



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un sistema di controllo/monitoraggio e analisi preliminare delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche ed ambientali

F. Causone, L. Pagliano, M. Pietrobon

SVILUPPO DI UN SISTEMA DI CONTROLLO/MONITORAGGIO E ANALISI PRELIMINARE DELLE PRESTAZIONI
DI UN EDIFICIO AD ALTE PERFORMANCE ENERGETICHE ED AMBIENTALI

F. Causone, L. Pagliano, M. Pietrobon (Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

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

Progetto: Tecnologie per costruire gli edifici del futuro

Obiettivo: Soluzioni innovative per l'efficientamento degli edifici

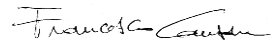
Responsabile del Progetto: Ing. Giovanni Puglisi, ENEA 

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione per una attività di ricerca dal titolo:
"Sviluppo di un sistema di controllo/monitoraggio e analisi preliminare delle prestazioni di un edificio ad alte performance energetiche ed ambientali".

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fabio Zanghirella



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



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

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	8
2.1 MESSA IN ESERCIZIO DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	8
2.1.1 <i>Descrizione del sistema di monitoraggio e attività di completamento e ottimizzazione</i>	8
2.1.1.1 Integrazione fra sistema Konnex e sistema BACnet.....	10
2.1.1.2 Revisione e completamento dei punti di misura e controllo	13
2.1.1.3 Grandezze e variabili per monitoraggio e controllo.....	14
2.1.1.4 Determinazione dei requisiti per l'acquisizione e memorizzazione.....	21
2.1.1.5 Determinazione dei requisiti per la struttura del database	21
2.1.1.6 Definizioni delle prime elaborazioni	23
2.1.1.7 Determinazione dei requisiti per le visualizzazioni per gli utenti.....	23
2.1.2 <i>Settaggio del sistema di acquisizione dati e verifica del corretto funzionamento dell'apparato sperimentale</i>	25
2.2 SCRITTURA E IMPLEMENTAZIONE DI UN PRIMO SET DI LOGICHE DI CONTROLLO	30
2.2.1 <i>Schedule per set-point e altri valori impostabili</i>	31
2.2.2 <i>Frequenza dei cicli di controlli</i>	31
2.2.3 <i>Controlli per i sistemi HVAC e di ventilazione naturale</i>	31
2.2.3.1 Monitoraggio dell'apertura delle finestre / portefinestre	31
2.2.3.2 Attivazione della ventilazione meccanica alla chiusura delle finestre	31
2.2.3.3 Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente.....	32
2.2.3.4 Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente da bagni e cucina	32
2.2.3.5 Controllo della portata delle ventilazione meccanica in funzione di variabili ambientali (Demand controlled mechanical ventilation)	32
2.2.3.6 Modalità di raffrescamento - selezione del pozzo di calore più vantaggioso	37
2.2.3.7 Raffrescamento attivo base	38
2.2.3.8 Raffrescamento con scambiatore di calore interrato	38
2.2.3.9 Raffrescamento con attivazione della massa termica.....	39
2.2.3.10 Modalità di riscaldamento - selezione della sorgente di calore più vantaggiosa.....	41
2.2.3.11 Riscaldamento.....	42
2.2.4 <i>Controllo per sfruttamento accumulo termico per acqua calda sanitaria</i>	43
2.2.5 <i>Controlli per illuminazione naturale ed artificiale e radiazione solare</i>	43
2.2.5.1 Controllo manuale con pulsante per le schermature solari	43
2.2.5.2 Controllo con programmazione a tempo e scenari (Schedule) per le schermature solari.....	43
2.2.5.3 Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo e radiazione solare	44
2.2.5.4 Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo, radiazione solare e temperatura interna della stanza.....	44
2.2.5.5 Controllo delle schermature solari in funzione di radiazione solare su piano della finestra e temperatura interna della stanza	45
2.2.5.6 Schermature solari in modalità notturna in periodo di riscaldamento	46
2.2.5.7 Controllo dell'illuminazione artificiale	46
2.2.6 <i>Notifiche e messaggi per l'utente</i>	46
2.3 ANALISI E FINE TUNING DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO ENERGETICO ED AMBIENTALE	48
2.3.1 <i>Verifica del corretto funzionamento e della stabilità del sistema di acquisizione dati</i>	48
2.3.2 <i>Analisi preliminare delle prestazioni energetiche ed ambientali</i>	51
3 CONCLUSIONI.....	64
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	67

Sommario

Il documento presenta le attività svolte per lo sviluppo e l'implementazione di un sistema di controllo e monitoraggio di un edificio ad alte performance energetiche ed ambientali.

L'edificio rappresenta un interessante esempio di *nearly zero energy buildings* (nZEB) situato in Sicilia nel comune di Mascali (Catania) in condizioni climatiche tipiche dell'area mediterranea e, grazie all'apparato sperimentale sviluppato per il controllo e monitoraggio degli ambienti e degli impianti, può rappresentare un laboratorio reale per le soluzioni tecnologiche e le strategie di controllo di un edificio a energia quasi zero. L'edificio ha raggiunto la certificazione Passivhaus grazie alle elevate prestazioni termiche dell'involucro edilizio ed è completato da sistemi ad energia rinnovabile quali gli impianti solare termico e fotovoltaico.

L'attività svolta per la revisione del sistema di controllo e monitoraggio ha incluso i dispositivi fisici, i requisiti di progetto e le logiche di controllo. Sono stati necessari, e quindi riportati nella relazione, alcuni interventi di integrazione di componenti fisici, utili per il completamento e alla stabilità del sistema e per garantire la misura di tutte le grandezze necessarie alle attività di analisi delle prestazioni dell'edificio. Nella relazione sono illustrati i requisiti e le caratteristiche che hanno governato lo sviluppo del sistema.

Dall'analisi dei dati monitorati nell'ultimo quadrimestre del 2015 si è potuto verificare il funzionamento del sistema e si è intervenuti aggiornando le parti software di alcuni componenti, così da rendere più stabile la trasmissione dei dati sul bus di comunicazione del sistema. Gli interventi adottati hanno portato ad una maggior stabilità nella memorizzazione delle misure, riscontrabile nell'analisi svolta su un secondo set di dati relativi al 2016.

Nel documento vengono anche presentate le logiche di controllo che sono state scritte per regolare l'uso rispettivamente della ventilazione naturale e di quella meccanica, per il controllo del raffrescamento tramite scambiatore interrato e del raffrescamento attivo e per il controllo del riscaldamento degli ambienti. Le logiche sviluppate consentono di attuare in modo prioritario le soluzioni passive e a bassa domanda di energia e di attivare le soluzioni di tipo attivo solo quando quelle passive non sono sufficienti al raggiungimento dei valori stabiliti per i parametri ambientali.

L'analisi dei dati monitorati nell'intero periodo ha permesso infine una prima caratterizzazione prestazionale dell'edificio. L'edificio presenta un buon comportamento in termini di comfort nei periodi più caldi, anche in assenza di raffrescamento attivo, ricorrendo all'uso della ventilazione naturale. Buon comportamento è riscontrabile anche nel periodo invernale.

In generale la domanda di energia per tutti gli usi è contenuta e ben bilanciata dall'energia prodotta dal sistema fotovoltaico installato in copertura. Complessivamente nei mesi analizzati l'energia prodotta dal sistema fotovoltaico è maggiore dell'energia richiesta globalmente per tutti gli usi dell'edificio e dei servizi di pertinenza. Si presentano anche analisi di interazione tra l'edificio e la rete elettrica che mostrano il quadro di dettaglio della domanda e produzione di energia con frequenze giornaliere e orarie.

1 Introduzione

Il recepimento e l'applicazione della direttiva europea 2010/31/EU sulle prestazioni energetiche degli edifici, ha introdotto nel dibattito nazionale il tema degli edifici ad energia quasi zero o nearly zero energy buildings (nZEB) [1]. Sebbene si sia giunti ormai ad una definizione tecnica di che cosa sia, in Italia, un edificio ad energia quasi zero e si sia definito come procedere per il calcolo delle prestazioni energetiche delle nuove costruzioni e ristrutturazioni [2], si è ancora lontani (in tutt'Europa) da una chiara comprensione di come garantire un ottimale uso/controllo di questi edifici in fase di occupazione, di quali problemi di gestione possano svilupparsi, di come questi edifici interagiscano con la rete e se effettivamente possa essere perseguito un bilancio ad energia zero, su base annuale o mensile.

In particolare, un edificio a energia zero o quasi zero, o più in generale un edificio ad alte prestazioni, deve garantire elevati livelli di qualità ambientale agli occupanti, con un consumo energetico ridotto, compensato significativamente attraverso lo sfruttamento di energia rinnovabile. Il conseguimento di questo obiettivo diventa più difficile all'inasprirsi delle forzanti climatiche. In Europa, uno dei climi maggiormente impegnativi è quello Mediterraneo, poiché sebbene gli elevati valori di irraggiamento solare garantiscano una maggiore capacità di sfruttamento di energia rinnovabile, essi determinano, insieme alle elevate temperature, carichi termici significativi e richiedono pertanto particolari attenzioni progettuali e di gestione/controllo.

Alcuni edifici dimostrativi, pensati come laboratori reali (living labs) sono stati progettati e costruiti nel corso degli ultimi dieci anni con l'obiettivo di rispondere, nel modo più dettagliato possibile ai quesiti ancora aperti sul tema della loro gestione ottimale.

Il progetto Botticelli, sito a Mascalucia (Catania), oggetto del presente studio di approfondimento, è un edificio ad alte prestazioni certificato secondo lo standard *Passivhaus* [3] e concepito come living lab ed edificio a consumo zero, al fine di permettere studi di dettaglio in clima Mediterraneo [4]. Esso è caratterizzato da un basso fabbisogno energetico e da un'elevata produzione energetica da sistemi a fonti rinnovabili. L'edificio monofamiliare ad uso residenziale, è composto da un piano fuori terra, dove si trovano tutti gli ambienti climatizzati e da un piano interrato che ospita locali tecnici, di servizio e posti auto. La climatizzazione degli ambienti è realizzata attraverso un sistema a tutt'aria, in cui l'aria di mandata, prelevata dall'esterno, viene fatta passare in appositi canali interrati (scambiatore *terra/aria*)¹ [5] prima di essere convogliata in un recuperatore di calore (aria/aria a flussi incrociati), in cui l'aria espulsa dagli ambienti interni scambia calore con l'aria di mandata proveniente dallo scambiatore interrato o direttamente dall'esterno². Esiste inoltre una funzione di bypass integrata all'interno del sistema di recupero del calore³.

Dopo il passaggio nel recuperatore di calore, l'aria di mandata attraversa una batteria ad acqua (calda in stagione di riscaldamento o fredda in stagione di raffrescamento) e viene infine distribuita in ogni locale. L'impianto è bilanciato nel suo layout (collocazione e quantità di bocchette di mandata e ripresa) e non prevede ulteriori serrande motorizzate per la regolazione delle portate d'aria negli ambienti. L'impianto

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

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

³ Le funzioni di bypass del pacco di recupero è integrata nel gruppo macchina comprendente elementi filtranti, componente per recupero a flussi incrociati, ventilatore di mandata, ventilatore di ritorno.

di ventilazione non prevede ricircolo dell'aria⁴. Nel caso di apertura di finestre o porte sull'esterno, il sistema di ventilazione meccanica si arresta automaticamente e l'edificio passa quindi in modalità di ventilazione naturale.

L'energia termica fornita alla batteria aria/acqua dell'impianto di ventilazione e al sistema di produzione di acqua calda sanitaria è generata da un sistema integrato: un accumulo ad acqua di 500 litri alimentato dal circuito primario di un sistema solare termico e da una pompa di calore elettrica (*aria/acqua*).

La pompa di calore aria/acqua è invertibile; in fase di riscaldamento essa può produrre calore scaldando il serbatoio di accumulo tecnico oppure direttamente la batteria nell'impianto di ventilazione. In modalità di raffrescamento può produrre acqua refrigerata per alimentare direttamente la batteria nell'impianto di ventilazione. L'edificio è inoltre dotato di un impianto fotovoltaico (8,14 kW di potenza elettrica di picco), installato sulle falde di copertura.

Le superfici finestrate delle stanze sono protette da sistemi di schermatura solare meccanizzati, controllabili manualmente o attraverso un sistema automatico. In ciascun locale climatizzato sono inoltre presenti sensori di temperatura dell'aria, temperatura globotermometrica, umidità relativa e concentrazione di CO₂, al fine di garantire un adeguato monitoraggio del microclima interno (comfort termico e indicatori indiretti di qualità dell'aria).



Figura 1. Immagine esterna del progetto Botticelli

Il lavoro oggetto dell'accordo di collaborazione, descritto nei seguenti paragrafi, ha avuto come obiettivo la messa in esercizio del sistema di monitoraggio e controllo dell'edificio. Si tratta di una parte fondamentale per il comportamento dell'edificio sia quando il sistema di climatizzazione è attivo e quindi c'è generazione di energia termica o frigorifera attraverso la pompa di calore, sia quando esso è spento, e l'edificio funziona di condizioni completamente passive o parzialmente passive (ventilazione meccanica e scambio con il terreno). Al fine di raggiungere un bilancio ad energia zero, l'edificio è stato progettato con un livello di isolamento termico particolarmente elevato, quindi, per evitare un

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

surriscaldamento sia nel periodo invernale che estivo, è necessario attuare un controllo estremamente preciso dei carichi termici solari, attraverso le schermature solari, ed un controllo adeguato della ventilazione, sfruttando la massa termica del terreno circostante l'edificio. L'edificio è pensato perché possano essere sperimentate anche strategie di controllo dell'impianto di climatizzazione, al fine di studiare diverse opzioni attive, passive o ibride ed ottenere indicazioni utili alla gestione e progettazione di edifici simili.

La struttura del sistema di monitoraggio e controllo, le problematiche riscontrate nella messa in esercizio, la loro risoluzione e le logiche di controllo proposte ed implementate sono descritte nel dettaglio nelle successive sessioni, mostrando inoltre i primi risultati in termini di analisi dati per la caratterizzazione del comportamento energetico ed ambientale dell'edificio.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Messa in esercizio del sistema di monitoraggio

2.1.1 Descrizione del sistema di monitoraggio e attività di completamento e ottimizzazione

Il sistema di controllo e monitoraggio è costituito da due parti principali. L'una gestisce le funzioni più tipiche degli ambienti e degli impianti dell'edificio, si basa su standard Konnex e relativo protocollo di comunicazione. La seconda parte integra e supervisiona la prima, si basa su protocollo di comunicazione BACnet e ha lo scopo di completare le funzioni e le potenzialità della prima parte, permettendo l'implementazione di logiche di controllo più complesse ed il monitoraggio più dettagliato delle prestazioni energetiche e di comfort. La struttura dell'intero sistema è rappresentata nello schema in Figura 2.

La prima parte, che di seguito per brevità indicheremo come "sistema Konnex" (KNX), si basa sull'omonimo standard EN 50090 [6] e relativo protocollo di comunicazione, caratterizzati da componenti ad intelligenza distribuita che tramite *rete bus* possono comunicare fra loro. Ogni dispositivo del sistema Konnex può agire in modo indipendente e contiene la porzione software per compiere le sue funzioni di base. I dispositivi possono essere configurati con un software comune a tutti i produttori, denominato *Eib Tool Software* (ETS). Grazie a queste peculiarità, la parte Konnex dell'intero sistema è stata sviluppata per presentare caratteristiche di elevata replicabilità in altri progetti. Il sistema Konnex come interfacciamento con l'utente è gestito da un applicativo denominato *Ikon Server* di *Domotica Labs*.

Il sistema Konnex è integrato all'interno di un sistema più ampio che lo comprende e ne completa la supervisione. Questo si basa su protocollo di comunicazione BACnet (secondo norma EN ISO 16484-5 [7]) e consente un monitoraggio più dettagliato in molteplici punti di misura ed ulteriori forme di controllo negli ambienti e nei sistemi impiantistici dell'edificio. Per brevità indicheremo di seguito questa parte come "sistema BACnet". Questo è controllato dall'apposito software sviluppato da *Siemens*, nell'ambito della gamma denominata *Desigo*.

L'integrazione di queste due parti in unico sistema organico consente di perseguire obiettivi sia di replicabilità e diffusione delle soluzioni implementate e testate, sia di completezza e approfondimento delle attività di monitoraggio, sviluppo e implementazione di logiche di controllo.

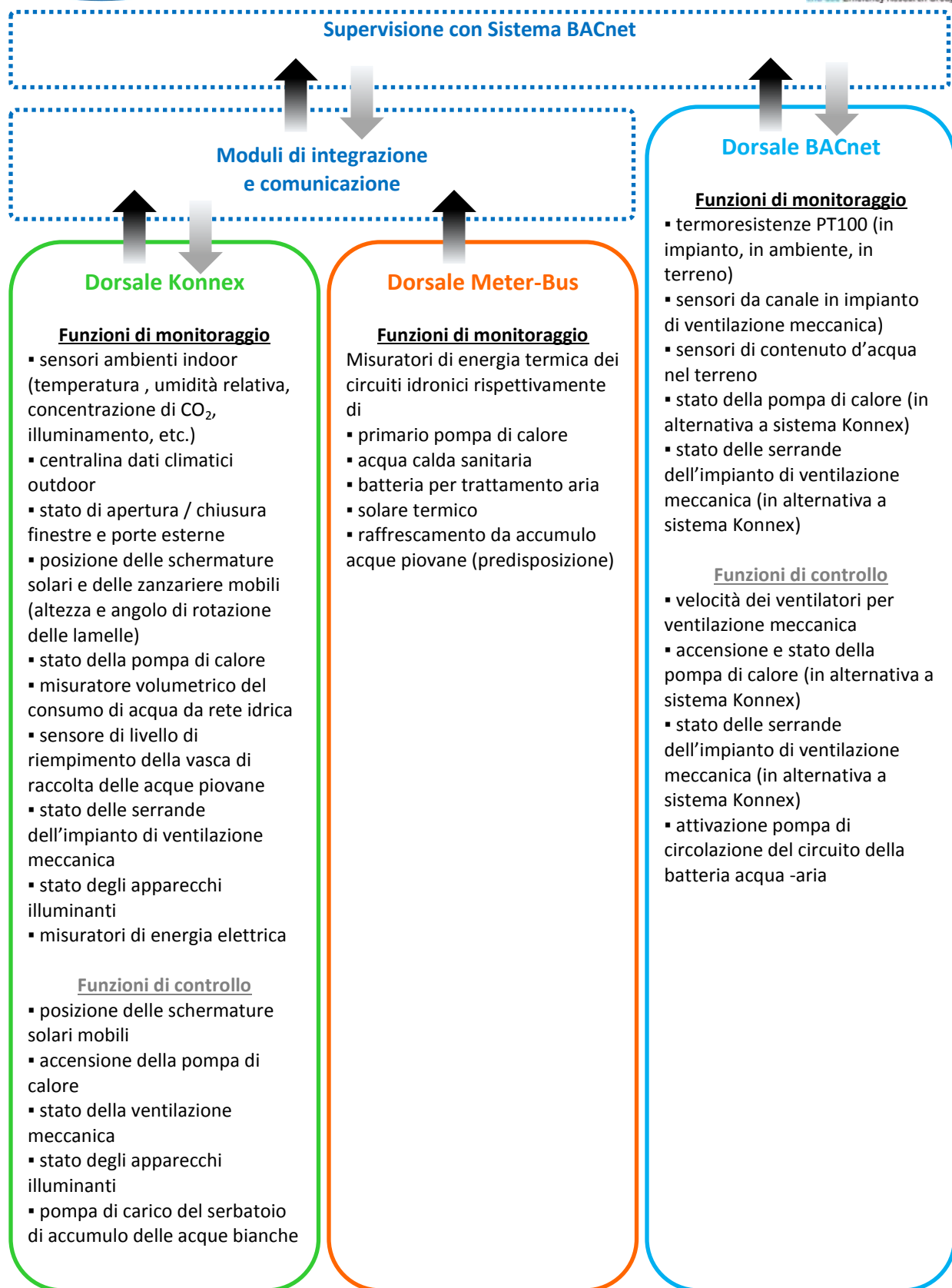


Figura 2. Struttura schematica del sistema di controllo e monitoraggio.

Il sistema di monitoraggio e controllo nel suo complesso è stato sviluppato al fine di conseguire delle funzioni prestabilite.

Funzioni del sistema di **monitoraggio**:

- Acquisizione e memorizzazione delle grandezze misurate e gli stati considerati
- Elaborazioni di base
- Memorizzazione di misure, stati ed elaborazioni in un database
- Visualizzazioni per utente
- Esportazione dati (in file di testo utilizzabili in Excel e software similari)
- Comunicazione e controllo anche da remoto via internet.

Funzioni del sistema di **controllo**:

- Selezione alternativa di regole e logiche di controllo per le diverse funzioni di attuazione
- Modifica e settaggio dei parametri di input e output
- Integrazione con nuove regole per sviluppi futuri.

Nel periodo riguardante il presente accordo di collaborazione, sono state realizzate attività di revisione sul layout del sistema di controllo e monitoraggio e attività di analisi e verifica delle grandezze monitorate, allo scopo di esaminare la completezza del sistema e di completarne la messa in esercizio. Sulla base di queste sono state individuate ed implementate azioni per completare ed ottimizzare il funzionamento del sistema. Sono state infine sviluppate logiche di controllo per il sistema edificio impianto ed un primo set di queste è stato implementato sul sistema di controllo (Konnex) esistente (le logiche di controllo scritte per il sistema BACnet non sono ancora state trasferite sul sistema informatico).

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le caratteristiche del sistema e le specifiche attività svolte.

2.1.1.1 Integrazione fra sistema Konnex e sistema BACnet

L'integrazione delle diverse parti di cui è composto il sistema di monitoraggio e controllo richiede un'accortezza particolare, poiché esistono sostanziali interconnessioni ed interdipendenze tra di esse. Per questo si sono verificate la completezza, le caratteristiche tecniche e la piena compatibilità dei dispositivi che consentono la comunicazione del sistema Konnex con quello BACnet. In particolare questi sono costituiti dai moduli programmabili, schede di estensione e alimentatori delle rispettive dorsali bus che permettono l'integrazione fra protocolli di comunicazione Konnex, BACnet su rete IP (*Internet Protocol*) e BACnet su rete di tipo *LonTalk* (per la comunicazione tra i diversi moduli programmabili in ambito BACnet).

Inoltre si è anche completata l'integrazione nel sistema BACnet della dorsale bus che collega i misuratori di energia termica installati in campo sui circuiti idronici. Questi misuratori, come è comune per questa famiglia di dispositivi, comunicano secondo protocollo *Meter-Bus* (M-Bus) (secondo norma EN 13757 [8,9]).

Allo scopo di ottimizzare l'integrazione fra le dorsali di comunicazione Meter-Bus, Konnex e BACnet si è selezionato e proceduto con l'installazione di un apposito dispositivo elettronico con funzione di connessione e smistamento (router) indicato in corrispondenza della posizione ① in Figura 3.

L'architettura del sistema prevede che il sistema BACnet supervisioni il sistema Konnex integrato, il quale comunque può comunque operare anche in modo autonomo per le funzioni e i punti di misura e controllo di sua competenza.

In Figura 3 è rappresentato uno schema dei componenti elettronici installati nel quadro elettrico principale del sistema di controllo e monitoraggio. In particolare sono evidenziati in azzurro con lettera B, i dispositivi relativi a sensori e attuatori controllati direttamente dai moduli con protocollo BACnet, in arancione con lettera M, il collegamento con la dorsale Meter-Bus, e in verde con lettera K, il collegamento con la dorsale Konnex.

Tutta la parte hardware (dispositivi, collegamenti, componenti per il montaggio) dell'intero sistema di monitoraggio e controllo, è stata completata e risulta ora pienamente operante. Si è poi completata ed implementata la parte software di supervisione del sistema Konnex e sono stati scritti i requisiti di dettaglio e le logiche di controllo da implementare nel sistema BACnet (l'implementazione informatica sul sistema BACnet avverrà nei prossimi mesi).

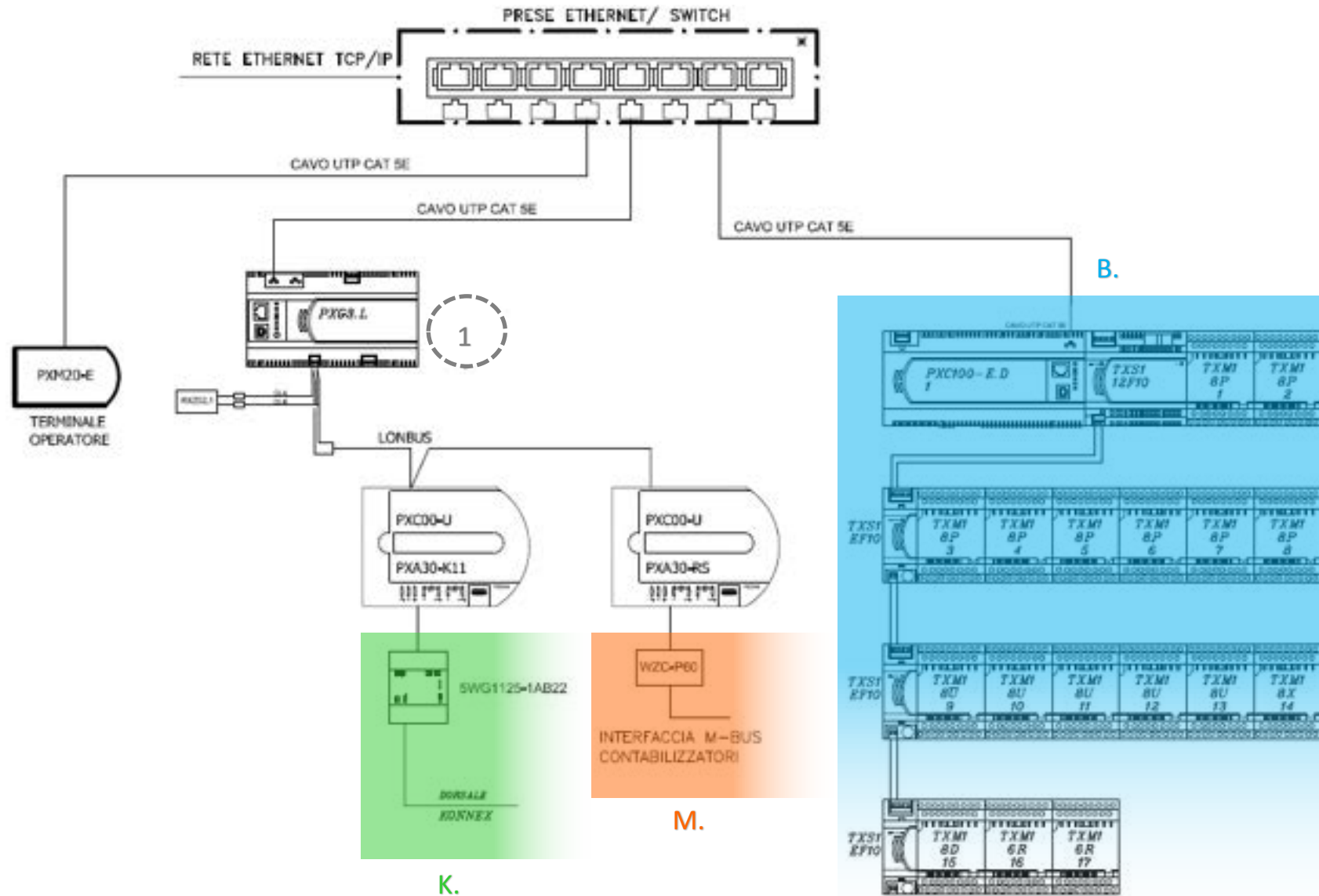


Figura 3. Schema dei componenti elettronici installati nel quadro elettrico principale del sistema di monitoraggio e controllo, con evidenziati i collegamenti con la dorsale Konnex(K.), la dorsale Meter-Bus (M.), i moduli con protocollo BACnet (B.).

2.1.1.2 *Revisione e completamento dei punti di misura e controllo*

Il sistema di monitoraggio è stato sviluppato in modo che siano acquisiti e memorizzati i valori delle variabili di tutti i punti di misura individuati. Un estratto dei punti di misura e controllo è riportato in Tabella 1 e rappresentato negli schemi in Figura 4 e Figura 8.

Il sistema di monitoraggio e controllo è stato sviluppato a partire dalle grandezze fisiche che si volevano monitorare e dalle funzioni da regolare secondo logiche di controllo. Sulla base di queste si sono determinate le posizioni dei punti di misura e controllo nei sistemi impiantistici e negli ambienti. Sono stati quindi selezionati i sensori per la misura delle grandezze individuate e i dispositivi per il controllo delle funzioni (quali ad esempio attuatori, pulsanti e motori). Sensori e attuatori si interfacciano al sistema di monitoraggio e controllo tramite il collegamento ai dispositivi del sistema Konnex, Meter-Bus e BACnet. Ad un punto di misura e controllo, in alcuni casi corrisponde un singolo sensore o attuatore, mentre in altri casi corrispondono più sensori (o un solo dispositivo per la misura combinata di più grandezze) e più attuatori.

Si è svolta un'attività di revisione sulla completezza dei punti di misura e controllo e sulle rispettive grandezze da monitorare, per verificare l'opportunità di aggiungere dei componenti. Si è anche proceduto a una revisione della mappatura di tutti i dispositivi installati, verificando che ciascun sensore e attuatore fosse associato a un numero progressivo univoco.

Il sistema consente il monitoraggio dei seguenti aspetti:

- Condizioni di comfort igro-termico negli ambienti interni,
- Qualità dell'aria negli ambienti interni,
- Condizioni climatiche esterne,
- Prestazioni energetiche dell'impianto di ventilazione meccanica, di riscaldamento e raffrescamento,
- Prestazioni dello scambiatore di calore ad aria interrato,
- Domanda di energia elettrica totale e in dettaglio per diversi usi principali,
- Produzione di energia elettrica da sistema fotovoltaico integrato in copertura dell'edificio,
- Domanda di energia termica per i diversi usi,
- Produzione di energia termica da sistema solare termico installato in copertura dell'edificio,
- Stati relativi all'apertura delle finestre e alla posizione delle schermature solare e delle zanzariere,
- Stati relativi ai principali attuatori negli impianti termici (ad es. per le serrande dei canali principali dell'impianti di ventilazione meccanica).

Il sistema consente il controllo delle seguenti funzioni:

- Ventilazione meccanica, riscaldamento e raffrescamento dell'ambiente,
- Produzione di calore per riscaldamento e acqua calda sanitaria,
- Controllo solare e illuminazione degli ambienti,
- Accumulo acque meteoriche e irrigazione del giardino,
- Visualizzazioni, interfacce e comunicazione con gli utenti.

In seguito alla revisione del sistema di controllo e monitoraggio, si è intervenuto come segue per completarlo e consentirne la corretta messa in esercizio.

Si è riscontrato che nel corso dell'estate 2015 la stazione meteo originariamente installata si è guastata per la fulminazione durante un temporale. Si è intervenuto selezionando una stazione meteo compatibile con la precedente e che potesse essere integrata nel sistema Konnex. Si è scelta una nuova stazione meteo che

consentisse la misura di una set completo di grandezze climatiche esterne con un'accuratezza adeguata. Sono stati valutati diverse soluzioni alternative e si è proceduto con la messa in opera di quella selezionata.

Si è riscontrata la necessità di aggiungere un modulo elettronico per l'acquisizione delle grandezze da sensori con segnale in scala di corrente 0-20 mA, allo scopo di consentire il collegamento adeguato dei sensori di contenuto d'acqua nel terreno, i quali comunicano in scala di corrente. Originariamente era previsto di collegarli a moduli elettronici per la lettura di segnale in tensione 0-10 V applicando un resistenza elettrica al collegamento per la conversione delle due scale. Tuttavia si è preferito completare il sistema con il modulo elettronico apposito per l'acquisizione in scala di corrente e avere così un segnale più pulito.

Si è riscontrata l'utilità di aggiungere un sensore di velocità dell'aria nel canale di presa dell'aria diretta dall'ambiente esterno (bypass dello scambiatore interrato ad aria), per l'analisi della portata d'aria. Originariamente erano presenti sensori di velocità dell'aria nei canali di uscita dallo scambiatore interrato. L'aggiunta del nuovo sensore di velocità consente il monitoraggio della velocità e della portata anche nel caso sia attivata la configurazione di presa dell'aria direttamente dall'esterno.

È stata determinata la posizione migliore per l'installazione del sensore di velocità, garantendo la presenza di un tratto di tubo rettilineo con assenza di curve prima e dopo il sensore stesso, allo scopo di avere un flusso d'aria adeguatamente regolare, come richiesto dalle specifiche del produttore del sensore.

Gli stessi accorgimenti erano stati adottati anche nel posizionamento dei sensori di velocità dell'aria da canale precedentemente installati.

2.1.1.3 Grandezze e variabili per monitoraggio e controllo

In Tabella 1 è presentato un estratto dell'elenco completo delle variabili per il monitoraggio e il controllo. A seguito della fase iniziale si è provveduto a definire in modo più approfondito le variabili da acquisire sullo stato delle schermature solari e delle zanzariere. Per questo si sono considerate le variabili disponibili dall'applicativo Konnex degli attuatori che controllano i rispettivi motori elettrici delle schermature solari e delle zanzariere. Lavoro analogo è stato fatto anche per la nuova stazione meteo e altri sensori e attuatori del sistema Konnex.

I dispositivi collegati con il sistema Konnex permettono potenzialmente l'esportazione di diverse variabili, relative alle grandezze fisiche misurate e agli stati del dispositivo; è tuttavia opportuno verificare quali siano le grandezze effettivamente disponibili e quali debbano essere necessariamente acquisite per evitare un eccessivo sovraccarico del bus Konnex e dei dispositivi di supervisione e memorizzazione, con conseguenti problemi di instabilità del sistema.

In Figura 4 è rappresentato lo schema del sistema impiantistico dell'edificio con indicati in rosso i sensori installati nei punti significativi dell'impianto, i quali sono collegati direttamente ai moduli programmabili del sistema BACnet. Questo ha consentito di utilizzare sensori tipici per il monitoraggio e il controllo degli impianti, quali sensori che comunicano su scala di tensione (0-10 V), sensori che comunicano su scala di corrente (0-20 mA), termoresistenze (PT100 a 4 fili, nel nostro caso). Fanno eccezione i misuratori di energia termica installati sui circuiti idronici, i quali comunicano con protocollo Meter-Bus e sono collegati al sistema BACnet tramite l'interfaccia di comunicazione. Nello schema in Figura 4 sono compresi anche degli attuatori attualmente controllati tramite il sistema Konnex, ma che in alternativa, grazie alla predisposizione di opportuni moduli elettronici, possono essere controllati anche dal sistema BACnet. Questi attuatori sono ad esempio quelli delle serrande per il passaggio dell'aria dallo scambiatore interrato o in alternativo dal bypass, quelli di accensione e spegnimento della pompa di calore, quelli relativi al controllo dei ventilatori del gruppo di ventilazione meccanica.

Tabella 1. Estratto di elenco dei punti di misura e controllo.

#	Sensore
-	in TERRENO :
1	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
2	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
3	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
4	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
5	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
6	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
7	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
8	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
9	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
10	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
11	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
12	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
13	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
14	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
15	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
16	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
17	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
18	Temperatura Terreno (PT 100 - 4 fili)
19	Contenuto volumetrico d'acqua nel terreno
20	Contenuto volumetrico d'acqua nel terreno
21	Contenuto volumetrico d'acqua nel terreno
22	Contenuto volumetrico d'acqua nel terreno
-	in IMPIANTO DI VENTILAZIONE :
23	Velocità aria in canale
24	Velocità aria in canale
25	Velocità aria in canale
26	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
27	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
28	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
29	Umidità aria da canale
30	Umidità aria da canale
31	Umidità aria da canale
32	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
33	Umidità aria da canale
34	Concentrazione CO ₂ e VOC da canale
35	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
36	Umidità aria da canale
37	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
38	Umidità aria da canale
39	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
40	Umidità aria da canale
41	Concentrazione CO ₂ e VOC
42	Temperatura Aria in canale (PT 100 - 4 fili)
43	Umidità aria da canale
44	Temperatura Aria esterna (PT 100 - 4 fili)

#	Sensore
45	Umidità aria da ambiente esterno
46	Temperatura aria da ambiente esterno
47	Velocità aria in canale
-	in circuito primario POMPA DI CALORE:
48	Misuratore di energia (su Ritorno)
49	Temperatura Acqua - Ritorno
50	Temperatura Acqua - Mandata
51	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Ritorno
52	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Mandata
-	in circuito ACQUA CALDA SANITARIA (ACS):
53	Misuratore di energia (su Mandata acqua calda sanitaria - ACS)
54	Temperatura Acqua - Mandata ACS
55	Temperatura Acqua - Adduzione Acqua Fredda
56	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) su Mandata ACS
57	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) su Adduzione Acqua Fredda
-	in circuito BATTERIA di ricald./raffresc.
58	Misuratore di energia (su Ritorno)
59	Temperatura Acqua - Ritorno
60	Temperatura Acqua - Mandata
61	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Ritorno
62	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Mandata
-	in circuito SOLARE TERMICO:
63	Misuratore di energia (su Ritorno: da Pannelli solari ad Accumulo)
64	Temperatura Acqua - Ritorno
65	Temperatura Acqua - Mandata
66	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Ritorno
67	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Mandata
68	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - in accumulo
-	in circuito e accumulo ACQUE PIOVANE:
69	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili)
70	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili)
71	Misuratore di energia (su Ritorno)
72	Temperatura Acqua - Ritorno
73	Temperatura Acqua - Mandata
74	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Ritorno
75	Temperatura Acqua (PT 100 - 4 fili) - Mandata
-	circuiti ENERGIA ELETTRICA:
76	Contatore en. elettrica - trifase 80A (Totale)
77	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Importata / Esportata Generale)
78	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Autoclave)
79	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Pompa acque grigie)
80	Contatore en. elettrica - trifase 80A (Fotovoltaico)
81	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Consumi generali casa e luci esterne)
82	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Aspirapolvere)
83	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Pompa di calore)
84	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Surriscaldatore accumulo)
85	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (VMC - ventilazione meccanica controllata)
86	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Pompa accumulo)

#	Sensore
87	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Piano cottura)
88	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Lavastoviglie)
89	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Forno)
90	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Frigido)
91	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Macchina caffè)
92	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Asciugatrice)
93	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Lavatrice)
94	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Termoarredo bagno)
95	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Quadro elettrico sistema di monitoraggio)
96	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Pompe irrigazione)
97	Contatore en. elettrica - Monofase 32A (Pompa acque bianche)
-	in AMBIENTE :
98	PT 100 (4 fili) - globo-termometro
99	PT 100 (4 fili) - globo-termometro
100	PT 100 (4 fili) - globo-termometro
101	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
102	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
103	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
104	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
105	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
106	PT 100 (4 fili) - con schermo per radiazione
107	Umidità aria da ambiente esterno
108	Temperatura aria da ambiente esterno
109	Concentrazione CO2 da ambiente esterno
-	per TEMPERATURE SUPERFICIALI PARETI :
113	PT 100 (4 fili) - in dischetto di ottone
114	PT 100 (4 fili) - in dischetto di ottone
115	PT 100 (4 fili) - in dischetto di ottone
116	PT 100 (4 fili) - in dischetto di ottone
117	PT 100 (4 fili) - in dischetto di ottone
-	componentistica KNX in ambiente :
nnn	tutti i componenti della dorsale Konnex
-	Stazione meteo :
nnn	Stazione meteo
-	Misuratore livello vasca acqua piovana
nnn	Misuratore di livello a ultrasuoni

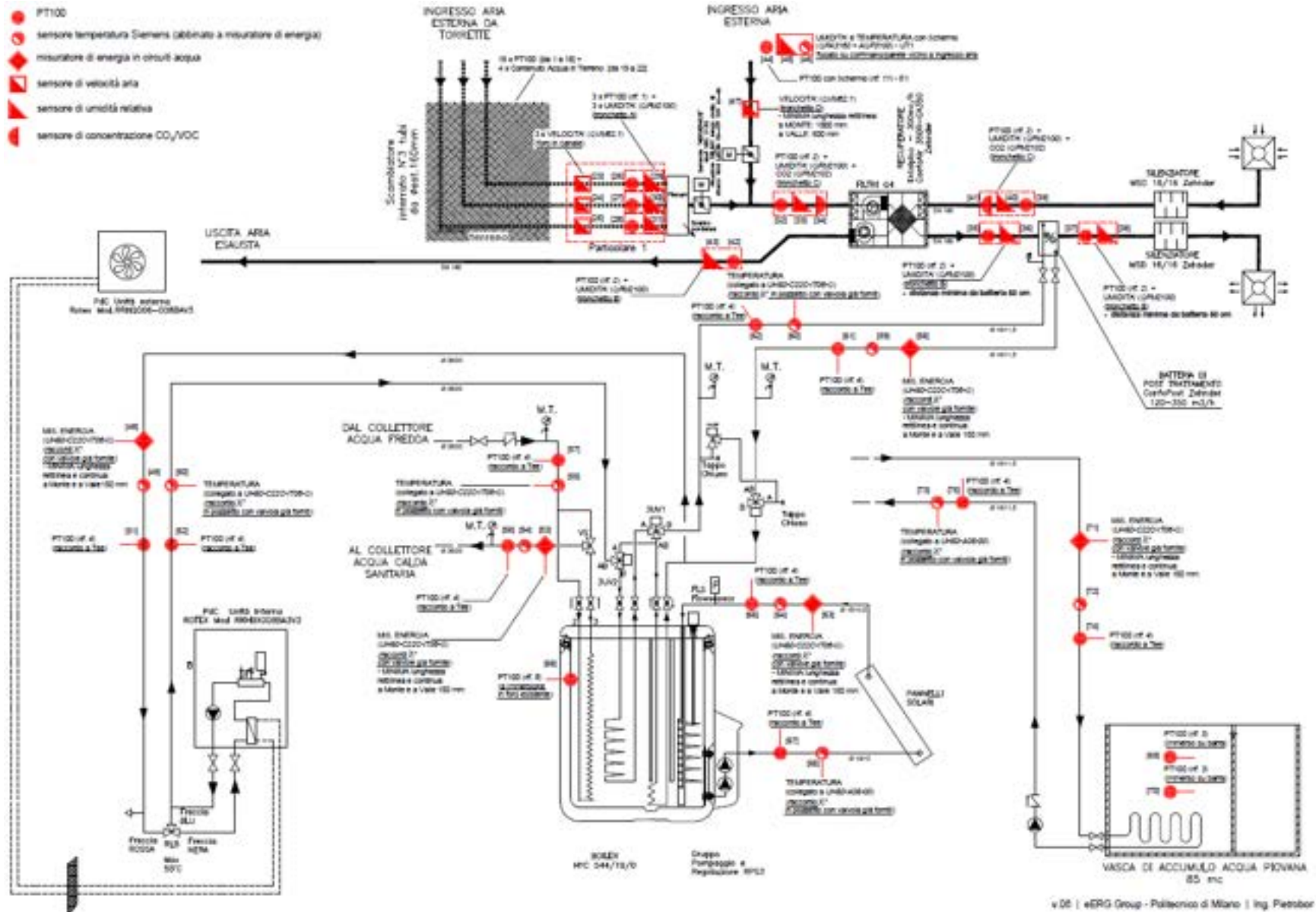


Figura 4. Schema dei sensori (in rosso) installati nel sistema impiantistico dell'edificio.



Figura 5. Sensori di temperatura, umidità relativa, concentrazione di CO₂ e composti organici volatili su canale dell'aria in impianto di ventilazione meccanica (canale principale di aria di ripresa).



Figura 6. Sensori di temperatura e umidità relativa in canali d'aria all'uscita dello scambiatore di calore interrato



Figura 7. Tubi rettilinei termicamente isolati in corrispondenza dei misuratori di energia termica nei circuiti idronici.

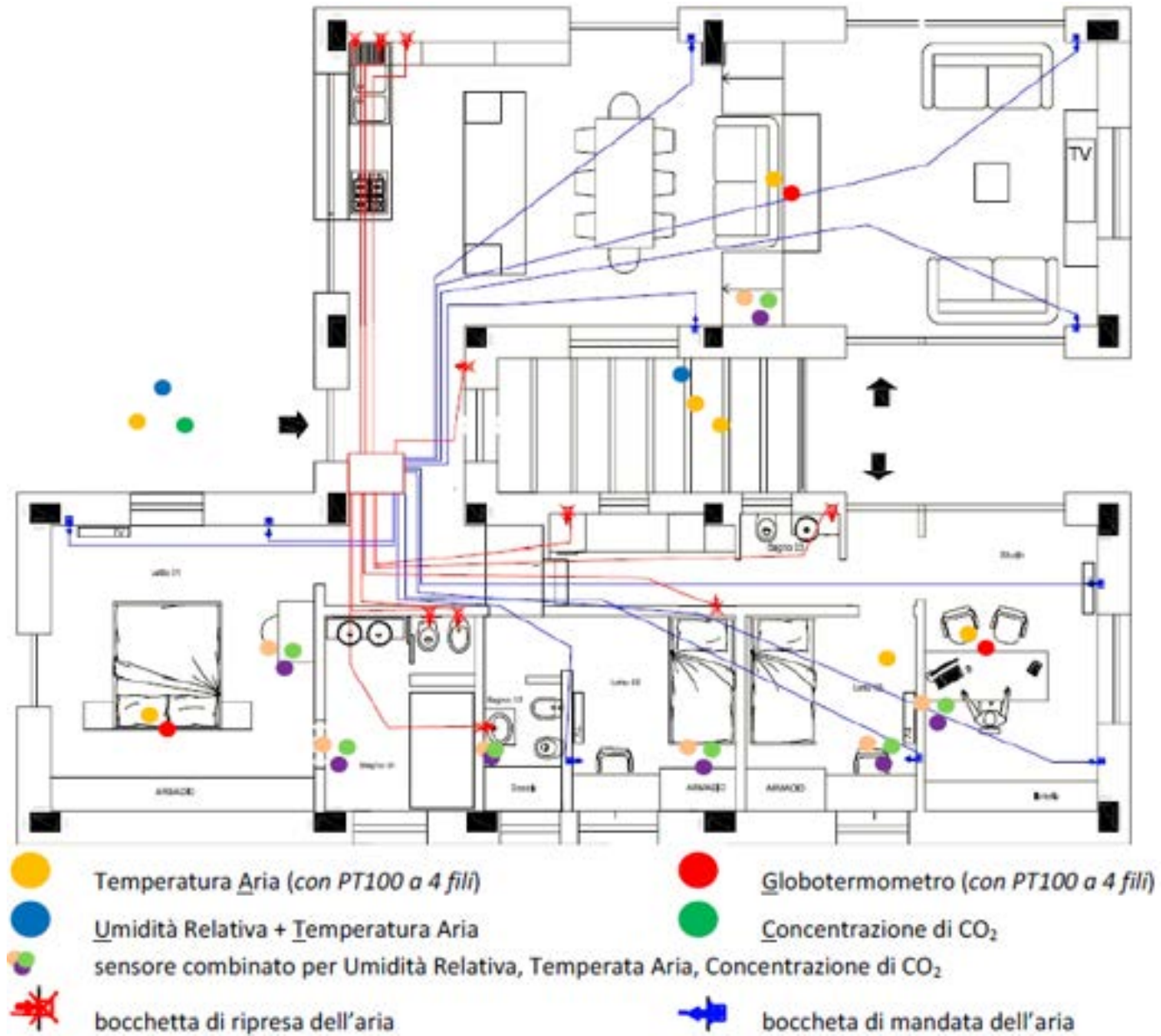


Figura 8. Principali sensori installati negli ambienti interni ed esterni.

2.1.1.4 *Determinazione dei requisiti per l'acquisizione e memorizzazione*

Allo scopo di raggiungere un dettaglio elevato nel monitoraggio, si è scelto di memorizzare i valori delle variabili con frequenze minima di 1 minuto.

In base a vincoli di limiti di memoria dei dispositivi elettronici di supervisione e a vincoli di stabilità del sistema che potranno emergere nelle fasi successive, si potrà valutare di differenziare le frequenze di memorizzazione dei diversi tipi di variabili.

Si è comunque previsto che tutti i dati debbano essere memorizzati con la stessa frequenza e negli stessi istanti o, nel caso si manifestino i citati problemi di memoria o stabilità, con frequenze coordinate (multipli di 5 o 10 minuti).

Questo è utile in generale per consentire analisi coordinate di grandezze diverse e in particolare è importante anche per la memorizzazione delle misure dai sensori di temperatura tipo termoresistente PT100 e quelle dai misuratori di energia termica. Queste misure verranno utilizzate insieme per affinare il calcolo dell'energia termica utilizzata.

I dati devono essere memorizzati su un supporto hardware affidabile e di adeguata capacità di memoria, installato localmente nell'edificio.

Per questo si è selezionato un computer con caratteristiche proprie e del sistema operativo installato, adeguate all'installazione del software per la gestione del sistema di supervisione BACnet.

Si è preferito un computer portatile così da garantire continuità di operazione anche nei periodi per cui accidentalmente potrebbe essere interrotta l'alimentazione elettrica, utilizzando la sua batteria e gravando di meno sul gruppo di continuità elettrico a cui è collegato il sistema. Il computer portatile è stato scelto completo di porte USB, LAN e seriale, per consentire l'eventuale collegamento anche a dispositivi aggiuntivi per il monitoraggio o, ad esempio, il collegamento alla centralina di controllo dell'accumulo del solare termico, che prevede il collegamento tramite seriale.

Si è garantita la funzione di esportazione di tutti i valori misurati in file di testo o file Excel.

2.1.1.5 *Determinazione dei requisiti per la struttura del database*

Si è sviluppata la struttura del database di memorizzazione dei valori delle variabili misurate, secondo i seguenti campi per ciascuna delle grandezze memorizzate:

- Numero/codice identificativo (ID)
- Nome oggetto
- Anno
- Mese
- Giorno
- Ora
- Istante temporale come valore numerico (convertibile in formato "hh:mm dd/mm/yyyy")
- Giorno della settimana
- Unità di misura
- Valore iniziale nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Valore finale nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Valore medio nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Valore minimo nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente

- Valore massimo nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Somma nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Numero di acquisizioni nel periodo fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Differenza tra valore iniziale e finale del periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente
- Integrale nel periodo di acquisizione fra una istante temporale di memorizzazione e il precedente.

La grandezze monitorate sono così raccolte in un database, che può essere esportato in forma di file di testo, sui cui è possibile operare con software di analisi dati per estrazione di dati, verifiche, elaborazioni e analisi.

La Figura 9 mostra un esempio di visualizzazione in ambiente Excel del database di alcuni dati memorizzati.

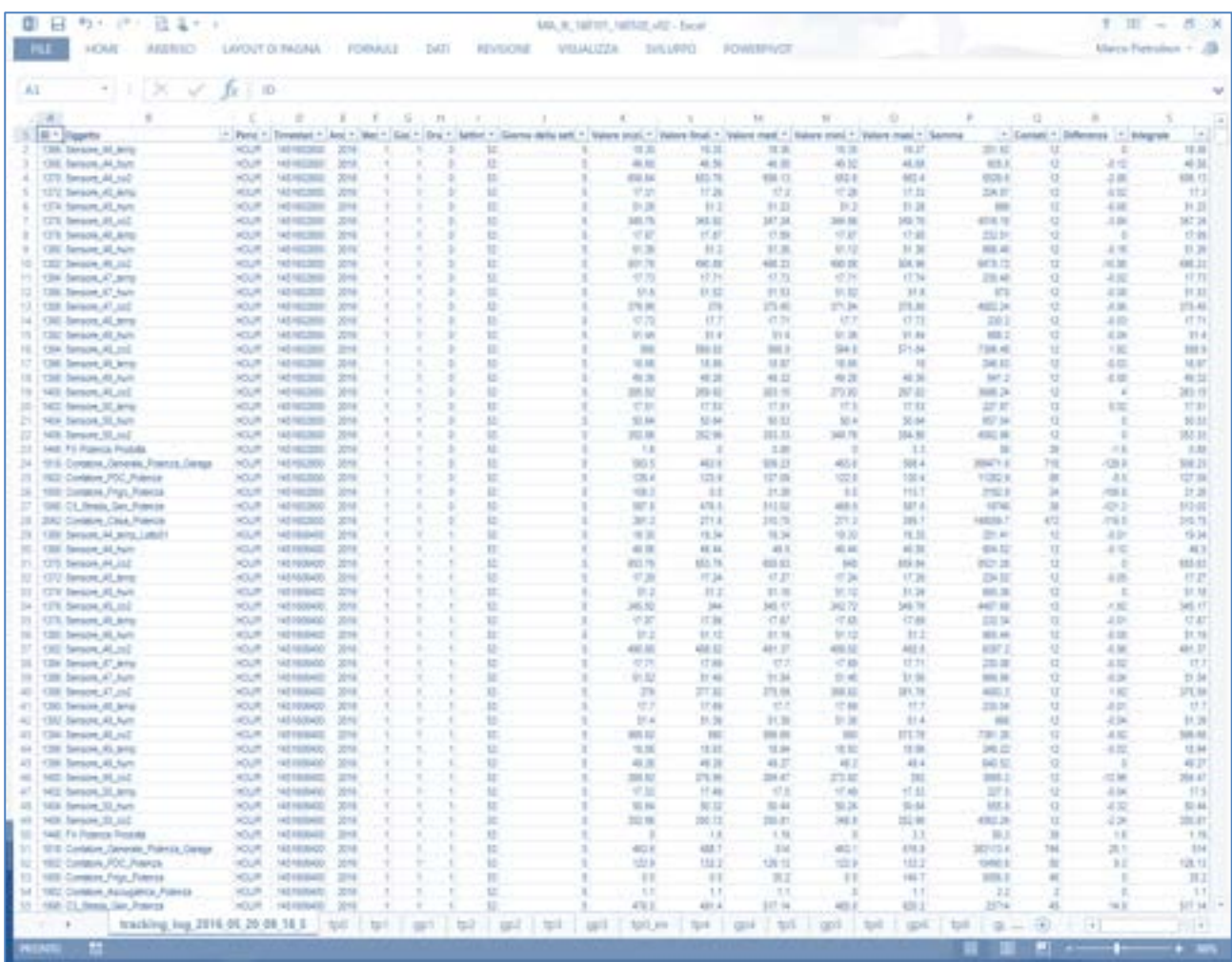


Figura 9. Esempio di visualizzazione in Excel del database dati memorizzati.

2.1.1.6 Definizioni delle prime elaborazioni

In aggiunta alle regole di controllo, si sono determinate alcune prime elaborazioni che possano essere svolte dal sistema di monitoraggio e controllo sulle grandezze memorizzate. Le prime elaborazioni riguardano la determinazione delle seguenti grandezze:

- Portata d'aria nell'impianto di ventilazione meccanica (da sensori di velocità in canali d'aria)
- Portata d'aria ricavata da curva ventilatori
- Efficienza del recuperatore di calore aria/aria
- Potenza elettrica specifica per ventilazione meccanica (*specific fan power*)
- Grandezze sulle prestazioni dello scambiatore interrato [10]
- Coefficiente di prestazione (COP) del sistema pompa di calore (in riscaldamento, raffrescamento, totale)
- Rendimento sistema solare Termico
- Rendimento sistema solare Fotovoltaico
- Indici di interazione fra edificio e rete elettrica [11].

2.1.1.7 Determinazione dei requisiti per le visualizzazioni per gli utenti

Il sistema di monitoraggio e controllo presenta un interfaccia che permette agli utenti di visualizzare gli andamenti delle principali grandezze e di impostare i valori dei principali parametri per la regolazione. Un primo set di visualizzazioni è già stato implementato in particolare per il sistema Konnex, per interfacce accessibili da supporto computer e dispositivi mobili. Se ne presentano degli esempi in Figura 10 e Figura 11.



Figura 10. Esempio di visualizzazione per utente implementata nel sistema.

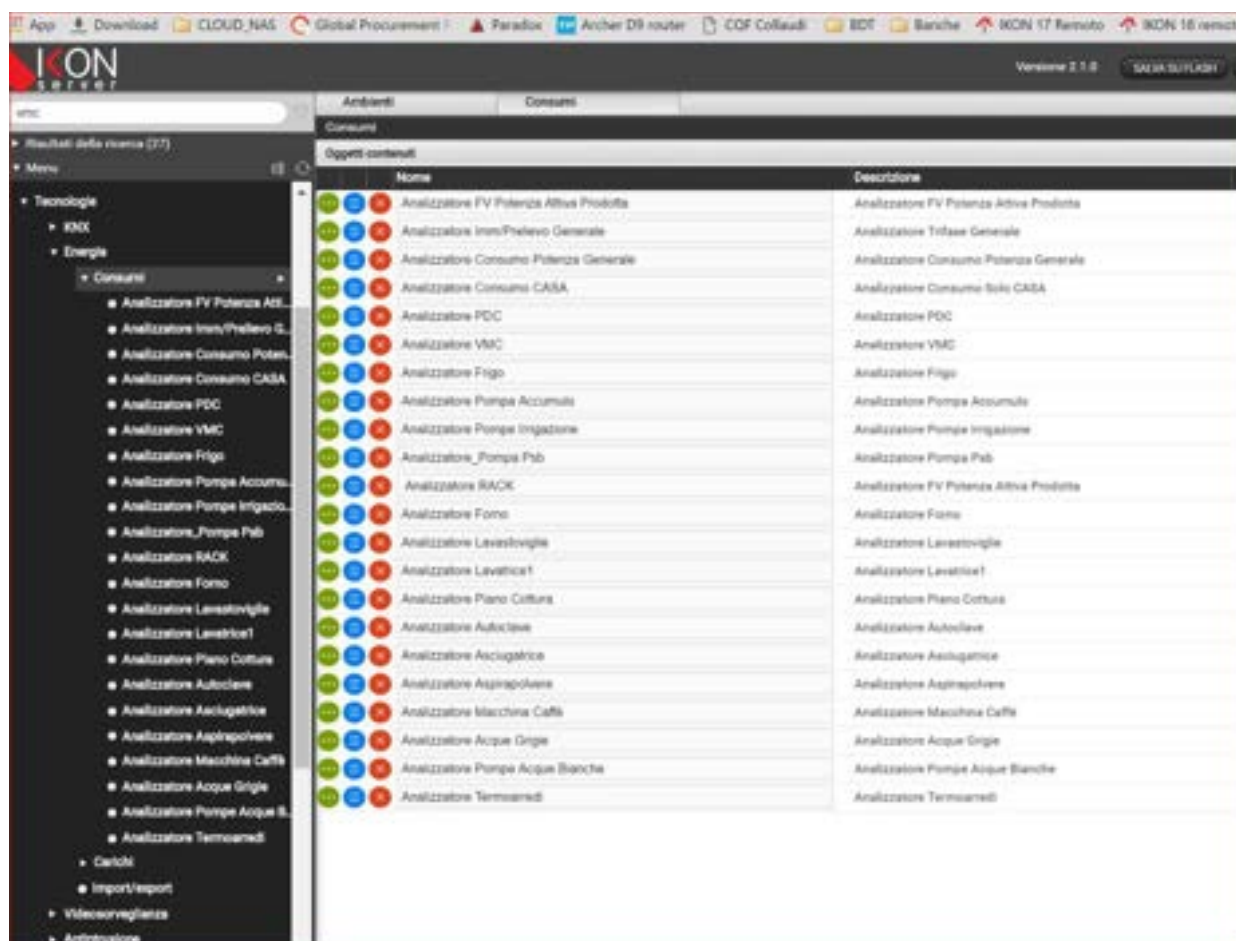


Figura 11. Esempio di visualizzazione per utente implementata nel sistema.

2.1.2 Settaggio del sistema di acquisizione dati e verifica del corretto funzionamento dell'apparato sperimentale

In fase di installazione il sistema è stato impostato con settaggi iniziali parziali, a partire da questi si è operato, nel periodo del presente accordo di collaborazione, allo scopo di integrarli e completarli e per verificare il corretto funzionamento dell'apparato sperimentale.

Si sono scaricati i dati monitorati per consentirne una prima visione, verifica ed elaborazione, rispettivamente per i periodi settembre 2015 - dicembre 2015 (primo periodo) e gennaio 2016 - maggio 2016 (secondo periodo).

In prima battuta si è svolto un lavoro di coordinamento e scambio di informazioni con i fornitori industriali del sistema di monitoraggio e controllo, al fine di rendere più agevole l'esportazione dei dati acquisiti e memorizzati. Infatti l'esportazione dei dati nella fasi precedenti era risultata a tratti macchinosa e possibile solo in modo assistito da parte degli sviluppatori informatici. Per questo si è deciso di richiedere di attivare una funzione di esportazione più agevole, che è stata implementata nelle prime fasi del presente lavoro.

Dopo essere stati scaricati, i dati del primo periodo sono stati estratti dal database e ordinati per le prime analisi, che hanno riguardato la verifica della loro completezza. Inoltre sono stati considerati gli andamenti e le tendenze dei valori delle diverse grandezze allo scopo di individuare picchi o comportamenti anomali.

Si sono riscontrate alcune misure mancanti. Si tratta soprattutto di ore singole o periodi di lunghezza contenuta (da 1 alle 3 ore consecutive) e in casi meno numerosi di lunghezza maggiore. Solo due episodi sono stati tuttavia caratterizzati da intervalli molto prolungati di assenza dati, rispettivamente di 18 e 24 ore. Complessivamente le ore con valori mancanti corrispondono a meno del 4% del periodo di tempo di cui si sono analizzati i dati.

Come esempio, in Figura 12 e Figura 13 sono rappresentate rispettivamente la temperatura e l'umidità relativa dell'aria degli ambienti interni nel mese di Novembre 2015. Le frecce rosse individuano i 3 periodi di questo mese durante i quali i dati non sono stati memorizzati dal sistema di monitoraggio. Si tratta in particolare di un periodo di 5 ore in data 2 Novembre (dalle ore 15 alle ore 19), un intervallo di 2 ore in data 15 Novembre (dalle ore 18 alle ore 19), un periodo di 10 ore con inizio in data 24 Novembre (dalle 21 alle 6 del giorno 25 Novembre).

Per alcune analisi, data la durata contenuta delle mancanze di dati, si sono completati i valori mancanti con operazione di media tra i valori precedenti e quelli successivi delle ore corrispondenti, ottenendo la continuità dei valori in modo coerente.

Si è riscontrato che la totalità delle misure mancanti non riguardano i singoli sensori e dispositivi, ma tutte le misure effettuate per mezzo del sistema Konnex. Questo ha portato a dedurre che i dati mancanti non sono dovuti a malfunzionamenti temporanei delle singole parti, ma al fatto che il sistema Konnex, come descritto, e in particolare l'unità centrale che attualmente lo supervisiona, risultano sollecitati in modo intenso a causa della numerosità dei dispositivi collegati e delle logiche implementate. E questo produce in alcuni frangenti instabilità e blocco temporaneo di questa parte del sistema.

Per questo si è ritenuto di continuare le attività per l'implementazione della supervisione generale attraverso il sistema BACnet così da affiancare e completare il sistema Konnex.

Si sono così svolte le attività di sviluppo in collaborazione con i produttori dei sistemi, allo scopo di realizzare l'implementazione dell'apparato sperimentale completo, garantendo maggiore stabilità al sistema. Si sono sviluppati i requisiti per il suo completamento, allo scopo di consentire l'uso di tutti i sensori e l'implementazione di nuove logiche di controllo. Queste attività e i contenuti sviluppati sono descritti nei successivi paragrafi del presente documento.

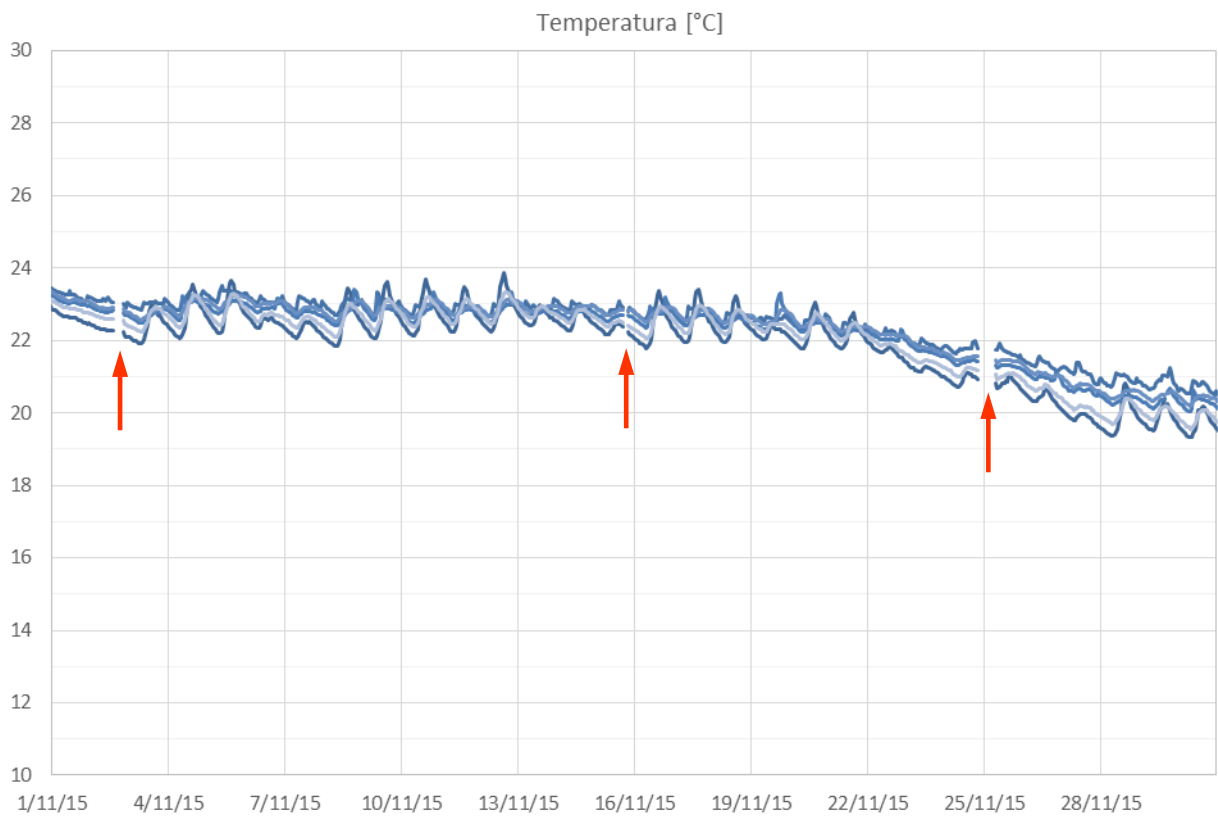


Figura 12. Temperatura dell'aria degli ambienti interni, con indicati (freccie rosse) 3 intervalli di tempo in cui le misure non sono state memorizzate dal sistema di monitoraggio.

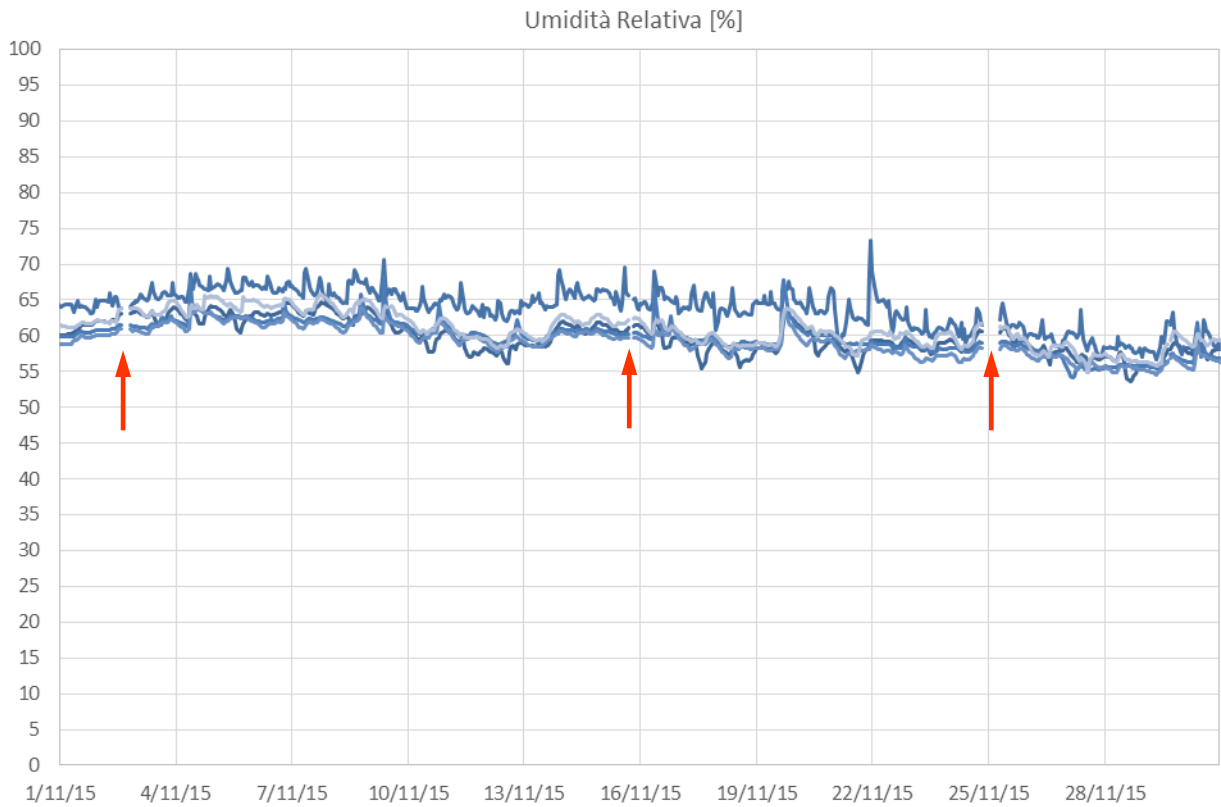


Figura 13. Umidità relativa dell'aria negli ambienti interni, con indicati (freccie rosse) 3 intervalli di tempo in cui le misure non sono state memorizzate dal sistema di monitoraggio.

Si sono potute sviluppare ulteriori considerazioni riguardanti i dispositivi installati per la misura dell'energia e della potenza elettrica dei diversi circuiti. Tali dispositivi sono misuratori elettronici ciascuno accoppiato a un'apposita interfaccia di comunicazione che li collega tramite bus al sistema Konnex. Dall'analisi dei dati, parte dei misuratori, soprattutto quelli relativi ad alcune utenze specifiche (ad esempio la pompa di calore) hanno mostrato un'instabilità maggiore nella trasmissione dei dati su bus Konnex.

In generale hanno garantito migliore stabilità i misuratori per il monitoraggio complessivo, rispettivamente della domanda di energia elettrica per tutti gli usi, dello scambio di energie con la rete e della produzione di energia dal sistema fotovoltaico. Tuttavia su quest'ultimo si è individuato un periodo di mancanza di acquisizione delle misure, per la durata di circa un mese a cavallo fra Novembre 2015 e Dicembre 2015, come visualizzato dal grafico in Figura 14.

Si è verificato che le mancanze di misure non sono state dovute al malfunzionamento dei misuratori di energia, ma a problemi nell'esportazione dei valori sulla rete bus e quindi la successiva memorizzazione nel supervisore Konnex. Dalle verifiche effettuate si è determinata la necessità di aggiornare i programmi firmware integrati nei misuratori di energia elettrica e la loro interfaccia con il sistema Konnex. Questa attività è stata coordinata con l'azienda produttrice dei misuratori.

Nelle analisi finali si è potuto comunque intervenire completando la serie storica delle misure di energia e potenza elettrica prodotta dal fotovoltaico, procedendo con il calcolo della differenza fra le misura dell'energia esportata verso la rete elettrica e l'energia richiesta globalmente per tutti gli usi dell'edificio. L'andamento completo dei dati è mostrato dal grafico in Figura 15.

Due dei misuratori elettrici installati, oltre alla misura dell'energia attiva e della potenza attiva, permettono la misura di ulteriori grandezze elettriche quali: energia reattiva, potenza reattiva, tensione, corrente, fattore di potenza. Inizialmente si è ritenuto interessante monitorare anche queste grandezze almeno in due punti del sistema, ovvero dove l'inverter del sistema fotovoltaico fornisce l'energia elettrica prodotta e dove avviene lo scambio di energia con la rete elettrica. Tuttavia dall'analisi si è riscontrato che queste grandezze correttamente misurate dai dispositivi non vengono però automaticamente esportate sul bus Konnex. Da verifiche in campo e con il produttore dei dispositivi è stato accertato che l'applicativo Konnex, sviluppato dall'azienda produttrice con *Eib Tool Software* (ETS) e caricato sui dispositivi, non prevedeva l'esportazione di queste grandezze, ma solo di energia attiva e potenza attiva. Siccome non è possibile in tempi brevi aggiornare l'applicativo standard, si è richiesto di implementare a livello di supervisione della rete bus, alcune apposite routine che richiedano l'invio delle grandezze elettriche non esportate in automatico.

In generale risulta quindi importante in ambito di applicazioni con sistemi Konnex verificare l'aggiornamento dei firmware integrati sul dispositivo e l'effettiva completezza dell'applicativo ETS per i dispositivi che si vogliono utilizzare. Le caratteristiche delle componenti software insieme a quelle del dispositivo fisico ne determinano il funzionamento completo.

Dall'analisi dei valori in periodi di non occupazione dell'edificio, si è riscontrato che uno tra i diversi sensori di concentrazione di CO₂ installati negli ambienti registra valori bassi, plausibilmente anomali.

Si è quindi proposto la sostituzione del sensore e si sta valutando la possibilità di affiancare uno o più nuovi sensori di altra tipologia ai dispositivi già installati. Si stanno valutando alcune soluzioni da poter integrare agevolmente al bus del sistema Konnex, per esigenza di cablaggio.

Si ricorda inoltre che già per il sistema BACnet si è prevista l'installazione di alcuni sensori di concentrazione di CO₂, rispettivamente per l'aria di mandata dell'impianto di ventilazione meccanica, per l'aria di ripresa e per l'aria esterna.

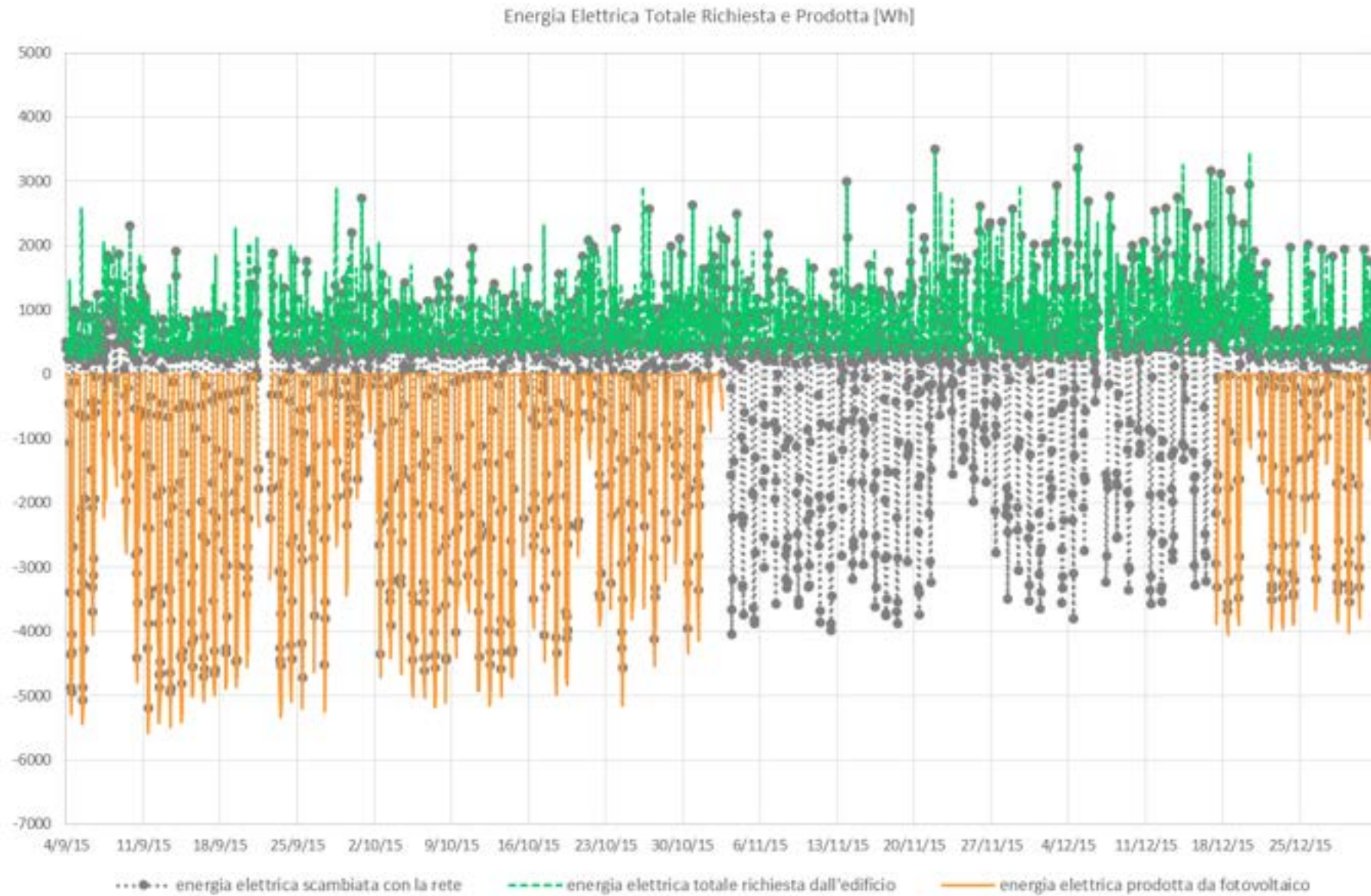


Figura 14. Energia elettrica totale richiesta per tutti gli usi, prodotta dal sistema fotovoltaico in copertura, e scambiata con la rete (si evidenzia un problema di mancata memorizzazione dell'energia elettrica prodotta dal sistema fotovoltaico)

Energia Elettrica Totale Richiesta e Prodotta [Wh]



Figura 15. Energia elettrica totale richiesta per tutti gli usi, prodotta dal sistema fotovoltaico in copertura, e scambiata con la rete (si evidenzia la correzione del problema attraverso differenza degli altri valori di riferimento)

2.2 Scrittura e implementazione di un primo set di logiche di controllo

Come descritto nel seguito, si sono sviluppate diverse logiche per il controllo della ventilazione meccanica e naturale, per il riscaldamento e il raffrescamento, per la protezione solare e l'illuminazione degli ambienti. Come previsto, un primo set di logiche di controllo è stato implementato nel sistema di controllo e monitoraggio dell'edificio (logiche Konnex).

In generale nelle formule qui di seguito sono indicati rispettivamente

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

Le logiche di controllo sviluppate si riferiscono rispettivamente al sistema Konnex o al sistema BACnet secondo la suddivisione espressa nell'elenco seguente.

Logiche di controllo su sistema Konnex:

- Attivazione della ventilazione meccanica alla chiusura delle finestre,
- Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente,
- Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente da bagni e cucina,
- Controllo per sfruttamento accumulo termico per acqua calda sanitaria,
- Controllo manuale con pulsante per le schermature solari,
- Controllo con programmazione a tempo e scenari (Schedule) per le schermature solari,
- Controllo dell'illuminazione artificiale,
- Notifiche e messaggi per l'utente.

Logiche di controllo su sistema BACnet:

- Controllo della portata della ventilazione meccanica in funzione di variabili ambientali (Demand controlled mechanical ventilation),
- Modalità di raffrescamento - selezione del pozzo di calore più vantaggioso,
- Raffrescamento attivo base,
- Raffrescamento con scambiatore di calore interrato,
- Raffrescamento con attivazione della massa termica,
- Modalità di riscaldamento - selezione della sorgente di calore più vantaggiosa,
- Riscaldamento,
- Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo e radiazione solare,
- Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo, radiazione solare e temperatura interna della stanza,
- Controllo delle schermature solari in funzione di radiazione solare su piano della finestra e temperatura interna della stanza,
- Schermature solari in modalità notturna in periodo di riscaldamento.

2.2.1 Schedule per set-point e altri valori impostabili

Si è definito che tutti i valori di set-point considerati in questo documento e tutti i valori impostabili devono poter essere espressi nell'interfaccia del sistema secondo queste modalità alternative

- valore fisso
- valore fisso per il periodo considerato (mese, settimana, giorno, etc.)
- programmazione (*schedule*) di valori da esprimere per mezzo di schemi semplificati, ad esempio su base oraria (tramite definizione di giorno settimanale tipo, giorno tipo del weekend, etc.)
- schedule da esprimere con file di testo (*.txt, *.csv o simili) con valori inseriti con la frequenza fino al time-step di 1 minuto, dove possibile per vincoli di memoria e stabilità del sistema.

2.2.2 Frequenza dei cicli di controlli

Di seguito nel documento vengono descritti alcuni cicli di controllo.

Si è richiesto al fornitore tecnico di selezionare insieme la frequenza ottimale di iterazione dei cicli allo scopo di ottenere sia controlli accurati e precisi, sia un sistema di controllo stabile.

2.2.3 Controlli per i sistemi HVAC e di ventilazione naturale

Sono state sviluppate delle logiche di controllo per regolare l'uso rispettivamente della ventilazione naturale e di quella meccanica, per il controllo del raffrescamento tramite scambiatore interrato e del raffrescamento attivo e per il controllo del riscaldamento degli ambienti.

Le logiche di controllo descritte di seguito consentono di attuare in modo prioritario, quando possibile, le soluzioni passive e a bassa domanda di energia, e di attivare le soluzioni di tipo attivo (con accensione della pompa di calore) solo quando quelle passive non sono sufficienti al raggiungimento dei valori stabiliti per i parametri ambientali.

2.2.3.1 Monitoraggio dell'apertura delle finestre / portefinestre

L'apertura delle finestre avviene in modo manuale e viene rilevata e inviata sul bus Konnex per mezzo di un contatto installato su ciascuna finestra / portafinestra. Questo stato di apertura e chiusura deve essere memorizzato per il monitoraggio con la frequenza stabilita e impostata.

Lo stato di apertura viene riconosciuto quando la finestra o portafinestra viene aperta.

2.2.3.2 Attivazione della ventilazione meccanica alla chiusura delle finestre

Si è implementata la seguente logica di controllo: se dai contatti installati sui serramenti e collegati a sistema Konnex, le finestre / porte sull'esterno dei locali climatizzati sono tutte chiuse, allora sono accessi il ventilatore di mandata e il ventilatore di ripresa posizionati nel recuperatore di calore aria/aria. (Modalità ventilazione meccanica).

All'apertura di una o più finestre / porte finestre, con un ritardo impostabile (ad es. 1 minuto, impostabile) vengono spenti il ventilatore di mandata e di ripresa. (Modalità ventilazione naturale)

Se dai contatti installati sui serramenti, risulta che almeno una finestra / porta sull'esterno è stata aperta e rimane aperta per un tempo di durata superiore a un valore liberamente impostabile, allora vengono spenti

il ventilatore di mandata e il ventilatore di ripresa posizionati nel recuperatore di calore aria/aria. (Modalità ventilazione naturale).

Alla chiusura di tutte le finestre / porte finestre, con un ritardo impostabile vengono accessi il ventilatore di mandata e di ripresa. (Modalità ventilazione meccanica).

2.2.3.3 Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente

Possibilità anche di accensione manuale della ventilazione meccanica, attraverso comando da interfaccia e pannelli di controllo del sistema (ad esempio nel caso di malfunzionamento di un contatto su finestre / porte).

Il sistema deve consentire la scelta da parte dell'utente e/o amministratore di selezionare il controllo di tipo automatico in funzione dell'apertura delle finestre oppure manuale tramite scelta dell'utente.

2.2.3.4 Attivazione della ventilazione meccanica da parte dell'utente da bagni e cucina

Possibilità ulteriore di accensione manuale della ventilazione meccanica da pulsanti nei bagni e nella cucina. All'attivazione del pulsante corrispondente i ventilatori funzionano a una velocità impostabile.

In automatico, dopo un ritardo impostabile (ad es. 5 minuti), i ventilatori tornano a seguire le logiche di controllo descritte negli altri punti di questo documento (di seguito).

Attualmente sono installati tre pulsanti (rispettivamente nei due bagni e in cucina) per attivare la ventilazione meccanica alla velocità massima per un periodo di 30 minuti (impostabile).

Questo tipo di controllo deve essere possibile in modalità ventilazione meccanica.

2.2.3.5 Controllo della portata delle ventilazione meccanica in funzione di variabili ambientali (Demand controlled mechanical ventilation)

In Modalità ventilazione meccanica, si sono sviluppate le logiche seguenti selezionabili per regolare l'accensione e la velocità dei ventilatori di mandata e ripresa dell'impianto di ventilazione meccanica.

Il controllo della velocità dei ventilatori è possibile in continuo con segnale secondo scala di tensione elettrica 0-10 V.

Poiché la ventilazione meccanica è di tipo bilanciato, il ventilatore di mandata e quello di ripresa funzionano sempre alla stessa velocità.

Il sistema deve controllare la velocità dei ventilatori, e conseguentemente la portata di ventilazione dell'impianto, in funzione dei valori delle seguenti variabili rappresentative delle condizioni degli ambienti interni:

- Concentrazione di CO₂ ($C_{CO_2.input}$)
- Concentrazione di Composti Organici Volatili - VOC ($C_{VOC.input}$)
- Umidità Relativa (UR_{input})
- Differenza fra il valore di Umidità Assoluta X dell'aria interna e dell'aria esterna ($\Delta X_{input} = X_{ind.input} - X_{out.input}$) come similmente in [12]
- Temperatura interna ($T_{ind.input}$).

La velocità dei ventilatori deve essere controllata in modo proporzionale rispetto a valori delle variabili sopra elencate e della loro distanza dai rispettivi valori di set-point (SP), impostabili dall'utente (di seguito indicati con $C_{CO_2.SP}$, $C_{VOC.SP}$, UR_{SP} , ΔX_{SP} , $T_{ind.SP}$).

Il valore della velocità dei ventilatori risulta dal valore massimo degli output risultanti dai diagrammi come quello riportato in Figura 16, in funzione rispettivamente di Temperatura interna, UR, ΔX , CO_2 e/o VOC. Qui come esempio si riporta solo il diagramma in funzione della concentrazione di CO_2 .

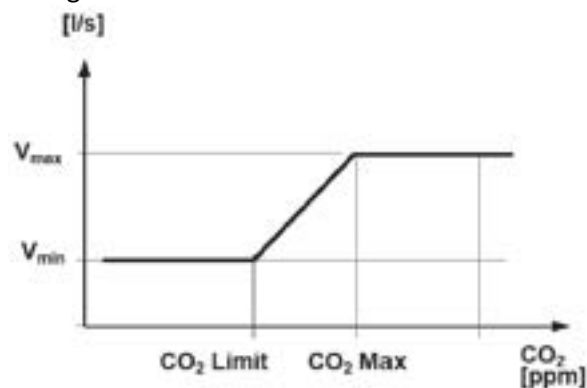


Figura 16. Esempio di diagramma di controllo in funzione della concentrazione di CO_2 (C_{CO_2}).

Per ognuna delle variabili di cui sopra (C_{CO_2} , C_{VOC} , UR, ΔX , T_{ind}) il sistema considera un diagramma simile a questo (Figura 16), con i parametri impostabili dall'utente, così da definire la forma dei diagrammi di controllo (V_{min} , V_{max} , pendenze, etc.). Sull'asse verticale (output del diagramma) può essere espressa la percentuale da 0 a 100% della velocità dei ventilatori, la quale ha corrispondenza nel segnale 0-10 V per il controllo della macchina di ventilazione).

I diagrammi di controllo (come quello di Figura 16) e le relative percentuali di velocità minima e massima, possono essere definiti considerando il campo di funzionamento dei ventilatori della macchina di ventilazione installata, come rappresentata nello specifico diagramma portata - prevalenza (in Figura 17) e la stima della curva caratteristica che esprime la relazione portata - perdite di carico dell'impianto di ventilazione meccanica. Mentre in Figura 17 sono rappresentate curve caratteristiche dei ventilatori le quali corrispondono a 8 livelli di velocità preimpostati, con la regolazione della velocità in continuo tramite scala in tensione 0-10 V, si deve considerare tutta l'area sottesa alla curva relativa alla velocità massima.

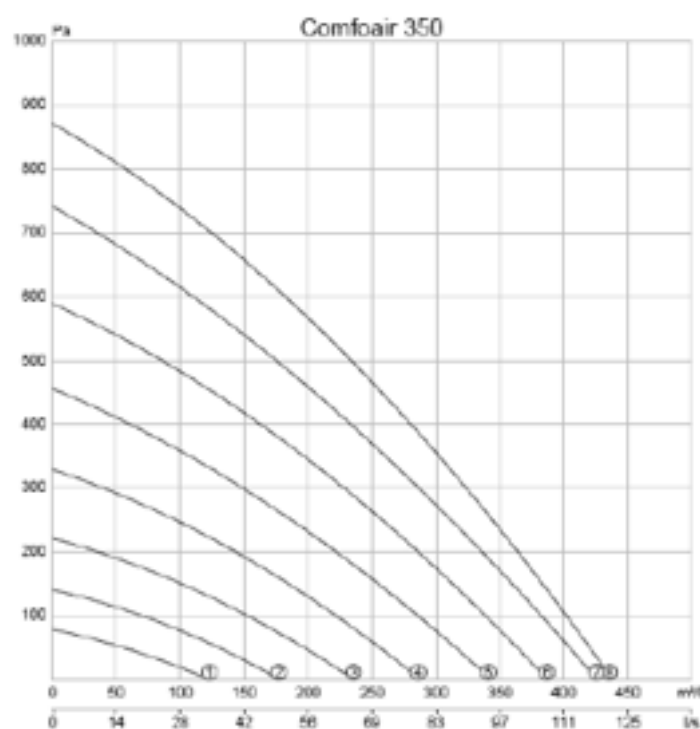


Figura 17. Curve portata - prevalenza di funzionamento dei ventilatori della macchina installata.

Il sistema in funzione dei valori dei set-point impostati e delle misure rispettivamente di $C_{CO_2.input}$, $C_{VOC.input}$, UR_{input} , $T_{ind.input}$ restituisce da ciascun diagramma di controllo un valore di percentuale di velocità dei ventilatori (indicata con $V[\%]$). Il valore massimo dei cinque $V[\%]$ restituiti come output dei diagrammi è il valore selezionato per regolare i ventilatori (come da Equazione 1):

Equazione 1. Valore massimo di $V[\%]$ determinati dalle relazioni tipo quella in Figura 16.

$$V[\%]_{output} = \text{MAX} (V[\%] = f(C_{CO_2}) ; V[\%] = f(C_{VOC}) ; V[\%] = f(UR) ; V[\%] = f(\Delta X, UR_{SP.X}) ; V[\%] = f(T_{ind}) ; V[\%]_{min})$$

In questo modo possiamo controllare la portata d'aria dell'impianto di ventilazione in funzione di queste variabili con una logica di tipo OR, come da schema esemplificativo qui in Figura 18, la quale prevede il controllo alternativo in funzione delle diverse variabili elencate.

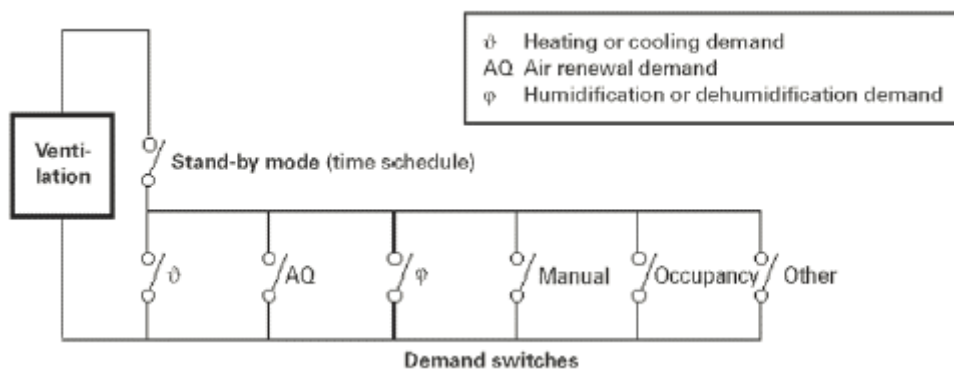


Figura 18. Schema di controllo della velocità dei ventilatori con “logica OR” in funzione di C_{CO_2} , C_{VOC} , UR , ΔX , T_{ind} , etc. [13].

È anche previsto che l'utente / amministratore del sistema di controllo possa disattivare una o più di queste logiche, ad esempio impostando il controllo della portata di ventilazione meccanica solo in funzione della concentrazione di CO_2 .

Deve poter essere impostato un valore minimo di velocità dei ventilatori, $V[\%]$ ($\geq 0\%$), per garantire la ventilazione minima di base per sostanze emesse da componenti di mobili e edificio (*base load ventilation*, $V[\%]_{min}$).

Esiste anche la possibilità di impostare il controllo della velocità dei ventilatori in funzioni di questi variabili rispettivamente con logica proporzionale (come descritto), proporzionale-integrale (PI) o proporzionale-integrale-derivativa (PID).

Nella fase di settaggio, i valori dei parametri delle regole di controllo devono essere scelti anche per evitare che il sistema cambi di stato (velocità dei ventilatori) con una frequenza troppo elevata, in funzione degli input, allo scopo di evitare troppo frequenti cambi di velocità dei ventilatori o accensioni e spegnimenti.

Il sistema è pensato per consentire all'utente / amministratore di associare, tramite selezione manuale o definizione di schedule, alle variabili di input del controllo $C_{CO_2.input}$, $C_{VOC.input}$, UR_{input} , $\Delta X_{input} = X_{ind.input} - X_{out.input}$, $T_{ind.input}$ diverse variabili misurate nel sistema, in particolare in modo alternativo:

- Come $C_{CO_2.input}$ in alternativa per la concentrazione di CO_2
- 1. valore MEDIO dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti
- 2. valore MASSIMO dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti
- 3. valore del sensore in un ambiente selezionabile
- 4. possibilità di escludere il sensore di uno o più ambienti
- 5. valore del sensore installato nel canale di ripresa dell'aria esausta

6. DIFFERENZA fra valore di concentrazione di CO₂ outdoor ($C_{CO_2.out}$) e uno dei valori di cui sopra
 7. DIFFERENZA fra valori del sensore nel canale di ripresa dell'aria esausta e del sensore nel canale di mandata dell'aria di rinnovo
- Per i punti 6. e 7. di cui qui sopra deve essere previsto e si deve poter impostare un valore di set-point di DIFFERENZA di concentrazione di CO₂ tra aria indoor e outdoor (e, in questo caso, non di C_{CO_2} in assoluto) - vedere quanto segue;
 - Come $C_{CO_2.SP}$ (set-point in corrispondenza del quale la velocità del ventilatore aumenta rispetto a $V[\%]_{min}$) in alternativa
 1. un valore fisso impostabile
 2. un valore impostato con una schedule
 3. un valore di concentrazione di CO₂ in funzione del valore esterno ($C_{CO_2.out}$), secondo l'espressione:

$$C_{CO_2.SP} = C_{CO_2.out} + \Delta C_{CO_2}, \quad \text{con } \Delta C_{CO_2} \geq 0 \text{ ppm impostabile dall'utente/amministratore;}$$
 - Come $C_{VOC.input}$ in alternativa per la concentrazione di VOC
 1. valore del sensore nel canale di ripresa dell'aria esausta
 2. DIFFERENZA fra valori del sensore nel canale di ripresa dell'aria esausta e del sensore nel canale di mandata dell'aria di rinnovo;
 - Come UR_{input} in alternativa per l'umidità relativa
 1. valore MEDIO dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti
 2. valore MASSIMO dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti
 3. valore del sensore in un ambiente selezionabile
 4. possibilità di escludere il sensore di uno o più ambienti
 5. valore del sensore installato nel canale di ripresa dell'aria esausta;
 - Come valore di ΔX_{input} si deve considerare che $\Delta X_{input} = X_{ind.input} - X_{out.input}$. $X_{ind.input}$ e $X_{out.input}$ sono calcolati da formula in funzione della temperatura e dell'umidità relativa rispettivamente dell'aria interna (ind) ed esterna (out). Per queste variabili rispettivamente si deve poter selezionare in alternativa le seguenti possibilità:
 6. valore MEDIO dei valori misurati da tutti i sensori negli ambienti interni e in esterno
 7. valore MASSIMO dei valori misurati da tutti i sensori negli ambienti interni e in esterno
 8. valori da un sensore nell'ambiente interno e uno in ambiente esterno, selezionabili
 9. possibilità di escludere il sensore di uno o più ambienti interni ed esterni
 10. valore del sensore installato nel canale di ripresa dell'aria esausta e di un sensore selezionato in esterno.

Nel caso del controllo in funzione della differenza tra ΔX_{SP} e $\Delta X_{input} = X_{ind.input} - X_{out.input}$, nello stesso tempo deve essere verificata la condizione $UR_{input} > UR_{SP,X}$ (per questo è indicato in Equazione 1 che $V[\%]_{\Delta X} = f(\Delta X, UR_{SP,X})$). Questo significa che il digramma di controllo della velocità dei ventilatori restituisce il valore di $V[\%]_{\Delta X, min}$ se l'UR interna non supera il valore di set-point impostato ($UR_{input} \leq UR_{SP,X}$). Al contrario se $UR_{input} > UR_{SP,X}$ allora il digramma restituirà il valore di $V[\%]_{\Delta X} = f(\Delta X, UR_{SP,X})$ secondo l'andamento impostato). Questo tipo di controllo consente, quando necessario, di utilizzare la ventilazione meccanica per smaltire parte del vapore prodotto negli ambienti interni.

- Come $T_{ind.input}$ in alternativa per la temperatura indoor
 1. valore MEDIO dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti

2. valore MASSIMO/MINIMO⁵ dei valori misurati da tutti i sensori del sistema Konnex installati negli ambienti interni
3. valore MEDIO dei valori misurati dai globo-termometri installati negli ambienti interni
4. valore MASSIMO/MINIMO dei valori misurati dai globo-termometri installati negli ambienti interni
5. valore MEDIO delle temperature operanti calcolate per gli ambienti interni
6. valore MASSIMO/MINIMO delle temperature operanti calcolate per gli ambienti interni
7. valore del sensore in un ambiente selezionabile
8. possibilità di escludere il sensore di uno o più ambienti.

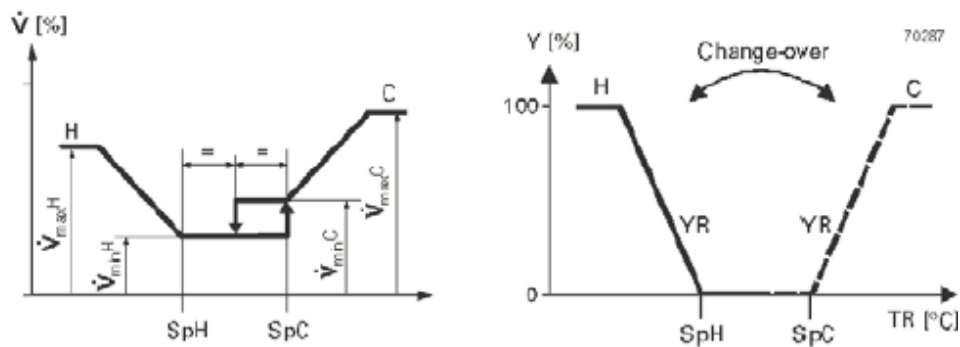
In particolare per il controllo della velocità dei ventilatori in funzione della temperatura interna, si considera un diagramma di controllo simile a quello in Figura 19, dove si definiscono rispettivamente valori impostabili della temperatura interna di set-point per il riscaldamento degli ambienti (indicato con *heating* - H) ($T_{ind.SP.H}$) e un valore di set-point per il raffrescamento degli ambienti (*cooling* - C) ($T_{ind.SP.C}$), come nella figura di seguito (rappresentati con SpH e SpC).

È previsto che l'attivazione della modalità di riscaldamento o di raffrescamento della pompa di calore avvenga secondo questi modi alternativi

1. Comando manuale
2. Schedule programmabile
3. In funzione di corrispondenti set point da confrontare con un valore di media mobile (*running mean*) della temperatura dell'aria esterna.

Più in particolare nel sistema il controllo nelle fasi di riscaldamento (*heating*) e raffrescamento (*cooling*) deve essere completato con le regole descritte nei paragrafi seguenti.

⁵ Considerare valore MASSIMO in periodo di RAFFRESCAMENTO, valore MINIMO in periodo di RISCALDAMENTO.



Function diagrams

V	Volumetric flow
TR	Room temperature
SpH	Effective heating setpoint
SpC	Effective cooling setpoint
$V_{max,H}$	Max. volume, heating
$V_{min,H}$	Min. volume, heating
$V_{max,C}$	Max. volume, cooling
$V_{min,C}$	Min. volume, cooling
Y	Output signal
YR	Reheating/recooling coil
H	Heating sequence
C	Cooling sequence

Figura 19. Diagramma di controllo della velocità dei ventilatori in fase di riscaldamento (H) e raffreddamento (C) degli ambienti, in funzione della temperatura indoor (T_{ind}) e la sua distanza dai valore di set-point.

2.2.3.6 Modalità di raffreddamento - selezione del pozzo di calore più vantaggioso

Il raffreddamento attivo degli ambienti dell'edificio deve essere regolato secondo le logiche di controllo descritte qui di seguito.

Quando tutte le finestre / portefinestre sono CHIUSE, se la temperatura esterna è abbastanza fresca ($T_{out,input} < T_{ind,input} - \Delta T$ E $T_{ind,input} > T_{ind.SP.C}$), allora il sistema produce un avviso che consiglia l'APERTURA delle finestre, con le seguenti modalità (selezionabili nel sistema) per esprimere il messaggio:

- messaggio per utenti, a video e registrato in un elenco messaggi / allarmi
- segnale sonoro di accompagnamento
- messaggio per amministratori, a video e registrato in un elenco messaggi / allarmi
- invio di messaggio di posta elettronica e/o di sms a utente.

Quando una o più finestre / portefinestre sono APERTE, se la temperatura NON è abbastanza fresca ($T_{out,input} > T_{ind,input} - \Delta T$ E $T_{ind,input} > T_{ind.SP.C}$), allora il sistema produce un avviso che consiglia la CHIUSURA delle finestre, con le modalità di invio descritte sopra.

Quando tutte le finestre sono chiuse, il sistema attiva (con un ritardo impostabile) la ventilazione meccanica secondo le regole descritte in questo documento.

Oltre alle logiche descritte nei paragrafi precedenti (a partire da 2.2.3.2), in modalità ventilazione meccanica devono essere impostate anche le regole seguenti.

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 deve aprire la serranda dello scambiatore interrato e chiudere la serranda della presa d'aria diretta dell'esterno:

$$SE \ T_{EAHE.OUT} < T_{out.input}$$

Allora deve essere APERTA la Serranda da Scambiatore Interrato e CHIUSA la Serranda presa d'aria diretta dell'esterno.

$$Al\ contrario \ SE \ T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$$

Allora deve essere CHIUSA la Serranda da Scambiatore Interrato e APERTA la Serranda presa d'aria diretta dell'esterno.

A questo punto l'impianto deve essere controllato da una delle seguenti logiche selezionabili dall'utente.

2.2.3.7 Raffrescamento attivo base

SE la temperatura rappresentativa delle stanze è maggiore della temperatura di set-point per il raffrescamento ($T_{ind.input} > T_{ind.SP.C}$), ALLORA devono essere attivate la pompa di calore in modalità raffrescamento e la pompa di circolazione del circuito della batteria di raffrescamento (a condizione che tutte le finestre siano chiuse).

2.2.3.8 Raffrescamento con scambiatore di calore interrato

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

E

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

$$T_{[35]} < T_{ind.SP.C} - \Delta T_{FC1}$$

ALLORA selezionare la velocità dei ventilatori secondo diagramma (cooling, in funzione di $T_{ind.input}$)

INVECE SE NON si verifica la condizione (2)

ALLORA attiva il circuito della batteria di raffrescamento e la pompa di calore in modalità raffrescamento,

INVECE SE NON si verifica la condizione (1)

ALLORA selezionare la velocità dei ventilatori secondo gli altri diagrammi di controllo (CO2, VOC, UR)

La logica di controllo è rappresentata anche nello schema seguente (Figura 20).

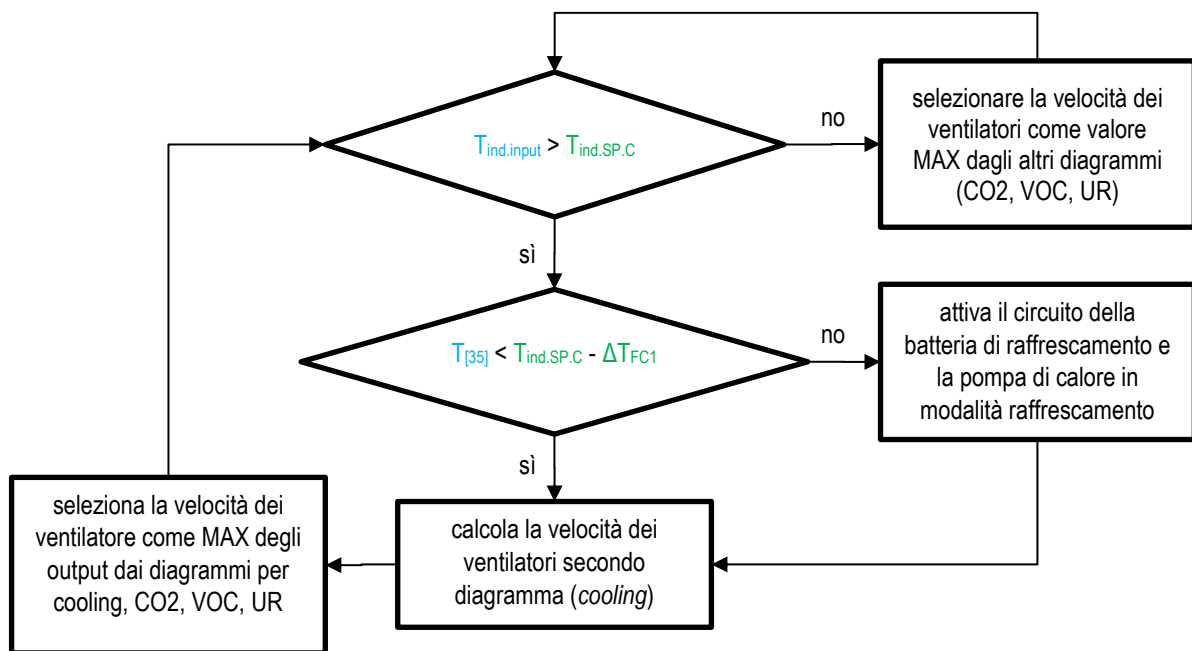


Figura 20. Schema di controllo della modalità di raffreddamento con scambiatore di calore interrato.

2.2.3.9 Raffrescamento con attivazione della massa termica

Questa logica di controllo espressa in Figura 21 permette di attivare l'impianto di ventilazione meccanica per consentire il raffreddamento degli ambienti interni e della massa termica dei componenti che li delimitano (soffitto, pavimento e pareti), quando la temperatura all'uscita del recuperatore di calore ($T_{[35]}$) è sufficientemente bassa.

Per questo, è previsto di poter selezionare un valore limite per la temperatura di mandata massima per realizzare il raffreddamento della massa termica (indicato con " $T_{ind.SP.MC} - \Delta T_{MC}$ ") e una limite inferiore (indicato con $T_{MIN.MC}$) per evitare temperatura di mandata eccessivamente basse.

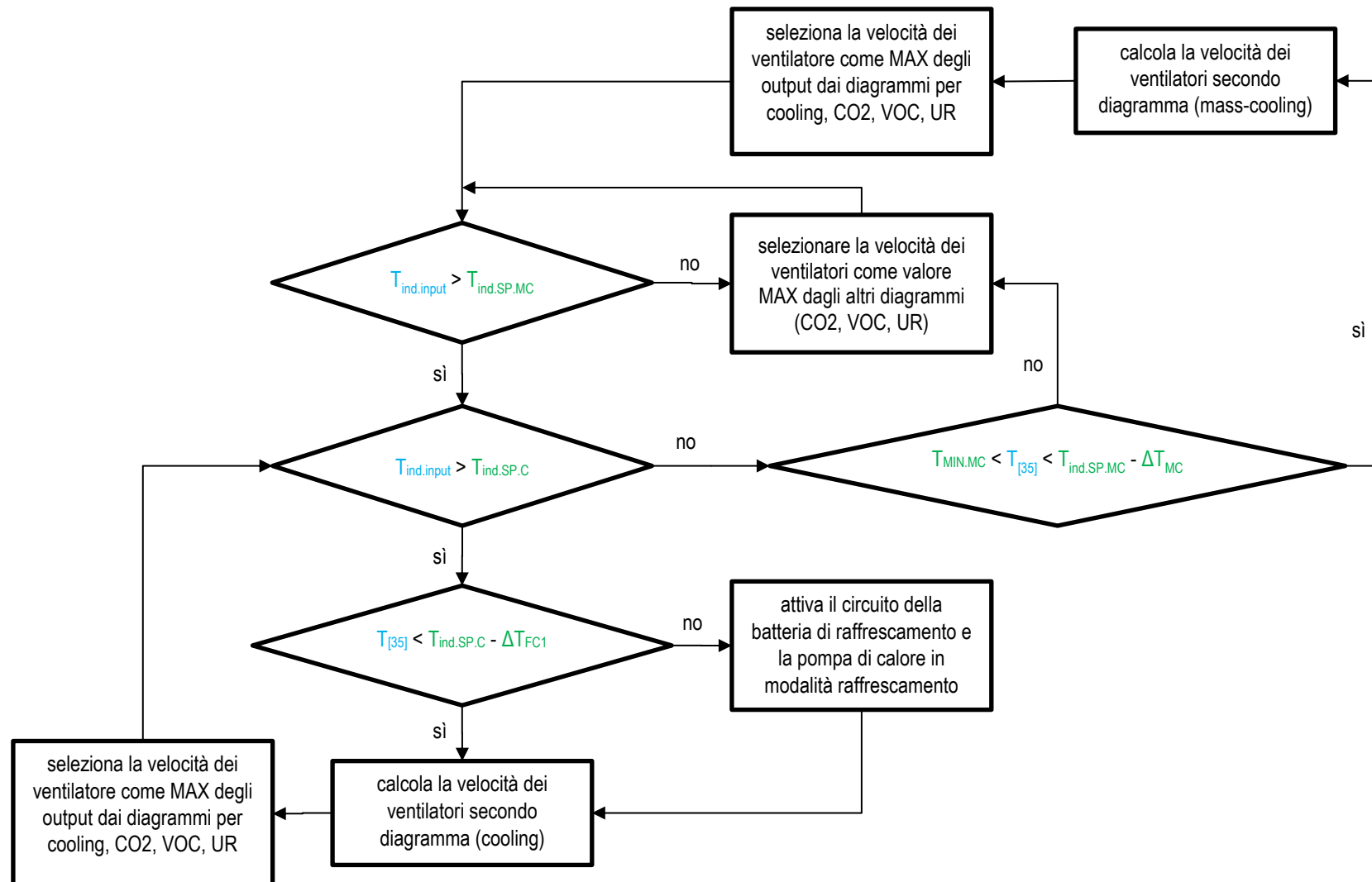


Figura 21. Schema di controllo della modalità di raffrescamento con attivazione della massa termica.

2.2.3.10 Modalità di riscaldamento - selezione della sorgente di calore più vantaggiosa

Il riscaldamento attivo degli ambienti dell'edificio deve essere regolato secondo le logiche di controllo di seguito descritte.

Quando una o più finestre / portefinestre 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, con le seguenti modalità (selezionabili nel sistema) per esprimere il messaggio:

- messaggio per utenti, a video e registrato in un elenco messaggi / allarmi
- segnale sonoro di accompagnamento
- messaggio per amministratori, a video e registrato in un elenco messaggi / allarmi
- invio di messaggio di posta elettronica e/o di sms a utente.

Quando tutte le finestre sono chiuse, il sistema attiva (con un ritardo impostabile) la ventilazione meccanica

secondo le regole di questo documento. Oltre alle logiche descritte nei paragrafi precedenti (a partire da 2.2.3.2), in modalità ventilazione meccanica devono essere impostate anche le regole seguenti.

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 deve aprire la serranda dello scambiatore interrato e chiudere la serranda della presa d'aria diretta dell'esterno:

$$\text{SE } T_{EAHE.OUT} > T_{out.input}$$

Allora deve essere APERTA Serranda da Scambiatore Interrato e CHIUSA Serranda presa d'aria diretta dell'esterno.

$$\text{Al contrario SE } T_{EAHE.OUT} < T_{out.input}$$

Allora deve essere CHIUSA Serranda da Scambiatore Interrato e APERTA Serranda presa d'aria diretta dell'esterno.

A questo punto l'impianto deve essere controllato dalla logica definita nello schema di seguito in Figura 22.

2.2.3.11 Riscaldamento

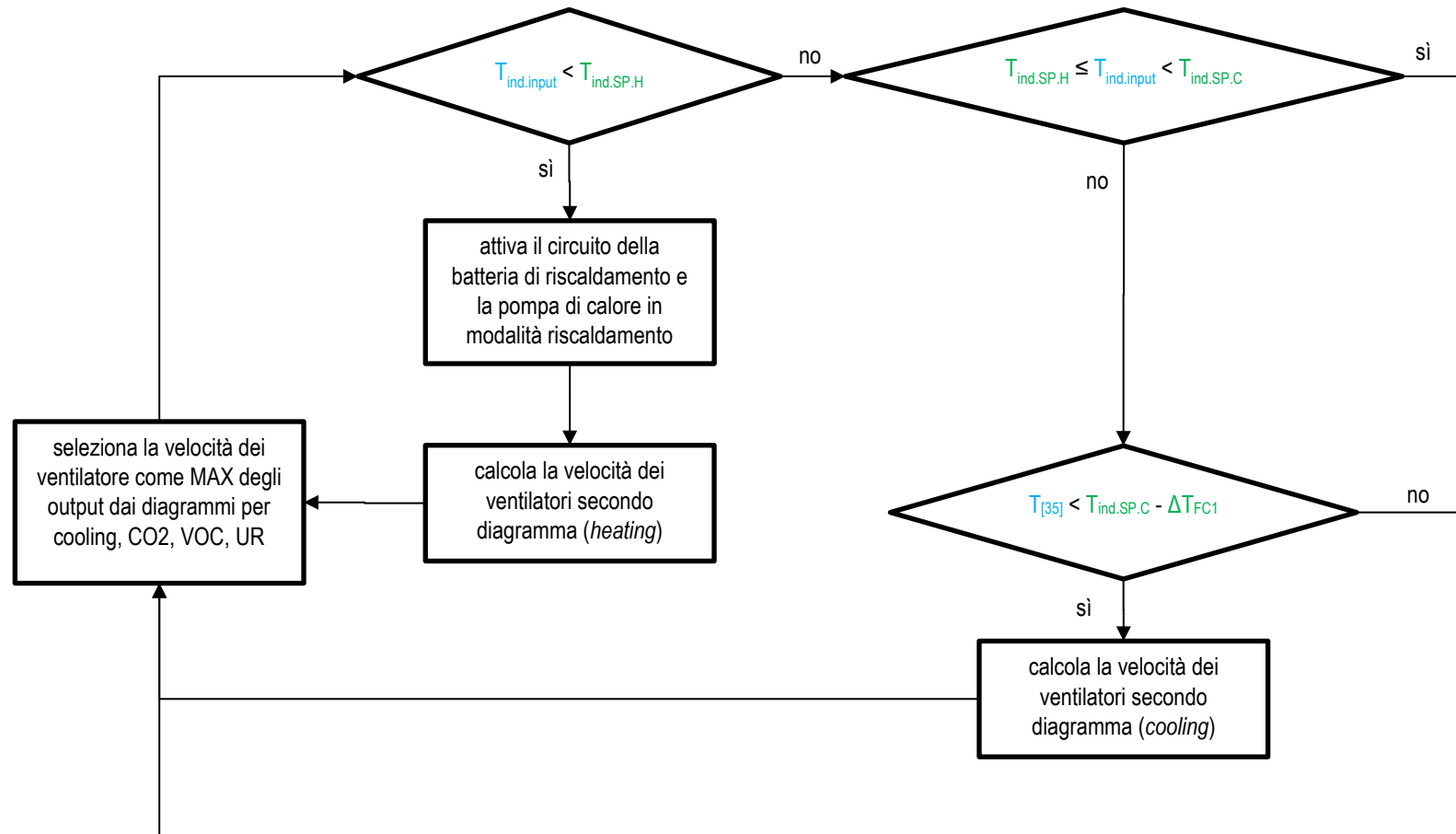


Figura 22. Schema di controllo della modalità di riscaldamento.

2.2.4 Controllo per sfruttamento accumulo termico per acqua calda sanitaria

Per evitare che la pompa di calore entri in funzione e riscaldi l'intero accumulo termico, anche quando non necessario, si è operato programmando una regola, attivabile da parte dell'utente, secondo la quale la pompa di calore non entra in funzione in modalità di produzione di acqua calda sanitaria in un intervallo selezionabile, ad esempio dalle ore 5 alle ore 10 del mattino. Questo consente che l'energia termica presente nell'accumulo, grazie all'apporto di energia del sistema solare termico, venga utilizzata completamente anche nel caso di richiesta di acqua calda nelle prime ore del mattino. In caso di poca radiazione solare, e quindi uno scarso contributo da parte del sistema solare termico, alla fine dell'intervallo temporale impostato, la pompa di calore si attiva regolarmente per la produzione di acqua calda sanitaria.

2.2.5 Controlli per illuminazione naturale ed artificiale e radiazione solare

Le schermature solari esterne mobili sono azionate ciascuna da un motore controllato dal sistema Konnex, il quale determina la posizione verticale delle schermature solari e l'angolo di rotazione delle lamelle.

È stato previsto di memorizzare nel sistema di monitoraggio la posizione verticale e l'angolo di inclinazione delle lamelle. Anche per le zanzariere, che pure sono azionate meccanicamente, si vuole monitorare la posizione verticale, per monitorarne l'utilizzo

È anche installato un sensore di presenza e di illuminamento, collocato in posizione centrale sul soffitto del locale principale della zona giorno.

Gli apparecchi illuminanti installati nell'abitazione e nel giardino montano sorgenti luminose del tipo LED, con elevata efficienza luminosa ed energetica, per cui di potenza elettrica ridotta. Per queste caratteristiche e per aspetti legati ai costi, in fase di progetto si è deciso di scegliere apparecchi illuminanti senza la componentistica integrata per permettere il dimmerraggio delle sorgenti luminose. Non è stato quindi possibile implementare un controllo sull'intensità luminosa delle sorgenti.

Per il controllo delle schermature solari esterne (posizione verticale e angolo di inclinazione delle lamelle) e dell'illuminazione degli ambienti sono state sviluppate le logiche descritte di seguito.

2.2.5.1 Controllo manuale con pulsante per le schermature solari

La posizione delle schermature solari e l'inclinazione delle lamelle viene comandata manualmente attraverso la pressione del relativo pulsante in ambiente, secondo una sequenza impostata. La schermatura solare di ciascuna finestra può essere controllato separatamente.

2.2.5.2 Controllo con programmazione a tempo e scenari (Schedule) per le schermature solari

Controllo delle schermature solari con schedule contenenti i valori (0-100 %) che definiscono la posizione verticale e l'inclinazione delle lamelle. E' possibile definire una programma temporale (*schedule*) per ogni finestra/portafinestra dotate di schermature solari.

La schedule relativa a ciascuna finestra deve contenere i valori di:

- Posizione verticale

- Angolo di inclinazione delle lamelle con la frequenza corrispondente all'istante temporale minimo impostato (ad esempio 1 minuto).

È possibile impostare i valori della schedule secondo le seguenti modalità:

- Acquisizione di valori da file di testo editabili
- Interfaccia informatica semplificate accessibile dal sistema dall'utente.

Il controllo manuale attraverso pulsante ha la priorità sui valori delle schedule: la schermatura si posiziona come da valori nella schedule, fino a quando l'utente non cambia la posizione della schermatura premendo il pulsante, la schermatura allora si posiziona come richiesto manualmente dall'utente. Dopo un periodo di tempo impostabile (ad esempio 15 minuti) dall'ultima pressione sul pulsante da parte dell'utente, la schermatura riprende la posizione e inclinazione secondo schedule.

2.2.5.3 Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo e radiazione solare

Si tratta di una logica di controllo analoga a quella appena descritta con l'aggiunta di valori limite (impostabili) per l'attivazione delle schermature solari, per le seguenti grandezze:

- Illuminamento esterno sul piano orizzontale
 - o in alternativa selezionabile
- radiazione solare globale sul piano orizzontale
 - o in alternativa selezionabile
- radiazione solare globale sul piano della facciata in cui è inserita la finestra.

Se il valore di radiazione solare selezionato supera il valore di set-point allora la schermatura solare si posiziona come da valori di schedule ($I_{out,input} > I_{out,SP,H}$).

Invece se il valore di radiazione solare selezionato NON supera il valore di set-point indipendentemente dal valore della schedule per la finestra considerata, la schermatura solare rimane disattivata in posizione raccolta (vetro NON schermato).

Il set-point di radiazione solare (o illuminamento esterno) deve essere impostabile con valore diverso rispettivamente nei periodi di riscaldamento, raffrescamento e intermedi.

Anche in questo caso, il controllo manuale da pulsante ha la priorità sui valori della schedule e anche sul controllo in funzione della radiazione solare.

Come nel paragrafo precedente, dopo un periodo di tempo impostabile (ad es. 15 minuti) dall'ultima pressione sul pulsante da parte dell'utente, la schermatura riprende la posizione e inclinazione secondo la regola di controllo selezionata per il periodo in corso.

2.2.5.4 Controllo delle schermature solari con programmazione a tempo, radiazione solare e temperatura interna della stanza

Questo controllo prevede le stesse caratteristiche di quello appena descritto, tuttavia l'attivazione delle schermature solari è regolata anche in funzione del valore della temperatura dell'aria interna nella stanza della schermatura considerata (T_{ind}) rispetto a un valore limite impostabile per periodo di riscaldamento (*heating* - H) raffrescamento e (*cooling* - C) (rispettivamente " $T_{ind,SP,H} + \Delta T_{shad,H}$ " e " $T_{ind,SP,C} - \Delta T_{shad,C}$ ").

In periodo di riscaldamento, in ciascuna stanza per le schermature solari della finestra della stanza stessa:

- SE $T_{ind} < T_{ind.SP.H} + \Delta T_{shad.H}$ E $I_{out.input} > I_{out.SP.H}$ (ad es. Radiazione solare esterna > valore limite di Radiazione solare esterna), allora l'attuatore ALZA completamente la schermatura solare della finestra della stanza considerata.
- SE $T_{ind} > T_{ind.H.MAX}$ E $I_{out.input} > I_{out.SP.H}$ (ad es. Radiazione solare esterna > valore limite di Radiazione solare esterna), allora l'attuatore ABBASSA completamente la schermatura solare della finestra della stanza considerata e ruota le lamelle della schermatura all'angolo desiderato, che in alternativa deve poter essere impostato come:
 - 45°
 - Angolo con schedule
 - Angolo calcolato da formula per la protezione dalla radiazione solare diretta [14].

Ad esempio $T_{ind.H.MAX}$ potrebbe essere uguale a 27 °C, per evitare surriscaldamento invernale.

Questa logica di controllo ha lo scopo di permettere lo sfruttamento degli apporti solari gratuiti in periodo di riscaldamento, evitando un eventuale surriscaldamento eccessivo degli ambienti interni.

In periodo di raffrescamento, in ciascuna stanza per le schermature solari della finestra della stanza stessa:

- SE $T_{ind} > T_{ind.SP.C} - \Delta T_{shad.C}$ E $I_{out.input} > I_{out.SP.C}$ (Radiazione solare esterna > Set-point di Radiazione solare esterna), allora l'attuatore ABBASSA completamente la schermatura solare della finestra della stanza considerata e ruota le lamelle della schermatura all'angolo desiderato, che in alternativa deve poter essere impostato come:
 - 45°
 - Angolo con schedule
 - Angolo calcolato da formula per la protezione dalla radiazione solare diretta [14].

2.2.5.5 *Controllo delle schermature solari in funzione di radiazione solare su piano della finestra e temperatura interna della stanza*

Questo tipo di controllo è simile a quello descritto nel paragrafo 2.2.5.4, ma il controllo è esclusivamente in funzione di:

- radiazione solare sul piano della finestra considerata e
- temperatura dell'aria nella stanza considerata.

Il presente controllo seguirà la logica seguente: SE la radiazione incidente supera un valore impostato E la temperatura dell'aria interna supera un valore impostato, ALLORA l'attuatore abbassa le schermature solari esterne e posizionale con una angolo di inclinazione impostato.

Anche in questo caso esistono logiche differenziate per riscaldamento e raffrescamento.

In periodo di riscaldamento, in ciascuna stanza per le schermature solari della finestra della stanza stessa:

- SE $T_{ind} < T_{ind.SP.H} + \Delta T_{shad.H}$ E $I_{out.input} > I_{out.SP.H}$ (ad es. Radiazione solare esterna > Set-point di Radiazione solare esterna), allora ALZA completamente la schermatura solare delle finestre della stanza considerata.

In periodo di raffrescamento, in ciascuna stanza per le schermature solari della finestra della stanza stessa

- SE $T_{ind} > T_{ind.SP.C} - \Delta T_{shad.C}$ E $I_{out.input} > I_{out.SP.C}$ (ad es. Radiazione solare esterna > Set-point di Radiazione solare esterna), allora ABBASSA completamente la schermatura solare della finestra della stanza considerata e ruota le lamelle della schermatura all'angolo desiderato, che in alternativa deve poter essere impostato come:
 - 45°
 - Angolo con schedule
 - Angolo calcolato da formula per la protezione dalla radiazione solare diretta [14].

2.2.5.6 Schermature solari in modalità notturna in periodo di riscaldamento

Questa logica di controllo consente di trarre vantaggio dalla resistenza termica aggiuntiva dovuta alle schermature solari davanti alle finestre, sarà attiva solamente in periodo di riscaldamento e nelle ore notturne, in ciascuna stanza, secondo questa impostazione: SE $T_{ind} < T_{ind.SP.H} + \Delta T_{shad.H}$ E $T_{out.input} < T_{out.SP.H}$, allora l'attuatore ABBASSA completamente la schermatura solare delle finestre della stanza considerata.

Per stabilire se si è in periodo notturno, deve essere possibile selezionare e impostare uno dei seguenti metodi:

- schedule oraria (per mezzo di file di testo e/o maschere semplificate per l'impostazione)
 - o in alternativa
- valore limite di illuminamento esterno
 - o in alternativa
- valore limite di radiazione solare sul piano orizzontale.

2.2.5.7 Controllo dell'illuminazione artificiale

Come anticipato gli apparecchi illuminanti installati nell'abitazione e nel giardino sono caratterizzati da sorgenti luminose LED che non includono componentistica integrata per la modulazione del flusso luminoso. I controlli disponibili sono pertanto:

- Accensione / spegnimento manuale per mezzo di pulsanti
- Accensione / spegnimento in funzione di sensore di presenza, con la logica seguente:
SE dopo un periodo di lunghezza impostabile (ad esempio. 15 minuti) dall'accensione della sorgente luminosa, il sensore di presenza della stanza non rileva nessuna presenza, ALLORA l'attuatore spegne le sorgenti luminose della stanza.

Le luci esterne possono essere programmate secondo le seguenti modalità:

- in funzione di schedule
- in funzione di valori limite di illuminamento esterno
- in funzione di valori limite di radiazione solare sul piano orizzontale.

2.2.6 Notifiche e messaggi per l'utente

Il sistema di controllo e monitoraggio prevede la possibilità di impostare regole per l'invio automatico di messaggi agli utenti del sistema e agli occupanti dell'edificio, con le seguenti modalità (selezionabili nel sistema) per esprimere il messaggio:

- messaggio per utenti, a video e registrato in un elenco di messaggi / allarmi

- segnale sonoro di accompagnamento
- messaggio per amministratori, a video e registrato in un elenco di messaggi / allarmi
- invio di messaggio di posta elettronica e/o di sms a utente.

Oltre alle notifiche relative al sistema antiintrusione nell'edificio, sono stati impostati anche i messaggi relativi ai consigli per l'utente sull'apertura / chiusura delle finestre a l'attivazione della ventilazione meccanica, in funzione dei valori di temperatura esterna ed interna.

In Figura 23 è presentata, come esempio, una schermata dell'interfaccia grafica del sistema Konnex con indicati alcuni messaggi di notifica per l'utente.

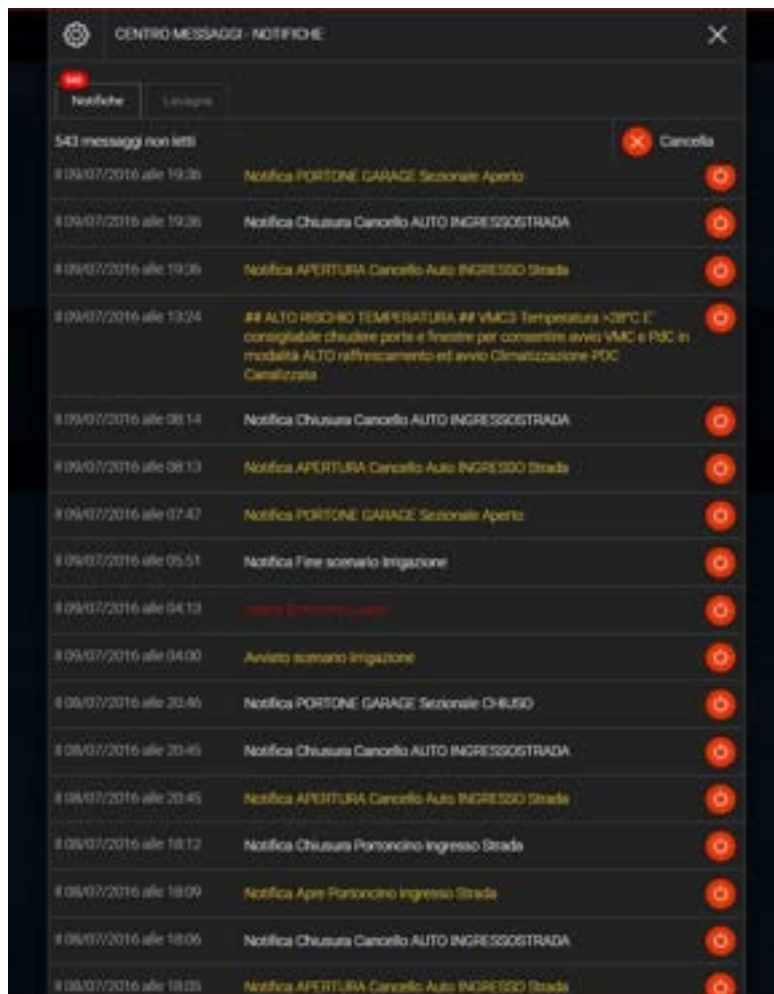


Figura 23. Esempio di schermata di notifiche per l'utente.

2.3 *Analisi e fine tuning del sistema di monitoraggio energetico ed ambientale*

2.3.1 *Verifica del corretto funzionamento e della stabilità del sistema di acquisizione dati*

I dati acquisiti nel periodo compreso tra gennaio 2016 e maggio 2016, successivo alla fase di revisione e completamento del sistema di monitoraggio, sono stati utilizzati per riscontrare gli effetti degli interventi sulla stabilità del sistema e il comportamento del primo set di logiche di controllo implementate sul sistema Konnex (le logiche scritte per il sistema BACnet non sono ancora state implementate sul sistema informatico).

In particolare, per contrastare i problemi di blocco di componenti nell'acquisizione dati sono state svolte le seguenti attività:

- Sostituzione dei componenti danneggiati
- Installazione dei componenti mancanti
- Aggiornamento del firmware dei misuratori di energia elettrica
- Installazione di una seconda unità centrale per il sistema Konnex al fine di gestire meglio il consistente flusso di dati, in attesa della completa implementazione del sistema BACnet
- Predisposizione per lo spostamento di alcune funzioni di monitoraggio e controllo dal sistema Konnex al sistema BACnet, per ridurre l'eccessivo flusso di dati, origine dei blocchi del sistema Konnex (in particolare, sono stati selezionati ed installati i componenti di interfaccia Konnex-BACnet e l'attività di implementazione informatica delle logiche di controllo sul sistema BACnet è in fase di completamento).

Il sistema di monitoraggio appare, a seguito degli interventi, chiaramente più stabile, ed il numero di intervalli in cui si riscontra un'assenza di memorizzazione dati è nettamente minore, seppur qualche piccolo problema continua a persistere. Questo ha confermato l'utilità di proseguire, nelle fasi future, a completare l'implementazione del sistema di supervisione BACnet a completamento del sistema Konnex, per sgravare questo totalmente dal compito di memorizzazione dati ed evitare quindi completamente intervalli temporali in cui manchino dati importanti per l'analisi.

Come esempio si riportano in Figura 24 e Figura 25 rispettivamente i grafici delle temperatura e le umidità relativa dell'aria degli ambienti interni per il mese di marzo 2013, nei quali vediamo un solo intervallo di dati mancanti, indicato con freccia rossa, di durata di 2 ore in data 27 marzo a partire dalla una di notte. Il confronto fra i grafici in Figura 12 e Figura 13 e quelli in Figura 24 e Figura 25 mostra il miglioramento nella stabilità per la memorizzazione dei dati nel secondo periodo di monitoraggio.

Dopo l'aggiornamento dei loro firmware, i misuratori di energia elettrica e la loro comunicazione verso il bus Konnex si sono dimostrati più stabili sia per i singoli utilizzatori (ad esempio per la pompa di calore) sia per le misure globali di domanda e produzione di energia elettrica. Nel secondo periodo, il misuratore collegato al sistema fotovoltaico non ha più mostrato il blocco nell'esportazione dei dati riscontrato nel primo periodo. I dati energetici raccolti nel secondo periodo sono stati direttamente utilizzati per l'analisi preliminare descritta nei successivi paragrafi.

Il primo set di logiche di controllo implementato sul sistema Konnex ha mostrato un comportamento soddisfacente portando effetti utili agli utenti dell'edificio. Le prime regole programmate per l'attivazione delle schermature solari sono state utili ad assistere l'utente nell'utilizzare questi componenti. Gli occupanti dell'edificio si sono inoltre detti soddisfatti dei messaggi con consigli per l'apertura o la chiusura delle finestre in funzione della temperatura dell'aria interna ed esterna. Si è dimostrata infine utile ad affidabile anche la logica di controllo per lo spegnimento della ventilazione meccanica in funzione dell'apertura delle finestre.

La logica di controllo per lo sfruttamento dell'accumulo termico per acqua sanitaria, ha tuttavia mostrato un problema. Si sono riscontrati dei buchi nella memorizzazione dati del misuratore elettrico collegato alla pompa di calore, ogni qual volta la logica di controllo si attiva. In particolare quando viene tolta l'alimentazione elettrica alla pompa di calore secondo la logica implementata, anche il modulo Konnex per l'esportazione dei dati misurati non riceve più alimentazione e si interrompe l'esportazione dati, che riprende non appena il sistema di produzione di energia si riattiva.

L'anomalia si riscontra nel periodo compreso dalle ore 5 alle 10 del mattino, come visibile nel grafico in Figura 26. Si sta ora verificando la possibilità di spostare il misuratore di energia elettrica e la posizione migliore per esso, controllando che le sue funzioni di esportazione dei dati non interferiscano con l'attuatore Konnex che regola l'alimentazione elettrica alla pompa di calore.

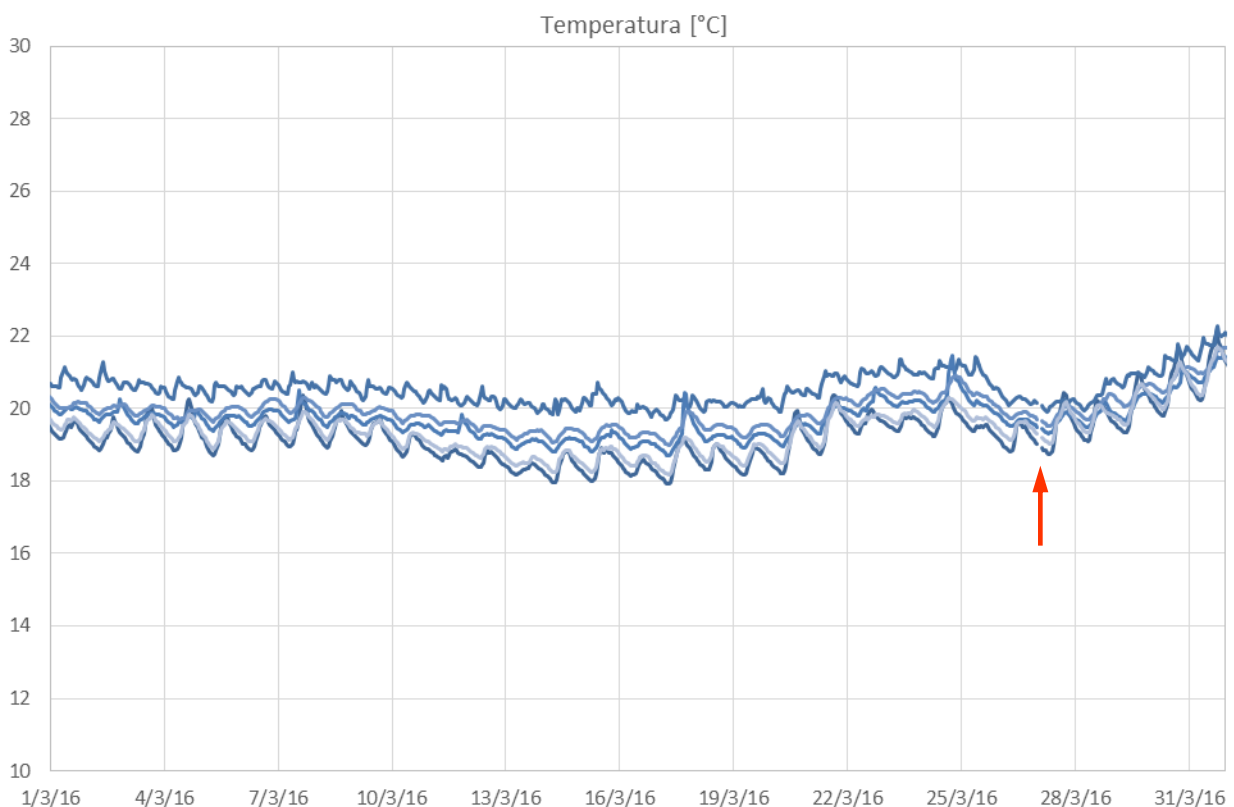


Figura 24. Temperatura dell'aria degli ambienti interni nel mese di marzo 2016, con indicato (freccia rossa) un intervallo di tempo in cui le misure non sono state memorizzate dal sistema di monitoraggio.

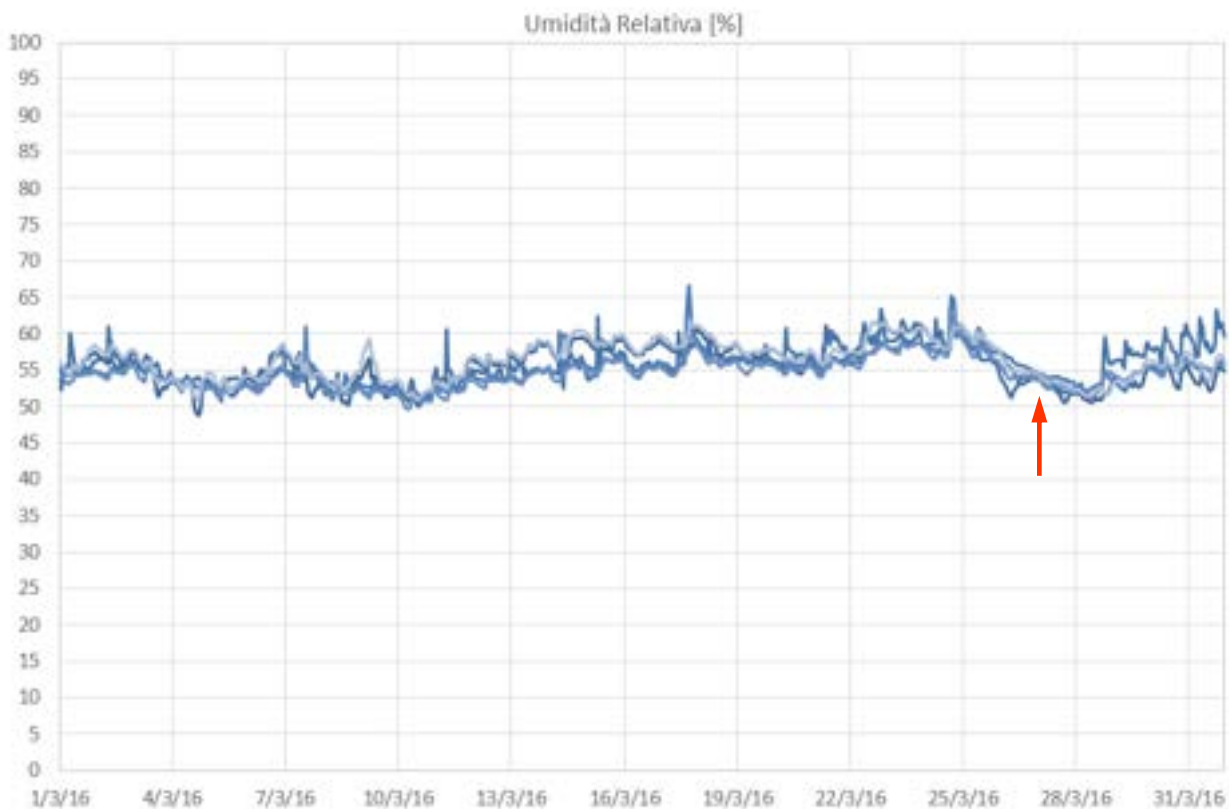


Figura 25. Umidità relativa dell'aria degli ambienti interni nel mese di marzo 2016, con indicato (freccia rossa) un intervallo di tempo in cui le misure non sono state memorizzate dal sistema di monitoraggio.

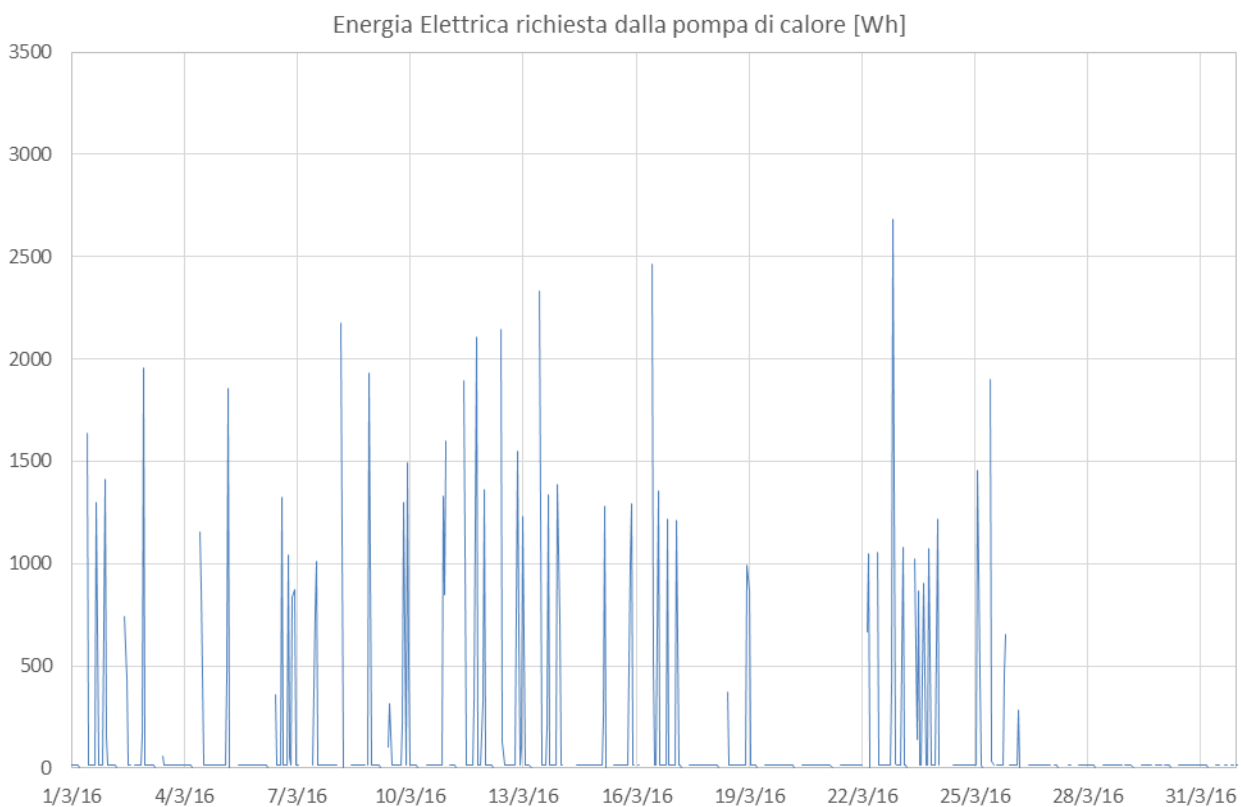


Figura 26. Domanda di energia elettrica per pompa di calore nel mese di marzo 2016 (con mancanze di esportazione e memorizzazione dalle ore 5 alle 10 del mattino di alcuni giorni)

2.3.2 Analisi preliminare delle prestazioni energetiche ed ambientali

Oltre alle analisi svolte sul sistema di controllo e monitoraggio e sui dati monitorati allo scopo di ottimizzare la sua messa in esercizio, si sono svolte anche prime analisi per studiare le prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio. Si presentano i risultati preliminari nei successivi paragrafi.

Nei periodi con clima esterno caldo, l'edificio mostra un buon comportamento con impianto di raffrescamento spento (regime di *free-running*) e con l'utilizzo prevalente della ventilazione naturale; gli occupanti dell'edificio tendono infatti a preferire questa modalità di uso, che risulta inoltre essere particolarmente vantaggiosa dal punto di vista energetico.

Il comportamento dell'edificio in clima caldo è stato riprodotto in questa relazione attraverso i dati raccolti in un periodo rappresentativo del mese di settembre 2015. Un comportamento analogo in *free-running* è stato riscontrato anche nei mesi di giugno e luglio 2016, i cui dati ambientali sono tuttavia pervenuti solo a fine agosto 2016, per cui non è stato possibile elaborarli e riportarli nel dettaglio in questa relazione. I dati energetici dell'intero periodo settembre 2015 - luglio 2016 sono stati tuttavia raccolti, analizzati e sintetizzati alla fine di questo report.

In Figura 27 è rappresentato un periodo nel quale la temperatura dell'aria esterna ha raggiunto valori sopra 32 °C, con picchi fino a 36 °C. Senza l'attivazione della pompa di calore per il raffrescamento attivo e con l'uso quasi esclusivo della ventilazione naturale nel periodo rappresentato, la temperatura dell'aria interna assume valori tra i 24 e i 27 °C, con poche ore intorno ai 28 °C. Il grafico può rappresentare un esempio del comportamento termico dell'edificio in un periodo estivo in cui si alternano serie di giorni con temperature esterne maggiori di 30 °C e giorni con temperature più moderate. In queste condizioni si vede come l'edificio presenti un livello di inerzia termica in grado di mantenere sufficientemente stabile il valore di temperatura interna e vicino a valori ottimali. Questo è dovuto sia all'accumulo di calore nella massa termica efficace dei componenti costruttivi che delimitano gli ambienti interni, sia al controllo degli apporti solari termici (tramite isolamento termico dell'involucro e schermature solare). Nel periodo considerato (dal 4 al 21 settembre 2015), per la maggior parte delle ore di occupazione, gli abitanti dell'edificio hanno preferito fare uso della ventilazione naturale tramite apertura delle finestre. Il comportamento energetico dell'edificio potrebbe, quindi, essere ulteriormente ottimizzato, evitando l'apertura delle finestre nelle ore in cui l'edificio non è occupato e in quelle in cui la temperatura dell'aria esterna non è favorevole al raffrescamento dell'edificio. Le logiche di controllo che verranno a breve implementate sul sistema BACnet sono pensate per agire in questa direzione.

Si completa il quadro per lo stesso periodo (4 - 21 settembre 2015) con le misure di umidità relativa e concentrazione di CO₂ rappresentate in Figura 28 e Figura 29. I valori rimangono in intervalli adeguati senza picchi rilevanti.

La Figura 30 mostra i valori di energia elettrica richiesta per la totalità degli usi energetici, l'energia elettrica prodotta dal sistema fotovoltaico installato sulla copertura dell'edificio e la quota di energia elettrica scambiata, prelevata (segno positivo) o immessa (segno negativo) nella rete elettrica. Notiamo complessivamente che la quantità di energia richiesta per tutti gli usi è minore di quella prodotta dal sistema fotovoltaico. In un confronto ora per ora si nota che questo avviene nelle ore diurne, con forte irraggiamento solare, per la maggior parte delle quali si esporta energia elettrica verso la rete. Mentre nelle ore di assenza di radiazione solare viene prelevata energia dalla rete per coprire la richiesta dell'edificio.

Questo comportamento viene anche descritto dagli indicatori di interazione con la rete, che sono stati elaborati partendo dai dati misurati. Gli indici sono definiti come segue, secondo [11], dove in particolare abbiamo l'indice di Load Match (indicato con $f_{load,i}$) e l'indice di Grid Interaction ($f_{grid,i}$):

$$f_{load,i} = \min \left[1, \frac{\text{produzione di energia in situ}}{\text{domanda di energia}} \right] \cdot 100 \quad [\%],$$

$$f_{grid,i} = \frac{\text{energia netta scambiata con la rete}}{\max|\text{energia netta scambiata con la rete}|} \cdot 100 \quad [\%],$$

con i intervallo temporale considerato (mese, giorno, ora, minuto, etc.).

L'indice di Load Match rappresenta la quota parte di domanda di energia coperta da fonti rinnovabili in situ, considerando come massimo una copertura del 100%. Nel nostro caso confrontiamo domanda e produzione di energia con lo stesso vettore che corrisponde all'energia elettrica, essendo l'edificio completamente elettrico.

In particolare dall'analisi dei dati, l'indice di Load Match calcolato su base oraria (Figura 31) assume valore pari al 100% nelle ore centrali della giornata con radiazione solare più alta, assume valore pari a 0% nelle ore in assenza di radiazione solare e valori intermedi nelle ore con radiazione solare ridotta o con cielo coperto. Passando al calcolo dell'indice di Load Match su base giornaliera (Figura 32) si nota come assuma valori del 100% nella maggior parte delle giornate del periodo considerato, ad eccezione di 3 giornate con condizioni di cielo coperto, durante le quali il contributo da parte delle fonti rinnovabili assume percentuali comprese fra il 30 e il 75 % della domanda energetica dell'edificio.

Considerazioni analoghe possono essere tratte dai valori dell'indice di Grid Interaction, riportati in Figura 33 e Figura 34. L'indice calcolato su base oraria assume un andamento che si ripete nei diversi giorni in modo abbastanza costante. Fanno eccezione i giorni con ridotta radiazione solare, in particolare 8, 9 e 10 settembre 2015 in Figura 33. In particolare l'interazione con la rete raggiunge i picchi massimi in fase di esportazione di energia elettrica prodotta con il sistema fotovoltaico. Durante le ore notturne o con bassi valori di irraggiamento solare, l'indice assume valori più contenuti e regolari.

Per rendere più regolare l'interazione con la rete si sono programmate analisi di dettaglio della domanda di energia per i principali usi e apparecchiature elettriche presenti nell'edificio, con l'obiettivo di dare indicazioni di uso ottimizzato di queste. L'obiettivo deve essere quello di massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta in situ da fonti rinnovabili e quindi di raggiungere valori dell'indice di Load Match mediamente più elevati anche nei giorni e nelle ore con ridotta radiazione solare. L'effetto finale si potrebbe riscontrare in uno scambio con la rete più costante (quindi prevedibile) e con minori picchi.

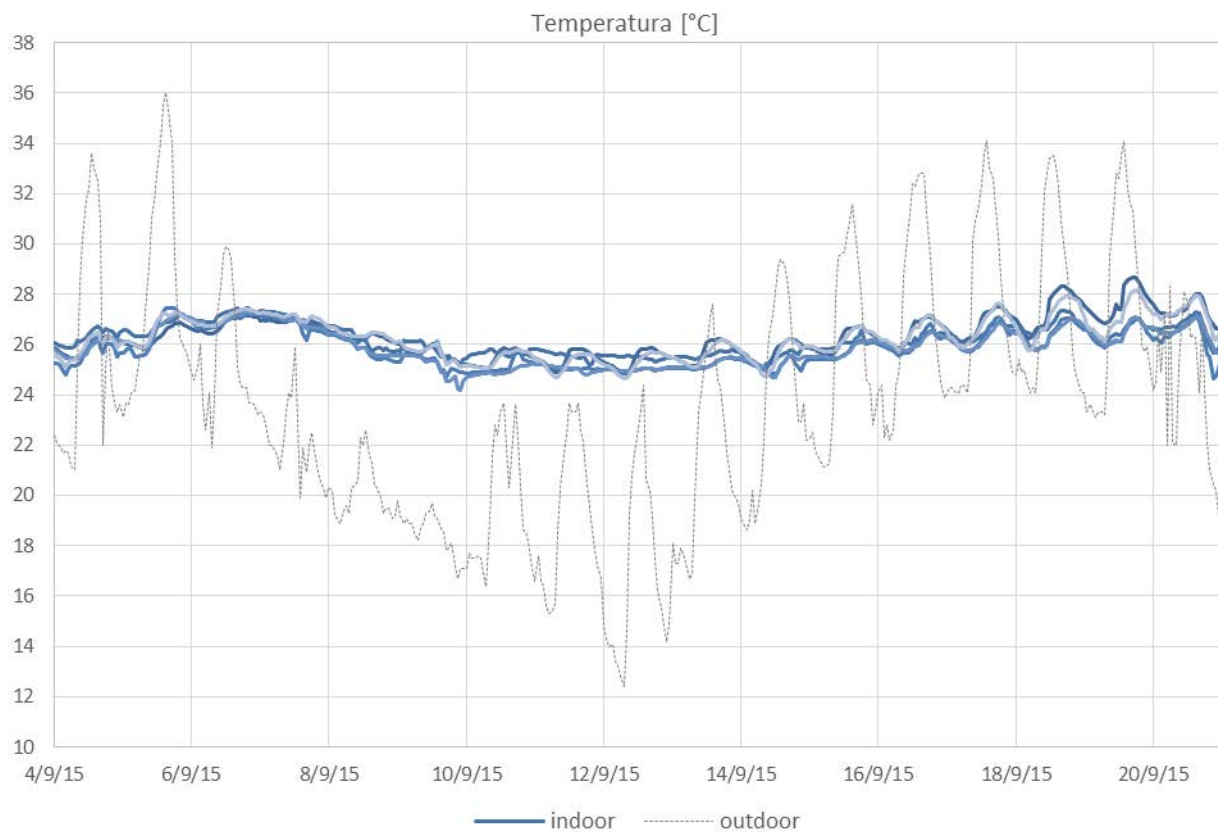


Figura 27. Temperatura dell'aria interna ed esterna, in periodo caldo (con edificio in *free-running*: impianto di raffrescamento spento).

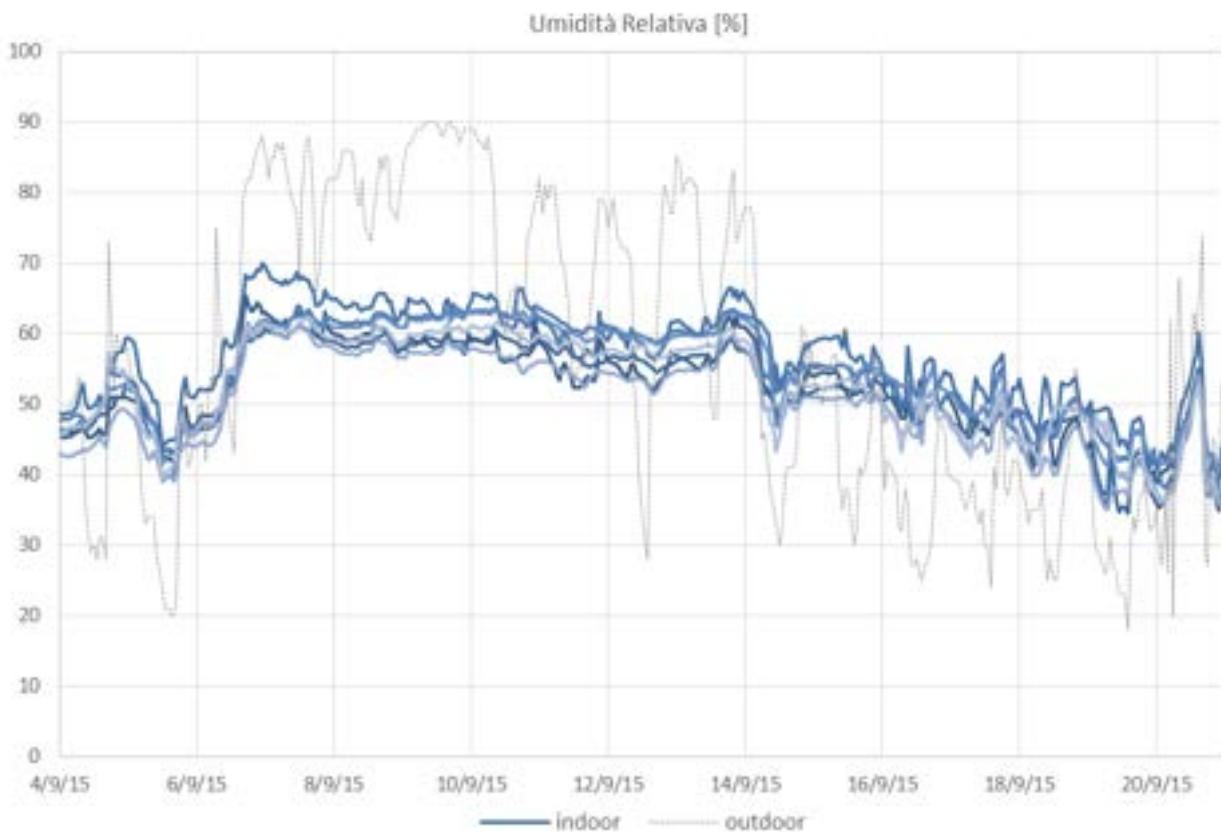


Figura 28. Umidità relativa dell'aria interna ed esterna, in periodo caldo (con edificio in *free-running*: impianto di raffrescamento spento).

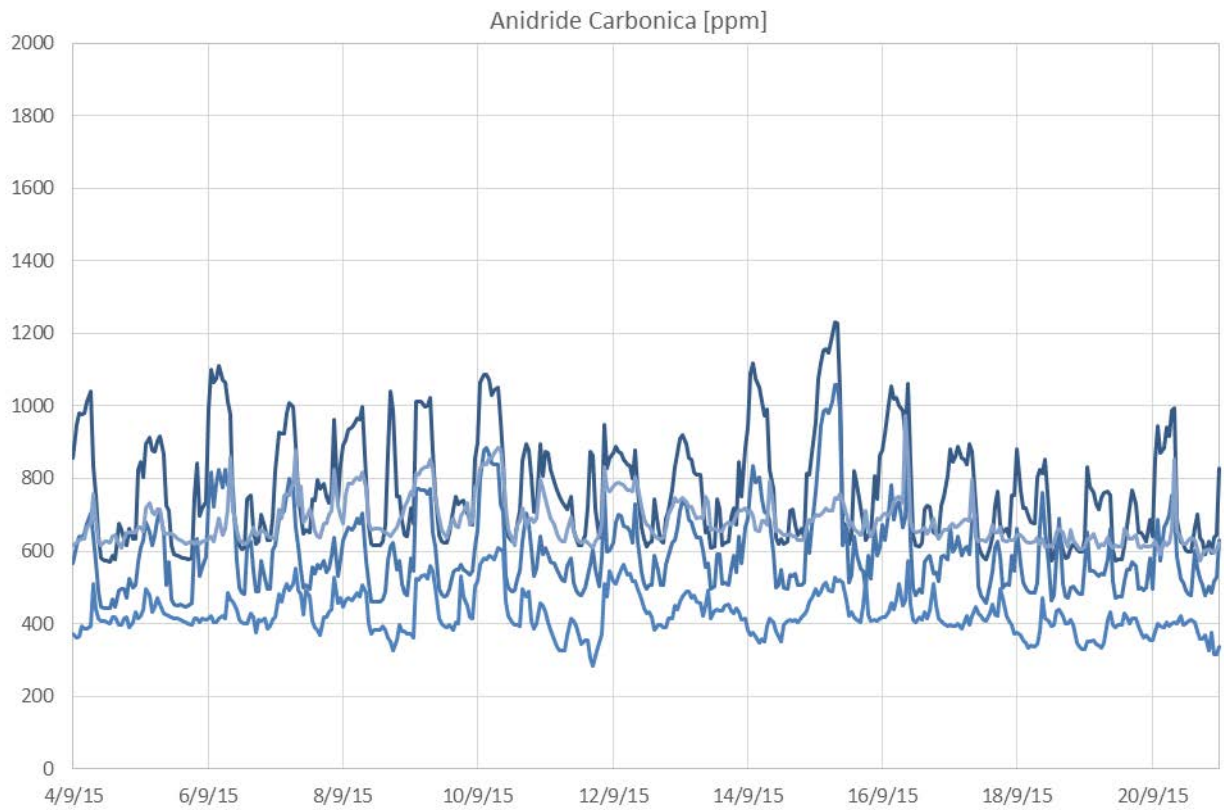


Figura 29. Concentrazione di CO₂ dell'aria interna, in periodo caldo (con edificio in free-running: impianto di raffreddamento spento e ventilazione naturale prevalente).

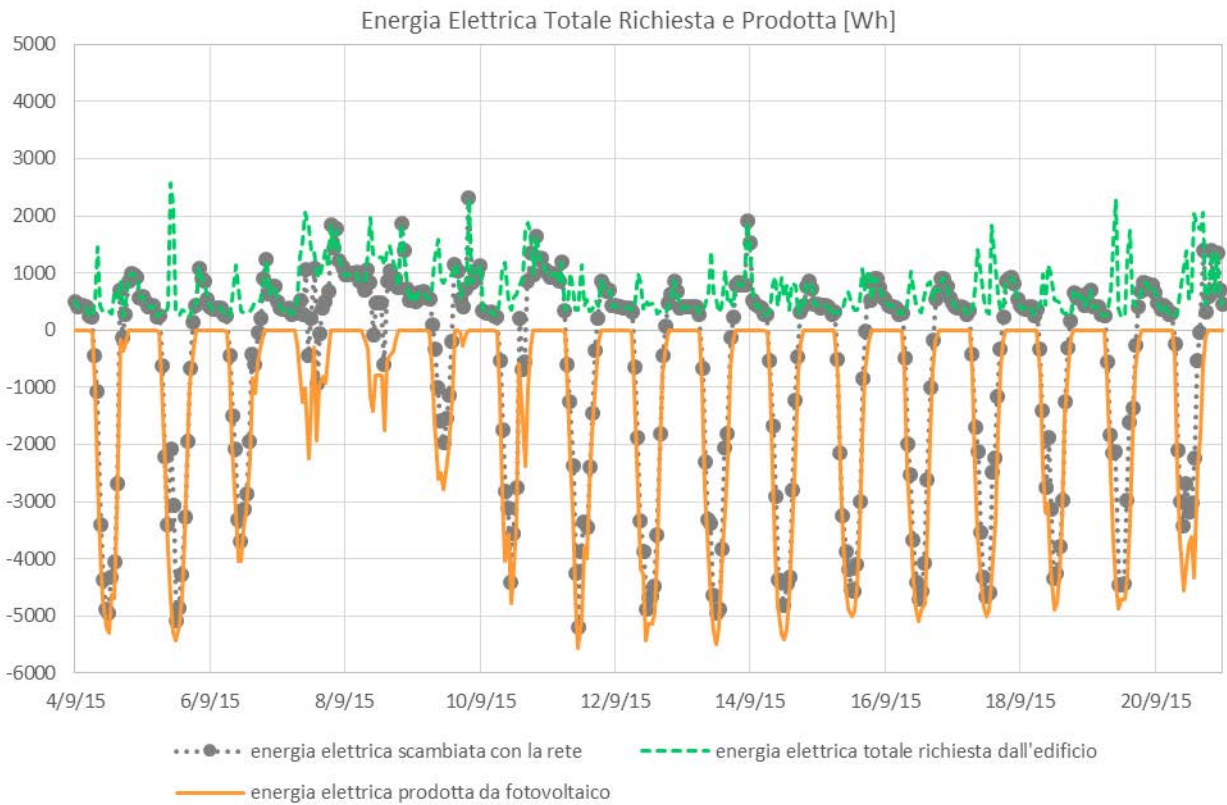


Figura 30. Energia elettrica richiesta, prodotta e scambiata con la rete in periodo caldo (settembre).

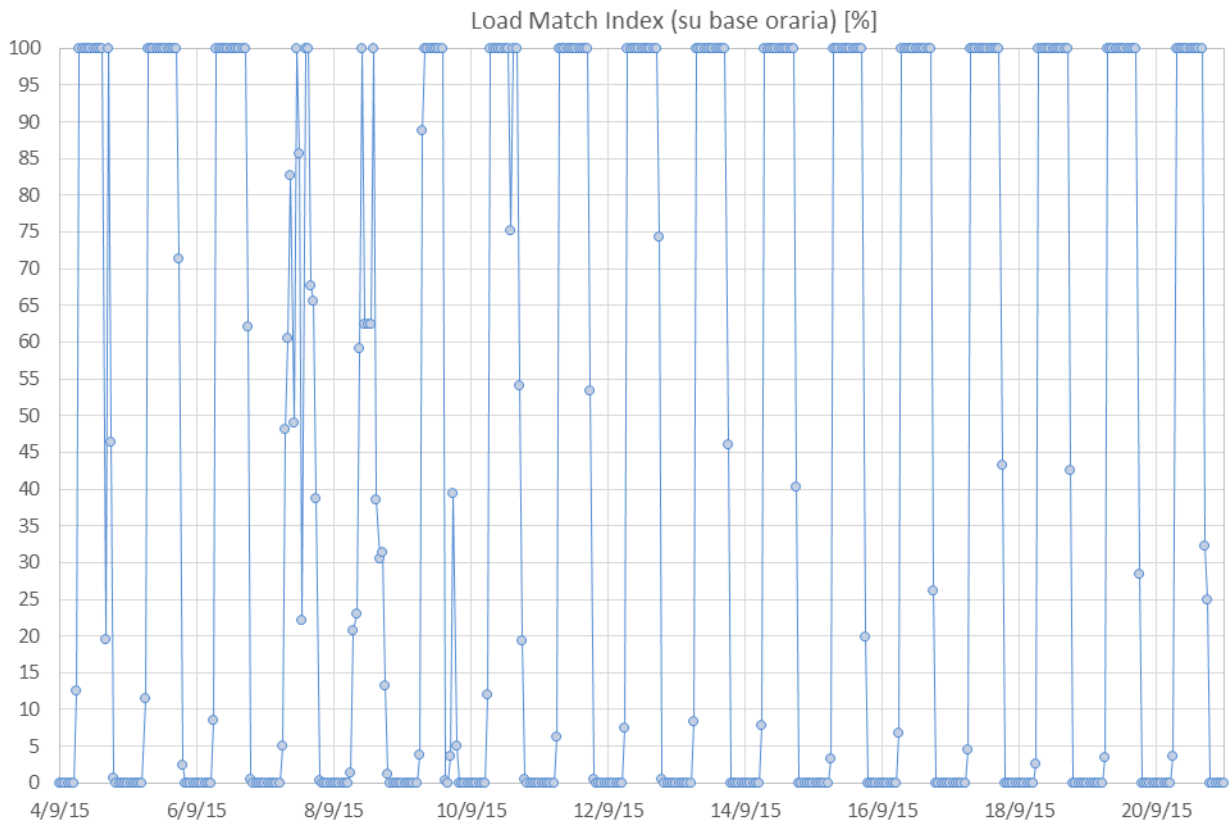


Figura 31. Indice di load match calcolato su base oraria i periodo caldo (settembre)

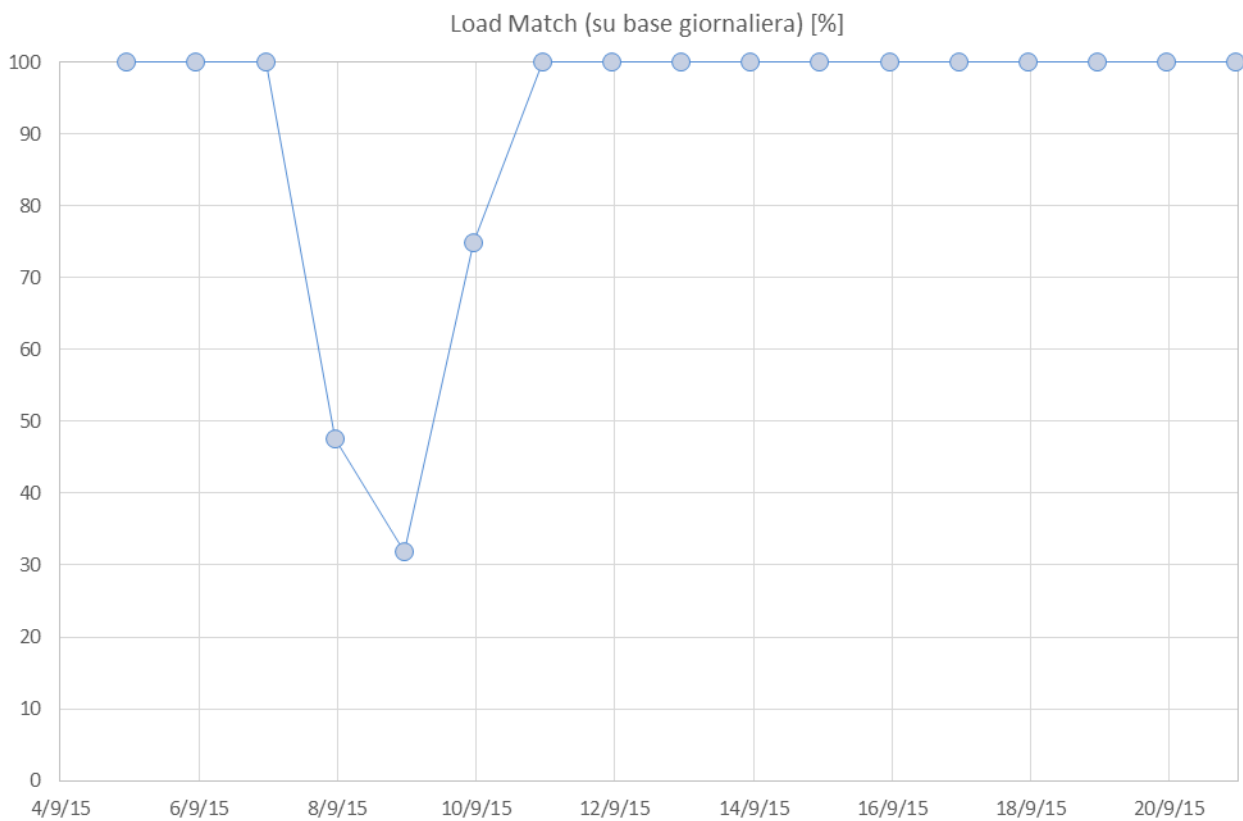


Figura 32. Indice di load match calcolato su base giornaliera in periodo caldo (settembre)

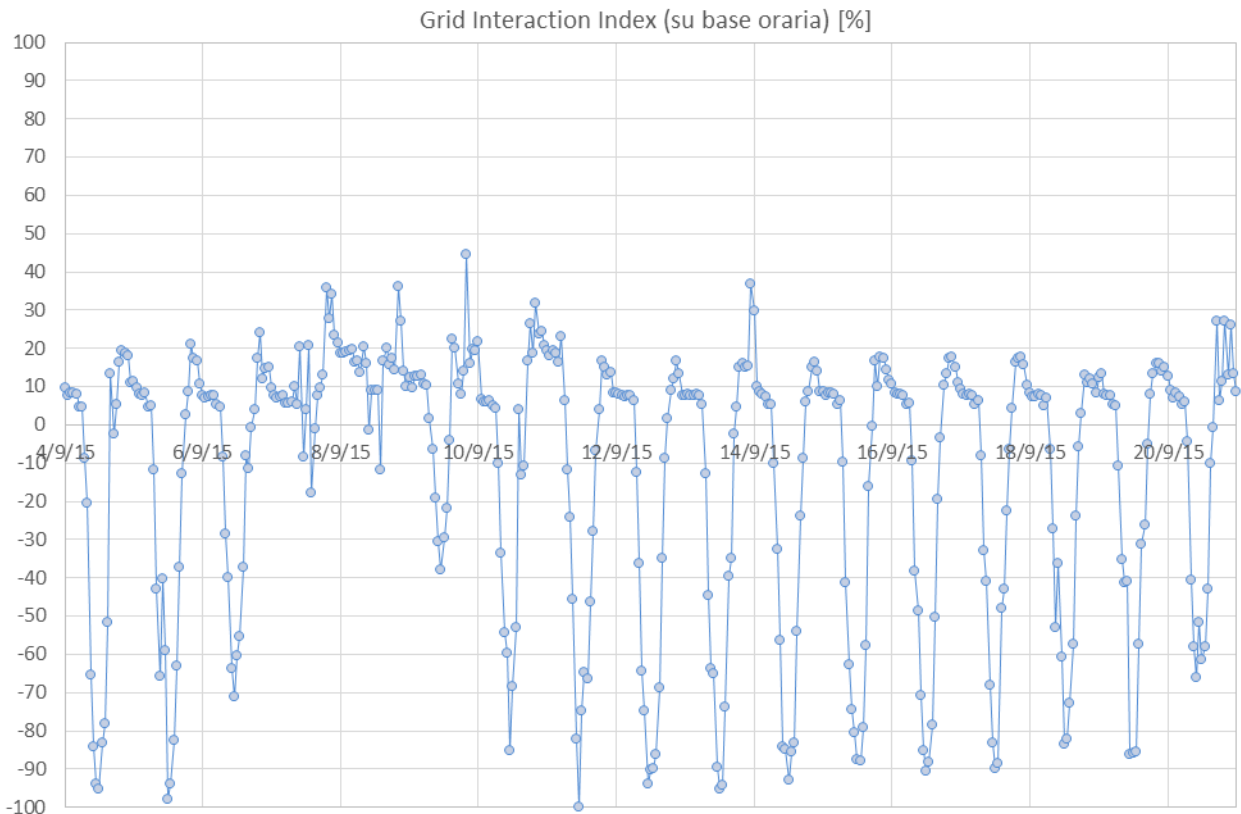


Figura 33. Indice di grid interaction calcolato su base oraria in periodo caldo – settembre (i valori negativi indicano l’esportazione dall’edificio alla rete, i valori positivi un flusso dalla rete verso l’edificio).

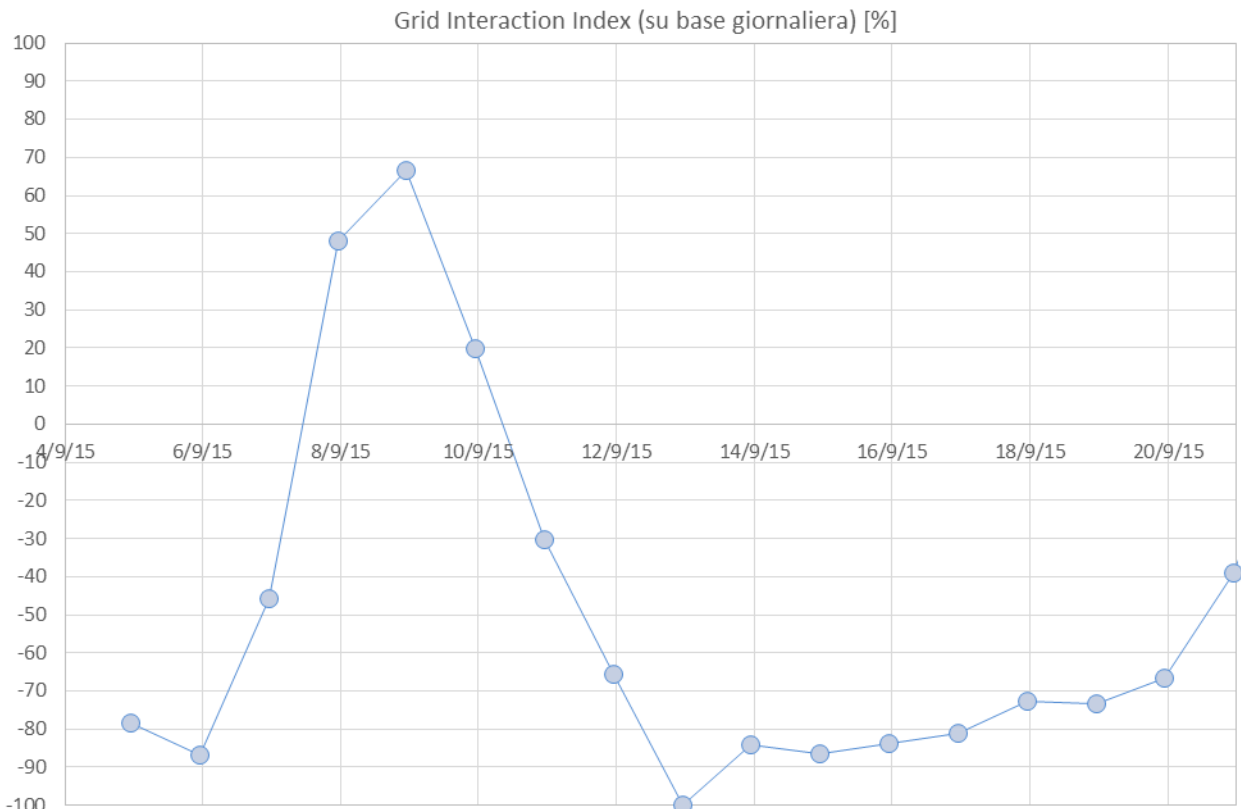


Figura 34. Indice di grid interaction calcolato su base giornaliera in periodo caldo (settembre)

Anche le analisi condotte sul periodo di riscaldamento mostrano il buon comportamento dell'edificio, con valori adeguati delle variabili ambientali e un bilancio equilibrato fra l'energia consumata ed energia prodotta in situ.

La Figura 35 mostra l'andamento della temperatura dell'aria interna in diversi ambienti in un periodo invernale con temperature esterne basse, con valori minimi inferiori a 0 °C. Si nota come le temperature degli ambienti interni rimangano comprese fra 18 e 22 °C.

Anche i valori di umidità relativa degli ambienti interni non fanno registrare picchi al di fuori dei limiti indicati dagli standard di riferimento, come si può notare in Figura 36. I valori di CO₂ presentano invece dei picchi leggermente al di sopra dei valori massimi indicati dagli standard, ovvero 700 ppm al di sopra del valore di concentrazione esterna, che nel caso specifico corrispondono ad un limite di circa 1100 ppm, come riportato in Figura 37. Questo sta ad indicare che in alcuni locali la ventilazione dovrebbe essere regolata con maggiore dettaglio. Si considererà questo aspetto nei prossimi affinamenti che verranno implementati.

Si riportano anche gli andamenti delle grandezze energetiche complessive (in Figura 38) e degli indici di interazione con la rete (in Figura 39, Figura 40, Figura 41, Figura 42).

Si possono notare andamenti simili a quelli riscontrati nel periodo estivo, tuttavia con una produzione inferiore da parte del sistema fotovoltaico, dovuta alla minor radiazione solare incidente nel periodo invernale. Si può inoltre notare come l'indice di Grid Interaction abbia un andamento più regolare con picchi di intensità inferiore e che i picchi di prelievo e di esportazione in rete siano più bilanciati.

Nell'intero periodo oggetto di analisi, compreso tra il 4 settembre 2015 e il 31 luglio 2016, si è misurata una domanda di energia elettrica che copre la totalità degli usi energetici, riguardanti sia le parti climatizzate dell'edificio sia tutte le parti accessorie, pari a 5 921,2 kWh corrispondenti a 41,1 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Mentre l'impianto fotovoltaico installato in copertura ha prodotto 9 725,8 kWh di energia elettrica corrispondenti a 67,5 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Si riscontra pertanto che complessivamente, nei mesi analizzati, la produzione di energia da fonti rinnovabili è stata maggiore della domanda di energia per la totalità degli usi energetici. L'andamento mese per mese della domanda e della produzione di energia è rappresentato in Figura 43.

Se si considera il periodo dal 15 novembre 2015 al 31 marzo 2016, che corrisponde al periodo di riscaldamento per la zona climatica C in cui si trova l'edificio [15], si è misurata una domanda di energia elettrica per la tutti gli usi energetici pari a 3 118,0 kWh, corrispondenti a 21,7 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Mentre l'impianto fotovoltaico installato in copertura ha prodotto 2 944,0 kWh di energia elettrica, corrispondenti a 20,4 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Il bilancio fra energia consumata ed energia prodotta risulta meno vantaggioso nei mesi invernali del periodo di riscaldamento, durante i quali la radiazione solare è minore rispetto alle altre stagioni dell'anno. Tuttavia il bilancio risulta quasi in pareggio anche in questi mesi.

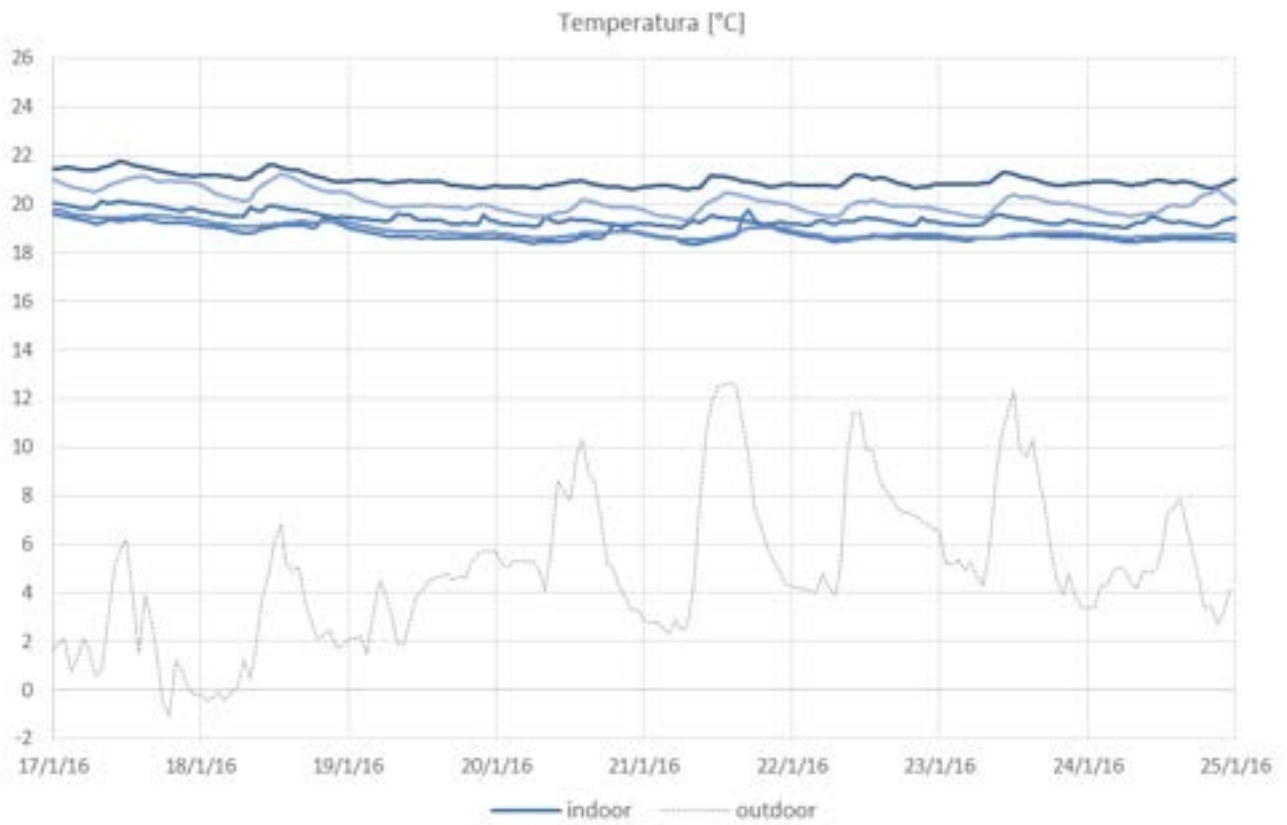


Figura 35. Temperatura dell'aria interna ed esterna, in periodo di riscaldamento

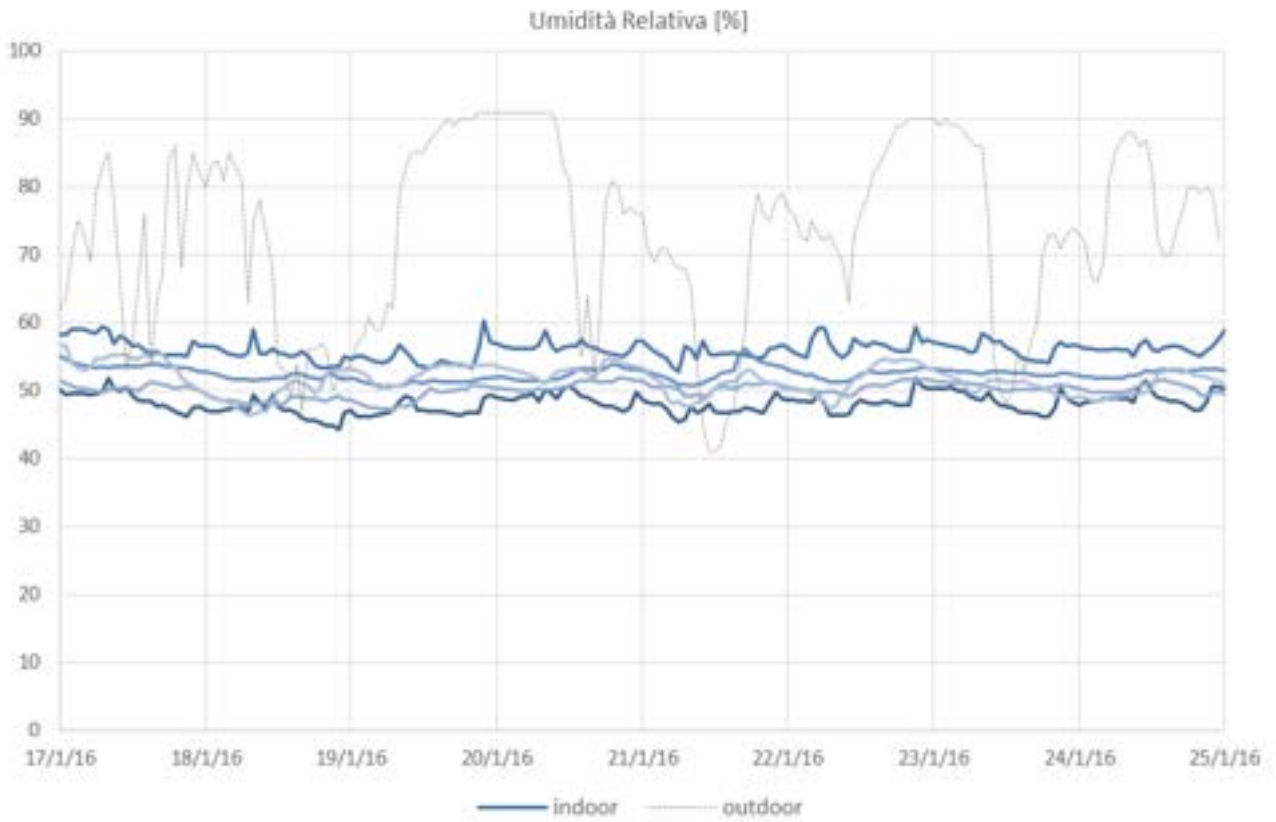


Figura 36. Umidità relativa dell'aria interna ed esterna, in periodo di riscaldamento

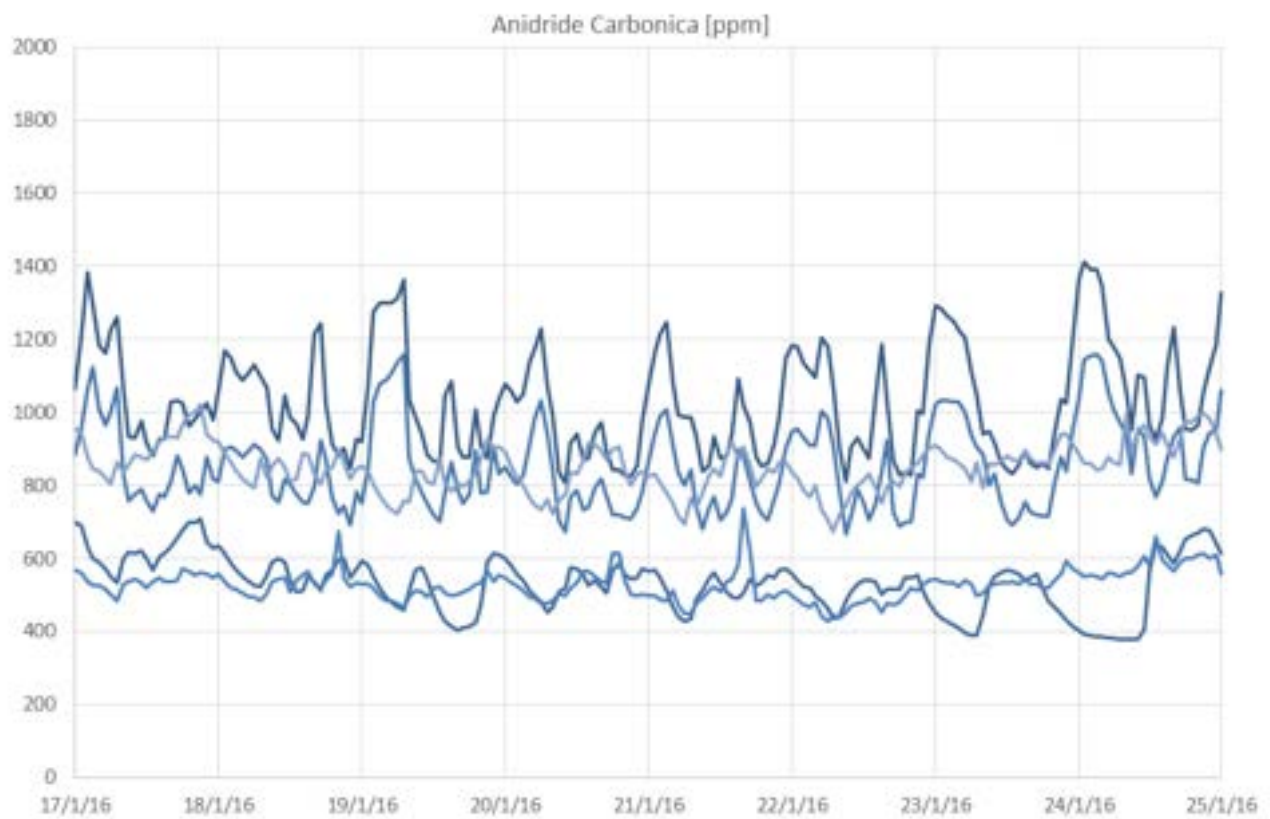


Figura 37. Concentrazione di CO₂ dell'aria interna, in periodo di riscaldamento

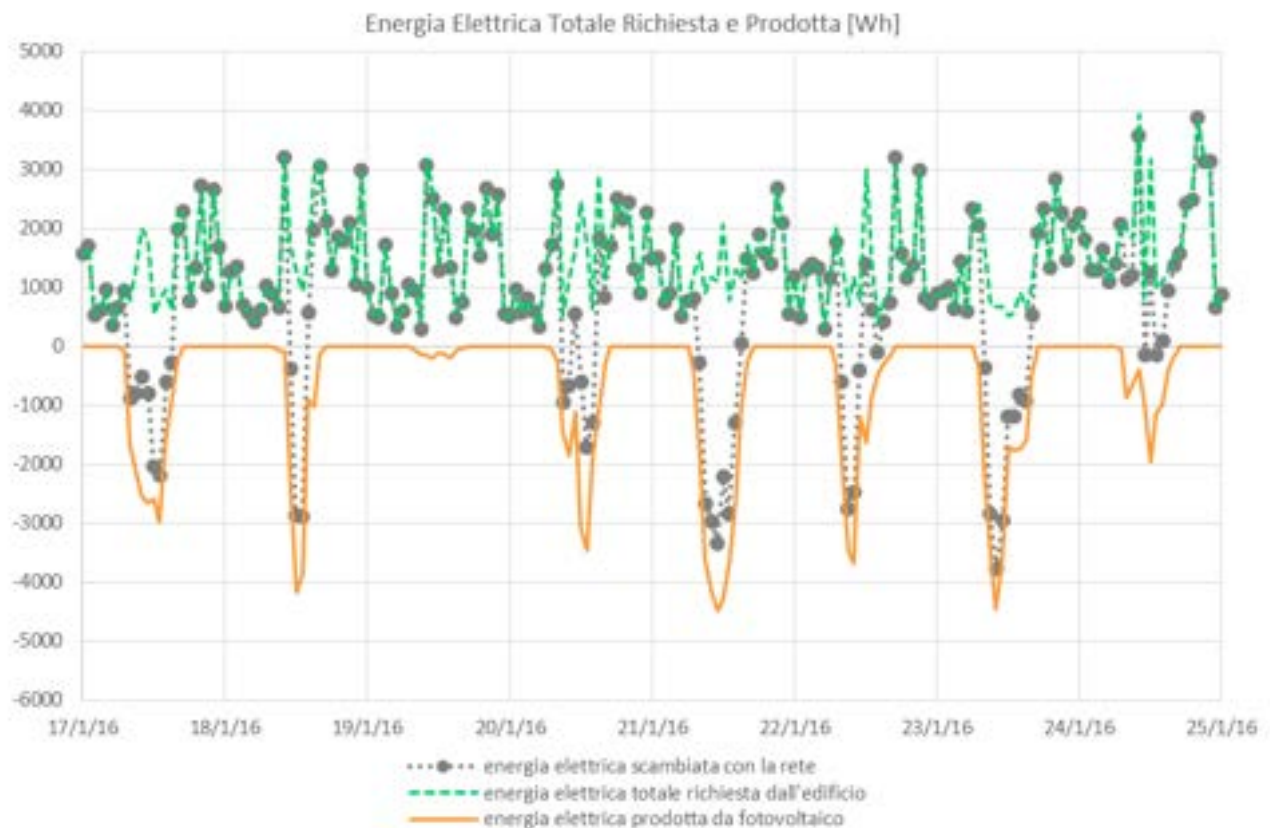


Figura 38. Energia elettrica richiesta, prodotta e scambiata con la rete, durante una settimana rappresentativa del periodo di riscaldamento

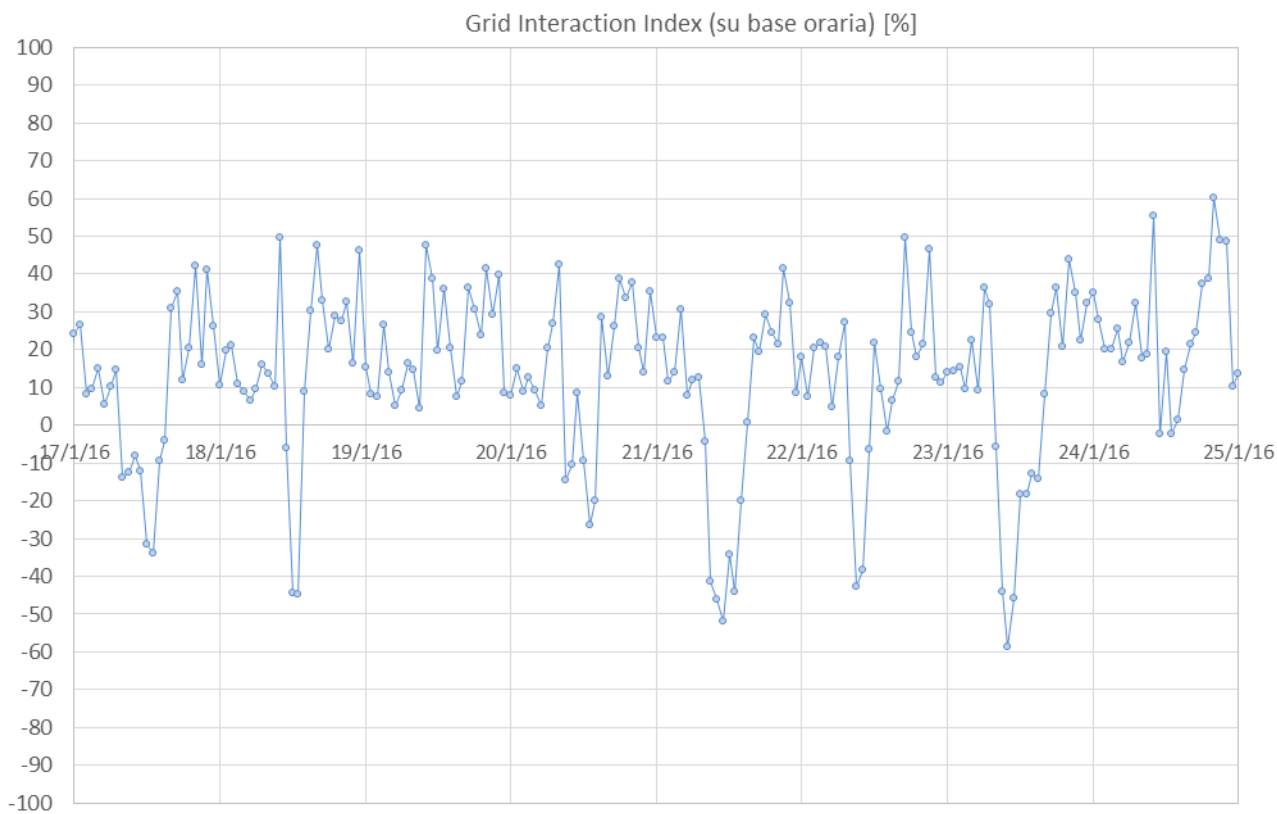


Figura 41. Indice di grid interaction calcolato su base oraria, durante una settimana rappresentativa del periodo di riscaldamento.

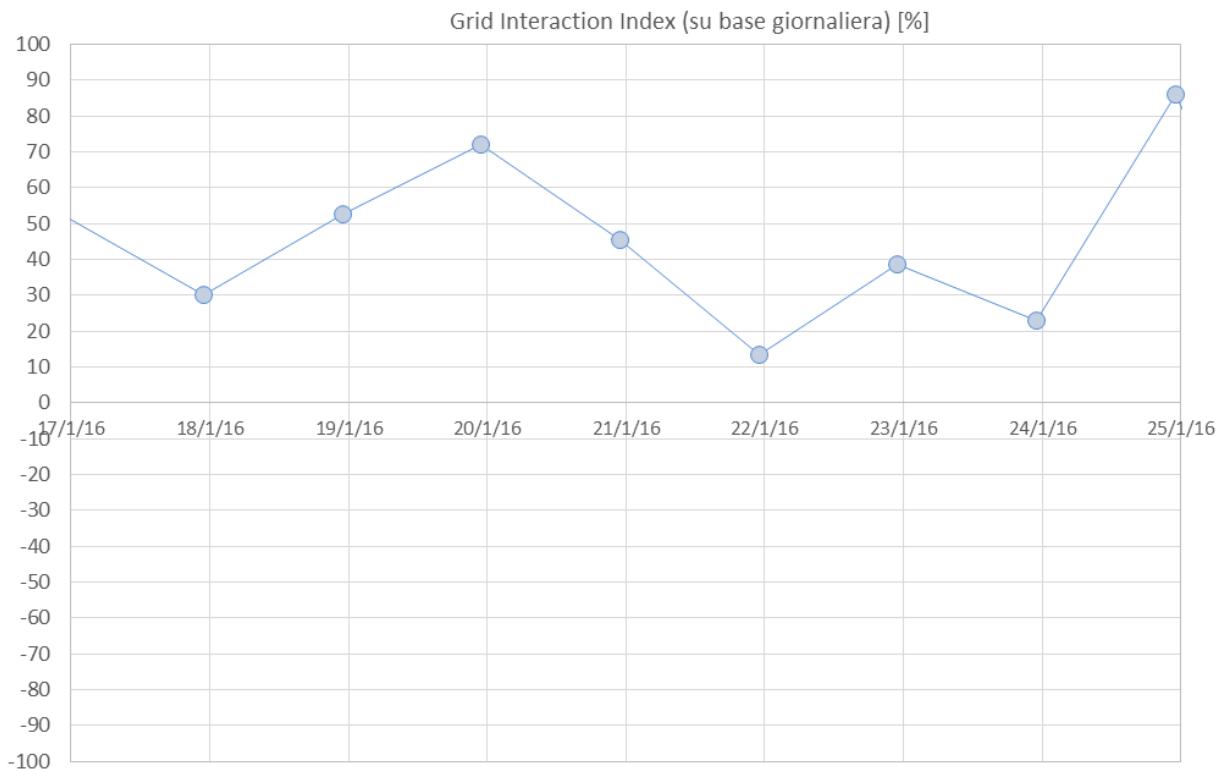


Figura 42. Indice di grid interaction calcolato su base giornaliera, durante una settimana rappresentativa del periodo di riscaldamento

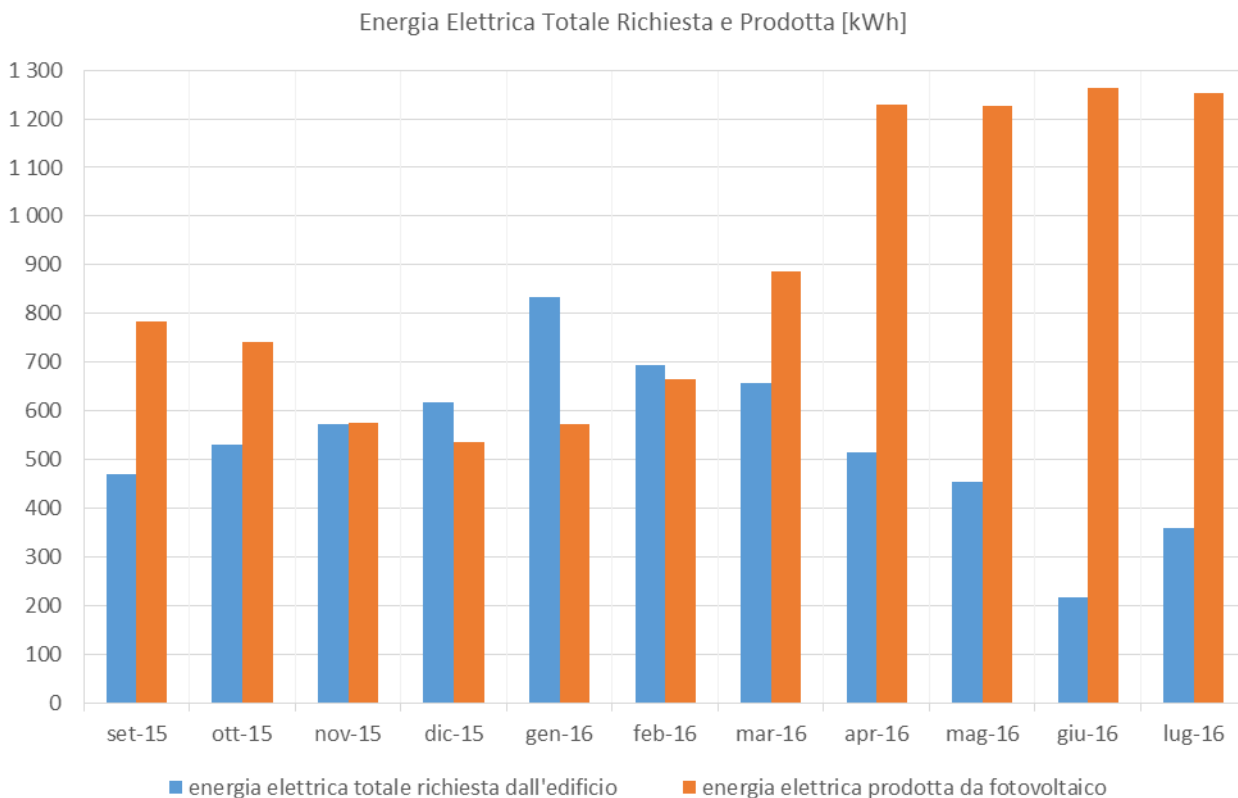


Figura 43. Energia elettrica mensile richiesta e prodotta nell'intero periodo oggetto di analisi (settembre 2015 - luglio 2016) per tutti gli usi dell'edificio

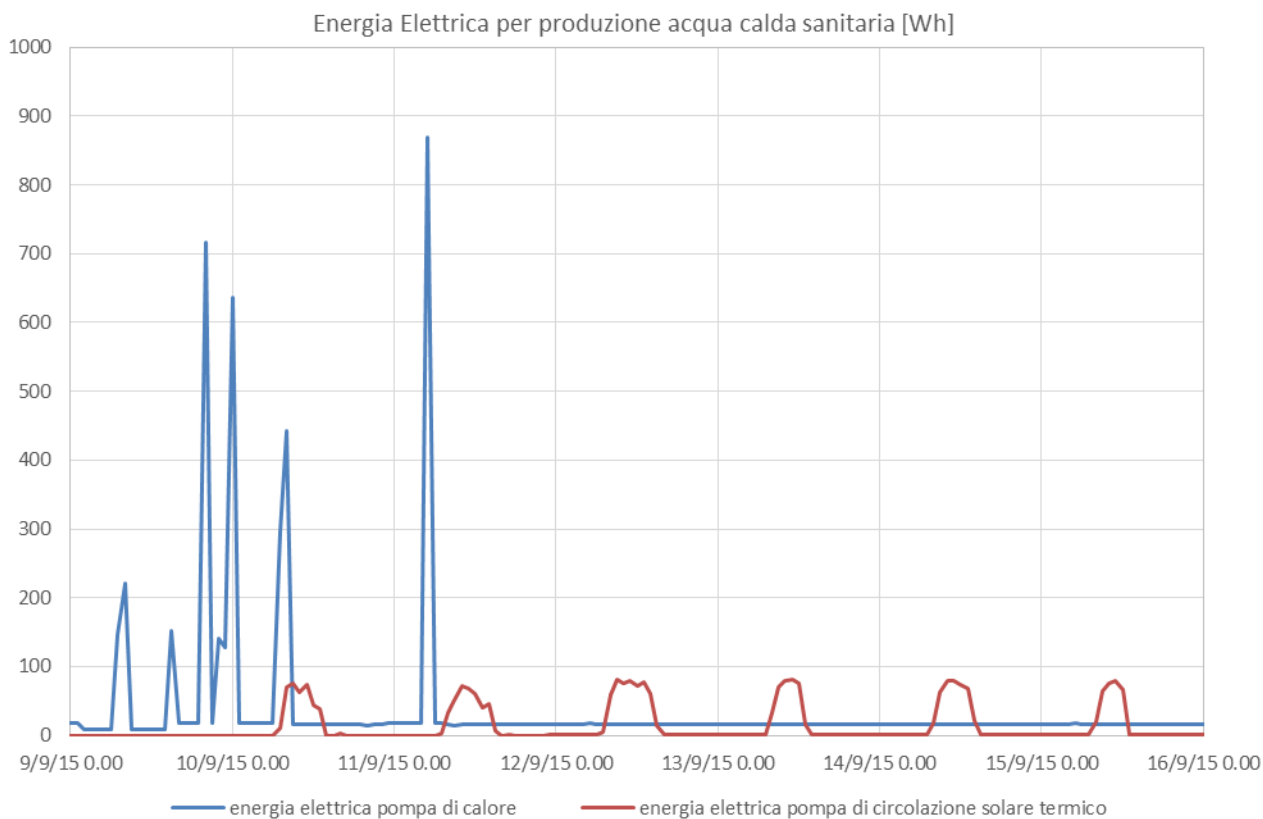


Figura 44. Domanda di energia elettrica per pompa di calore e pompa di circolazione dell'impianto solare termico, per produzione di acqua calda sanitaria, durante una settimana rappresentativa del periodo caldo

In Figura 44 sono rappresentati gli andamenti della domanda di energia elettrica per la produzione di acqua calda sanitaria, nel periodo dal 9 al 16 settembre 2015. In particolare è rappresentata con linea blu la domanda di energia per la pompa di calore in modalità produzione di acqua calda sanitaria, la quale comprende anche l'energia elettrica per il circolatore del circuito idraulico che collega la pompa di calore con lo scambiatore integrato nell'accumulo termico. La linea rossa rappresenta la domanda di energia elettrica per la pompa di circolazione del circuito primario dell'impianto solare termico.

Il grafico rappresenta un esempio di analisi svolta per singoli usi energetici o apparecchi elettrici.

In particolare vediamo come la pompa di circolazione del circuito solare termico venga attivata dalla relativa centralina, in funzione della radiazione solare incidente sul campo solare della falda in copertura. La pompa di circolazione di piccole dimensioni è in funzione nelle ore centrali della giornata per trasportare energia termica dai collettori solari piani all'accumulo termico, che aumenta la sua temperatura. Come abbiamo visto dai grafici precedenti, riguardati lo stesso periodo (ad esempio in Figura 30) il giorno 9 settembre è stato di cielo coperto con ridotta quantità di radiazione incidente e l'acqua calda sanitaria risulta essere stata prodotta dalla sola pompa di calore, fino alle ore centrali del giorno successivo, 10 settembre, quando si è attivata la pompa di circolazione del sistema solare. Si nota un picco di energia richiesta dalla pompa di calore nelle prime ore del mattino del giorno 11 settembre. Questo può essere dovuto a un'elevata richiesta di acqua calda in quel frangente, o più probabilmente al fatto che la pompa di calore ha iniziato a caricare l'accumulo termico prima che il sistema solare termico fosse raggiunto da sufficiente radiazione solare. Per questo tipo di situazione si è ritenuto di implementare la logica di controllo descritta nel paragrafo 2.2.4.

3 Conclusioni

La prima parte delle attività ha incluso la revisione approfondita del sistema di controllo e monitoraggio dell'edificio. Sono stati verificati i requisiti e le caratteristiche dell'intero apparato sperimentale e si è determinato dove si doveva intervenire con aggiunte di componenti e impostazioni di regolazione aggiuntive.

Il sistema di controllo e monitoraggio integra una parte operante secondo protocollo Konnex, la quale presenta caratteristiche più comuni e peculiarità di maggiore replicabilità, e una parte operante secondo protocollo BACnet, la quale gestisce gli strumenti di misura più tipici dell'ambito impiantistico e quelli relativi agli aspetti più di dettaglio scientifico. A queste si aggiunge una parte operante secondo protocollo Meter-Bus, come tipico per i misuratori di energie termica più comunemente utilizzati. Tutte le parti del sistema sono supervisionate attraverso protocollo BACnet. Per la miglior integrazione delle parti del sistema, si sono rivisti e completati i moduli elettronici di interfaccia del sistema Konnex e del sistema Meter-Bus con il sistema BACnet.

Tutta la parte hardware (dispositivi, collegamenti, componenti per il montaggio) dell'intero sistema di monitoraggio e controllo, è stata completata e risulta ora pienamente operante. Si è poi completata ed implementata la parte software di supervisione del sistema Konnex e sono stati scritti i requisiti di dettaglio e le logiche di controllo da implementare nel sistema BACnet (l'implementazione informatica sul sistema BACnet avverrà nei prossimi mesi).

Si è verificato che i componenti del sistema di controllo e monitoraggio fossero completi e si è intervenuti installando i dispositivi mancanti e aggiornando quelli per cui si è deciso di migliorare le prestazioni, come nel caso di alcuni moduli di acquisizione, della centralina di misura dei dati climatici esterni, sostituita perché danneggiata da eventi atmosferici e dell'aggiunta di un sensore di velocità dell'aria nell'impianto di ventilazione. Quest'ultimo ha permesso, in particolare, di completare l'apparato sperimentale con un punto di misura utile al monitoraggio della portata d'aria dell'impianto in tutte le possibili configurazioni operative.

Le successive attività hanno riguardato l'analisi dei dati monitorati nel periodo compreso tra settembre 2015 a dicembre 2015 (il mese di settembre è stato incluso nell'analisi al fine di considerare condizioni climatiche sufficientemente calde). Si è verificato il funzionamento del sistema di monitoraggio ed acquisizione dati, per individuare eventuali aspetti da migliorare. In particolare, sono stati individuati dei buchi durante il processo di memorizzazione delle grandezze monitorate, relative ad intervalli di alcune ore nell'arco dell'intero periodo. In particolare, i dati mancanti non hanno riguardato singoli sensori o dispositivi, ma tutte le misure effettuate per mezzo del sistema Konnex. Il problema nell'acquisizione dati non è dipeso quindi da malfunzionamenti temporanei delle singole parti, ma dall'incapacità del sistema Konnex, ed in particolare della sua unità centrale, di gestire il consistente carico di dati dovuto alla numerosità dei dispositivi collegati ed alle logiche di controllo implementate. Si è quindi verificato che l'eccessivo flusso di dati ha prodotto, in alcuni frangenti, instabilità e blocco temporaneo del sistema di acquisizione. Si è ritenuto quindi necessario continuare e completare le attività per l'implementazione della supervisione complessiva attraverso il sistema BACnet, così da affiancare e sgravare da compiti di acquisizione dati il sistema Konnex.

Si sono così svolte le attività di sviluppo in collaborazione con i produttori dei sistemi allo scopo di realizzare l'implementazione dell'apparato sperimentale completo, garantendo maggiore stabilità al sistema. Si sono sviluppati i requisiti per la sua integrazione e completamento, allo scopo di consentire l'uso di tutti i sensori e l'implementazione di nuove logiche di controllo.

Alcune buchi nella memorizzazione dei dati sono stati dovuti anche alla mancata esportazione delle misure sul bus del sistema Konnex da parte dei moduli di comunicazione di alcuni misuratori di energia elettrica. Per questo si è proceduto ad aggiornare i programmi firmware integrati nei misuratori di energia elettrica e le loro interfacce con il sistema Konnex.

In generale, si è pertanto visto che risulta importante, in ambito di applicazioni con sistemi Konnex, verificare l'aggiornamento dei firmware integrati sul dispositivo e l'effettiva completezza dell'applicativo ETS (*Eib Tool Software*) per i dispositivi che si vogliono utilizzare. Le caratteristiche delle componenti software insieme a quelle del dispositivo fisico ne determinano il funzionamento completo.

Parallelamente le attività hanno riguardato lo sviluppo di logiche di controllo per regolare l'uso della ventilazione naturale e di quella meccanica, per il controllo del raffrescamento con scambiatore interrato e del raffrescamento attivo e per il controllo del riscaldamento degli ambienti.

Si sono sviluppate logiche di controllo da poter selezionare in modo alternativo e i cui effetti possono essere valutati e confrontati. Le logiche di controllo individuate rappresentano una varietà di complessità crescente, dalle più essenziali a quelle più complesse.

Le logiche sviluppate consentono di attuare in modo prioritario, quando possibile, le soluzioni passive e a bassa domanda di energia, e di attivare le soluzioni di tipo attivo (con accensione della pompa di calore) solo quando quelle passive non sono sufficienti al raggiungimento dei valori stabiliti per i parametri ambientali.

A seguito del completamento del sistema di monitoraggio e della correzione dei problemi riscontrati, è stata impostata un'ulteriore analisi dati nel periodo compreso tra marzo e luglio 2016, per verificare gli effetti degli interventi. È stata riscontrata una maggior stabilità del sistema di monitoraggio e controllo, con un sensibile calo del periodo di mancata memorizzazione di dati. Tuttavia i pochi buchi che ancora permangono hanno indicato l'utilità di proseguire con la definitiva implementazione del sistema di supervisione BACnet a completamento del sistema Konnex, il quale potrà infine essere sgravato interamente dal compito di memorizzazione dati.

È stato inoltre implementato un primo set di logiche di controllo sul sistema Konnex (le logiche sul sistema BACnet non sono ancora state completamente implementate) ed esso ha mostrato un comportamento soddisfacente, portando effetti utili agli utenti dell'edificio. Le prime regole programmate per l'attivazione delle schermature solari sono state utili ad assistere l'utente nell'uso di questi componenti. Gli occupanti dell'edificio si sono detti soddisfatti anche dei messaggi con consigli per l'apertura o la chiusura delle finestre in funzione della temperatura dell'aria interna ed esterna. Si è dimostrata utile ed affidabile anche la logica di controllo per lo spegnimento della ventilazione meccanica in funzione dell'apertura delle finestre.

Le prime analisi dei dati estese a tutto il periodo di monitoraggio (riscaldamento e raffrescamento), hanno permesso di avere indicazioni interessanti sulle prestazioni energetiche ed ambientali dell'edificio.

Anche i periodi con clima più caldo mostrano buone condizioni di comfort igrotermico negli ambienti interni, con un uso molto ridotto del raffrescamento attivo tramite la pompa di calore. Come mostrato in dettaglio nel report, gli ambienti interni mantengono temperature dell'aria stabili e all'interno degli intervalli di comfort, anche quando la temperatura esterna raggiunge picchi di 36 °C, se pur in assenza di raffrescamento attivo e con la prevalenza della ventilazione naturale, la quale potrebbe essere ulteriormente ottimizzata nelle ore più calde.

Anche le analisi condotte sul periodo di riscaldamento mostrano il buon comportamento dell'edificio, con valori adeguati delle variabili ambientali, come temperatura e umidità relativa. Solamente i valori di concentrazione di CO₂ degli ambienti interni, mostrano dei picchi eccessivi, che indicano la necessità di regolare meglio il sistema di ventilazione meccanica nel periodo freddo.

Per quanto riguarda le prestazioni energetiche, è stata registrata una domanda di energia contenuta rispetto alla produzione di energia in situ, la quale avviene per mezzo del sistema solare termico e tramite l'impianto fotovoltaico, entrambi integrati nella copertura dell'edificio.

Complessivamente (tra il 4 settembre 2015 e il 31 luglio 2016), si è misurata una domanda di energia elettrica che copre la totalità degli usi energetici, riguardanti sia le parti climatizzate dell'edificio sia le parti accessorie, pari a 5 921,2 kWh corrispondenti a 41,1 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata.

Mentre l'impianto fotovoltaico installato in copertura ha prodotto 9 725,8 kWh di energia elettrica corrispondenti a 67,5 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Si riscontra pertanto che nei mesi analizzati la produzione di energia da fonti rinnovabili è stata maggiore della domanda di energia per la totalità degli usi energetici.

Se si considera il periodo dal 15 novembre 2015 al 31 marzo 2016, che corrisponde al periodo di riscaldamento per la zona climatica C in cui si trova l'edificio [15], si registra una domanda di energia elettrica per la tutti gli usi energetici pari a 3 118,0 kWh corrispondenti a 21,7 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Mentre l'impianto fotovoltaico installato in copertura ha prodotto 2 944,0 kWh di energia elettrica corrispondenti a 20,4 kWh/m² per unità di superficie netta climatizzata. Il bilancio fra energia consumata ed energia prodotta risulta meno vantaggioso nei mesi invernali del periodo di riscaldamento, durante i quali la radiazione solare è minore rispetto alle altre stagioni dell'anno. Tuttavia il bilancio risulta quasi in pareggio anche in questi mesi.

È stata inoltre analizzata l'interazione fra l'edificio e la rete elettrica calcolando gli indici di Load Match e di Grid Interaction con frequenze giornaliere e orarie. Si è visto che l'indice di Load Match, calcolato su base oraria, assume un valore pari al 100% solo nelle ore centrali della giornata con radiazione solare più alta, mentre si riscontrano valori minori nelle ore con radiazione solare ridotta o con cielo coperto e valori nulli in assenza di radiazione solare. Si tratta di un comportamento stabile durante l'intero corso dell'anno, anche se nei mesi invernali la frequenza con cui l'indice raggiunge il valore del 100% si riduce. Inoltre nei mesi invernali si riscontra una più stabile interazione con la rete.

A partire dalle attività svolte e dal completamento delle prime analisi, è ora possibile sviluppare studi approfonditi sugli effetti dell'applicazione delle differenti logiche di controllo sull'edificio, sia in termini energetici che di comfort termico ambientale. In particolare si prevede di ottimizzare il controllo della ventilazione meccanica e naturale, del riscaldamento e del raffrescamento, approfondendo le potenzialità della massa termica dell'edificio.

Si prevede di iniziare analisi dettagliate sul comportamento dello scambiatore interrato ad aria, che includano il monitoraggio delle prestazioni energetiche dello scambiatore, la calibrazione di modelli di simulazione energetica esistenti e lo sviluppo di nuovi modelli, con fasi di validazione e identificazione dei parametri del sistema.

Si prevede anche di approfondire le analisi dell'uso ottimizzato delle energie da fonti rinnovabili con il miglioramento dell'interazione tra edificio e rete. Potranno essere analizzati più nel dettaglio i profili di consumo di energia per i diversi usi, sviluppando logiche di controllo e indicazioni di uso ottimizzato anche in funzione dei valori degli indici di interazione con la rete. Si è pianificato di sviluppare un'analisi per la possibile implementazione di sistemi di accumulo di energia elettrica.

4 Riferimenti bibliografici

1. Concerted Action EPBD, “2016 – Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD)”, ADENE, Lisbon, 2016.
2. ANIT, “Regole per l’efficienza energetica degli edifici”, Guida Anit di approfondimento tecnico, ANIT, Milano, 2016.
3. Passive House Institute, “Criteria for the Passive House, EnerPHit and PHI Low Energy Building Standard, version 9e”, Criteri per la certificazione, Passive House Institute, Darmstadt, 2016.
4. F. Causone, S. Carlucci, L. Pagliano, M. Pietrobon, “A zero energy concept building for the Mediterranean climate”, Energy Procedia, Volume 62 (2014), pp. 280-288.
5. S. Carlucci, G. Cattarin, L. Pagliano, M. Pietrobon, “Optimization of the installation of an Earth-to-Air Heat Exchanger and detailed design of a dedicated experimental set-up”, Applied Mechanics and Materials, Volumi 501-504 (2014), pp 2158-2161, Trans Tech Publications, Switzerland.
6. CENELEC, Norma EN 50090 - “Home and building electronic systems (HBES)”, CENELEC, Bruxelles, 2004-2016.
7. CEN, Norma EN ISO 16484-5 - “Building automation and control systems (BACS) - Part 5: Data communication protocol”, CEN, Bruxelles, 2014.
8. CEN, Norma EN 13757-2 - “Communication systems for and remote reading of meters - Part 2: Physical and link layer”, CEN, Bruxelles, 2004.
9. CEN, Norma EN 13757-3 - “Communication systems for and remote reading of meters - Part 3: Dedicated application layer”, CEN, Bruxelles, 2013.
10. J. Pfafferot, “Evaluation of earth-to-air heat exchangers with a standardised method to calculate energy efficiency”, Energy and Buildings, Volume 35 (2003), pp. 971-983.
11. K. Voss, I. Sartori, A. Napolitano, S. Geier, H. Gonzalves, M. Hall, P. Heiselberg, J. Widén, E. Musall, B. Karlsson, P. Torcellini, “Load Matching and Grid Interaction of Net Zero Energy Buildings”, Proceedings of EuroSun 2010 (2010), Graz.
12. T. R. Nielsen, C. Drivsholm, “Energy efficient demand controlled ventilation in single family houses”, Energy and Buildings, Volume 42 (2010), pp. 1995-1998.
13. Siemens, “Demand-controlled ventilation - Control strategy and applications for energy-efficient operation”, Guida tecnica, Siemens Switzerland Ltd, 2010.
14. N. Aste, R. S. Adhikari, C. Del Pero, “An algorithm for designing dynamic solar shading system”, Energy Procedia, Volume 30 (2012), pp. 1079-1089.
15. 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.

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.