabile prodotta in sito e di disaccoppiare la richiesta istantanea di energia dell'edificio e il prelievo dalla rete, favorendo i consumi nei momenti in cui le tariffe sono più basse (o la produzione di energia da fonti rinnovabili più elevata) e limitandoli quando i prezzi sono più alti.

L'edificio oggetto di questo studio, è dotato di misuratori di energia elettrica sui principali usi finali, questo ha permesso di calcolare, mese per mese, gli indici specifici di consumo per unità di superficie netta climatizzata di tutti gli usi e di costruire grafici di breakdown energetici per ogni mese.

La Tabella 4 e la Tabella 5 riportano, rispettivamente, i valori di energia elettrica richiesta mensilmente per tutti gli usi dell'edificio nell'intero periodo di monitoraggio e la suddivisione percentuale dell'energia elettrica richiesta mensilmente da ciascun uso dell'edificio. Si ricorda che alcuni di questi usi, come l'illuminazione degli spazi interni ed esterni, alcuni elettrodomestici, le televisioni, le apparecchiature elettriche collegate temporaneamente alle prese elettriche (come ad esempio i computer portatili, telefoni cellulari e simili, asciugacapelli, etc.) non sono monitorati singolarmente e la richiesta mensile di energia elettrica registrata da parte di questi usi è compresa nelle tabelle alla colonna definita "altri usi". Per una migliore visualizzazione dei risultati ottenuti sono stati costruiti dei grafici a torta riportati in Figura 27 e in Figura 28 nelle pagine successive. Come si può vedere, l'uso maggiore di energia elettrica va imputato alla pompa di calore, al sistema di domotica e monitoraggio che comprende anche il sistema antifurto e di videosorveglianza e al frigorifero. Se però l'uso di energia mensile del sistema di domotica e monitoraggio e del frigorifero sono pressoché costanti tutti i mesi dell'anno (Figura 30), l'uso di energia della pompa di calore varia considerevolmente da mese a mese in relazione all'occupazione, ma soprattutto alle condizioni climatiche esterne (Figura 31).

Data la sporadica occupazione dell'edificio nel mese di luglio 2017, la pompa di calore ha registrato un valore di uso di energia pari a 41.7 kWh/mese, molto minore di quello registrato ad agosto 2017, durante cui l'attivazione della pompa di calore è avvenuta regolarmente nei primi venti giorni del mese (Figura 31), perché l'occupazione dell'edificio è stata regolare e le temperature esterne si sono mantenute molto elevate sia di giorno che di notte. Settembre ha invece registrato il minor uso di energia elettrica da parte della pompa di calore. Durante tutto il mese, infatti, è stato preferito lo sfruttamento della ventilazione naturale degli ambienti, come si può notare dalla Figura 31, che riporta in nero la potenza richiesta dalla macchina di ventilazione. I mesi di dicembre, gennaio e febbraio, i più freddi della stagione di riscaldamento, hanno registrato i valori più alti di uso di energia elettrica per la pompa di calore poiché il riscaldamento degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria sono demandati a questo sistema.

Come si può vedere dalla Tabella 4, l'uso di energia delle pompe di irrigazione segue un andamento stagionale essendo più alto durante i mesi estivi, caratterizzati da minor frequenza di precipitazioni, e più basso durante i mesi invernali. Il frigorifero ha registrato valori d'uso di energia di circa 35-39 kWh/mese durante i mesi invernali, per poi aumentare fino a circa 48 kWh/mese durante i mesi estivi nei quali la temperatura dell'aria degli ambienti interni è stata di circa 26 °C rispetto ai circa 20 °C della stagione invernale. La richiesta di energia elettrica degli altri usi risulta correlato maggiormente all'occupazione dell'edificio (usi cucina) e ancora una volta alle condizioni climatiche esterne (pompe di circolazione solare termico).

La Tabella 6 riporta i valori di uso di energia per tutti i servizi dell'edificio registrati durante la stagione di riscaldamento (15 novembre – 31 marzo) e durante tutto il periodo di monitoraggio. La Figura 29 riporta i risultati della stessa analisi in percentuale rispetto alla richiesta totale di energia mensile.

Durante la stagione di riscaldamento la pompa di calore si conferma essere l'uso che richiede la maggior parte dell'energia elettrica, seguito dalla domotica e sistema di monitoraggio e antifurto. Considerando

però l'intero anno di monitoraggio, l'uso di energia di questi due ultimi servizi, pari a 1391.8 kWh, equivale a circa quello di energia elettrica per la pompa di calore, pari a 1382.1 kWh, ovvero circa il 16 % dell'uso totale di energia. La somma degli altri usi pesa per il 46 % sull'uso totale, mentre il frigorifero per il 5 % e il piano cottura a induzione per il 4 % come la macchina di ventilazione.

Dalla lettura della Tabella 4 e 5, è possibile identificare altre interessanti dinamiche legate al comportamento degli occupanti. Per esempio, l'aspirapolvere che rappresenta circa l'1 % dell'uso totale di energia, è stata utilizzata con regolarità nel corso dell'anno, salvo un picco di minimo a luglio, quando l'edificio è stato occupato saltuariamente ed un picco di massimo a dicembre, seguito da marzo e maggio, probabilmente in prossimità di cene o eventi di incontro familiare come il Natale. L'assorbimento elettrico della macchina di ventilazione è un chiaro indicatore delle preferenze in termini di ventilazione naturale. Gli occupanti hanno ricorso a questa soluzione prevalentemente nei mesi di giugno e settembre e moderatamente nei mesi di maggio, luglio ed agosto; nei restati mesi l'uso energetico è stato maggiore e pressoché costante, con un massimo nel mese di gennaio.

È interessante notare come la lavastoviglie sia stata utilizzata solo 2 mesi l'anno, a luglio ed agosto, con un picco considerevole in questo mese. Probabilmente le logiche di utilizzo della cucina in questi mesi sono state molto differenti, perché l'utente principale degli elettrodomestici è stato differente. Ciò è confermato anche dal profilo d'uso energetico del forno, che assume un massimo ad agosto, similmente alla lavastoviglie, e poi ad ottobre, riducendo poi il suo valore nei restanti mesi. L'asciugatrice presenta dei picchi d'uso nei mesi di ottobre e novembre, mentre risulta inattiva da gennaio a giugno. Questa dinamica non permette però speculazioni particolari sul comportamento dell'utente, che andrebbero eventualmente approfondite con delle interviste.

Ciò che emerge chiaramente, tuttavia, è che il comportamento degli occupanti influenza significativamente i profili d'uso energetico di un edificio ad alte prestazioni, come quello oggetto di questa analisi. Promuovere politiche per un uso più razionale e corretto dell'energia, oltre che per fornire un'educazione energetica di base, hanno ed avranno sempre di più in futuro, un peso fondamentale per la gestione energetica delle nostre città e delle reti energetiche.

Il sistema di monitoraggio dell'edificio non permette di distinguere tra riscaldamento e ACS, essendo entrambi legati all'uso della pompa di calore. Il profilo azzurro fornito in Figura 31, corrisponde quindi, dal 15 novembre al 31 marzo, al profilo di potenza per riscaldamento e ACS, e nei restanti mesi al profilo di potenza per raffrescamento e ACS. La linea nera, fornisce invece il profilo di carico, in potenza, per la ventilazione dell'edificio.

Tabella 4. Uso di energia elettrica mensile per i diversi servizi dell'edificio da luglio 2017 a giugno 2018.

Mese	PdC [kWh/mese]	Aspirapolvere [kWh/mese]	Surriscaldatore accumulo - solare termico [kWh/mese]	Macchina di ventilazione [kWh/mese]	Pompe di circolazione solare termico [kWh/mese]	Autoclave ACS [kWh/mese]	Pompa recupero acque grigie [kWh/mese]	Piano cottura [kWh/mese]	Lavastoviglie [kWh/mese]	Forno [kWh/mese]	Frigorifero [kWh/mese]	Macchina caffè [kWh/mese]	Asciugatrice [kWh/mese]	Lavatrice [kWh/mese]	Radiatore elettrico bagno [kWh/mese]	Domotica, sist. di controllo e monitoraggio [kWh/mese]	Pompe irrigazione [kWh/mese]	Pompe riserva acque bianche [kWh/mese]	Altri usi
lug-17	41.7	1.3	0.0	20.7	7.8	2.8	0.0	5.1	2.9	5.3	36.4	0.6	6.8	4.4	0.0	116.4	36.9	0.0	159.3
ago-17	105.2	3.8	0.0	20.6	10.3	19.6	0.0	26.2	12.8	15.2	48.4	1.2	1.2	12.0	0.0	118.9	37.6	0.0	250.3
set-17	9.9	4.0	0.0	6.9	9.7	3.5	0.0	26.9	0.0	7.9	40.8	0.1	7.8	10.4	0.0	114.3	11.6	0.0	263.9
ott-17	25.7	5.2	0.0	31.7	11.6	1.2	0.0	39.4	0.0	14.6	38.5	0.2	30.4	14.5	0.0	116.7	3.0	0.0	333.1
nov-17	120.9	6.0	0.0	39.6	7.7	1.2	0.0	36.8	0.0	7.4	30.0	3.3	29.5	20.1	0.0	113.0	1.3	0.0	370.9
dic-17	324.9	7.0	0.0	33.1	8.9	0.8	0.0	44.3	0.0	4.8	29.3	3.2	6.4	22.3	0.0	116.0	0.8	0.0	483.1
gen-18	229.6	4.1	0.0	39.0	7.5	1.4	0.0	33.9	0.0	3.6	28.8	3.7	0.0	22.4	0.0	119.6	0.1	0.0	547.3
feb-18	321.2	4.9	0.0	34.6	5.3	0.9	0.0	35.1	0.0	1.7	26.1	3.9	0.0	17.6	0.0	108.2	0.0	0.0	475.4
mar-18	104.2	6.2	0.0	37.5	11.6	0.9	0.0	37.3	0.0	1.5	30.1	1.5	0.0	19.2	0.0	120.0	0.7	0.0	371.3
apr-18	40.0	5.0	0.0	31.7	12.3	12.6	0.0	31.0	0.0	0.4	31.4	6.1	0.0	15.6	0.0	110.1	12.7	0.0	276.2
mag-18	28.3	6.0	0.0	15.6	13.1	1.4	1.6	37.0	0.0	0.0	40.8	0.1	0.0	13.7	0.0	121.0	8.6	0.0	278.0
giu-18	29.2	4.4	0.0	2.6	9.9	1.0	1.7	30.8	0.0	0.0	43.9	0.9	0.0	12.7	0.0	117.4	17.9	0.0	255.6

Tabella 5. Suddivisione percentuale dell'uso di energia elettrica mensile per i diversi servizi dell'edificio da luglio 2017 a giugno 2018.

Mese	PdC	Aspirapolvere	Surriscaldatore accumulo solare termico	Macchina di ventilazione	Pompe di circolazione solare termico	Autoclave ACS	Pompa recupero acque grigie	Piano cottura	Lavastoviglie	Forno	Frigorifero	Macchina caffè	Asciugatrice	Lavatrice	Radiatore elettrico bagno	Domotica, sist. di controllo e monitoraggio	Pompe irrigazione	Pompe riserva acque bianche	Altri usi
lug-17	9%	0%	0%	5%	2%	1%	0%	1%	1%	1%	8%	0%	2%	1%	0%	26%	8%	0%	36%
ago-17	15%	1%	0%	3%	2%	3%	0%	4%	2%	2%	7%	0%	0%	2%	0%	17%	5%	0%	37%
set-17	8%	1%	0%	1%	2%	1%	0%	5%	0%	1%	7%	0%	1%	2%	0%	21%	2%	0%	48%
ott-17	4%	1%	0%	5%	2%	0%	0%	6%	0%	2%	6%	0%	5%	2%	0%	18%	0%	0%	50%
nov-17	15%	1%	0%	5%	1%	0%	0%	5%	0%	1%	4%	0%	4%	3%	0%	14%	0%	0%	47%
dic-17	30%	1%	0%	3%	1%	0%	0%	4%	0%	0%	3%	0%	1%	2%	0%	11%	0%	0%	45%
gen-18	22%	0%	0%	4%	1%	0%	0%	3%	0%	0%	3%	0%	0%	2%	0%	11%	0%	0%	53%
feb-18	31%	0%	0%	3%	1%	0%	0%	3%	0%	0%	3%	0%	0%	2%	0%	10%	0%	0%	46%
mar-18	14%	1%	0%	5%	2%	0%	0%	5%	0%	0%	4%	0%	0%	3%	0%	16%	0%	0%	50%
apr-18	7%	1%	0%	5%	2%	2%	0%	5%	0%	0%	5%	1%	0%	3%	0%	19%	2%	0%	47%
mag-18	5%	1%	0%	3%	2%	0%	0%	7%	0%	0%	7%	0%	0%	2%	0%	21%	2%	0%	49%
giu-18	5%	1%	0%	0%	5%	0%	0%	5%	0%	0%	8%	0%	0%	8%	0%	20%	3%	0%	42%

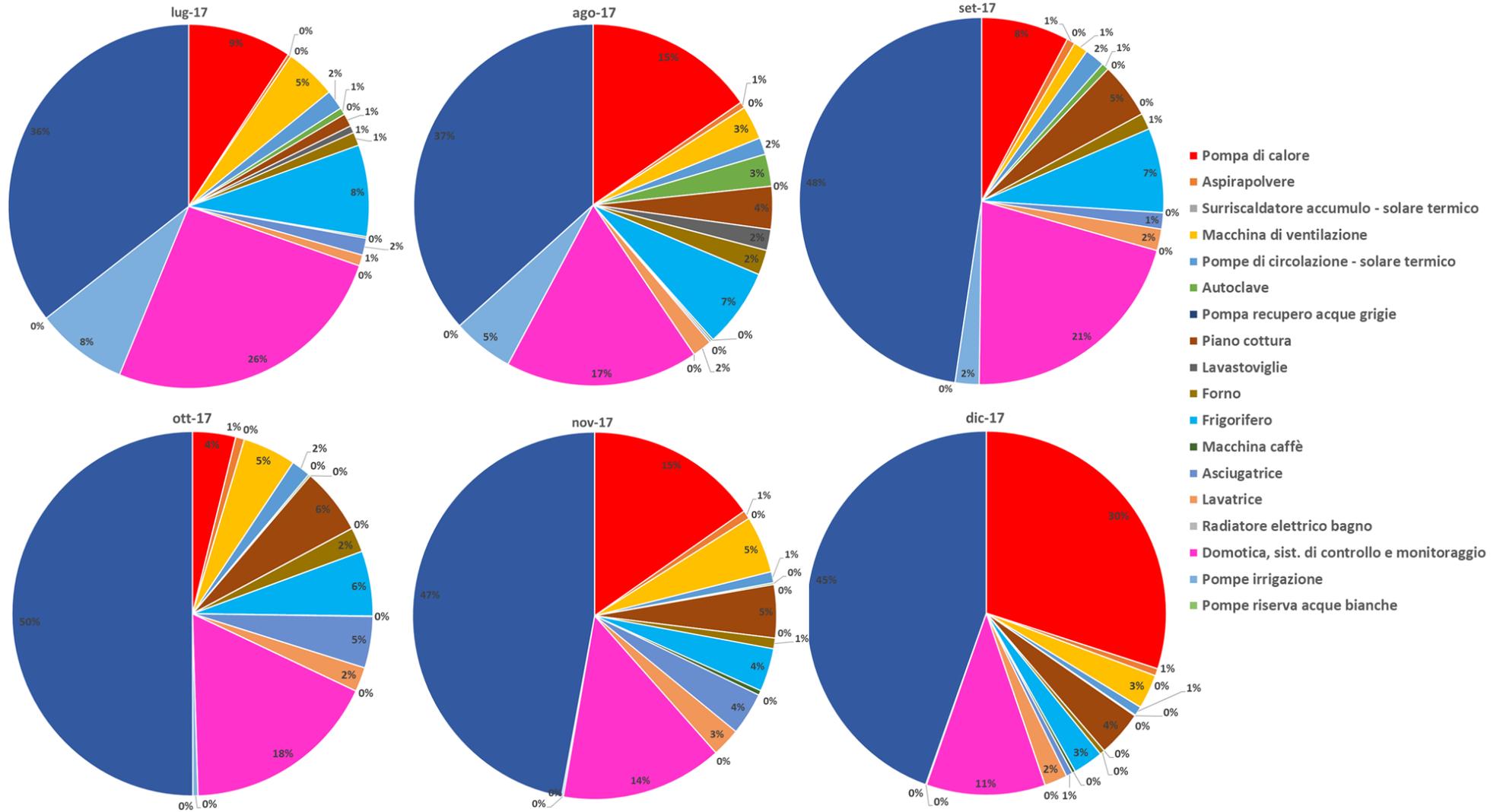


Figura 27. Suddivisione percentuale dell'uso di energia per i diversi servizi dell'edificio - luglio 2017 – dicembre 2017.

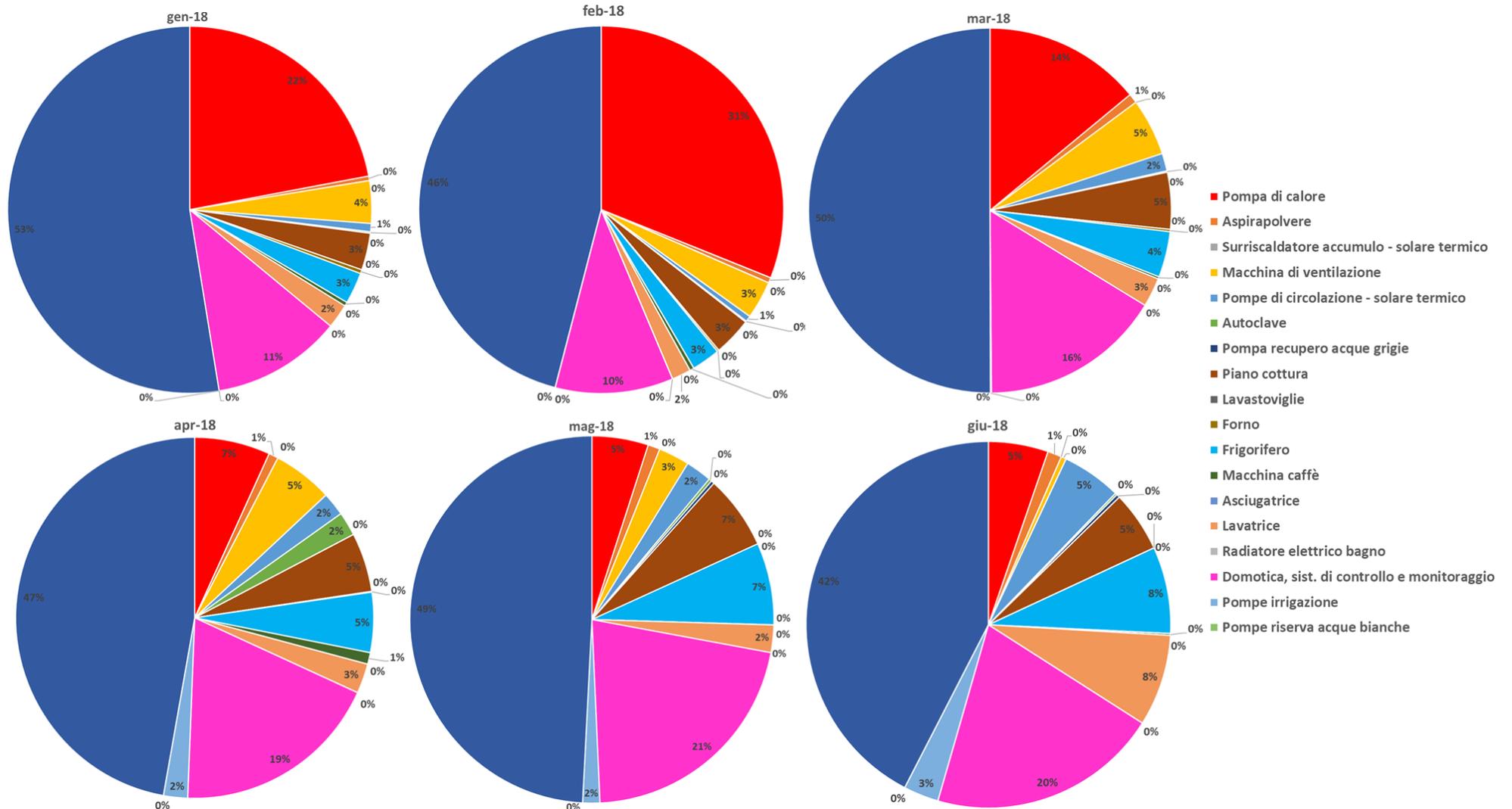


Figura 28. Suddivisione percentuale dell'uso di energia per i diversi servizi dell'edificio - gennaio 2018 – giugno 2018.

Tabella 6. Uso di energia elettrica stagione di riscaldamento e per tutti i mesi monitorati (luglio 2017 – giugno 2018) per i diversi servizi dell’edificio.

Periodo	PdC [kWh]	Aspirapolvere [kWh]	Surriscaldatore accumulo - solare termico [kWh]	Macchina di ventilazione [kWh]	Pompe di circolazione solare termico [kWh]	Autoclave ACS [kWh]	Pompa recupero acque grigie [kWh]	Piano cottura [kWh]	Lavastoviglie [kWh]	Forno [kWh]	Frigorifero [kWh]	Macchina caffè [kWh]	Asciugatrice [kWh]	Lavatrice [kWh]	Radiatore elettrico bagno [kWh]	Domotica, sist. di controllo e monitoraggio [kWh]	Pompe irrigazione [kWh]	Pompe riserva acque bianche [kWh]	Altri usi [kWh]
Stagione di risc. (15nov-31mar)	1046.8	25.0	0.0	165.1	37.8	4.7	0.0	169.5	0.0	15.9	129.7	14.2	15.4	92.1	0.0	522.6	2.8	0.0	2087.1
Lug-17 - Giu-18	1382.1	60.8	0.0	313.6	136.1	47.5	3.4	383.7	15.7	62.5	424.6	24.7	82.1	218.5	0.0	1391.8	131.2	0.0	4052.3

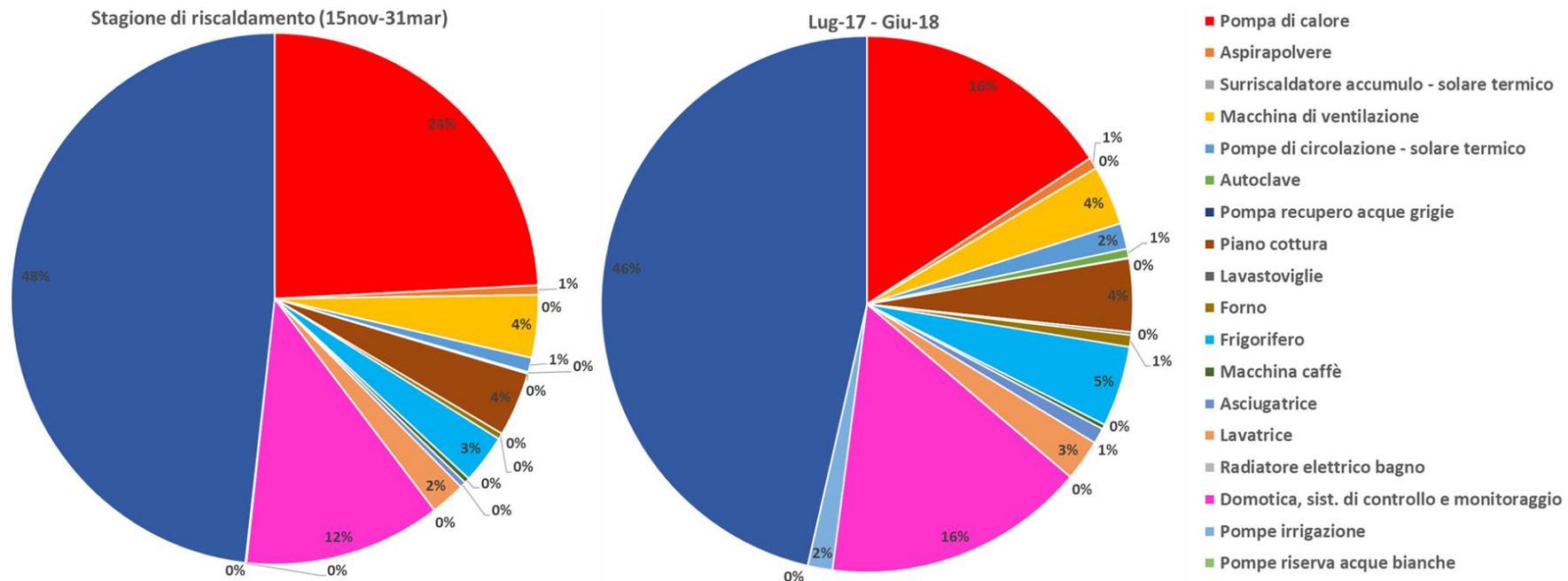


Figura 29. Suddivisione percentuale dell’uso di energia per i diversi servizi dell’edificio per la stagione di riscaldamento e per tutti i mesi monitorati (luglio 2017 – giugno 2018).

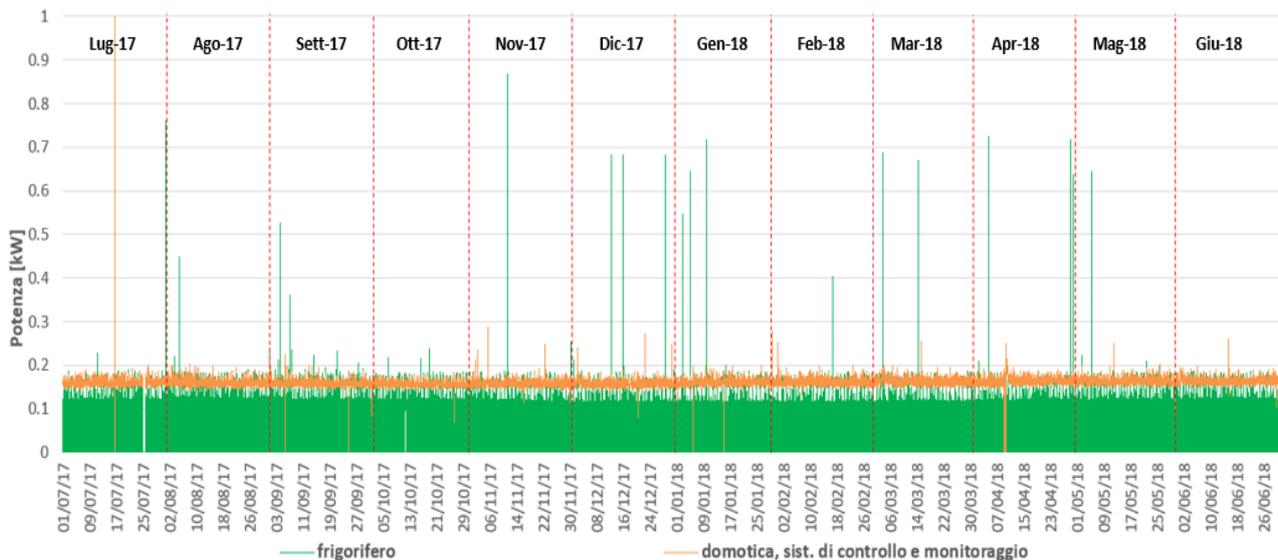


Figura 30. Potenza elettrica richiesta per frigorifero (verde) e domotica, sistema di controllo e monitoraggio (arancione) – luglio 2017 – giugno 2018.

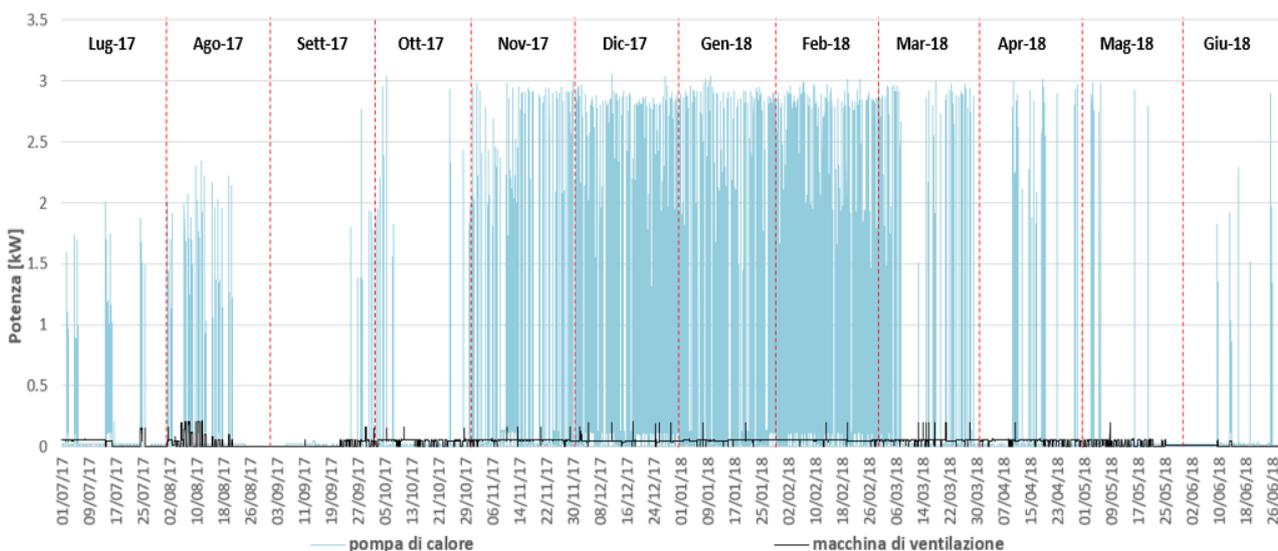


Figura 31. Potenza elettrica richiesta per pompa di calore (azzurro) e macchina di ventilazione (nero) – luglio 2017 – giugno 2018.

I profili di carico fin ora descritti e riportati in Figura 22, 23, 30, 31, possono essere utilizzati per studi di dimensionamento e fattibilità di sistemi di accumulo (termico o elettrico) locali, per massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta da fonte rinnovabile in sito. Il dimensionamento dei sistemi di accumulo può essere fatto sul profilo d'uso totale o su specifici usi (tipicamente quelli dominanti, o maggiormente sfasati rispetto alla produzione), sull'anno o sulla singola stagione, ovvero per massimizzare l'autoconsumo giornaliero, mensile, stagionale o annuale. Le logiche di dimensionamento, che debbono sempre includere anche valutazioni economiche, possono essere quindi diverse.

Nel momento in cui si intende produrre studi a scala urbana per valutare scenari di diffusione di edifici ad alte prestazioni e della loro interazione con reti energetiche intelligenti e sistemi di accumulo a scala distrettuale, profili di carico estremamente dettagliati prodotti da un singolo edificio potrebbero non essere l'input migliore. Per questi studi sono necessari profili di carico più generali che possano includere l'incertezza dettata dalle differenze implicite tra diversi edifici e diversi utenti.

Ad oggi, tuttavia, non sono disponibili dati reali di monitoraggio energetico per ampi patrimoni immobiliari composti da edifici ad alte prestazioni, problema rilevante per chiunque si accinga a sviluppare scenari di dimensionamento per le reti energetiche del futuro.

Tali profili d'uso energetico distrettuali possono essere prodotti, in alternativa, partendo da dei profili d'uso medi calcolati su un edificio di riferimento (come quello oggetto della presente analisi) ed associando a ciascun valore di potenza oraria una probabilità casuale di accadimento. Replicando questa procedura per diversi edifici, si potranno generare dei profili d'uso casuali, che sommati diano luogo ad una curva di carico distrettuale. Il limite di questo approccio è che gli edifici del distretto devono essere tipologicamente simili, ovvero, nel caso specifico, tutti edifici residenziali (mono o bi-familiari).

Seguendo questo approccio sono stati generati e riportati in Figura 32 e Figura 33, i profili di carico giornalieri (00:00 – 23:55) medi mensili che potranno essere utilizzati per studi preliminari volti a determinare un possibile profilo d'uso di un distretto residenziale di edifici ad alte prestazioni in clima mediterraneo.

La costruzione dei profili di Figura 32 e Figura 33, ha seguito la stessa procedura per tutti i mesi; è stato dapprima determinato il profilo orario giornaliero medio come media dei valori di ciascun time step (5 minuti) di tutti i giorni di ogni mese (linea arancione in figura), quindi si è valutato quale giorno reale del mese si discostasse, in termini di varianza e deviazione standard, in minor misura rispetto al giorno medio calcolato (linea blu in figura). Si vede infatti come il giorno medio calcolato (giorno medio fittizio) mostri valori di potenza generalmente minori rispetto al giorno medio reale per ogni mese.

Il profilo del mese di luglio risente molto della ridotta occupazione dell'edificio perché, a differenza degli altri mesi, presenta un solo picco di richiesta di energia durante la mattina, mentre per gli altri mesi si riscontra un picco di richiesta di energia anche nelle ore serali quando tutti gli occupanti dell'edificio sono a casa. Tuttavia, anche per il mese di agosto 2017 e giugno 2018 il picco più alto di potenza richiesta si riscontra nella mattina verso le 11, per poi calare gradualmente durante il corso della giornata. Questo andamento evidenzia l'influenza dei carichi solari sull'uso di energia durante il periodo estivo.

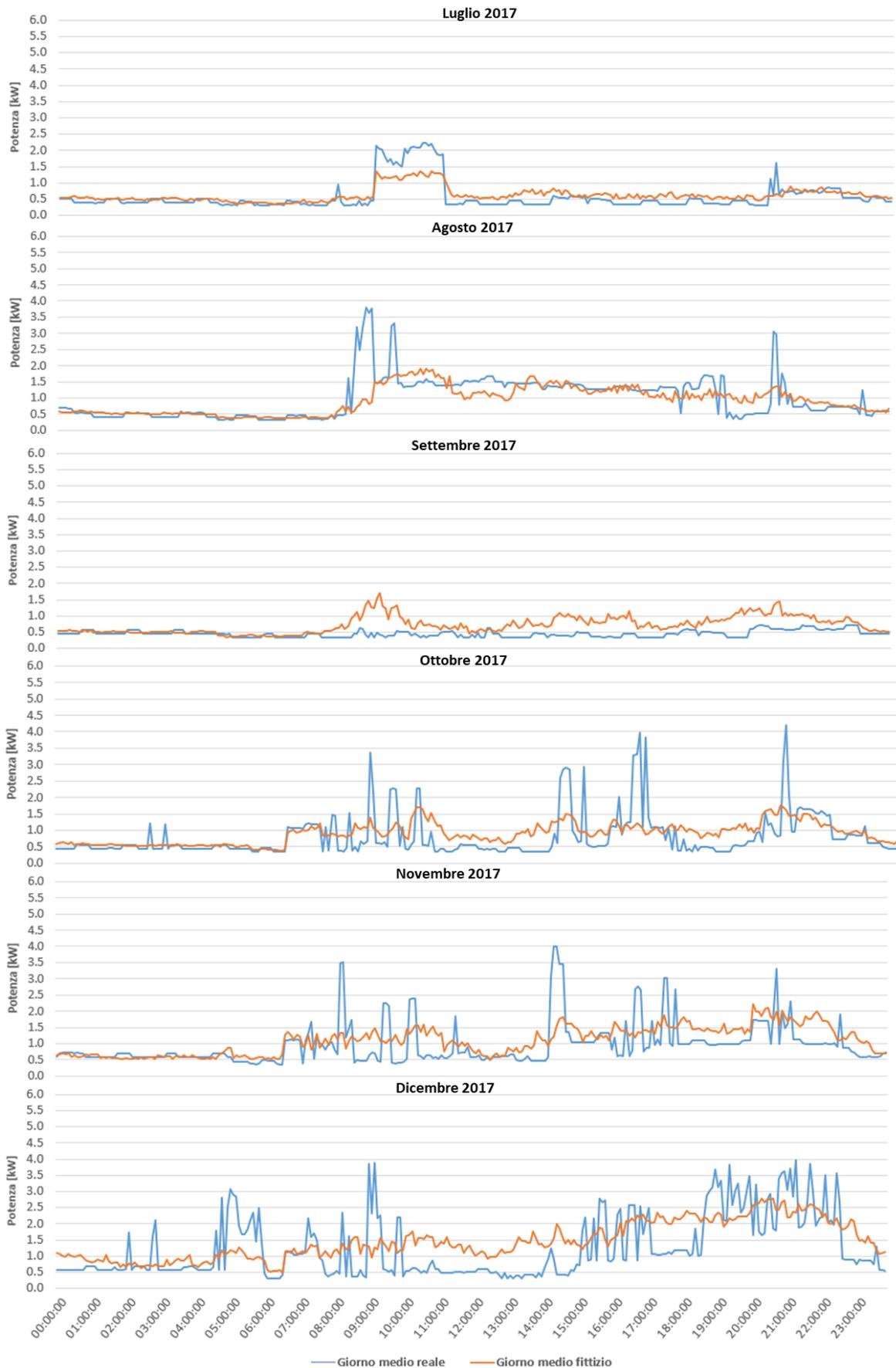


Figura 32. Profilo medio giornaliero reale e fittizio per i mesi di luglio, agosto, settembre, ottobre, novembre e dicembre 2017.

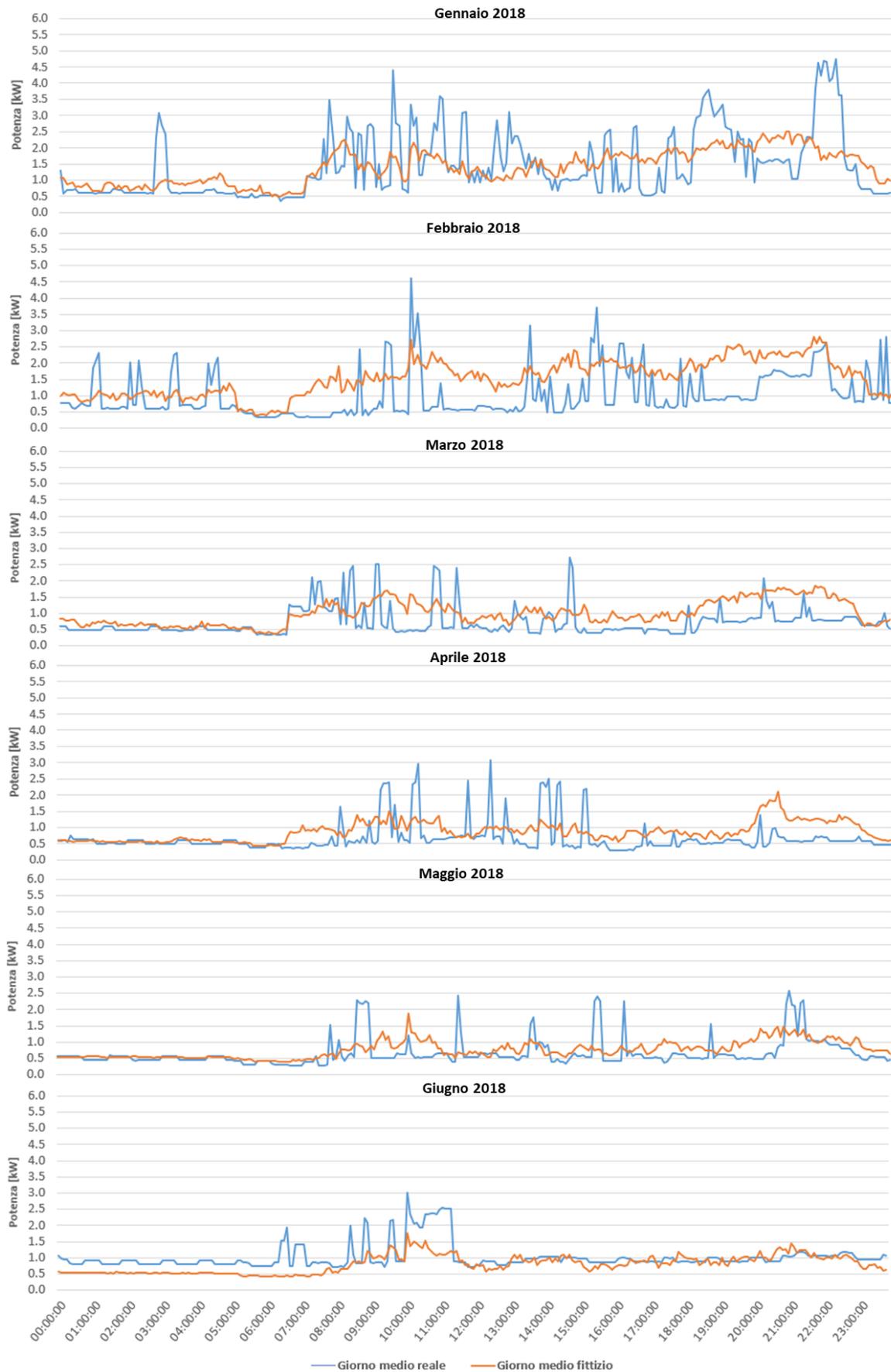


Figura 33. Profilo medio giornaliero reale e fittizio per i mesi gennaio, febbraio, marzo, aprile, maggio e giugno 2018.

5 Studio preliminare per un sistema di accumulo elettrico

Al fine di valutare il miglioramento delle prestazioni dell'edificio oggetto di analisi, è stato condotto uno studio di dimensionamento per un sistema di accumulo elettrico a supporto del sistema fotovoltaico installato nell'edificio. L'obiettivo di ottimizzazione corrisponde con la massimizzazione dell'autoconsumo dell'energia fotovoltaica prodotta in sito e con la minimizzazione dello scambio di energia con la rete, su base annuale. Un sistema di accumulo elettrico consente infatti di stoccare l'energia solare prodotta e non consumata durante il giorno ed utilizzarla, in caso di bisogno, anche nelle ore di assenza di radiazione solare. Questo aspetto risulta essere vantaggioso soprattutto nei mesi invernali, dove, come visto in Figura 24, esiste un netto sfasamento tra produzione massima di energia rinnovabile e massima richiesta di energia per tutti gli usi dell'edificio. L'energia rinnovabile, in questo modo, può essere pienamente sfruttata in sito e l'impiego di batterie di accumulo elettrico su piccola o vasta scala può contribuire considerevolmente ad aumentare la stabilità della rete elettrica. Oltre alla minimizzazione dello scambio di energia con la rete, infatti, un sistema di accumulo può operare anche secondo la logica di gestione definita "peak shaving" che, in caso di utenze domestiche, è in grado di evitare il superamento della soglia di potenza stipulata nel contratto di fornitura di energia elettrica e quindi di evitare carichi indesiderati per la rete.

Per il dimensionamento del sistema di accumulo si è dapprima condotto uno studio puramente energetico al fine di individuare la taglia ottimale delle batterie per la minimizzazione dello scambio di energia con la rete, su base annuale. Tale studio è stato condotto attraverso il software *Homer Pro*² originariamente sviluppato presso il National Renewable Energy Laboratory e potenziato e distribuito da HOMER Energy. Attraverso tale software, considerando come dati di input il profilo annuale di carico orario dell'edificio e di produzione oraria di energia elettrica da fotovoltaico dell'intero anno monitorato, sono state simulate differenti taglie del sistema di accumulo al fine di individuare quella più adatta al caso studio. Successivamente, al fine di rendere lo studio realmente utile agli utenti e gestori dell'edificio è stata condotta un'analisi economica, che dimostra, che l'ottimo energetico non corrisponde perfettamente all'ottimo economico, a causa degli alti costi delle batterie di accumulo e della vita utile limitata dei componenti tecnologici.

Le tecnologie su cui sono basati gli accumuli elettrici in commercio sono diverse e le due tipologie più diffuse in ambito residenziale sono quelle a litio e quelle al piombo-acido. Le batterie al piombo-acido sono più economiche (400-700 € per kWh di capacità [7]) rispetto a quelle agli ioni di litio (900-1600 € per kWh di capacità [7]), ma sono caratterizzate da una vita utile inferiore e richiedono di essere installate in locali ben areati a causa della produzione di gas idrogeno durante la fase di carica [8, 9]. La profondità di scarica che caratterizza le batterie al piombo-acido è pari al 50 % ovvero, solo il 50 % della capacità nominale della batteria può essere utilizzata per coprire i carichi elettrici poiché la batteria garantisce una buona durata solo se non viene scaricata per oltre metà della sua capacità di accumulo nominale. Le batterie al litio anche se meno economiche sono meno ingombranti, hanno una vita utile maggiore e sono caratterizzate da una profondità di scarica maggiore (80 %). In questo modo, a parità di fabbisogno, la capacità nominale di una batteria agli ioni di litio potrà essere più bassa rispetto ad una batteria al piombo-acido.

Per il caso in questione sono state scelte batterie di accumulo elettrico agli ioni di litio e simulato il loro comportamento per taglie da 5 kWh, 10 kWh, 15 kWh, 20 kWh e 25 kWh. Per valutare l'incremento di autoconsumo dovuto all'installazione del sistema di accumulo elettrico è stato simulato anche il caso di riferimento, senza batteria di accumulo, di seguito chiamato 0 kWh.

La Tabella 7, la Figura 34 e la Figura 35 riportano i risultati delle simulazioni effettuate attraverso il software *Homer Pro* per le differenti taglie del sistema di accumulo elettrico elencate poc'anzi. L'autoconsumo, calcolato a partire dall'energia elettrica prodotta da fotovoltaico e dall'energia immessa in rete, varia da 3869.4 kWh, nel caso senza batteria di accumulo, a 7497.4 kWh nel caso di un sistema di accumulo di capacità pari a 25 kWh, subendo un incremento del 94 %. Per il caso in esame inoltre l'accoppiamento dell'impianto fotovoltaico installato (da 8.14 kWp) ad un sistema di accumulo elettrico da 25 kWh permetterebbe di far fronte all'87 % della totalità di energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio.

² <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>

Quest'ultimo dato, definito *autosufficienza* in Tabella 7, risulta pari a 45 % nel caso di fotovoltaico senza batterie di accumulo ovvero nel caso di riferimento (0 kWh).

Tuttavia, i miglioramenti incrementali di autoconsumo di energia e di autosufficienza del sistema fotovoltaico-accumulo elettrico decrescono notevolmente quando si passa da batterie di accumulo da 15 kWh a 20 kWh o da 15 kWh a 25 kWh rispetto alle taglie inferiori. La batteria da 15 kWh, che potrebbe rappresentare una soluzione di compromesso per il caso studio, permette infatti un aumento dell'autoconsumo rispetto al caso di riferimento (0 kWh) di circa l'85 %, del 49 % rispetto al caso di una batteria di dimensioni di 5 kWh e del 18 % nel caso di una batteria da 10 kWh. In termini di autosufficienza, l'aumento percentuale risulta pari a 38 % rispetto al caso di una batteria da 0 kWh, al 22 % rispetto al caso da 5 kWh e 8 % rispetto al caso da 10 kWh. Questo miglioramento è chiaramente visibile dalla Figura 34 e dalla Figura 35. Oltre la taglia di accumulo da 15 kWh l'autoconsumo aumenta del 6 % e 9 % per batterie da 20 kWh e 25 kWh e del 3 % e 4 % in termini di autosufficienza. Per il caso in esame, l'unico modo per aumentare ulteriormente l'autoconsumo di energia e l'autosufficienza del sistema fotovoltaico-accumulo sarebbe quello di aumentare anche la taglia del campo fotovoltaico installato.

Tabella 7. Risultati delle simulazioni effettuate con Homer Pro per differenti taglie del sistema di accumulo elettrico.

Taglia batteria [kWh]	Energia richiesta per tutti gli usi [kWh/anno]	Energia elettrica prodotta da fotovoltaico [kWh/anno]	Energia acquistata dalla rete [kWh/anno]	Energia immessa in rete [kWh/anno]	Autoconsumo [kWh/anno]	Incremento percentuale di autoconsumo [%]	Autosufficienza [%]
25 kWh	8598.7	10946.4	2089	3449	7497.4	94%	87%
20 kWh	8598.7	10946.4	2174	3540	7406.4	91%	86%
15 kWh	8598.7	10946.4	2403	3790	7156.4	85%	83%
10 kWh	8598.7	10946.4	3035	4489	6457.4	67%	75%
5 kWh	8598.7	10946.4	4124	5694	5252.4	36%	61%
0 kWh	8598.7	10946.4	5372	7077	3869.4	0%	45%

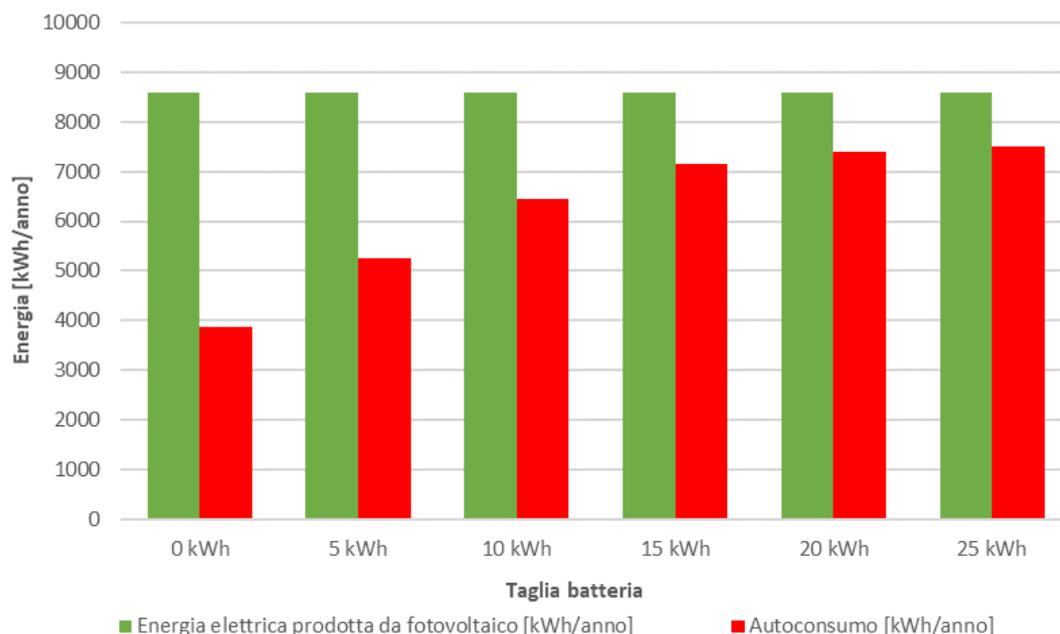


Figura 34. Energia elettrica prodotta da fotovoltaico (verde) ed autoconsumo di energia elettrica annuale (rosso) per differenti taglie di accumulo elettrico.

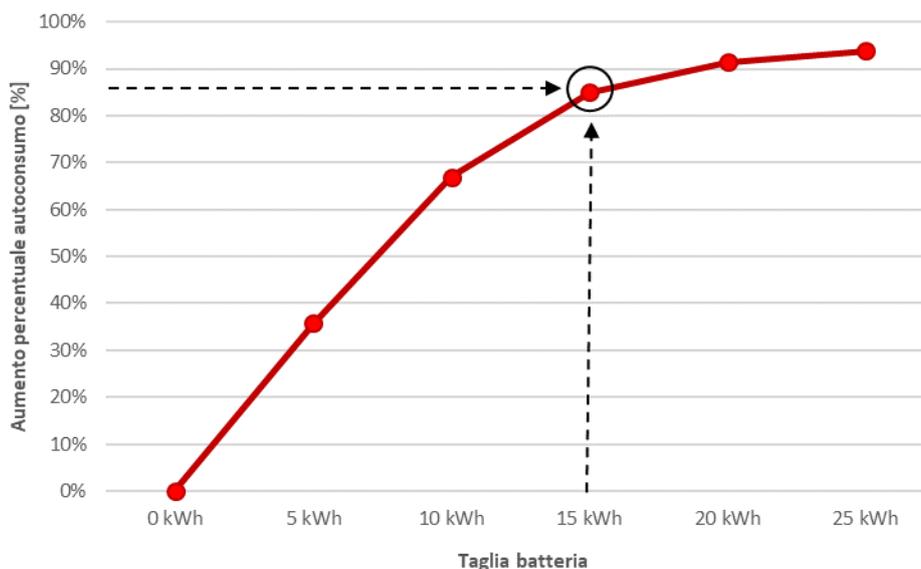


Figura 35. Incremento percentuale dell'autoconsumo differenti taglie di accumulo elettrico.

La Figura 36 riporta, come esempio, il profilo orario di potenza richiesta per tutti gli usi dell'edificio (bordeaux), potenza elettrica da fotovoltaico (verde), acquisto di energia dalla rete (nero), immissione di energia in rete (grigio), profilo di ricarica batteria da 15 kWh (giallo) e profilo di scarica della batteria da 15 kWh durante il 14 e il 15 luglio. Durante i mesi estivi l'acquisto dalla rete è minimo e diverso da zero solo nei giorni in cui la scarsa radiazione solare limita la produzione di energia elettrica da fotovoltaico e la ricarica della batteria. La fase di ricarica della batteria avviene durante le prime ore del mattino in concomitanza con l'inizio della produzione di energia elettrica da fotovoltaico, ovvero alle 6:00 nei due giorni analizzati. La ricarica della batteria richiede circa 6 ore durante il 14 luglio e circa 5 ore durante il 15 luglio poiché in tale giorno, durante le stesse ore, la richiesta di energia per tutti gli usi dell'edificio è minore (potenza istantanea media pari a circa 0.5 kW). In presenza di radiazione solare, i carichi dell'edificio risultano essere controbilanciati dalla produzione di energia da fotovoltaico e durante le ore di produzione massima, il surplus di energia prodotta viene ceduta alla rete (linea grigia). In assenza di radiazione solare tra il tramonto e l'alba, la batteria, che ha accumulato energia durante la mattina, permette di far fronte ai carichi elettrici serali e notturni iniziando il processo di scarica e terminandolo nelle prime ore del mattino nel momento in cui il sistema fotovoltaico ricomincia a produrre energia.

Per confronto, la Figura 37 riporta il comportamento del sistema fotovoltaico-accumulo elettrico durante due giorni invernali, il 22 e il 23 novembre. In entrambi i giorni, per far fronte ai carichi elettrici notturni e delle prime ore della mattina si richiede l'acquisto di energia dalla rete, poiché l'energia accumulata dalla batteria permette di controbilanciare i soli carichi elettrici registrati da dopo il tramonto fino alle 20:30 circa, durante il 22 novembre e da dopo il tramonto fino a dopo le 24:00 nel caso del 23 novembre. Il 23 novembre registra infatti carichi elettrici minori, rispetto al giorno precedente, durante le ore serali subito dopo il tramonto. Durante il 22 novembre inoltre, tutta l'energia prodotta da fotovoltaico viene utilizzata per ricaricare la batteria di accumulo e per far fronte ai carichi elettrici dell'edificio; durante il 23 novembre invece, una parte dell'energia prodotta da fotovoltaico viene immessa in rete quando il ciclo di carica della batteria è ormai in parte concluso. I profili di produzione di energia da fotovoltaico e quelli di ricarica e scarica della batteria da 15 kWh evidenziano, come già visto in Tabella 7, che la possibilità di incremento dell'autoconsumo è limitata soprattutto durante la stagione invernale, nella quale la quasi totalità dell'energia prodotta in sito viene sfruttata per la ricarica della batteria di accumulo e la rimanente parte utilizzata per sopperire ai carichi dell'edificio. Solo un aumento della capacità installata del sistema fotovoltaico potrebbe far aumentare l'autoconsumo di energia in sito minimizzando ulteriormente l'immissione in rete dell'energia prodotta o annullandola completamente.

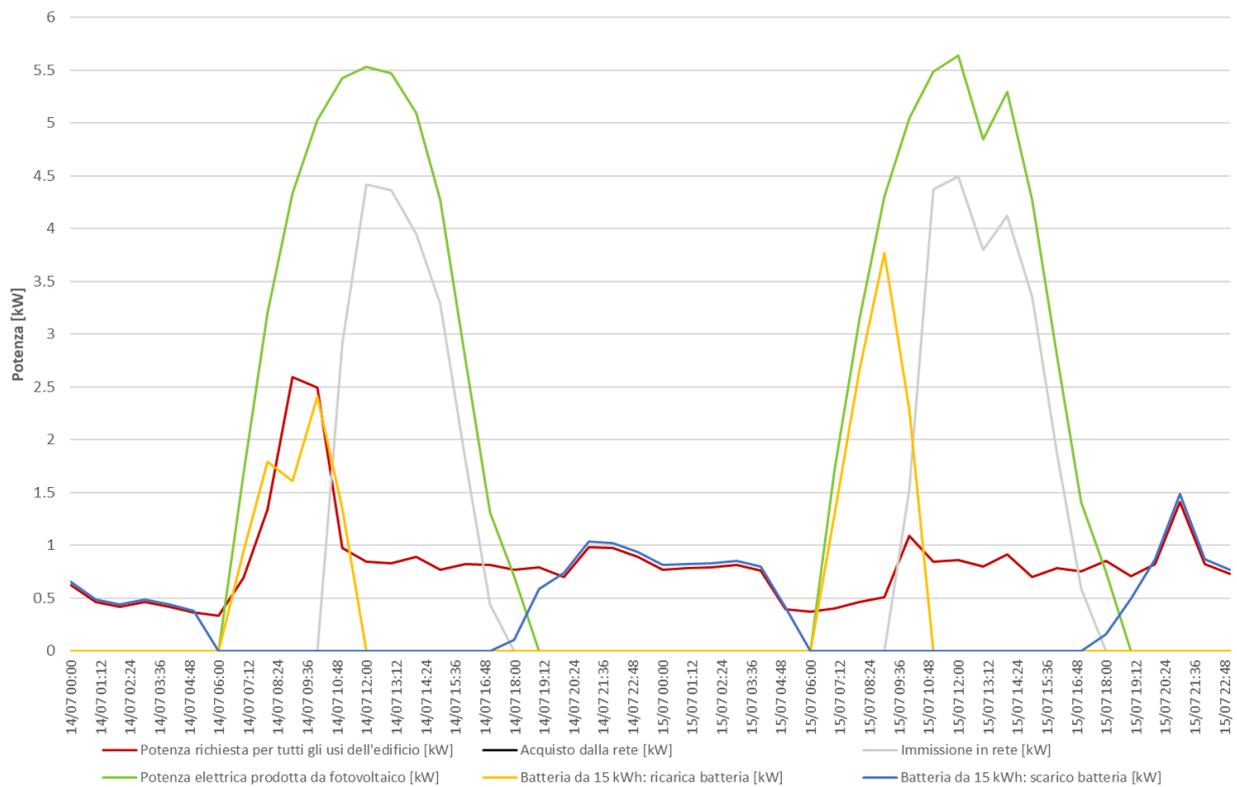


Figura 36. Profilo orario di potenza richiesta per tutti gli usi dell'edificio (bordeaux), potenza elettrica da fotovoltaico (verde), acquisto dalla rete (nero), immissione in rete (grigio), profilo di ricarica batteria da 15 kWh (giallo) e profilo di scarico della batteria da 15 kWh durante il 14 e il 15 luglio.

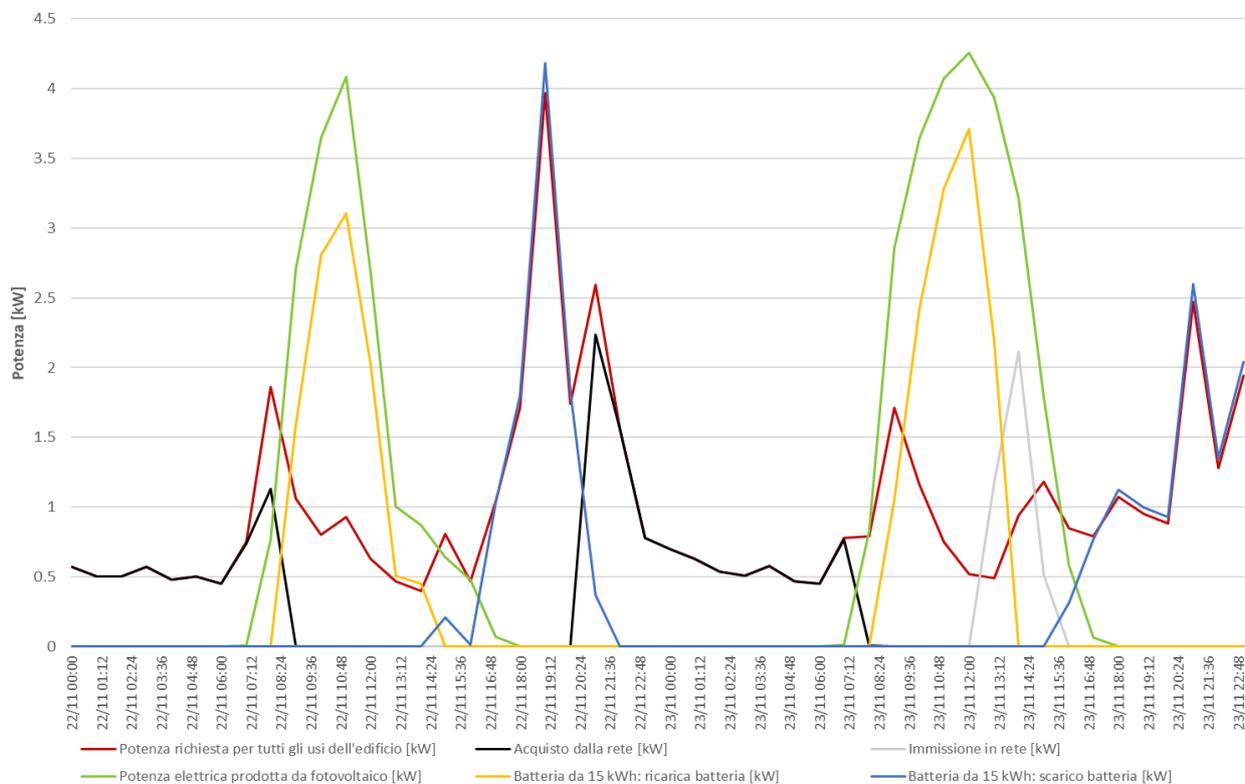


Figura 37. Profilo orario di potenza richiesta per tutti gli usi dell'edificio (bordeaux), potenza elettrica da fotovoltaico (verde), acquisto dalla rete (nero), immissione in rete (grigio), profilo di ricarica batteria da 15 kWh (giallo) e profilo di scarico della batteria da 15 kWh durante il 22 e 23 novembre.

Lo studio effettuato con *Homer Pro*, di tipo puramente energetico, ha permesso l'individuazione della taglia ottimale di accumulo elettrico per il caso in esame. Tuttavia, al fine di valutare la convenienza dell'investimento su un impianto di accumulo elettrico, è stata effettuata un'analisi economica utilizzando l'approccio del valore attuale netto (VAN) considerando il costo iniziale dell'impianto, i costi futuri di manutenzione ordinaria e straordinaria, l'entità dei ricavi e dei risparmi dovuti all'incremento dell'autoconsumo e all'immissione in rete della restante parte di energia prodotta e infine le possibili detrazioni ottenibili dall'installazione di tale sistema di accumulo. Tale approccio consente di valutare la fattibilità economica dell'investimento a lungo termine tenendo conto del costo iniziale dell'investimento e dei flussi di cassa attualizzati nel corso di vita utile dell'impianto considerato. L'investimento può definirsi conveniente se, tramite i flussi di cassa che esso è capace di generare, sarà in grado di ripagare interamente il costo globale dell'intervento e sarà altresì in grado di garantire un rendimento aggiuntivo all'investitore durante la vita utile del sistema installato. L'investimento sarà conveniente se, alla fine della vita utile del sistema di accumulo, il VAN risulterà maggiore di zero, ovvero se il tempo di ritorno dell'investimento sarà minore della vita utile del sistema di accumulo che si vuole installare.

Il costo globale dell'intervento o VAN è stato quindi calcolato sommando i diversi tipi di costi e applicando ad essi il tasso di sconto così da esprimerli in termini di valore nell'anno iniziale con l'aggiunta del valore residuo attualizzato, come di seguito esplicitato [10]:

$$C_g(\tau) = I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{CF(i)}{(1-r)^i} = I_0 + \sum_{i=1}^{\tau} CF(i) \cdot R_d(i)$$

Dove:

$C_g(\tau)$: costo globale (riferito all'anno iniziale τ_0) nell'arco del periodo di calcolo;

τ : periodo di calcolo;

r : tasso di sconto o di attualizzazione;

I_0 : costo iniziale dell'investimento;

$CF(i)$: flusso di cassa annuale all'anno i

$R_d(i)$: il fattore di sconto per l'anno i sulla base del tasso di sconto r .

L'analisi economica è stata condotta per ciascuna taglia di accumulo analizzata precedentemente (da 5 kWh a 25 kWh), mentre il caso di riferimento, senza batteria di accumulo, non prevedendo nessun tipo di investimento, non è stato analizzato. Il VAN è stato calcolato considerando una vita utile delle batterie di accumulo pari a 10 anni [11], tuttavia, considerando una vita media dell'impianto fotovoltaico già installato di 25 anni ed essendo installato da 5 anni, il VAN è stato calcolato anche su un periodo pari a 20 anni al fine di verificare la fattibilità economica dell'investimento fino al termine della vita utile del sistema fotovoltaico presente. Per quest'ultimo calcolo si è tenuto conto del costo di sostituzione delle batterie di accumulo e del nuovo inverter ai 10 anni di vita all'interno dei costi di manutenzione straordinaria. Il costo iniziale dell'investimento è stato valutato considerando un costo medio del sistema di accumulo di 1000 €/kWh di capacità installata [12, 7] e un costo del nuovo inverter pari al 9 % del costo dell'impianto [13]. Il sistema fotovoltaico installato infatti, essendo costituito da due differenti campi fotovoltaici e da un inverter per ciascun campo, renderebbe difficoltoso il collegamento del sistema di accumulo direttamente ai due inverter. Pertanto, si è prevista l'installazione di un sistema di accumulo lato "post-produzione", ovvero a valle dei pannelli fotovoltaici, che richiede l'installazione di un nuovo inverter. Infine, il costo della manutenzione ordinaria annuale incide invece per l'1.5 % del totale costo iniziale dell'investimento [14, 15]. Come tasso di sconto è stato utilizzato un tasso base del 4 % ritenuto il tasso minimo di rendimento necessario a convincere il gestore a investire in un'attività di produzione di energia da fonti rinnovabili [16]. È importante notare che in questo studio non si sono tenute in conto logiche di ottimizzazione legate ai differenti costi orari dell'energia, ma sono stati calcolati i valori medi reali da gennaio 2018 al giugno 2018 del caso di studio. In particolare, per il calcolo dei costi di acquisto di energia dalla rete è stato considerato un costo medio dell'energia di 0.19 €/kWh, il quale corrisponde peraltro alle proiezioni del modello *Energy Policy Scenarios to 2050 – POLES* [17], mentre per il calcolo dei ricavi ottenibili dall'immissione in rete

dell'energia prodotta da fotovoltaico ma non auto-consumata in sito, un prezzo di vendita pari a 0.11 €/KWh. Il calcolo dei risparmi e dei ricavi ha tenuto conto infine, di una percentuale di decadimento produttivo dei pannelli pari allo 0.05 % annuo [18] incidente su entrambe le componenti.

La Tabella 8 mostra i costi di investimento iniziale, di manutenzione ordinaria e straordinaria, i ricavi ottenibili dall'installazione di un sistema di accumulo di differenti taglie e le detrazioni ottenibili. Tali costi e ricavi sono stati calcolati a partire dai dati economici elencati poc'anzi e dai dati energetici ottenuti attraverso la simulazione descritta precedentemente. Per il calcolo del VAN il costo di manutenzione ordinaria è da considerarsi annualmente così come i risparmi per l'autoconsumo in sito dell'energia prodotta da fotovoltaico e i ricavi dalla vendita di energia alla rete, mentre i costi di manutenzione straordinaria sono da considerarsi ai 10 anni di vita dell'impianto di accumulo elettrico e solo nel caso di calcolo del VAN a 20 anni. Come già visto dall'analisi energetica, anche in termini di risparmi e ricavi, la batteria da 15 kWh rappresenta la soluzione di compromesso per il caso studio permettendo un risparmio annuo per l'energia auto-consumata di 1,359.72 € e un ricavo annuale per l'energia rivenduta in rete pari a 416.90 €.

Al momento in Italia per installare batterie di accumulo su un impianto fotovoltaico esistente o acquistare un sistema fotovoltaico con sistema di accumulo, sono applicabili detrazioni fiscali pari al 50 % del costo dell'impianto rimborsabili in rate di pari importo su 10 anni a patto che l'impianto fotovoltaico abbia una potenza non superiore a 20 kWp e il sistema venga installato direttamente al servizio dell'abitazione dell'utente [7]. Per la detrazione fiscale, il limite di spesa ammesso, attualmente pari a 96,000.00 €, riguarda sia l'impianto fotovoltaico che il sistema di accumulo. Se l'acquisto del sistema di accumulo è effettuato in un periodo di imposta successivo a quello di acquisto dell'impianto fotovoltaico, ai fini del raggiungimento del suddetto limite di spesa, occorre tener conto delle spese precedentemente sostenute per l'impianto fotovoltaico [7]. Nel caso in esame, l'investimento da sostenere per il sistema di accumulo di ciascuna taglia considerata, in aggiunta all'investimento sostenuto per l'installazione del sistema fotovoltaico presente, non supera il limite di spesa ammesso alla detrazione. Nel calcolo del VAN a 10 e 20 anni si è quindi tenuto conto delle detrazioni fiscali del 50 % ottenibili dall'installazione del sistema di accumulo.

Tabella 8. Costi, ricavi e detrazioni derivanti dall'installazione di un sistema di accumulo di differenti taglie.

Taglia batteria	5 kWh	10 kWh	15 kWh	20 kWh	25 kWh
Costi					
Costo d'investimento iniziale (costo impianto)	5,450.00 €	10,900.00 €	16,350.00 €	21,800.00 €	27,250.00 €
Costi di manutenzione ordinaria annuale	81.75 €	163.50 €	245.25 €	327.00 €	408.75 €
Costo di manutenzione straordinaria (sostituzione batterie ai 10 anni di vita utile)	5,450.00 €	10,900.00 €	16,350.00 €	21,800.00 €	27,250.00 €
Ricavi e risparmi					
Risparmio annuale per energia auto-consumata	997.96 €	1226.91 €	1359.72 €	1407.22 €	1424.51 €
Ricavi annuali per energia immessa in rete	626.34 €	493.79 €	416.90 €	389.40 €	379.39 €
Detrazioni fiscali					
Detrazione del 50 % sul costo iniziale dell'investimento (ripagato in 10 anni)	2,725.00 €	5,450.00 €	8,175.00 €	10,900.00 €	13,625.00 €

La Tabella 9 e la Tabella 10 riportano il calcolo del VAN rispettivamente a 10 e 20 anni di vita utile dell'impianto di accumulo elettrico considerando i costi i ricavi e le detrazioni applicabili descritti finora. Entrambe le tabelle partono da valori negativi (perdita) poiché il costo iniziale d'impianto deve essere recuperato. Con il passare degli anni essendo i ricavi superiori ai costi, i valori iniziano a migliorare fino a quando passano da negativi a positivi.

Questo passaggio indica il momento in cui l'investimento è riuscito a produrre un tasso di remunerazione pari almeno al 4 % utilizzato nel calcolo o il momento in cui il valore del rendimento ha superato quella percentuale. Il passaggio da valori negativi a valori positivi individua anche il tempo di ritorno dell'investimento sostenuto per l'installazione del sistema di accumulo. Il valore del VAN alla fine della vita utile del sistema rappresenta il valore monetario attualizzato del guadagno ottenibile dall'investimento.

Nel caso del VAN calcolato a 10 anni, tutte le taglie del sistema di accumulo analizzate tranne quella da 20 e 25 kWh risultano remunerative. La soluzione da 5 kWh risulta esserlo già dai 4 anni di vita dell'impianto quella da 10 kWh dai 6 e quella da 15 kWh dal nono anno. La taglia da 20 kWh e quella da 25 kWh presentano valori ancora negativi del VAN alla fine dei 10 anni di vita dell'impianto.

Tabella 9. Calcolo VAN a 10 anni.

Valore attuale netto (VAN) a 10 anni					
Anno	5 kWh	10 kWh	15 kWh	20 kWh	25 kWh
0	-€ 5,450.00	-€ 10,900.00	-€ 16,350.00	-€ 21,800.00	-€ 27,250.00
1	-€ 3,704.76	-€ 8,878.66	-€ 14,091.48	-€ 19,338.83	-€ 24,598.42
2	-€ 2,027.40	-€ 6,935.85	-€ 11,920.64	-€ 16,973.15	-€ 22,049.65
3	-€ 415.28	-€ 5,068.54	-€ 9,834.08	-€ 14,699.26	-€ 19,599.72
4	€ 1,134.15	-€ 3,273.78	-€ 7,828.54	-€ 12,513.59	-€ 17,244.78
5	€ 2,623.32	-€ 1,548.75	-€ 5,900.86	-€ 10,412.73	-€ 14,981.16
6	€ 4,054.57	€ 109.25	-€ 4,048.03	-€ 8,393.37	-€ 12,805.31
7	€ 5,430.16	€ 1,702.82	-€ 2,267.13	-€ 6,452.36	-€ 10,713.84
8	€ 6,752.25	€ 3,234.48	-€ 555.37	-€ 4,586.66	-€ 8,703.46
9	€ 8,022.92	€ 4,706.63	€ 1,089.93	-€ 2,793.35	-€ 6,771.03
10	€ 9,244.17	€ 6,121.58	€ 2,671.35	-€ 1,069.62	-€ 4,913.54

Considerando i 20 anni di vita dell'impianto di accumulo elettrico, che corrispondono anche alla fine di vita utile dell'impianto fotovoltaico installato, i costi di manutenzione straordinaria per la sostituzione delle batterie di accumulo e del nuovo inverter dopo 10 anni incidono negativamente, facendo calare la remuneratività dell'investimento rispetto ai casi raccolti in Tabella 9. Per la batteria da 5 kWh il valore del VAN a 10 anni, evidenziato in azzurro più scuro in Tabella 10, risulta pari a 5617.57 € rispetto ai precedenti 9244.17 €. Per le batterie da 10 kWh e 15 kWh il valore del VAN diventa negativo e per le batterie da 20 kWh e da 25 kWh il valore del VAN rimane negativo ma peggiora notevolmente, da - 1069.62 € a - 15576.01 € per la taglia da 20 kWh e da - 4913.54 € a - 23046.53 € per la taglia da 25 kWh. Tuttavia, nonostante la perdita di remuneratività ai 10 anni di vita dell'impianto il valore del VAN a 20 anni per le taglie del sistema di accumulo da 5kWh, 10 kWh e 15 kWh risulta essere maggiore di zero anche se le taglie da 5 kWh e 10 kWh risultano economicamente più vantaggiose, poiché più remunerative già dai primi anni di vita dell'impianto. Il sistema di accumulo da 15 kWh identificato come la soluzione ottimale in relazione agli output energetici della simulazione effettuata con il software *Homer Pro*, presentando un VAN pari a 113.80 € ai 20 anni di vita utile del sistema integrato fotovoltaico-accumulo elettrico, assicura comunque una piccola remuneratività, anche se molto minore rispetto agli altri due casi. L'investimento infatti risulta remunerativo già dal nono anno di vita dell'impianto, ma la sostituzione delle batterie di accumulo e dell'inverter al decimo anno ne limita la remuneratività fino al ventesimo anno nel quale il VAN assume nuovamente valori positivi. Questa soluzione risulta pertanto essere percorribile anche a livello economico, anche se poco remunerativa. Si ricorda tuttavia, che il presente studio non ha tenuto conto delle differenti

tariffe orarie dell'energia nelle varie fasi della giornata che potrebbero garantire margini di miglioramento dell'analisi economica.

Il mercato dei sistemi di accumulo nel residenziale è un mercato ancora di nicchia a causa degli elevati costi delle batterie, ma destinato ad avere sviluppi interessanti e una conseguente ampia diffusione nell'ottica di sviluppo delle reti energetiche intelligenti del futuro. È da considerare inoltre che nei prossimi anni la fattibilità economica di investimenti su sistemi di accumulo elettrico potrà ulteriormente migliorare anche a causa del calo di prezzi che subiranno questi sistemi.

Tabella 10. Calcolo VAN a 20 anni.

Valore attuale netto (VAN) a 20 anni					
Anno	5 kWh	10 kWh	15 kWh	20 kWh	25 kWh
0	-€ 5,450.00	-€ 10,900.00	-€ 16,350.00	-€ 21,800.00	-€ 27,250.00
1	-€ 3,704.76	-€ 8,878.66	-€ 14,091.48	-€ 19,338.83	-€ 24,598.42
2	-€ 2,027.40	-€ 6,935.85	-€ 11,920.64	-€ 16,973.15	-€ 22,049.65
3	-€ 415.28	-€ 5,068.54	-€ 9,834.08	-€ 14,699.26	-€ 19,599.72
4	€ 1,134.15	-€ 3,273.78	-€ 7,828.54	-€ 12,513.59	-€ 17,244.78
5	€ 2,623.32	-€ 1,548.75	-€ 5,900.86	-€ 10,412.73	-€ 14,981.16
6	€ 4,054.57	€ 109.25	-€ 4,048.03	-€ 8,393.37	-€ 12,805.31
7	€ 5,430.16	€ 1,702.82	-€ 2,267.13	-€ 6,452.36	-€ 10,713.84
8	€ 6,752.25	€ 3,234.48	-€ 555.37	-€ 4,586.66	-€ 8,703.46
9	€ 8,022.92	€ 4,706.63	€ 1,089.93	-€ 2,793.35	-€ 6,771.03
10	€ 5,617.57	-€ 1,131.61	-€ 8,208.44	-€ 15,576.01	-€ 23,046.53
11	€ 6,614.31	-€ 125.67	-€ 7,219.45	-€ 14,627.20	-€ 22,146.11
12	€ 7,572.22	€ 841.06	-€ 6,269.06	-€ 13,715.43	-€ 21,280.89
13	€ 8,492.79	€ 1,770.09	-€ 5,355.74	-€ 12,839.28	-€ 20,449.48
14	€ 9,377.50	€ 2,662.89	-€ 4,478.06	-€ 11,997.33	-€ 19,650.57
15	€ 10,227.73	€ 3,520.88	-€ 3,634.63	-€ 11,188.27	-€ 18,882.89
16	€ 11,044.82	€ 4,345.41	-€ 2,824.11	-€ 10,410.80	-€ 18,145.20
17	€ 11,830.08	€ 5,137.79	-€ 2,045.22	-€ 9,663.69	-€ 17,436.36
18	€ 12,584.73	€ 5,899.28	-€ 1,296.72	-€ 8,945.75	-€ 16,755.21
19	€ 13,309.98	€ 6,631.07	-€ 577.43	-€ 8,255.85	-€ 16,100.69
20	€ 14,006.97	€ 7,334.33	€ 113.80	-€ 7,592.89	-€ 15,471.75

6 Analisi delle condizioni di comfort ambientale su base annuale e stagionale

Il monitoraggio dei dati di temperatura dell'aria e globotermometrica all'interno di tre stanze dell'edificio (soggiorno camera matrimoniale e studio) ha reso possibile l'analisi di comfort in periodo estivo e invernale secondo la norma EN 15251 [19]. La presenza di un sensore di temperatura di tipo PT100 a 4 fili per la misura della temperatura dell'aria e, in modo accoppiato, di sonde globotermometriche ha permesso il calcolo della temperatura media radiante e della temperatura operativa dei tre ambienti (Figura 38). Il sensore di temperatura di tipo PT100 a 4 fili è rappresentato in figura con un pallino giallo, mentre la sonda globotermometrica con un pallino rosso; essi sono stati posizionati alla stessa altezza e nella stessa posizione, distanziati solo dallo spazio sufficiente per non perturbare le misure effettuate da ciascuno, come riportato a destra nella figura.

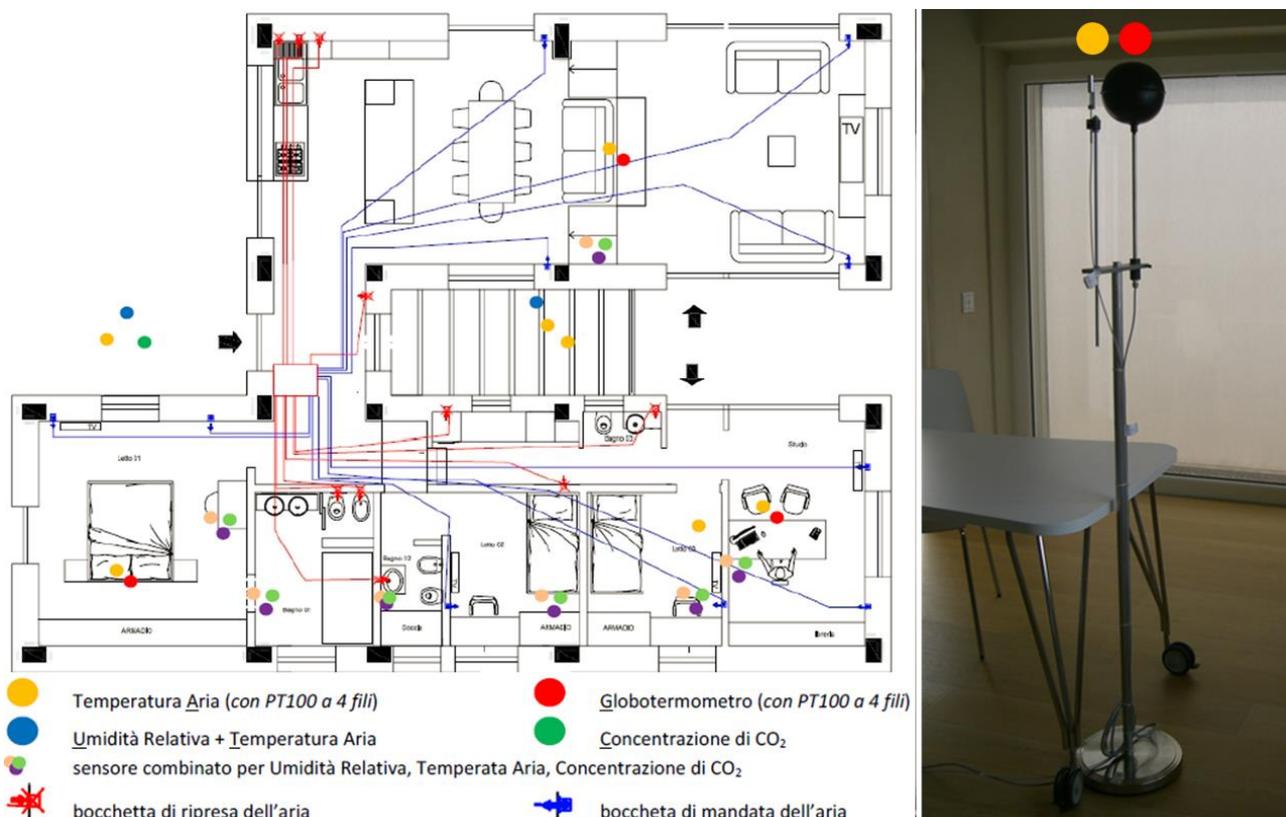


Figura 38. Pianta piano terra edificio – sensori ambientali installati (sinistra). Sensori di temperatura dell'aria interna: termoresistenza PT100 e sonda globotermometrica (destra).

Per fornire una valutazione globale dell'ambiente interno la norma EN 15251 definisce quattro categorie di edifici e di corrispondenti livelli di benessere (Cat. I, Cat. II, Cat. III, Cat. IV). L'edificio oggetto di studio, essendo di nuova realizzazione, deve riferirsi alla Cat. II. I limiti di temperatura accettabili affinché l'ambiente venga percepito come confortevole dipendono dal tipo di sistema usato nell'edificio per fornire il comfort e vengono definiti attraverso modelli di comfort (Fanger e adattivo). Quando il raffrescamento o riscaldamento vengono forniti attraverso sistemi attivi, le temperature limite di comfort sono dettate dal modello di Fanger, altrimenti dal modello adattivo. La normativa, e più in generale la letteratura, non forniscono tuttavia indicazioni per la condizione in cui brevi periodi di climatizzazione attiva si alternino a lunghi periodi di funzionamento passivo. Condizione per altro prevalente nell'edificio analizzato e in moltissimi edifici residenziali in clima mediterraneo.

Il modello di comfort adattivo, nel quale l'occupante è inteso come soggetto attivo interagente con l'ambiente che lo circonda, pare tuttavia adattarsi meglio al caso studio, poiché l'utente è libero di scegliere e di impostare le logiche di controllo e le strategie di climatizzazione e ventilazione (naturale o meccanica) a seconda della sua preferenza; questo si può vedere soprattutto dallo scarso uso della pompa di calore durante i periodi intermedi dell'anno ed in estate anche in presenza di elevate temperature esterne.

Si è scelto dunque di utilizzare il modello adattivo per l'analisi di tutto il periodo estivo, primaverile e autunnale. Tuttavia, durante la stagione invernale l'unico sistema di riscaldamento presente nell'edificio è di tipo attivo (pompa di calore), pertanto, la verifica di comfort in regime invernale è stata eseguita seguendo il modello di Fanger i cui valori di riferimento dei limiti di temperatura operativa per edifici residenziali in regime di riscaldamento e in caso di riscaldamento attivo sono riportati in Tabella 11.

Tabella 11. EN 15251 – Modello di Fanger intervalli di temperatura per il calcolo del comfort in condizioni di funzionamento invernale ed in caso di riscaldamento attivo (estratto da tabella A.3).

Categoria	Intervalli di temperatura accettabili – stagione di riscaldamento
I	21.0 – 25.0 °C
II	20.0 – 25.0 °C
III	18.0 – 25.0 °C

Il modello adattivo presuppone invece il calcolo della temperatura di comfort per stabilire i limiti inferiori e superiori oltre i quali la temperatura operativa non deve andare. La temperatura di comfort è stata calcolata in base alla temperatura running mean dell'aria esterna (T_{rm}) che rappresenta una combinazione lineare delle temperature medie giornaliere esterne dei giorni precedenti al calcolo. La Tabella 12 riporta i limiti di temperatura operativa in base alla temperatura di comfort per le tre categorie di edifici.

È stata successivamente calcolata la temperatura operativa dei tre ambienti analizzati come media della temperatura dell'aria e della temperatura media radiante calcolata, a sua volta secondo quanto descritto nella norma ISO 7726 [20]. I valori di temperatura operativa sono stati rappresentati in Figura 39 in relazione ai limiti del modello di Fanger per la stagione invernale (15 novembre – 31 marzo) e secondo quelli del modello adattivo per il resto dell'anno.

Tabella 12. 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 le tre categorie di comfort	
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	$t_{op,min}=T_{comf}-4$

La Figura 39 riporta l'analisi di comfort di tutto il periodo di monitoraggio; la temperatura operativa calcolata per il soggiorno è riportata in giallo per la camera matrimoniale in nero e per lo studio in verde. Come si può vedere per gran parte del periodo di raffrescamento e del periodo intermedio l'analisi di comfort soddisfa i limiti stabiliti dal modello adattivo, mentre l'analisi secondo il modello di Fanger evidenzia alcune criticità soprattutto nel caso della camera adibita a studio (in verde). Si riporta a questo proposito in Figura 40 lo zoom del periodo di riscaldamento per un'analisi più approfondita.

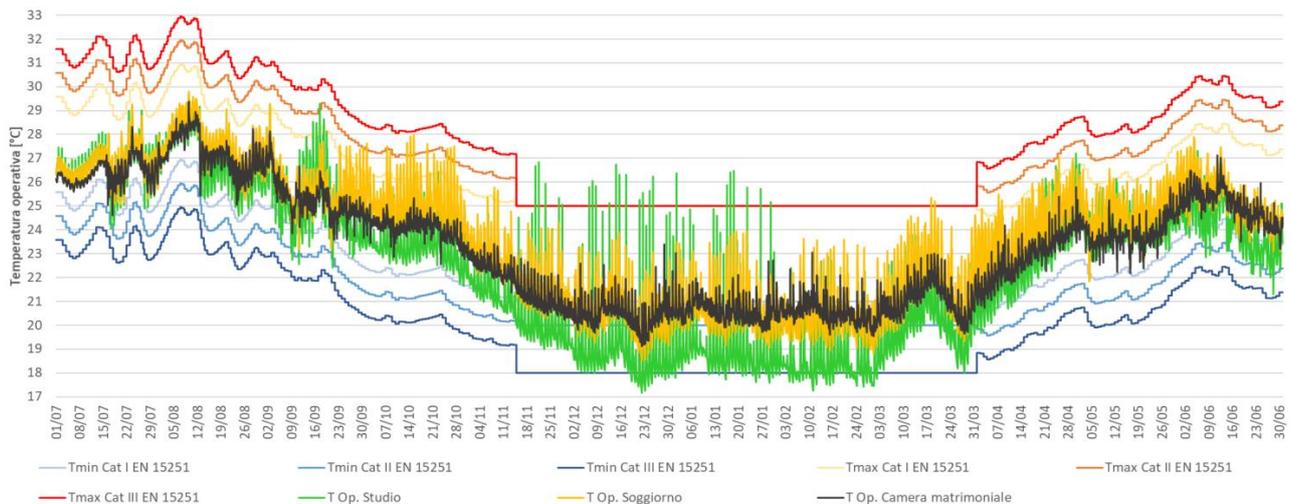


Figura 39. Analisi di comfort del periodo di monitoraggio secondo il modello di Fanger per il periodo di riscaldamento e secondo il modello adattivo per il resto dell'anno temperatura operativa soggiorno camera matrimoniale studio luglio 2017 – giugno 2018.

Come si può vedere di seguito, la stanza che evidenzia condizioni in prossimità dei limiti inferiori di comfort invernale è quella adibita a studio, che si trova nell'estremità nord-ovest dell'edificio (vedi Figura 2). La stanza in questione è caratterizzata da dimensioni in pianta contenute (14.4 m²) e dalla presenza di due grandi aperture finestrate di cui una esposta a sud. La stanza, inoltre, non è occupata regolarmente quindi anche gli apporti interni sono ridotti o nulli per la maggior parte delle ore dell'anno. I minimi di temperatura registrati in questo ambiente (17 – 18 °C) dipendono quindi da queste particolari condizioni. La verifica di Fanger non viene però soddisfatta anche in relazione al limite superiore di temperatura operativa; si vedano ad esempio i picchi di temperatura dell'ordine di 25 – 27 °C da novembre a fine gennaio. Questo avviene poiché l'ambiente in questione, in presenza di elevata radiazione solare, riceve elevati apporti soprattutto dalla superficie vetrata esposta a sud, che fanno oscillare la temperatura della stanza. La schermatura solare non viene infatti tipicamente attivata in fase invernale. Gli occupanti dell'edificio hanno confermato questo particolare comportamento della stanza, che non essendo occupata regolarmente e presentando questi andamenti sporadici, in relazione ad alcune condizioni di radiazione e di temperatura esterna, non ha creato situazioni di discomfort. Gli altri ambienti della casa hanno invece registrato un comportamento soddisfacente durante tutto l'anno, anche in presenza di sfavorevoli condizioni climatiche esterne come quelle registrate ad agosto con temperature molto elevate durante l'intero arco della giornata e della notte.

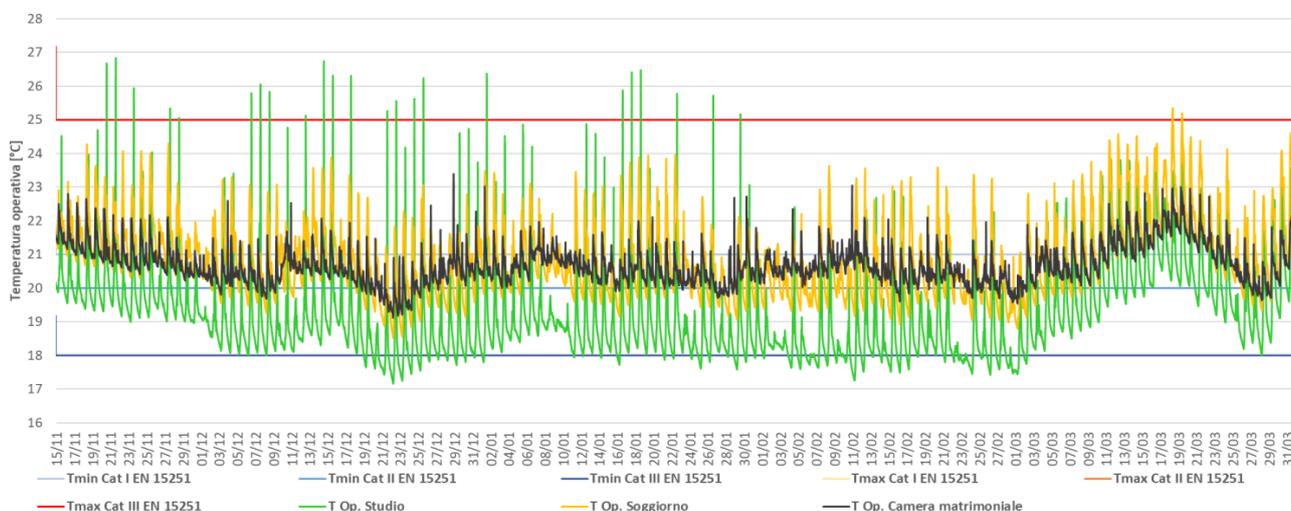


Figura 40. Analisi di comfort secondo il modello di Fanger per il periodo di riscaldamento 15 novembre 2017 – 31 marzo 2018.

Per una più immediata visione delle condizioni di benessere termoigrometrico misurate nelle tre stanze, è stata analizzata la distribuzione delle temperature operative registrate in relazione alle categorie di comfort. La Figura 41 riporta la distribuzione percentuale della temperatura operativa rispetto ai limiti inferiori (lower) e superiori (upper) delle categorie di comfort durante l'intero anno di monitoraggio. Si vede come durante l'anno le situazioni di discomfort siano principalmente correlate allo sfioramento dei limiti inferiori di temperatura operativa. All'interno della Cat. I ricadono il 68.9 % dei valori di temperatura, mentre circa l'86 % di tutti i valori si ritrovano all'interno della Cat. II, di riferimento per la tipologia di edificio oggetto di studio. Il restante 14 % dei valori di temperatura operativa ricade oltre la Cat. II e rispettivamente: 12.4 % in Cat. III e 1.6 % oltre la Cat. III.



Figura 41. Distribuzione percentuale della temperatura operativa del soggiorno camera matrimoniale e studio in relazione alle categorie di comfort e ai loro limiti superiori (upper) e inferiori (lower) durante l'intero anno di monitoraggio.

Focalizzandosi sui risultati di temperatura operativa durante stagione di riscaldamento (Figura 42) la situazione cambia e risulta distribuita in modo diverso, come già precedentemente visto in Figura 40. Il 25.4 % dei valori di temperatura operativa ricadono all'interno della Cat. I e il 63.3 % all'interno della Cat. II, i restanti valori di temperatura operativa si trovano rispettivamente in Cat. III e Cat. IV con il 32.3 % e il 4.4 %.

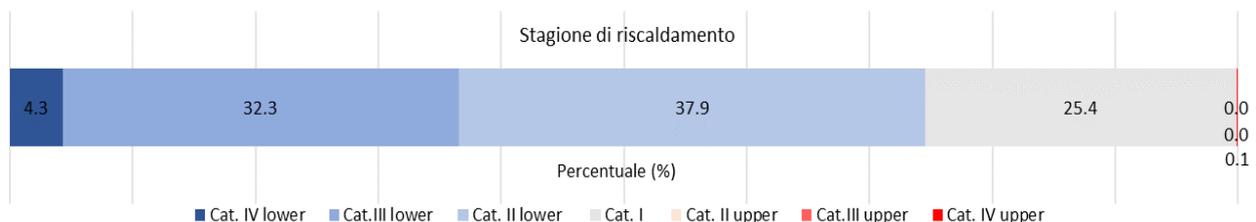


Figura 42. Distribuzione percentuale della temperatura operativa del soggiorno camera matrimoniale e studio in relazione alle categorie di comfort e ai loro limiti superiori (upper) e inferiori (lower) durante la stagione di riscaldamento.

Le condizioni di comfort registrate all'interno dello studio tuttavia hanno dimostrato essere poco rappresentative delle condizioni di comfort mediamente registrate all'interno delle stanze maggiormente utilizzate dell'edificio. A tal proposito, è stata condotta la stessa analisi di distribuzione percentuale della temperatura operativa, considerando solamente il soggiorno e la camera matrimoniale.

La Figura 43 riporta la distribuzione percentuale della temperatura operativa rispetto ai limiti delle categorie di comfort durante l'intero anno di monitoraggio per il solo soggiorno e la camera matrimoniale. Si vede come i risultati riportati in Figura 43, rispetto all'analisi precedente che includeva anche lo studio, siano migliorati. All'interno della Cat. I ricadono ora il 73.7 % dei valori di temperatura operativa mentre il 93.8 % della totalità dei valori di temperatura operativa ricadono all'interno della Cat. II. Solo il 6.2 % dei valori di temperatura ricadono oltre la Cat. II, ma contenuti all'interno della Cat. III; in questo caso infatti non ci sono valori di temperatura che superano i limiti della Cat. III. Come nel caso precedente la quasi totalità dei valori che ricadono oltre la Cat. II non rispettano i limiti inferiori della Cat. II.



Figura 43. Distribuzione percentuale della temperatura operativa del soggiorno e camera matrimoniale in relazione alle categorie di comfort e ai loro limiti superiori (upper) e inferiori (lower) durante l'intero anno di monitoraggio.

La Figura 44 riporta invece i risultati di distribuzione percentuale della temperatura operativa del soggiorno e della camera matrimoniale durante la stagione di riscaldamento. Anche in questo caso non ci sono valori di temperatura operativa che superano i limiti della Cat. III e rispetto al caso comprendente, la percentuale di valori di temperatura contenuti all'interno della Cat. I e II sono aumentati. Il 32.5 % dei valori di temperatura operativa ricadono all'interno della Cat. I e l'83.8 % all'interno della Cat. II. I restanti valori di temperatura (16.1 %) sono compresi in Cat. III e sfiorano il limite inferiore di temperatura della Cat. II.

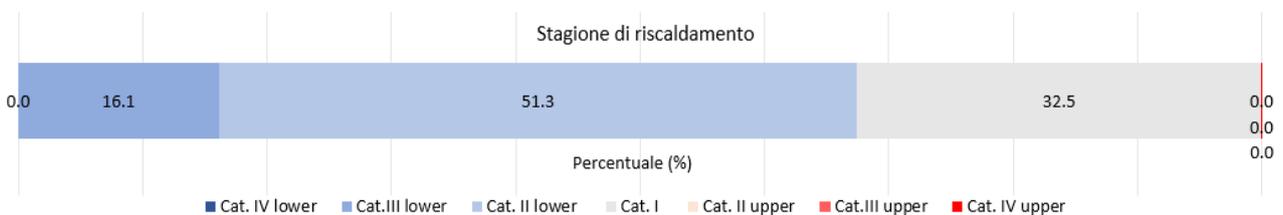


Figura 44. Distribuzione percentuale della temperatura operativa del soggiorno e camera matrimoniale in relazione alle categorie di comfort e ai loro limiti superiori (upper) e inferiori (lower) durante la stagione di riscaldamento.

7 Conclusioni

Il presente rapporto tecnico ha riguardato l'analisi annuale e stagionale delle prestazioni energetiche ed ambientali di un edificio ad alte performance energetiche in clima mediterraneo con l'obiettivo di fornire dati di benchmark, caratterizzare i profili e dinamiche d'uso energetiche dell'edificio, presentare i risultati di un'analisi di fattibilità tecnico-economica per un sistema di accumulo elettrico e caratterizzare il comportamento dell'edificio in relazione al comfort termico. La definizione dei profili caratteristici dell'edificio è importante in ottica di strategie di load-management in grado di ottimizzare l'uso di energia rinnovabile prodotta in sito e per lo sviluppo di strategie volte al miglioramento dell'accordo temporale tra produzione e uso di energia. Se dotato di sistemi di accumulo termico e/o elettrico per l'immagazzinamento dell'energia generata da fonti di energia rinnovabile, un edificio ad alte performance energetiche consentirebbe infatti di aumentare considerevolmente l'autoconsumo di energia prodotta in sito e alleggerire i costi e i carichi demandati alla rete di approvvigionamento elettrico.

Il rapporto tecnico ha presentato l'analisi energetica ed ambientale da luglio 2017 a giugno 2018 in relazione alle condizioni climatiche esterne, alle condizioni di occupazione e alle logiche impostate per il controllo dei principali parametri ambientali.

Complessivamente nell'intero anno monitorato il bilancio tra produzione e uso di energia risulta positivo. L'energia prodotta dal sistema fotovoltaico è stata di 10946.4 kWh/anno, corrispondenti a 76.0 kWh/m²/anno riferiti all'unità di superficie netta climatizzata e maggiore dell'energia elettrica richiesta per tutti gli usi dell'edificio, la quale è stata pari a 8598.7 kWh/anno, corrispondenti a 59.7 kWh/m²/anno, sempre riferiti all'unità di superficie netta climatizzata (Tabella 2, Tabella 3). I soli mesi che hanno presentato un bilancio negativo tra produzione e uso di energia sono stati i mesi invernali più freddi, ovvero novembre, dicembre, gennaio e febbraio. In questi mesi l'uso di energia risulta maggiore della produzione da fotovoltaico a causa di un funzionamento maggiore della pompa di calore per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria; al contempo, la produzione di energia elettrica da fotovoltaico è stata più bassa per una minore disponibilità di radiazione solare dovuta alle condizioni stagionali e alle maggiori precipitazioni. In sintesi, per 8 mesi la produzione di energia elettrica in situ è stata maggiore dell'uso totale e nei restanti 4 mesi è stata minore.

L'edificio, di tipo *all electric*, è stato quindi valutato in termini di energia primaria per la verifica della rispondenza ai limiti imposti dalla certificazione Passivhaus, ed in particolare dal criterio "Premium", applicabile ad edifici nei quali parte della richiesta dell'energia primaria per tutti gli usi deve essere soddisfatta attraverso lo sfruttamento di energia rinnovabile. Tale criterio richiede che, in condizioni di calcolo, il fabbisogno annuo di energia primaria per tutti i servizi energetici inclusi riscaldamento, acqua calda sanitaria, elettricità per l'abitazione e gli ausiliari, non superi i 120 kWh/m² di superficie netta climatizzata per anno. Il valore di energia primaria calcolato sulla base dei dati reali di monitoraggio è risultato di 144.5 kWh/m²/anno, quindi leggermente maggiore del limite imposto dal criterio della certificazione. Tuttavia, questo valore comprende la richiesta di energia elettrica per la totalità degli usi dell'edificio, compresi quelli all'esterno dell'area netta climatizzata (luci esterne, irrigazione, usi relativi al garage) non scomputabili poiché non monitorati singolarmente. Si sottolinea inoltre, che il valore ottenuto di energia primaria per l'anno monitorato fa riferimento a condizioni di funzionamento reale dell'edificio e non ad una procedura di calcolo standard basata su un clima tipico per la zona considerata. L'analisi dei gradi giorno invernali, calcolati per la stagione di riscaldamento 2017/2018 ha infatti evidenziato un clima più rigido rispetto a quello di riferimento per Mascalucia. Alla luce di queste condizioni, si può quindi dire che il valore di energia primaria misurato per l'anno considerato può ritenersi in linea con il limite richiesto dalla certificazione Passivhaus.

Il rapporto tra la produzione di energia elettrica da fotovoltaico e uso di energia per tutti i servizi dell'edificio è stato analizzato, oltre che mensilmente, anche giornalmente. In relazione alle condizioni climatiche esterne e all'occupazione dell'edificio; il valore di questo rapporto risulta essere più alto nei mesi

estivi, raggiungendo valori massimi di circa 4.5, e più basso nei mesi invernali, mediamente pari a circa 0.5 (Figura 25, Figura 26).

L'analisi di dettaglio dei principali usi energetici ha evidenziato annualmente e stagionalmente il peso di ciascuno di essi sulla totalità degli usi elettrici dell'edificio. Durante la stagione invernale la pompa di calore è stata responsabile per il 24 % degli usi elettrici totali dell'edificio, ovvero di 1046.8 kWh. Il sistema di domotica, che include il sistema di monitoraggio, il sistema antifurto e quello di videosorveglianza, è stato responsabile del consumo di 522.6 kWh (12 % dell'uso totale di energia elettrica) nella stagione di riscaldamento e di 1391.8 kWh (16 % dell'uso totale di energia elettrica) nell'intero anno di monitoraggio, valore paragonabile al consumo totale della pompa di calore nell'intero anno (Figura 29). Nei periodi intermedi tra la stagione di riscaldamento e il periodo estivo, la pompa di calore è entrata in funzione in maniera meno frequente in relazione alle condizioni di occupazione dell'edificio, alle logiche impostate e alla preferenza degli utenti per la ventilazione naturale degli ambienti (Figura 31).

Infine, è stato definito il profilo giornaliero di carico tipico dell'edificio per ogni mese monitorato. Il profilo di carico calcolato (fittizio), mediato sui valori di potenza registrati durante ogni giorno di ciascun mese, e quello reale tipico, evidenziano la richiesta di energia elettrica per ogni mese in base alle diverse condizioni climatiche registrate e all'uso dell'edificio. Durante i mesi invernali le richieste di potenza maggiore sono state registrate nelle ore serali della giornata, nei mesi estivi durante la mattina verso le 11-12 a causa principalmente dell'elevata radiazione solare in quelle ore, e nei mesi intermedi picchi simili di potenza sono stati registrati durante la mattina e le ore serali.

Al fine di valutare i possibili miglioramenti delle prestazioni energetiche dell'edificio in analisi, è stato condotto uno studio preliminare di dimensionamento per un sistema di accumulo elettrico ad integrazione dell'impianto fotovoltaico esistente. L'analisi ha avuto come obiettivo primario l'individuazione della taglia del sistema di accumulo ottimale per la massimizzazione dell'autoconsumo di energia in sito e per la minimizzazione dello scambio con la rete. L'analisi ha portato all'individuazione della taglia di accumulo da 15 kWh come soluzione ottimale per il caso in esame. Il sistema individuato infatti permette un incremento dell'autoconsumo dell'85 % rispetto al caso di riferimento (0 kWh) senza batterie di accumulo, mentre taglie superiori di accumulo evidenziano limitati margini di incremento dell'autoconsumo, se non a fronte di un ingrandimento del campo fotovoltaico installato. In seguito, al fine di verificare la fattibilità economica dell'investimento su un sistema di accumulo elettrico e quindi di rendere lo studio realmente utile ai gestori dell'edificio, è stata condotta un'analisi economica. L'analisi, condotta utilizzando l'approccio del valore attuale netto o VAN a 10 anni (vita media utile di sistema di accumulo agli ioni di litio) e a 20 anni (ovvero fino alla fine della vita utile del sistema fotovoltaico installato), ha confermato la fattibilità economica dell'investimento su un sistema di accumulo da 15 kWh, anche se la remuneratività dell'investimento è limitata a causa dei costi di manutenzione straordinaria per la sostituzione delle batterie al decimo anno di vita dell'impianto. Tuttavia, il calo di prezzi che potranno subire questi sistemi, in previsione di una più ampia diffusione, offre ulteriori margini di miglioramento per investimenti su sistemi di accumulo elettrico.

Il comportamento dell'edificio in regime invernale e annuale è stato infine caratterizzato dal punto di vista del comfort termico. Sono state calcolate le temperature operative di tre ambienti della casa nei quali sono presenti un sensore PT100 a 4 fili per la misura della temperatura dell'aria e un globotermometro che ha permesso il calcolo della temperatura media radiante all'interno di ciascun ambiente. Per la stagione invernale, l'edificio è stato verificato attraverso il modello di comfort di Fanger che meglio caratterizza ambienti nei quali il controllo della temperatura è effettuato attivamente, come nel caso di studio, e nel resto dell'anno attraverso il modello di comfort adattivo. L'edificio rimane per la maggior parte del tempo all'interno dei limiti di comfort imposti dalla Cat. II della norma EN 15251, categoria di riferimento per l'edificio oggetto di studio, ed in particolare ha presentato l'86 % dei valori di temperatura operativa all'interno di tale categoria, sforandone i limiti principalmente durante la stagione invernale in uno dei tre ambienti dell'edificio analizzato (lo studio). Questa stanza si trova in una posizione sfavorevole rispetto

all'intero edificio; è esposta su tre lati all'ambiente esterno e ha due ampie superfici vetrate. Essa risente quindi maggiormente delle temperature più rigide e al contempo ha elevati apporti solari nel caso di forte radiazione. Gli altri due ambienti analizzati, che sono quelli più utilizzati, camera matrimoniale e soggiorno, hanno invece presentato un comportamento soddisfacente durante l'intero anno anche in condizioni climatiche sfavorevoli, come nei mesi estivi di luglio e agosto e nei mesi invernali di dicembre e febbraio (Figura 39). Escludendo l'ambiente più critico (lo studio) dall'analisi e considerando solo il soggiorno e la camera matrimoniale, la situazione migliora, presentando il 93.8 % dei valori di temperatura operativa all'interno dei limiti di temperatura imposti dalla Cat. II della norma EN 15251.

Come riportato all'interno della relazione i dati raccolti con questa campagna di monitoraggio e con quelle che seguiranno, potranno essere usati, oltre che per l'ottimizzazione dell'edificio stesso, per studi volti al dimensionamento e alla gestione di reti energetiche e accumuli distrettuali, collegati a edifici ad alte prestazioni.

8 Riferimenti bibliografici

1. European Commission. 2013. Report from the Commission to the European Parliament and the Council on financial support for energy efficiency in buildings. Disponibile in: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52013DC0225&from=EN>
2. Direttiva 2010/31 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione) pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea n. L153 del 18 giugno 2010.
3. REN21. 2018. Renewables 2018 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).
4. DPR 412/1993. Decreto del Presidente della Repubblica del 26 Agosto 1993 n. 412 - "Regolamento recante norme per la progettazione l'installazione l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia in attuazione dell'art. 4 comma 4 della legge 9 gennaio 1991 n. 10" Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana Serie Generale n.242 del 14-10-1993 - Suppl. Ordinario n. 96 Roma.
5. MISE (2015). Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici Ministero dello sviluppo economico Roma.
6. 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>
7. QualEnergia.it. 2017. Mini guida alla scelta dell'accumulo per il fotovoltaico residenziale.
8. ES – Energy and Strategy Group. 2016. Energy Storage Report.
9. Akbari H. Browne M.C. Ortega A. Jun Huang M. Hewitt N.J. Norton B. McCormack S.J. 2018. Efficient energy storage technologies for photovoltaic systems. Solar Energy. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.052>
10. Commissione Europea. 2012. Regolamento delegato (UE) N. 244/2012 della Commissione del 16 gennaio 2012 che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi.
11. Xavier G. A.; Martins J. H.; Monteiro P. M. D. B.; Diniz A. S. A. C.; Filho D. 2015. Simulation of distributed generation with photovoltaic microgrids - Case study in Brazil. Energies 2015 8 (5) 4003–4023 DOI: 10.3390/en8054003
12. IRENA. 2016. Battery storage for renewables: market status and technology outlook. International Renewable Energy Agency.
13. Hay, J. F. 2016. Solar electric investment analysis. NE xtension, EC 3008.
14. Griffiths S. Mills R. 2016. Potential of rooftop solar photovoltaics in the energy system evolution of the United Arab Emirates. Energy Strategy Reviews 9 pp. 1-7.
15. Mehmedova V. 2016. Economic viability and business models for distributed solar PV in Brazil. Master thesis in the electric power industry (MEPI). Supervisor: Edmar Luiz de Almeida Co-supervisor: Luciano Losekann.
16. Ricerca sul Sistema Energetico – RSE. 2017. Valutazioni sui costi e sulla possibile remunerazione degli interventi per consentire la progressiva copertura del fabbisogno delle isole minori non interconnesse attraverso energia da fonti rinnovabili ai fini dell'attuazione del DM 14.02.2017.
17. Enerdata. 2007. Energy Scenario Development Analysis: Energy Policy Scenarios to 2050 – POLES.
18. Mehmedova V. 2016. Economic viability and business models for distributed solar PV in Brazil. Master thesis in the electric power industry (MEPI). Supervisor: Edmar Luiz de Almeida Co-supervisor: Luciano Losekann.

19. 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.
20. ISO 7726. 1998. Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. Geneva Switzerland: International Organization for Standardization.

9 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.