



Ricerca di Sistema elettrico

Messa a punto dell'apparato sperimentale
e definizione dei test sulle logiche di
controllo avanzate per impianti ibridi in
edifici ad alta efficienza

P. Conti, M. Barbieri, D. Della Vista, E. Schito, D. Testi

MESSA A PUNTO DELL'APPARATO SPERIMENTALE E DEFINIZIONE DEI TEST SULLE LOGICHE DI CONTROLLO AVANZATE PER IMPIANTI IBRIDI IN EDIFICI AD ALTA EFFICIENZA

P. Conti, M. Barbieri, D. Della Vista, E. Schito, D. Testi (Università di Pisa – Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *3 - Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici*

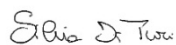
Linea di attività: *LA3.28 - Messa a punto dell'apparato sperimentale e definizione dei test sulle logiche di controllo avanzate per impianti ibridi in edifici ad alta efficienza*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sviluppo di sistemi di controllo per impianti ibridi applicati in edifici ad alta efficienza*"

Responsabile scientifico ENEA: Silvia Di Turi



Responsabile scientifico Università di Pisa – DESTEC: Daniele Testi



Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
1.1 PREMESSA	6
1.2 OBIETTIVI GENERALI DEL LAVORO.....	6
1.3 CONTESTUALIZZAZIONE DEL LAVORO NELLO STATO DELL'ARTE TECNICO-SCIENTIFICO	6
1.4 PRINCIPALI RISULTATI ATTESI DAL LAVORO	7
1.5 DESCRIZIONE DI OBIETTIVI, ATTIVITÀ E RISULTATI ATTESI, SPECIFICI DELLA PRIMA ANNUALITÀ	7
2 DETERMINAZIONE DI PROFILI DI CARICO IN EDIFICI-TIPO AD ALTA EFFICIENZA IN AMBITO RESIDENZIALE E TERZIARIO IN DIVERSI CONTESTI CLIMATICI ITALIANI	9
2.1 METODOLOGIA E MODELLI PER LA DETERMINAZIONE DEI FABBISOGNI EFFETTIVI DI RISCALDAMENTO, RAFFRESCAMENTO, ACQUA CALDA SANITARIA E DI ENERGIA ELETTRICA	9
2.1.1 SEAS LIGHT	9
2.1.2 TRNSYS	10
2.2 DESCRIZIONE DEGLI EDIFICI-TIPO AD ALTA EFFICIENZA	11
2.2.1 CONTESTI CLIMATICI E CARATTERISTICHE DI INVOLUCRO.....	12
2.2.2 DESTINAZIONI D'USO E PROFILI DI APPORTI INTERNI	18
2.2.3 TIPOLOGIE DI IMPIANTI E TERMINALI	25
2.3 CALCOLO E ANALISI DEI PROFILI DI FABBISOGNO DI ENERGIA PER GLI EDIFICI-TIPO.....	26
2.3.1 OTTENIMENTO FABBISOGNI DI INVOLUCRO (RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO)	26
2.3.2 OTTENIMENTO FABBISOGNI ELETTRICI E ACS	30
2.4 INDIVIDUAZIONE DEI "PROFILI-TIPO" PIÙ RAPPRESENTATIVI PER L'IMPLEMENTAZIONE NELL'APPARATO SPERIMENTALE.....	30
3 MESSA A PUNTO DI UN APPARATO SPERIMENTALE EMULATORE DI EDIFICI AD ALTA EFFICIENZA ALIMENTATI CON SISTEMI IBRIDI A POMPE DI CALORE	39
3.1 COMPONENTI HARDWARE APPARATO SPERIMENTALE DESTEC	40
3.2 FUNZIONALITÀ OBIETTIVO DELLA MESSA A PUNTO	40
3.2.1 VARIABILI ED ELEMENTI CONTROLLATI	41
3.2.2 VARIABILI ED ELEMENTI MONITORATI	41
3.3 MESSA A PUNTO DEGLI EMULATORI.....	43
3.3.1 EMULATORE DEL CARICO TERMICO DELL'EDIFICIO.....	43
3.3.2 EMULATORE DELLE RICHIESTE DI ACQUA CALDA SANITARIA	52
3.3.3 EMULATORE DELLA CALDAIA	53
3.3.4 EMULATORE DEI CARICHI ELETTRICI.....	54
3.4 MESSA A PUNTO DEL SISTEMA DI DISPACCIAMENTO DI ENERGIA TERMICA: SELEZIONE DEI CARICHI E DEI GENERATORI ATTIVI.....	54
3.5 MESSA A PUNTO DEL SISTEMA DI DISPACCIAMENTO DELL'ENERGIA ELETTRICA	55
3.6 MESSA A PUNTO DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO E MISURA	56
3.6.1 FLUSSI TERMICI IN INGRESSO A CIASCUN UTILIZZATORE ATTIVO E IN USCITA DA CIASCUN GENERATORE ATTIVO	56
3.6.2 VARIABILI METEO	57
3.6.3 REGISTRAZIONE DELL'UTILIZZO DI ENERGIA ELETTRICA DA PARTE DELLA POMPA DI CALORE.....	58
3.7 MESSA A PUNTO DEL SOFTWARE DI SUPERVISIONE E CONTROLLO	58
3.7.1 MOTORE DI CALCOLO.....	59
3.7.2 INTERFACCE DI COMUNICAZIONE	59
4 TEST DELLA MESSA A PUNTO EFFETTUATA	67
5 DESCRIZIONE REGOLE DI CONTROLLO TRADIZIONALI E AVANZATE DA IMPLEMENTARE NELL'APPARATO SPERIMENTALE	70

5.1	REGOLE DI CONTROLLO/INTEGRAZIONE ATTUALMENTE UTILIZZATE DAGLI OPERATORI PER I SISTEMI IBRIDI COMMERCIALI	70
5.2	REGOLE DI CONTROLLO/INTEGRAZIONE AVANZATE PER L'EFFICIENTAMENTO DEI SISTEMI IBRIDI	71
5.3	PREDISPOSIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE ALL'IMPLEMENTAZIONE DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO	73
6	CONCLUSIONI.....	77
7	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	78
8	CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	81

Sommario

La presente relazione tecnica si riferisce alle attività svolte nell'anno solare 2019 della linea di attività 3.28 del WP 3, dal titolo "Messa a punto dell'apparato sperimentale e definizione dei test sulle logiche di controllo avanzate per impianti ibridi in edifici ad alta efficienza". Le attività hanno riguardato parallelamente una componente modellistica e una sperimentale.

Nella prima parte della relazione vengono illustrate le metodologie di simulazione dinamica utilizzate per la costruzione dei profili di fabbisogno annuali su base oraria di riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria ed energia elettrica di edifici ad alta efficienza residenziali e terziari. Sono stati individuati dieci edifici-tipo e i relativi fabbisogni annuali su base oraria di energia termica ed elettrica. L'analisi di questi profili ha evidenziato come la dinamica giornaliera dei profili di carico per edifici ad alta efficienza abbia una dipendenza prioritaria dagli apporti interni e dai profili di gestione di impianto, piuttosto che da forzanti meteorologiche esterne. Sebbene infatti i consumi stagionali di energia siano determinati dal contesto climatico, si riscontrano evidenti analogie nell'andamento orario dei fabbisogni dovuti alla tipologia di utenza. Questa conclusione ha permesso di creare quattro classi di "profili-tipo" di fabbisogno che fungeranno da riferimento per le prove sperimentali da effettuare nelle successive annualità: classe "pensionato", che si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana; classe "famiglia", che si caratterizza per avere profili di carico che si differenziano tra i giorni feriali e i giorni festivi; classe "lavoratore", che si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana, ma con andamenti diversi dal "pensionato" a causa di un diverso profilo di occupazione dell'edificio; classe "ufficio", che si caratterizza per avere richieste di riscaldamento diverse tra il lunedì e gli altri giorni lavorativi, a causa dei due giorni di spegnimento dell'impianto durante il fine settimana.

Nella seconda parte della relazione viene illustrata la messa a punto dell'apparato sperimentale *hardware-in-the-loop* emulatore di edifici alimentati con sistemi ibridi a pompa di calore, in cui saranno implementate e analizzate le prestazioni di regole di controllo/integrazione tradizionali e avanzate. I principali dispositivi reali dell'apparato sono i generatori e gli accumuli termici ed elettrici, insieme alla centralina climatica che permette l'acquisizione e l'utilizzo dei dati climatici in tempo reale. Gli elementi emulati riguardano i carichi elettrici e termici. Diverse sezioni del rapporto sono quindi dedicate agli emulatori per presentarne i componenti, le strategie di emulazione e i modelli termodinamici utilizzati per il calcolo istantaneo dell'output termico od elettrico da realizzare. L'intero apparato viene gestito e monitorato tramite diverse apparecchiature di misura e controllo che fanno riferimento ad un'unica interfaccia software, anch'essa sviluppata nel corso dell'annualità.

L'intero apparato è stato ideato, configurato e testato per effettuare l'analisi sperimentale di strategie di controllo tradizionali e avanzate di impianti ibridi a pompa di calore per i cluster di edifici presentati precedentemente. Tra le strategie avanzate, l'accensione dei generatori, la gestione degli accumuli termici ed elettrici e lo scambio con la rete saranno determinati, nelle varie configurazioni impiantistiche, da un algoritmo di ottimizzazione, anche di tipo predittivo e soggetto a richieste di *demand-response*, con obiettivi di tipo sia energetico sia economico.

1 Introduzione

1.1 Premessa

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale di Realizzazione (PTR) 2019-2021 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. La presente relazione tecnica si riferisce alla prima annualità del Piano Triennale, relativa alle attività svolte nell'anno solare 2019, per quanto attiene al Tema di Ricerca 1.5 "Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti", Progetto 3 "Misura delle prestazioni reali di impianti integrati nel settore civile", Work Package 3 "Sviluppo di Sistemi di controllo per impianti ibridi applicati in Zero Energy Buildings". Il tema è sviluppato nell'ambito dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa e riguarda lo sviluppo di sistemi di controllo per impianti ibridi a pompa di calore in edifici ad alta efficienza. In particolare, all'interno del WP3, la presente Linea d'Attività LA3.28 si intitola "Messa a punto dell'apparato sperimentale e definizione dei test sulle logiche di controllo avanzate per impianti ibridi in edifici ad alta efficienza".

1.2 Obiettivi generali del lavoro

Le recenti evoluzioni dal punto di vista tecnico, legislativo e di politiche incentivanti hanno reso le fonti rinnovabili e l'aumento dell'efficienza energetica due elementi imprescindibili nella realizzazione di nuovi edifici o nella riqualificazione degli esistenti. Un'ulteriore riduzione dei consumi e un maggiore utilizzo delle fonti rinnovabili sono però richiesti per raggiungere gli attuali obiettivi energetici e ambientali a livello nazionale e comunitario. I cosiddetti impianti ibridi o integrati rappresentano una soluzione di grande interesse per questi scopi. Infatti, le tecnologie rinnovabili possono difficilmente garantire da sole un funzionamento economico, efficiente e funzionale dell'edificio, a causa delle loro caratteristiche intrinseche di aleatorietà, ridotta densità energetica, maggiore costo di messa in opera e di più complessa progettazione e gestione. Negli impianti ibridi, invece, tali tecnologie sono utilizzate sinergicamente a quelle tradizionali, al fine di aumentare i vantaggi reciproci, soddisfacendo i carichi elettrici e termici in modo integrato e minimizzando costi e consumi di energia.

Dal punto di vista progettuale e di gestione, gli impianti ibridi presentano una più difficile standardizzazione. È quindi utile sviluppare, nell'arco del triennio del presente lavoro, una serie di casi benchmark e casi ottimizzati, con relativi indici di prestazione, che possano costituire:

- a) un primo riferimento a livello nazionale sulle potenzialità di questi sistemi;
- b) delle indicazioni sull'implementazione di controlli avanzati per la gestione di questi sistemi complessi.

Questi risultati sarebbero di sicuro supporto agli operatori tecnico-finanziari che devono valutare la fattibilità e la convenienza delle diverse alternative energetiche per gli edifici, ma anche per i decisori politico-amministrativi che potrebbero avere dei riferimenti sul possibile contributo di questi sistemi per gli obiettivi energetici nazionali.

1.3 Contestualizzazione del lavoro nello stato dell'arte tecnico-scientifico

Nei cosiddetti sistemi ibridi, la pompa di calore viene utilizzata in maniera sinergica con almeno un altro generatore (tipicamente una caldaia) con l'obiettivo di realizzare la massima efficienza globale. L'attività scientifica internazionale si concentra su criteri e strategie di controllo che sappiano identificare il momento più conveniente di utilizzo della pompa di calore rispetto al generatore integrativo. Un'ulteriore potenzialità riguarda l'utilizzo di accumuli elettrici e termici, inclusa la stessa capacità termica dell'edificio, per la realizzazione di logiche di controllo predittivo o *demand-response*. Quest'ultime permettono di svincolare produzione e domanda di energia, immagazzinandola in condizioni di convenienza energetica e/o economica, in vista di un utilizzo successivo. Le strategie di controllo per sistemi ibridi a pompa di calore sono tipicamente analizzate con un approccio simulativo tramite algoritmi avanzati di predizione e ottimizzazione (ad esempio, model predictive control e algoritmi genetici), ottenendo i profili di utilizzo

ottimi della pompa di calore, di carica/scarica degli accumuli e dei generatori integrativi [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8].

Sono invece ancora poco disponibili verifiche sperimentali di questi sistemi, che ne confermino le effettive prestazioni in condizioni operative dinamiche o direttamente sul campo, una volta realizzati [9] [10] [11].

L'esecuzione di una campagna sperimentale su diverse tipologie e taglie di edifici è di difficile realizzazione, onerosa e con tempi lunghi. Per questo motivo, possono essere utilizzati dimostratori sperimentali di tipo *hardware-in-the-loop*, in cui alcuni elementi reali del sistema fisico-impiantistico analizzato sono effettivamente presenti (ad esempio, generatori di calore, accumuli elettrici e termici), mentre il funzionamento di altri componenti di difficile realizzazione in un apparato sperimentale (ad esempio, l'edificio) sono riprodotti tramite emulatori comandati in tempo reale da simulazioni dinamiche. I vantaggi di questa soluzione sono molteplici: vengono limitati i costi della sperimentazione su componenti la cui modellazione è già affidabile e si garantisce una grande flessibilità, potendo analizzare un maggior numero di casi studio (diversi edifici con diversi profili di utilizzo), tecnologie, configurazioni impiantistiche e logiche di gestione, utilizzando lo stesso dimostratore sperimentale.

Cionondimeno, è opportuno completare lo studio di tali sistemi, attraverso l'implementazione in un edificio reale, per validare ulteriormente le logiche di gestione sviluppate e anche per valutare eventuali criticità applicative sfuggite all'analisi in laboratorio.

La presente attività di ricerca triennale fornirà la validazione dei risultati di simulazione e analizzerà la reale possibilità di attuazione nelle macchine attualmente in commercio, quantificando i risparmi ottenibili. Saranno inoltre elaborati coefficienti e regole semplificate che permetteranno agli operatori di programmare il sistema ibrido in funzione delle caratteristiche dell'edificio, dell'impianto, di utilizzo, del clima e dei prezzi dell'energia.

1.4 Principali risultati attesi dal lavoro

L'attività di ricerca triennale svilupperà e validerà sperimentalmente modelli di simulazione e ottimizzazione, utilizzando strategie di controllo avanzate, anche di tipo predittivo, per impianti ibridi a pompa di calore commerciali.

L'esecuzione di una campagna sperimentale su vari edifici e in diversi contesti climatici, come detto, sarebbe particolarmente onerosa. Il lavoro si concentrerà invece sul setup e sulla conduzione di un emulatore *hardware-in-the-loop*, già in possesso del DESTEC, che riprodurrà il funzionamento di sistemi ibridi a servizio di numerosi edifici-tipo, realizzando e misurando le prestazioni ottenibili con logiche di controllo avanzate. A conclusione del progetto, è inoltre prevista l'effettuazione di un caso studio su un edificio reale indicato da ENEA.

I risultati di maggiore interesse applicativo riguarderanno il calcolo dei valori benchmark delle prestazioni ottenibili da tali sistemi a seconda della tipologia di edificio e clima. Questi valori possono essere utilizzati per analisi preliminari di fattibilità e valutazioni costi-benefici per impianti ibridi in casi analoghi a quelli analizzati. Un'interfaccia permetterà poi a operatori termotecnici di ottenere i migliori parametri e le strategie di controllo per il proprio impianto, attraverso l'inserimento di numero limitato di input riguardanti il sistema e il contesto operativo considerato.

Dal punto di vista metodologico, lo sviluppo del modello dinamico del sistema edificio-impianto sarà un risultato di generale applicazione, in quanto utilizzabile per l'analisi sperimentale in analoghi sistemi *hardware-in-the-loop*. Lo studio nel suo complesso costituirà un riferimento procedurale per future analisi sperimentali di generatori integrati. Infine, lo sviluppo di una semplice interfaccia software per l'ottimizzazione delle prestazioni operative del sistema ibrido avrà un duplice valore, pratico e scientifico: sarà uno strumento utilizzabile da utenti generici e il risultato di un metodo di sintesi di strategie di controllo ottimizzate ottenute da algoritmi complessi.

1.5 Descrizione di obiettivi, attività e risultati attesi, specifici della prima annualità

L'obiettivo generale per l'anno 2019 della LA3.28 consiste nella messa a punto di un apparato sperimentale emulatore di edifici alimentati con sistemi ibridi a pompe di calore, su cui sviluppare le logiche di controllo

avanzate oggetto del WP, e nella definizione dei test da eseguire. Come detto, il DESTEC è già in possesso dell'apparato *hardware-in-the-loop*, in cui gli elementi reali del sistema fisico (generatori e accumuli elettrici e termici) sono accoppiati a emulatori comandati in tempo reale da simulazioni dinamiche. In questo modo, l'apparato sperimentale è in grado di riprodurre il funzionamento dinamico reale del sistema ibrido, ottenendo informazioni sperimentali generalmente non rilevabili dalle tradizionali procedure di caratterizzazione dei singoli dispositivi, in quanto dipendenti dagli effetti dinamici di accoppiamento e di controllo dell'intero sistema edificio-impianto. Tali informazioni sono invece necessarie per l'individuazione e l'analisi quantitativa delle strategie di controllo ottimo del sistema ibrido in funzione delle caratteristiche dell'impianto, dell'edificio, del profilo di utilizzo, del clima e dei prezzi dei vettori energetici.

Nella presente linea d'attività annuale si procederà quindi parallelamente con una parte modellistica e una sperimentale. Verranno individuati dei set di edifici-tipo (residenziale e terziario) e le relative "condizioni-tipo" di utilizzo, rappresentativi di edifici ad alta efficienza in diversi contesti climatici italiani. I profili dei fabbisogni energetici elettrici, per acqua calda sanitaria (ACS), di riscaldamento e di raffrescamento saranno calcolati tramite simulazione dinamica. A questo scopo, soppesando esigenze di accuratezza, velocità di calcolo e fattibilità di implementazione in controllori industriali, si individuerà la metodologia e lo strumento di simulazione più idonei sulla base dell'esperienza derivante da precedenti Piani Annuali di Realizzazione (PAR) di Ricerca di Sistema Elettrico, in cui il presente gruppo di ricerca del DESTEC ha svolto attività sia in ambito di *nearly Zero-Energy Buildings* (nZEB) [12] [13] [14][12-14], sia di sviluppo di un codice dinamico semplificato, denominato SEAS Light [15] [16].

Parallelamente alle attività modellistiche, sarà effettuata la messa a punto dei controllori dell'apparato sperimentale, che dovranno essere in grado di realizzare sia le regole di controllo/integrazione attualmente utilizzate dagli operatori per i sistemi ibridi commerciali (ad esempio, temperatura esterna fissa di switch tra pompa di calore e sistema di backup, curva climatica per la temperatura di mandata, setpoint fisso di temperatura del serbatoio di accumulo termico), sia regole di controllo più avanzate, anche di tipo predittivo e *demand-response*, oggetto delle linee d'attività che si svolgeranno negli anni successivi (LA3.29 e LA 3.30), nell'ambito dello stesso progetto.

I risultati della LA3.28 consisteranno nella creazione dei profili di fabbisogno energetico elettrico e termico di un set di edifici-tipo (residenziale e terziario), rappresentativi di differenti caratteristiche di involucro, impiantistiche e di utilizzo di edifici ad alta efficienza in diversi contesti climatici italiani. Le simulazioni energetiche dinamiche, che saranno eseguite su una casistica ampia di sistemi edificio-impianto, permetteranno di selezionare il set effettivamente più significativo, in grado cioè di produrre richieste di carico elettrico e termico diversificate sia in termini quantitativi complessivi, sia in termini di andamento nel tempo. La richiesta di energia sarà determinata su base oraria per un anno meteorologico standard. Da questi "profili-tipo" di fabbisogno per le utenze elettriche dell'edificio, per la produzione di acqua calda sanitaria e per la climatizzazione dei locali in riscaldamento e raffrescamento, saranno infine estratte le condizioni operative più rappresentative, in vista delle prove sperimentali.

Parallelamente a questa attività simulativa, riportata nella Sezione 2, sarà effettuata la messa a punto dell'apparato sperimentale emulatore di edifici alimentati con sistemi ibridi a pompa di calore, ai fini dell'implementazione di regole di controllo/integrazione tradizionali e avanzate. I modelli termodinamici del comportamento degli edifici in analisi, inclusa la dinamica dei terminali di impianto e del sistema di distribuzione idronico, serviranno a comandare in tempo reale le condizioni di ritorno all'impianto di generazione. Le condizioni climatiche esterne, che determineranno non solo le risposte dinamiche degli edifici, ma anche le prestazioni di alcuni sottosistemi impiantistici come la pompa di calore aria-acqua e i pannelli fotovoltaici, saranno acquisite da una centralina climatica posizionata in corrispondenza dell'apparato sperimentale e immediatamente utilizzate per l'emulazione del comportamento degli edifici in esame. I componenti *hardware* del sistema di generazione e accumulo dell'energia già presenti nel laboratorio del DESTEC saranno predisposti e interfacciati in modo tale da essere comandati da un'unità centrale di gestione, per poter così realizzare sperimentalmente tutte le strategie di controllo individuate. Questo lavoro sperimentale sarà illustrato nelle Sezioni 3, 4 e 0, prima di trarre le conclusioni della prima annualità (Sezione 6), propedeutiche all'inizio delle attività del secondo anno.

2 Determinazione di profili di carico in edifici-tipo ad alta efficienza in ambito residenziale e terziario in diversi contesti climatici Italiani

Nella Sezione 2 vengono presentati metodi e risultati dell'attività simulativa volta a identificare un set di edifici-tipo (residenziale e terziario) e le relative "condizioni-tipo" di utilizzo, rappresentativi di edifici ad alta efficienza in diversi contesti climatici italiani. Tramite simulazione dinamica annuale vengono calcolati i profili dei fabbisogni energetici elettrici, di riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria. A tale scopo, sarà utilizzato il codice dinamico semplificato SEAS Light (vedi rapporto PAR2017 [16]) in modo da soppesare esigenze di accuratezza, velocità di calcolo e di implementazione dati, anche al fine di una possibile implementazione in controllori industriali. I risultati saranno confrontati con gli analoghi ottenuti tramite il software TRNSYS 17 [17], strumento consolidato nella simulazione dinamica degli edifici.

In questo paragrafo si riportano i modelli utilizzati per la determinazione dei carichi di riscaldamento e raffrescamento degli edifici; la descrizione degli edifici di riferimento individuati ed i profili-tipo scelti che saranno oggetto di emulazione tramite apparato sperimentale in possesso.

2.1 Metodologia e modelli per la determinazione dei fabbisogni effettivi di riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria e di energia elettrica

2.1.1 SEAS Light

SEAS Light è un modello dinamico semplificato per la determinazione di fabbisogni termici di edificio su base oraria. Si propone come strumento in grado di coniugare rapidità di calcolo e facilità di implementazione di dati caratteristici dell'edificio (input geometrici, stratigrafici, climatici e profili di utenza) con un livello di accuratezza superiore a quello garantito dai modelli quasi-statici (es. pacchetto UNI/TS 11300).

I dettagli del modello matematico alla base di SEAS Light sono presentati nel rapporto PAR2017 [16]. Brevemente richiamiamo gli elementi fondamentali della routine di calcolo (vedi Figura 1):

- La zona termica, comprensiva di aria interna e involucro, è rappresentata dal un singolo nodo di temperatura equivalente, T_z , associata ad una capacità termica dinamica efficace dell'intera zona, K_z , definita secondo la norma EN ISO 13786:2017 [18];
- Gli scambi termici per trasmissione attraverso pareti opache rivolte verso l'esterno vengono valutati attraverso una combinazione lineare della trasmittanza statica [19] e della trasmittanza dinamica [18] del componente, insieme ad una media mobile della temperatura equivalente sole-aria-cielo. In questo modo viene considerata la variabilità e gli effetti tutti i principali elementi climatici e l'inerzia termica delle strutture;
- Gli scambi termici per trasmissione attraverso gli elementi vetrati vengono valutati attraverso la trasmittanza statica del componente e il valore istantaneo della temperatura dell'aria;
- Gli elementi vetrati trasmettono l'irraggiamento solare direttamente alla zona termica;
- Gli scambi termici dovuti a ventilazione/infiltrazione vetrati vengono valutati attraverso una portata di ventilazione e infiltrazione e il valore istantaneo della temperatura dell'aria
- Gli apporti termici interni influenzano direttamente il nodo di temperatura equivalente rappresentativo della zona termica.

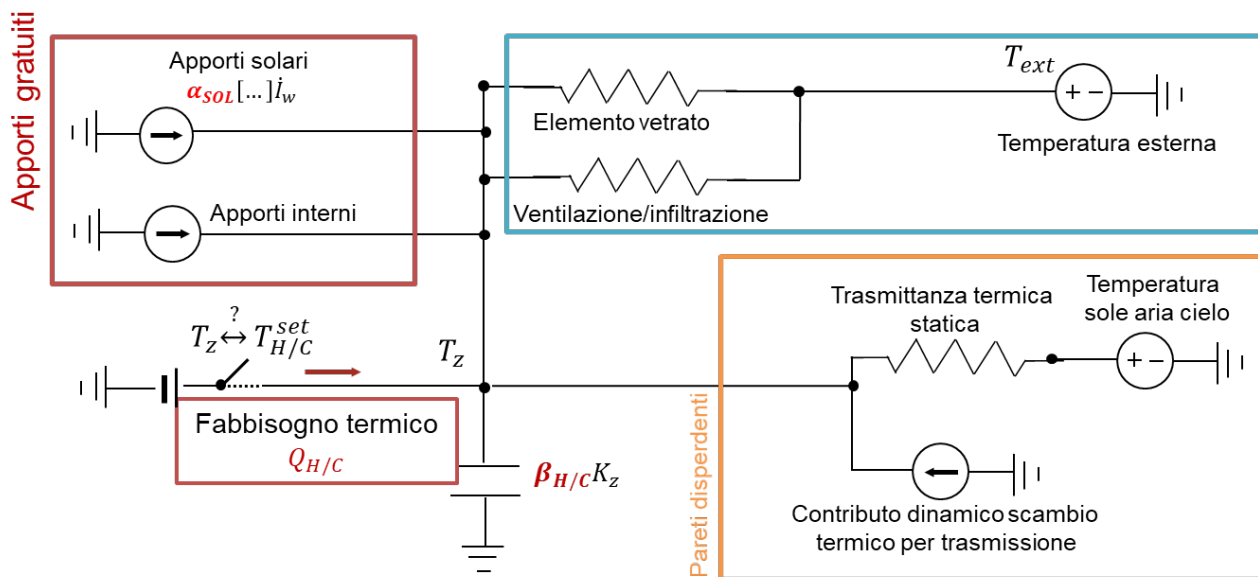


Figura 1. Schema del modello matematico implementato in SEAS Light.

Il modello è caratterizzato dall'utilizzo di tre coefficienti di calibrazione: β_H , β_C e $\alpha_{sol,C}$. I primi due si riferiscono alla capacità termica dinamica efficace della zona termica, mentre il terzo computa gli effetti degli apporti solari per irraggiamento attraverso le superfici vetrate. Attraverso questi tre coefficienti dinamici, SEAS Light restituisce stime orarie dei fabbisogni ideali d'involucro per la stagione di raffrescamento e di riscaldamento, in funzione della temperatura interna di setpoint, $T_{H/C}^{set}$.

SEAS Light dispone di una procedura iterativa per il calcolo di tali coefficienti, utilizzando come riferimento le richieste di energia relative ad un periodo di tempo di ampiezza variabile (ad esempio una settimana, un mese, una stagione, etc.) ottenute a partire da dati di consumo disponibili in bolletta o a seguito di un monitoraggio.

SEAS Light è stato validato con successo sia secondo le procedure riportate nella norma EN 15265:2007 [20], sia attraverso un confronto, a parità di simulazioni condotte, con i risultati forniti dal software dinamico commerciale TRNSYS 17 [21].

I risultati di simulazioni condotte con SEAS Light possono essere utilizzati nell'ambito di audit energetici, per stime previsionali dei profili di carico di un edificio e per la definizione di logiche di controllo predittivo applicate alla gestione della climatizzazione, con un sufficiente livello di accuratezza, velocità di calcolo e facilità di implementazione.

Nella presente attività, SEAS Light è stato utilizzato per simulare l'intero set di edifici descritto nella Sezione 2 dal quale sono stati individuati gli edifici-tipo (residenziale e terziario) e le relative "condizioni-tipo" di utilizzo, rappresentativi di edifici ad alta efficienza in diversi contesti climatici italiani.

2.1.2 TRNSYS

TRNSYS 17 è uno tra i software più usati per la simulazione dinamica degli edifici, sia a livello professionale, industriale, accademico e di ricerca [17]. Rappresenta un riferimento oramai consolidato per la verifica dell'accuratezza di software e modelli di simulazione dinamica *in-house*. È stato sviluppato dall'Università del Wisconsin e permette di calcolare i profili di fabbisogno dinamici di riscaldamento e raffrescamento degli edifici, inserendo tutti i dati di input in due diversi programmi, integrati tra di loro:

- In TRNBuild si inseriscono tutte le caratteristiche strutturali e di utilizzo dell'edificio (stratigrafia delle pareti, profili di apporti interni e carichi elettrici, tassi di ricambi d'aria per ventilazione e infiltrazione)
- In Simulation Studio si inseriscono i dati climatici e le caratteristiche del controllo del riscaldamento/raffrescamento

Nella presente attività, TRNSYS 17 è stato utilizzato per la valutazione del fabbisogno ideale di riscaldamento e raffrescamento dell'intero set di edifici presentato nella Sezione 2, al fine di valutarne l'accuratezza per l'identificazione dei giorni-tipo.

2.2 Descrizione degli edifici-tipo ad alta efficienza

Per individuare i profili di fabbisogno da testare nell'apparato sperimentale, è stato dapprima necessario scegliere un set di edifici rappresentativo di diverse caratteristiche di involucro, impianto e destinazione d'uso in diversi contesti climatici italiani.

Si sono quindi simulati in SEAS Light 85 casi studio, classificabili in funzione della fascia climatica, tipologia di involucro, destinazione e profilo di utilizzazione.

Per la classificazione a livello climatico, si sono scelte inoltre tre diverse città di riferimento, rappresentative di fasce C, D e E: Torino (fascia E), Pisa (fascia D) e Catania (fascia C). I dati climatici, in termini di temperatura dell'aria esterna, irradianza solare globale, diretta e diffusa sul piano orizzontale, su base oraria, sono ottenuti dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) [22] e sono riportati nella Sezione 2.2.1.

Per la classificazione a livello di involucro sono:

- Appartamento singolo, di superficie circa 80 m², con tre pareti disperdenti;
- Villetta bifamiliare a due piani, di superficie calpestabile circa 160 m², con tre pareti disperdenti, copertura orizzontale e pavimentazione contro terra;
- Villetta bifamiliare a due piani, di superficie calpestabile circa 160 m², con tre pareti disperdenti, copertura inclinata e pavimentazione contro terra;
- Ufficio con singola parete disperdente, con superficie calpestabile circa 20 m².

A seconda della tipologia di involucro e di clima, si sono scelte delle strutture opache tipiche del luogo, usando come riferimento principale l'abaco delle strutture UNI/TR 11552:2014 [23]. Il dettaglio dei componenti d'involucro utilizzati e delle relative stratigrafie è riportato nella Sezione 2.2.1.

Per la classificazione a livello di destinazione e profilo di utilizzazione, si sono inoltre definiti quattro diversi profili:

- Profilo "pensionato", rappresentativo di un nucleo familiare composto da due persone all'interno dell'edificio (per uso residenziale);
- Profilo "famiglia", rappresentativo di un nucleo familiare composto da quattro persone (per uso residenziale);
- Profilo "lavoratore", rappresentativo di un nucleo familiare composto da una sola persona (per uso residenziale);
- Profilo "impiegato", da utilizzarsi per la tipologia di edificio "ufficio" (per uso terziario).

A ciascun profilo corrispondono degli andamenti di apporti interni sensibili, carichi elettrici, richieste di acqua calda sanitaria e profili di accensione dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento (vedi Sezione 2.2.2).

Questi ottantacinque casi studio sono stati implementati in SEAS Light e i relativi risultati sono stati trattati per ottenere i "profili-tipo" dei fabbisogni di energia da emulare con l'apparato sperimentale descritto nella Sezione 3 nella fase successiva dell'attività. Come edifici-tipo, si sono quindi scelti i dieci casi caratterizzati da diversi profili di fabbisogno elettrico e termico che meglio sintetizzano il comportamento di tutti i casi simulati. Tutti gli edifici-tipo considerati sono edifici "ad alta efficienza", in quanto sono caratterizzati da ridotti valori di trasmittanza termica delle pareti opache disperdenti e dei componenti finestrati, insieme all'utilizzo di schermi per la riduzione degli apporti solari in estate.

La Tabella 1 riporta sinteticamente le caratteristiche dei dieci casi studio selezionati, comprensive del carico termico nominale dei terminali di emissione.

Tabella 1. Caratteristiche del set di edifici-tipo individuati.

ID	Tipologia involucro	Tipologia profilo	Clima	Carico termico di progetto dei terminali [kW]
1	Appartamento	Famiglia	Pisa	3.30
2	Appartamento	Pensionato	Pisa	3.30
3	Appartamento	Lavoratore	Catania	2.90
4	Villa copertura orizzontale	Pensionato	Catania	0.72
5	Villa copertura orizzontale	Pensionato	Pisa	0.85
6	Villa copertura orizzontale	Pensionato	Torino	10.60
7	Villa tetto a falda	Famiglia	Torino	11.10
8	Villa tetto a falda	Lavoratore	Pisa	8.70
9	Ufficio	Impiegato	Pisa	1.70
10	Ufficio	Impiegato	Pisa	1.70

2.2.1 Contesti climatici e caratteristiche di involucro

I dieci edifici tipo sono di tipo residenziale e terziario, inseriti in tre diversi contesti climatici: Torino (fascia climatica E), Pisa (fascia climatica D) e Catania (fascia climatica C). In Figura 2, Figura 3 e Figura 4 sono riportati i valori orari delle temperature esterne nei tre climi, mentre la Tabella 2 riporta i valori medi di temperatura esterna e irraggiamento globale su piano orizzontale, come riportato dalla UNI 10349-1:2016 [24].

Tabella 2. Dati medi climatici per le tre città analizzate.

	Torino (Fascia E)		Pisa (Fascia D)		Catania (Fascia C)	
	T_{ext} [°C]	H_h [MJ/(giorno m ²)]	T_{ext} [°C]	H_h [MJ/(giorno m ²)]	T_{ext} [°C]	H_h [MJ/(giorno m ²)]
Gennaio	1.3	4.6	7.3	5.9	11.9	8.3
Febbraio	3.2	7.7	7.4	8.3	10.4	11.7
Marzo	8.4	11.7	10.7	11.8	11.8	16.8
Aprile	12.0	16	12.9	15.6	15.4	18
Maggio	18.1	19.7	17.9	21.4	18.8	23.1
Giugno	22.2	22.8	20.6	23.2	23.4	24.5
Luglio	23.7	24	22.9	24.4	25.8	25.8
Agosto	22.7	20.2	23.1	21.2	26.5	22.7
Settembre	19.2	14.6	19.8	16	22.9	17.4
Ottobre	12.4	9	15.6	9.5	19.8	13.5
Novembre	6.9	4.8	11.7	6.7	15.1	10.2
Dicembre	2.7	3.9	7.6	5.1	12.3	7.5

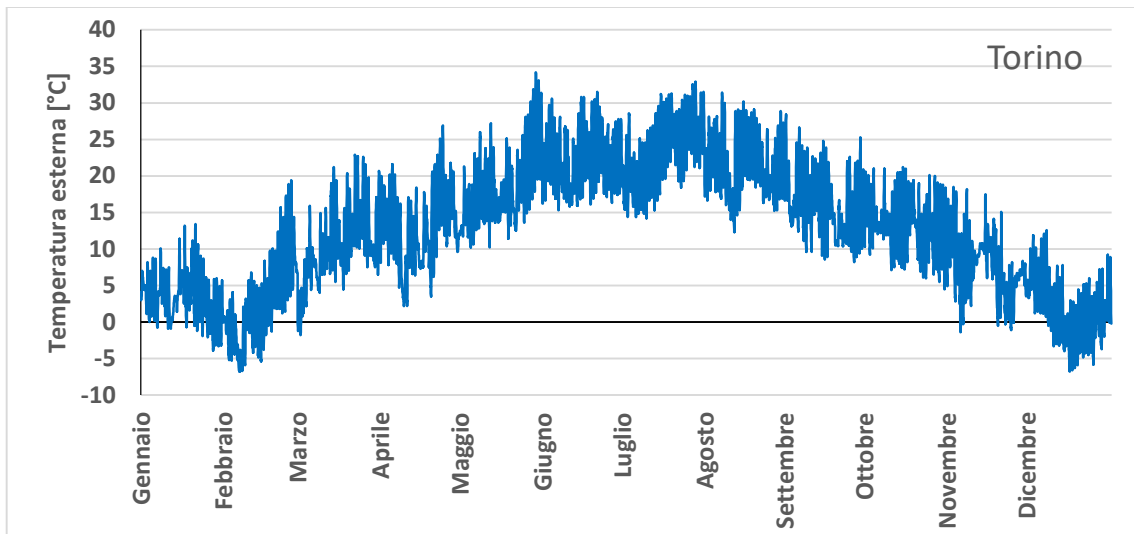


Figura 2. Temperatura esterna oraria a Torino (anno meteorologico tipo CTI).

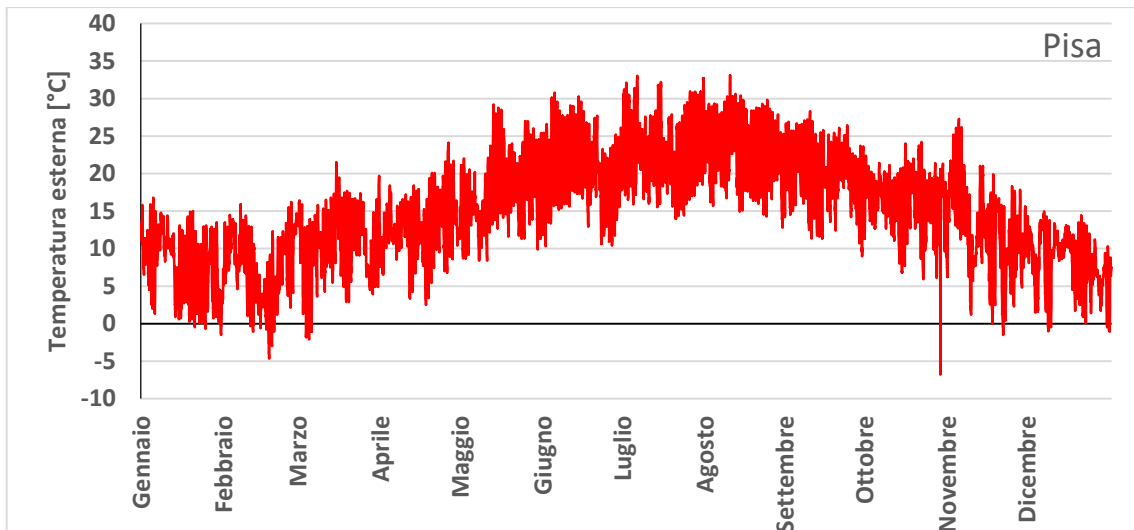


Figura 3. Temperatura esterna oraria a Pisa (anno meteorologico tipo CTI).

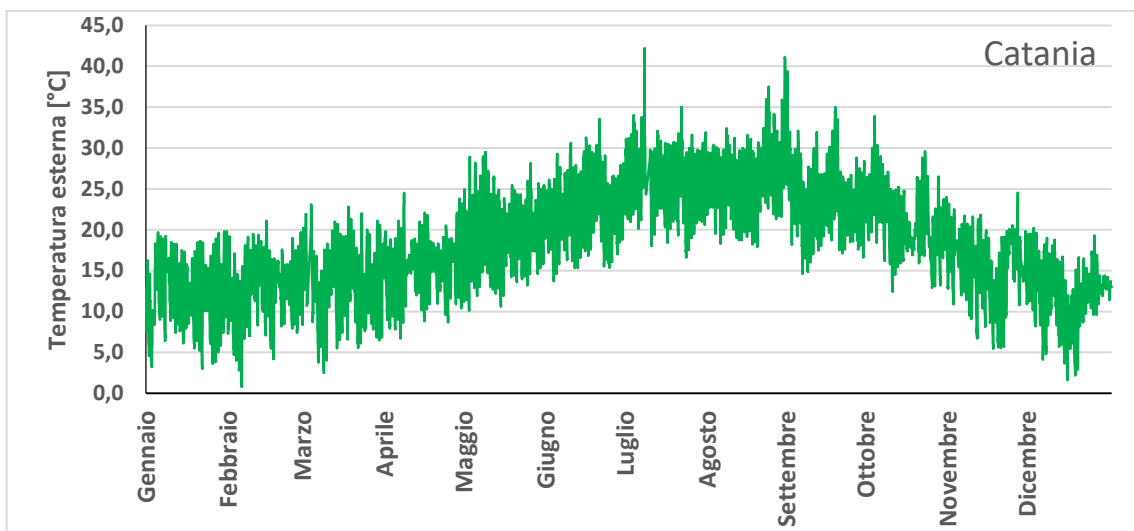


Figura 4. Temperatura esterna oraria a Catania (anno meteorologico tipo CTI).

Per ogni edificio-tipo si sono scelte delle strutture opache tipiche del luogo, usando come riferimento principale l'abaco delle strutture UNI/TR 11552:2014 [23].

Appartamento a Pisa

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MLP03 presente nell'abaco delle strutture, alla quale è stato aggiunto uno strato di lana di roccia (10 cm di spessore) sul lato esterno. La trasmittanza complessiva è 0.26 W/(m²K). I solai dell'appartamento sono considerati non disperdenti, come la parete verticale verso altro appartamento. Le finestre considerate sono di tipo triplo vetro e tratte dalla libreria TRNSYS 17. I divisori interni sono modellati sulla base della struttura MLP01, presente nell'abaco delle strutture, riducendo lo spessore a 12 cm di laterizio.

Tabella 3. Caratteristiche dell'involucro dell'appartamento a Pisa.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MLP03 + 10 cm di lana di roccia	Ovest	0.26	41.8
Verticale	MLP03 + 10 cm di lana di roccia	Sud	0.26	10.4
Verticale	MLP03 + 10 cm di lana di roccia	Nord	0.26	10.4
Verticale	MLP03	Parete verso altro appartamento	0.84	49.8
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Finestra	-	Ovest	1.66	8.0
Finestra	-	Sud	1.66	4.0
Finestra	-	Nord	1.66	4.0
Divisori interni	MLP01 (12 cm laterizio)	-	1.62	128.4

Appartamento a Catania

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MCV03 presente nell'abaco delle strutture, alla quale è stato aggiunto, centralmente, uno strato di poliuretano insufflato (10 cm di spessore) al posto dell'intercapedine d'aria. La trasmittanza complessiva è 0.26 W/(m²K). I solai dell'appartamento sono considerati non disperdenti, come la parete verticale verso altro appartamento. Le finestre considerate sono di tipo triplo vetro e tratte dalla libreria TRNSYS 17. I divisori interni sono modellati sulla base della struttura MLP01, presente nell'abaco delle strutture, riducendo lo spessore a 12 cm di laterizio.

Tabella 4. Caratteristiche dell'involucro dell'appartamento a Catania.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MCV03 + 10 cm di poliuretano	Ovest	0.26	41.8
Verticale	MCV03 + 10 cm di poliuretano	Sud	0.26	10.4
Verticale	MCV03 + 10 cm di poliuretano	Nord	0.26	10.4
Verticale	MCV03	Parete verso altro	0.83	49.8

		appartamento		
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Finestra	•	Ovest	1.66	8.0
Finestra	•	Sud	1.66	4.0
Finestra	•	Nord	1.66	4.0
Divisori interni	MLP01 (12 cm laterizio)	-	1.62	128.4

Villa a copertura orizzontale

Per questa tipologia di edificio, le stratigrafie di tutte le strutture si considerano uguali indipendentemente dal clima.

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MLP01 presente nell'abaco delle strutture, alla quale è stato aggiunto, sul lato esterno, uno strato di lana di roccia (10 cm di spessore). La trasmittanza complessiva è 0.27 W/(m²K). Il solaio contro terra è stato modellato sulla base della struttura SOL08, con l'aggiunta di 15 cm di isolante vetro cellulare, necessari per disaccoppiare il solaio dal terreno per l'installazione corretta di pannelli radianti; la copertura orizzontale, calpestabile, è basata sulla struttura COP01, cui è stata aggiunta una barriera al vapore, uno strato di poliuretano (8 cm) e una guaina bituminosa. È presente anche un solaio interpiano, basato sempre sulla struttura SOL04. Le finestre considerate sono di tipo triplo vetro e tratte dalla libreria TRNSYS 17. I divisori interni sono modellati sulla base della struttura MLP01, presente nell'abaco delle strutture, riducendo lo spessore a 12 cm di laterizio.

Tabella 5. Caratteristiche dell'involucro della villetta a copertura orizzontale.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MLP01 + 10 cm di lana di roccia	Ovest	0.27	47.6
Verticale	MLP01 + 10 cm di lana di roccia	Sud	0.27	33.3
Verticale	MLP01 + 10 cm di lana di roccia	Nord	0.27	33.3
Verticale	MLP01	Parete verso altro lato di villetta bifamiliare	0.99	61.6
Solaio	SOL08 + 15 cm isolante	Solaio contro terra	0.21	79.2
Copertura	COP01 + barriera al vapore + 8 cm di poliuretano + guaina bituminosa	Orizzontale	0.24	79.2
Solaio	SOL04	Solaio interpiano	1.49	79.2
Finestra	-	Ovest	1.66	14.0
Finestra	-	Sud	1.66	7.0
Finestra	-	Nord	1.66	7.0
Divisori interni	MLP01 (12 cm laterizio)	-	1.62	203.8

Villa con tetto a falda a Torino

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MCV04 presente nell'abaco delle strutture, alla quale sono stati aggiunti, sul lato interno, dei pannelli di XPS di 6 cm di spessore. La trasmittanza complessiva è 0.28 W/(m²K). Il solaio contro terra è stato modellato sulla base della struttura SOL08, isolata con 15 cm di isolante per poter installare i pannelli radianti; la copertura a falde è basata sulla struttura CIN03, cui sono stati aggiunti, internamente, dei pannelli di XPS, dello spessore di 10 cm. È presente anche un solaio interpiano, basato sempre sulla struttura SOL04. Le finestre considerate sono di tipo triplo vetro e tratte dalla libreria TRNSYS 17. I divisori interni sono modellati sulla base della struttura MLP01, presente nell'abaco delle strutture, riducendo lo spessore a 12 cm di laterizio.

Tabella 6. Caratteristiche dell'involucro della villetta con tetto a falda a Torino.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MCV04+ 6 cm di XPS	Ovest	0.28	58.2
Verticale	MCV04+ 6 cm di XPS	Sud	0.28	33.3
Verticale	MCV04+ 6 cm di XPS	Nord	0.28	33.3
Verticale	MCV04	Parete verso altro lato di villetta bifamiliare	0.52	72.2
Solaio	SOL08 + 15 cm isolante	Solaio contro terra	0.21	79.2
Copertura	CIN03 + 10 cm di XPS	Nord (19°)	0.22	42.0
Copertura	CIN03 + 10 cm di XPS	Sud (19°)	0.22	42.0
Solaio	SOL04	Solaio interpiano	1.49	79.2
Finestra	-	Ovest	1.66	14.0
Finestra	-	Sud	1.66	7.0
Finestra	-	Nord	1.66	7.0
Divisori interni	MLP01 (12 cm laterizio)	-	1.62	222.0

Villa con tetto a falda a Pisa

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MLP01 presente nell'abaco delle strutture, alla quale sono stati aggiunti, sul lato interno, dei pannelli di XPS di 10 cm di spessore. La trasmittanza complessiva è 0.26 W/(m²K). Il solaio contro terra è stato modellato sulla base della struttura SOL08; la copertura a falde è basata sulla struttura CIN04, cui sono stati aggiunti, internamente, dei pannelli di XPS, dello spessore di 14 cm. È presente anche un solaio interpiano, basato sempre sulla struttura SOL04. Le finestre considerate sono di tipo triplo vetro e tratte dalla libreria TRNSYS 17. I divisori interni sono modellati sulla base della struttura MLP01, presente nell'abaco delle strutture, riducendo lo spessore a 12 cm di laterizio.

Tabella 7. Caratteristiche dell'involucro della villetta con tetto a falda a Pisa.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MLP01+ 10 cm di XPS	Ovest	0.26	56.7
Verticale	MLP01+ 10 cm di XPS	Sud	0.26	33.3
Verticale	MLP01+ 10 cm di XPS	Nord	0.26	33.3
Verticale	MLP01	Parete verso altro lato di villetta bifamiliare	0.99	70.7
Solaio	SOL08	Solaio contro terra	1.19	79.2

Copertura	CIN04 + 14 cm di XPS	Nord (17°)	0.21	41.3
Copertura	CIN04 + 14 cm di XPS	Sud (17°)	0.21	41.3
Solaio	SOL04	Solaio interpiano	1.49	79.2
Finestra	•	Ovest	1.66	14.0
Finestra	•	Sud	1.66	7.0
Finestra	•	Nord	1.66	7.0
Divisori interni	MLP01 (12 cm laterizio)	-	1.62	222.0

Ufficio a Pisa (isolamento esterno)

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MCV04 presente nell'abaco delle strutture, alla quale è stato aggiunto uno strato di lana di roccia (10 cm di spessore) sul lato esterno. La trasmittanza complessiva è 0.23 W/(m²K). I solai dell'ufficio sono considerati non disperdenti. La finestra considerata è di tipo triplo vetro, tratta dalla libreria TRNSYS 17. Le altre pareti interne, non disperdenti, sono in cartongesso in lastre (spessore 20 cm).

Tabella 8. Caratteristiche dell'involucro dell'ufficio a Pisa con isolamento esterno.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MCV04 + 10 cm di lana di roccia	Ovest	0.23	8.4
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri uffici (est)	0.90	15.4
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri uffici (nord)	0.90	10.1
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri uffici (sud)	0.90	10.1
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	19.8
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Finestra	•	Ovest	1.66	7.0

Ufficio a Pisa (isolamento interno)

Le pareti esterne verticali dell'appartamento sono state modellate sulla base della struttura MCV04 presente nell'abaco delle strutture, alla quale sono stati aggiunti internamente dei pannelli di XPS (8 cm di spessore). La trasmittanza complessiva è 0.25 W/(m²K). I solai dell'ufficio sono considerati non disperdenti. La finestra considerata è di tipo triplo vetro, tratta dalla libreria TRNSYS 17. Le altre pareti interne, non disperdenti, sono in cartongesso in lastre (spessore 20 cm).

Tabella 9. Caratteristiche dell'involucro dell'ufficio a Pisa con isolamento interno.

Parete	Riferimento all'abaco UNI/TR 11552	Esposizione	Trasmittanza [W/(m ² K)]	Superficie elemento [m ²]
Verticale	MCV04 + 8 cm di XPS	Ovest	0.25	8.4
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri uffici (est)	0.90	15.4
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri uffici (nord)	0.90	10.1
Verticale	Cartongesso 20 cm	Parete verso altri	0.90	10.1

		uffici (sud)		
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	19.8
Solaio	SOL04	Solaio interpiano su altro appartamento	1.49	79.7
Finestra	•	Ovest	1.66	7.0

2.2.2 Destinazioni d'uso e profili di apporti interni

I dieci casi studio in esame si riferiscono a otto edifici-tipo ad uso residenziale e due ad uso terziario (ufficio). Come specificato precedentemente, sono stati definiti quattro profili di utilizzo (“pensionato”, “famiglia”, “lavoratore”, “impiegato”), ognuno dei quali suddiviso in due sub-profili (“giorno feriale”, “giorno festivo”). I periodi di attivazione degli impianti dipendono dalla destinazione d’uso e dai profili di presenza degli utenti all’interno della zona in esame. Gli apporti interni dipendono dalle tipologie di apparecchiature elettriche presenti, dal relativo profilo di utilizzo e dai profili di presenza degli utenti. La destinazione d’uso e i profili di presenza determinano anche le richieste orarie di acqua calda sanitaria.

I profili sono descritti nel dettaglio nei seguenti paragrafi.

Profilo pensionato

Il profilo “pensionato” descrive i profili di utilizzo di un edificio di tipo residenziale in cui sono presenti due persone. Gli utenti sono quasi sempre presenti all’interno dell’edificio e non ci sono differenze tra giorni feriali e festivi. In accordo con le norme UNI EN ISO 13792:2012 [25] e UNI EN ISO 7730:2006 [26], si è ipotizzato un apporto sensibile pari a circa 100 W a persona (1 met), per persone mediamente in condizioni di riposo o leggera attività.

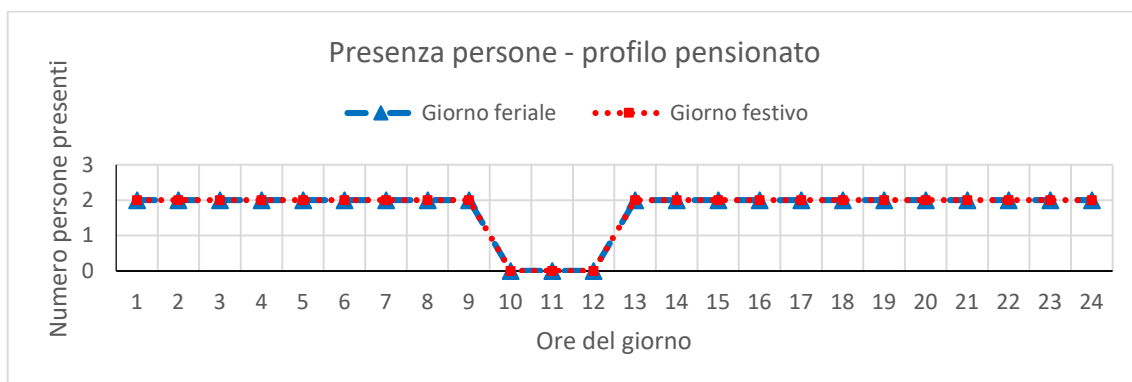


Figura 5. Profilo di presenza dei due utenti nella modalità “pensionato”.

L’impianto di riscaldamento si considera sempre spento di notte; l’accensione diurna, invece, avviene a partire dell’ora precedente alla presenza delle persone all’interno della zona termica (si veda la Figura 6 e Figura 6). Il profilo di accensione dell’impianto di raffrescamento è analogo a quello di riscaldamento, ma è attivo anche durante le ore notturne.

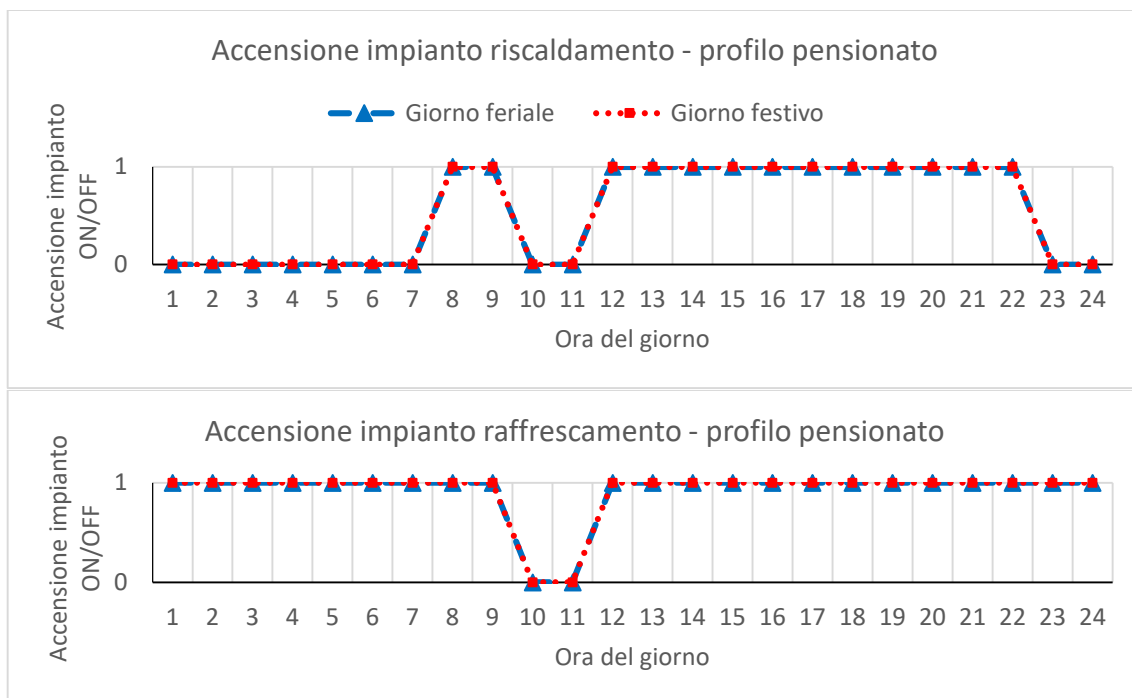


Figura 6. Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento nella modalità "pensionato".

I carichi elettrici associati a questo profilo sono quelli tipici di un uso residenziale (ad esempio frigorifero, congelatore, forno, lavatrice, phon, illuminazione). Si veda la Figura 7.

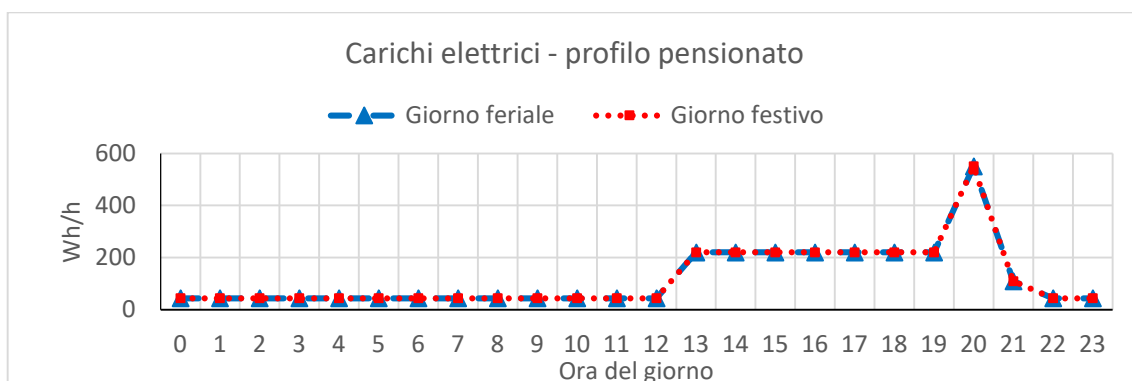


Figura 7. Profili di carichi elettrici nella modalità "pensionato".

Per i profili di acqua calda sanitaria si è fatto riferimento alla norma EN 16147:2017 [27], che nell'Appendice A riporta alcuni esempi di profilo di richiesta associati a delle "taglie", da 3 XS a 3 XL, in funzione della quantità di acqua utilizzata al giorno. In particolare, per il profilo pensionato, si è scelta la taglia XL, ritenuta adeguata a una famiglia di due persone.

La richiesta di acqua calda sanitaria associata a questo profilo è suddivisa in tre fasi (mattina, primo pomeriggio e sera), per una richiesta complessiva di 19 kWh giornalieri. Il grafico relativo è riportato in Figura 8.

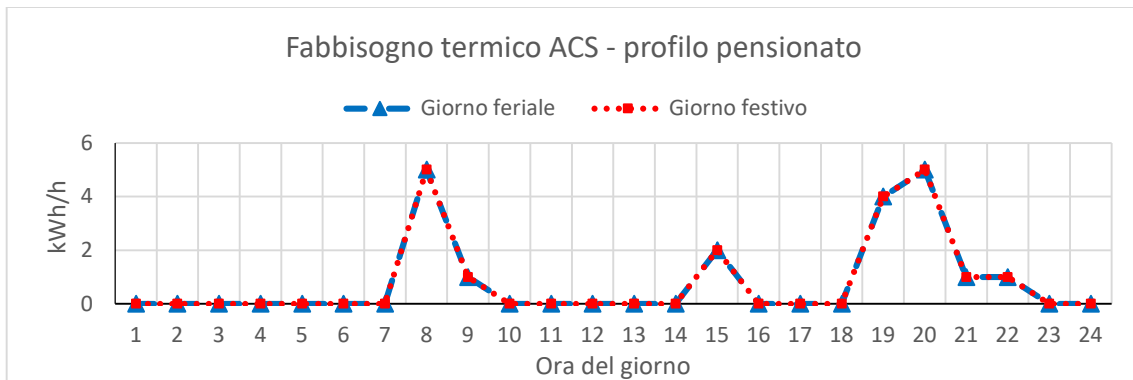


Figura 8. Profilo di fabbisogno energetico legato ad acqua calda sanitaria nella modalità “pensionato”.

Profilo famiglia

Il profilo “famiglia” descrive i profili di utilizzo di un edificio di tipo residenziale in cui sono presenti quattro persone. In accordo con le norme UNI EN ISO 13792:2012 [25] e UNI EN ISO 7730:2006 [26], si è ipotizzato un apporto sensibile pari a circa 100 W a persona (1 met).

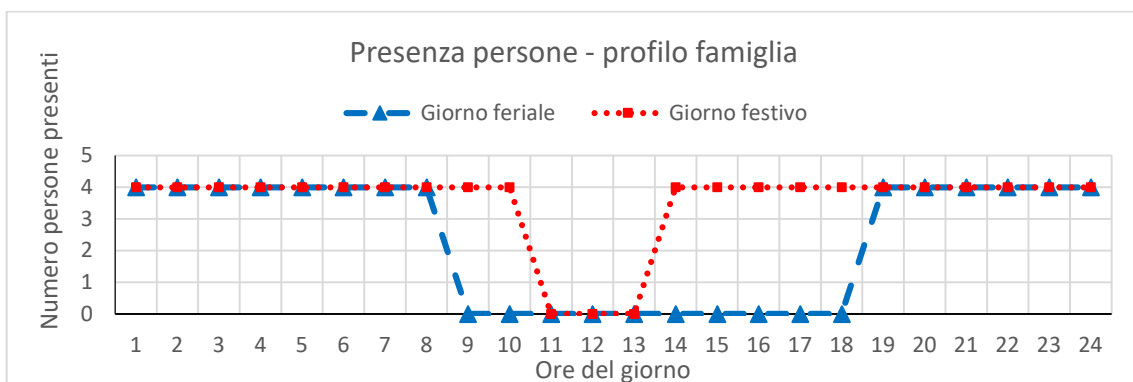


Figura 9. Profilo di presenza dei quattro utenti nella modalità “famiglia”.

L’impianto di riscaldamento si considera sempre spento di notte; l’accensione diurna, invece, avviene a partire dell’ora precedente alla presenza delle persone all’interno della zona termica (si veda la Figura 9 e Figura 10). Il profilo di accensione dell’impianto di raffrescamento è analogo a quello di riscaldamento, ma è attivo anche durante le ore notturne.

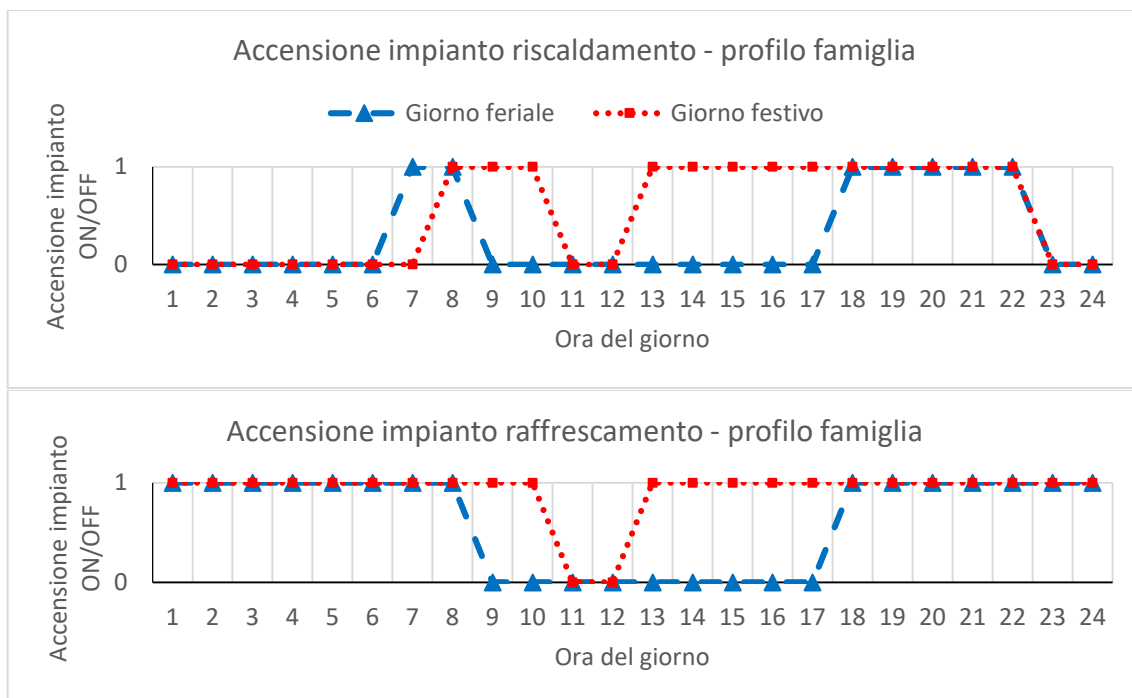


Figura 10. Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento nella modalità "famiglia".

I carichi elettrici associati a questo profilo sono quelli tipici di un uso residenziale (ad esempio frigorifero, congelatore, forno, lavatrice, phon, illuminazione). Si veda la Figura 11.

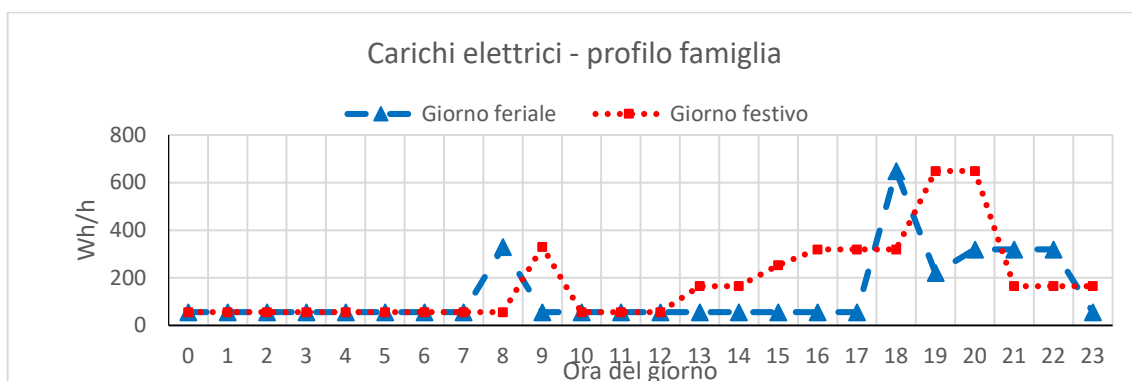


Figura 11. Profili di carichi elettrici nella modalità "famiglia".

Per i profili di acqua calda sanitaria si è fatto riferimento alla norma EN 16147:2017 [27], che nell'Appendice A riporta alcuni esempi di profilo di richiesta associati a delle "taglie", da 3 XS a 3 XL, in funzione della quantità di acqua utilizzata al giorno. In particolare, per il profilo "famiglia", si è scelta la taglia XXL, ritenuta adeguata a una famiglia di quattro persone. La richiesta di acqua calda sanitaria associata a questo profilo è suddivisa in tre fasi (mattina, primo pomeriggio e sera), per una richiesta complessiva giornaliera di 24 kWh. Il grafico relativo è riportato in Figura 12.

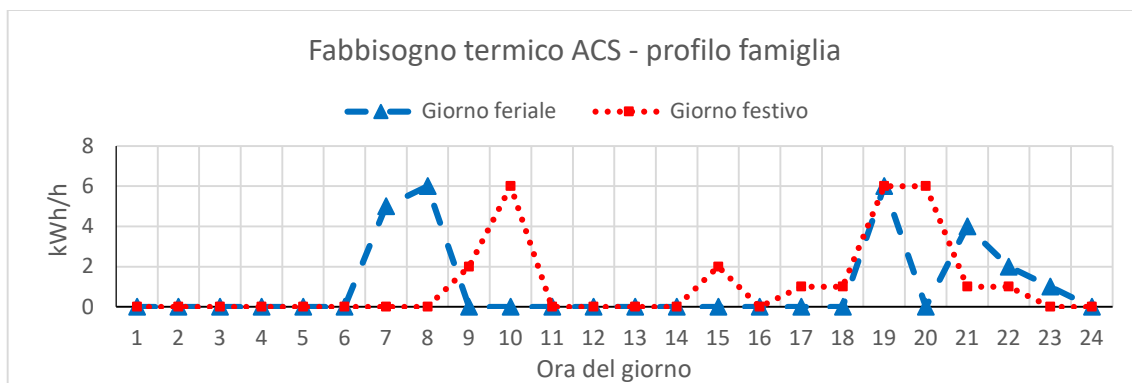


Figura 12. Profilo di fabbisogno energetico legato ad acqua calda sanitaria nella modalità “famiglia”.

Profilo lavoratore

Il profilo “lavoratore” descrive i profili di utilizzo di un edificio di tipo residenziale in cui è presente una sola persona. In accordo con le norme UNI EN ISO 13792:2012 [25] e UNI EN ISO 7730:2006 [26], si è ipotizzato un apporto sensibile pari a circa 100 W a persona (1 met).

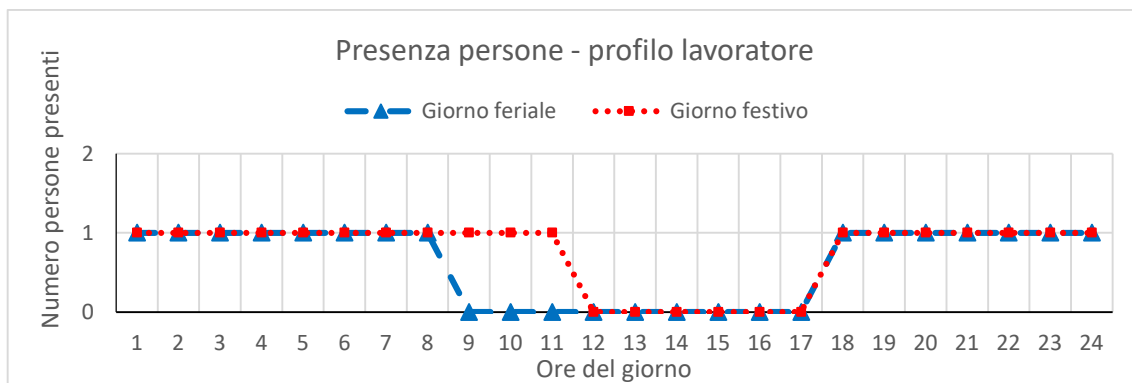


Figura 13. Profilo di presenza dell’utente nella modalità “lavoratore”.

L’impianto di riscaldamento si considera sempre spento di notte; l’accensione diurna, invece, avviene a partire dell’ora precedente alla presenza delle persone all’interno della zona termica (si veda la Figura 13 e Figura 14). Il profilo di accensione dell’impianto di raffrescamento è analogo a quello di riscaldamento, ma è attivo anche durante le ore notturne.

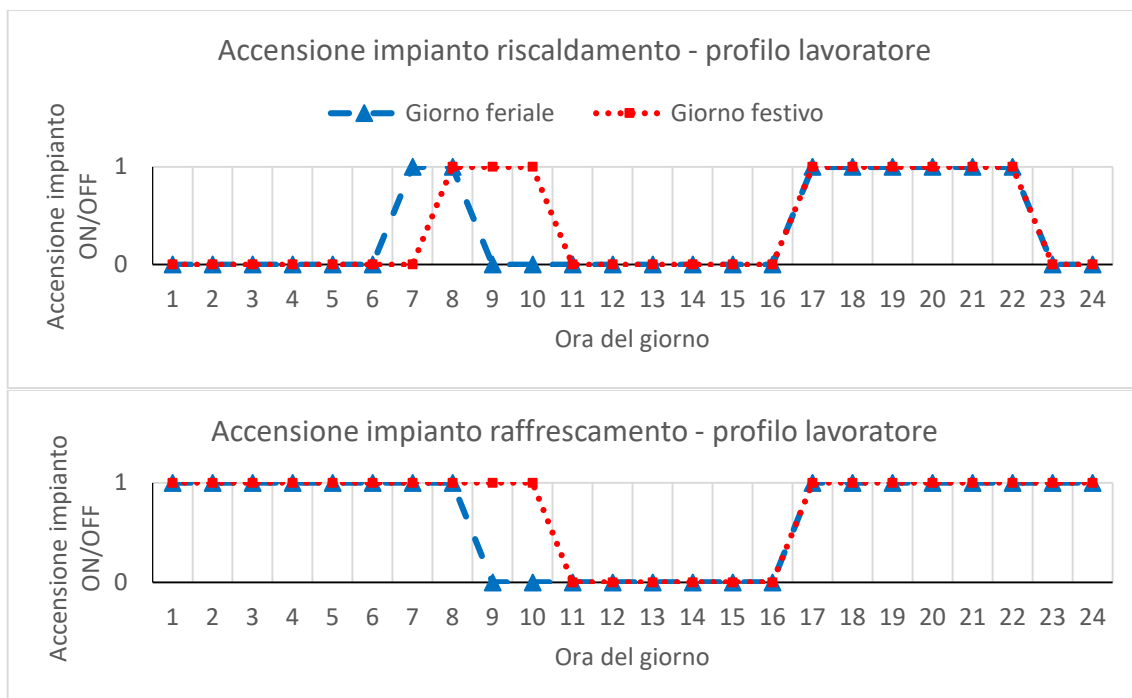


Figura 14. Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento nella modalità "lavoratore".

I carichi elettrici associati a questo profilo sono quelli tipici di un uso residenziale (ad esempio frigorifero, congelatore, forno, lavatrice, phon, illuminazione). Si veda la Figura 15.

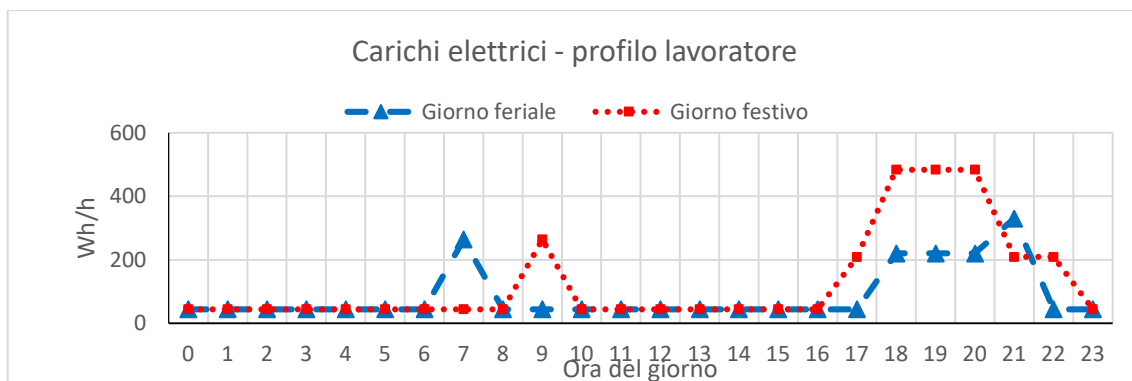


Figura 15. Profili di carichi elettrici nella modalità "lavoratore".

Per i profili di acqua calda sanitaria si è fatto riferimento alla norma EN 16147:2017 [27], che nell'Appendice A riporta alcuni esempi di profilo di richiesta associati a delle "taglie", da 3 XS a 3 XL, in funzione della quantità di acqua utilizzata al giorno. In particolare, per il profilo "lavoratore", si è scelta la taglia L, ritenuta adeguata a una famiglia di una sola persona. La richiesta di acqua calda sanitaria associata a questo profilo è suddivisa in tre fasi (mattina, primo pomeriggio e sera), per una richiesta complessiva giornaliera di 11 kWh. Il grafico relativo è riportato in Figura 16.

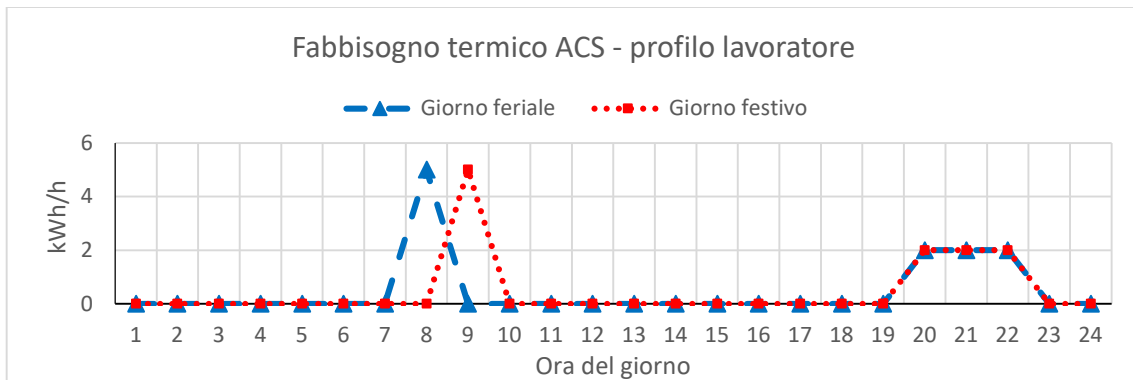


Figura 16. Profilo di fabbisogno energetico legato ad acqua calda sanitaria nella modalità "lavoratore".

Profilo impiegato

Il profilo "impiegato" descrive i profili di utilizzo di un edificio di tipo residenziale in cui è presente una sola persona. In accordo con le norme UNI EN ISO 13792:2012 [25] e UNI EN ISO 7730:2006 [26], si è ipotizzato un apporto sensibile pari a circa 125 W a persona (1.2 met).

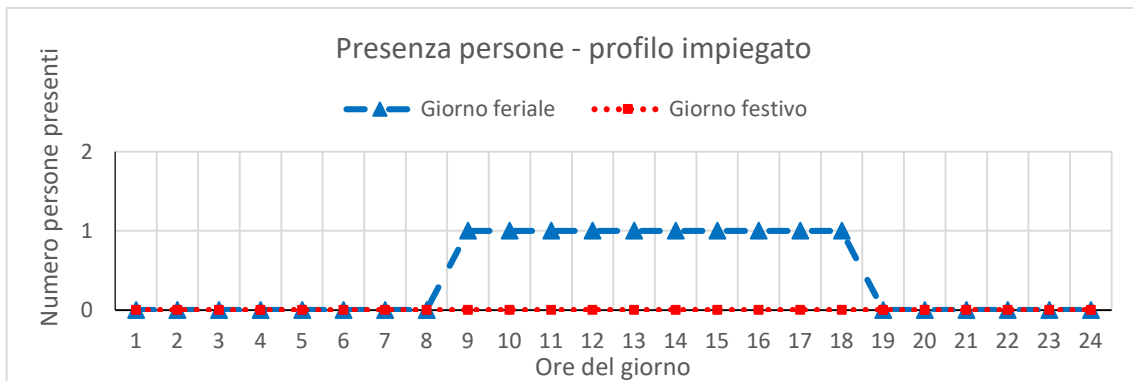


Figura 17. Profilo di presenza dell'utente nella modalità "impiegato".

L'impianto di riscaldamento/raffrescamento viene considerato acceso solo nei giorni feriali, dalle 7 alle 18, con l'accensione degli impianti che avviene un'ora prima dell'entrata a lavoro delle persone (si veda la Figura 17 e Figura 18). L'impianto è invece sempre spento nei giorni festivi.

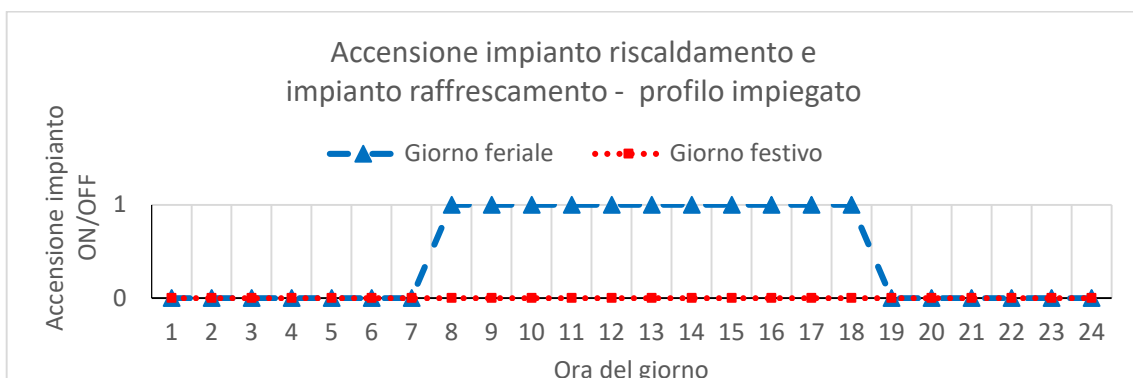


Figura 18. Profilo di accensione dell'impianto di riscaldamento/raffrescamento nella modalità "impiegato".

I carichi elettrici associati a questo profilo sono quelli tipici di un uso ufficio (ad esempio PC, stampante, illuminazione). Si veda la Figura 19.

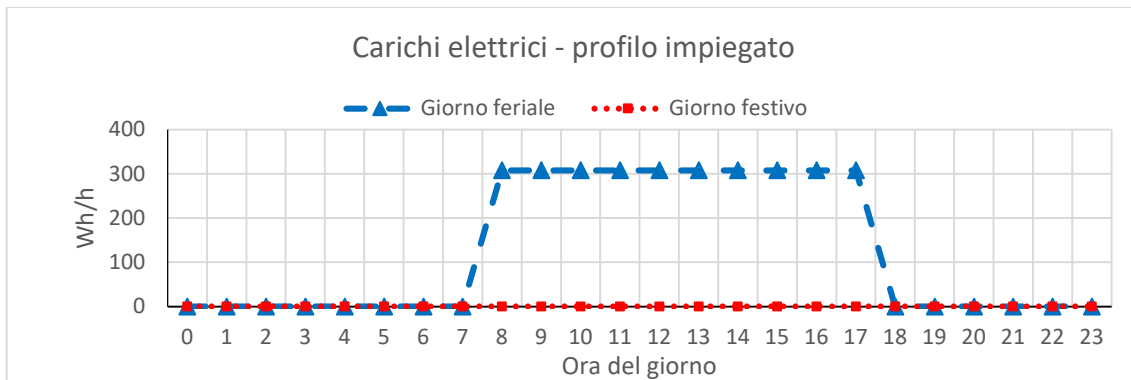


Figura 19. Profili di carichi elettrici nella modalità "impiegato".

L’impianto a servizio dell’ufficio considerato non è direttamente collegato a richieste di ACS; tuttavia si è ipotizzata la presenza di un servizio igienico comune con un prelievo giornaliero di 0.2 litri/(giorno m²) [28] servito da un boiler elettrico. La Figura 20 mostra il profilo di richiesta di ACS nelle varie ore del giorno.

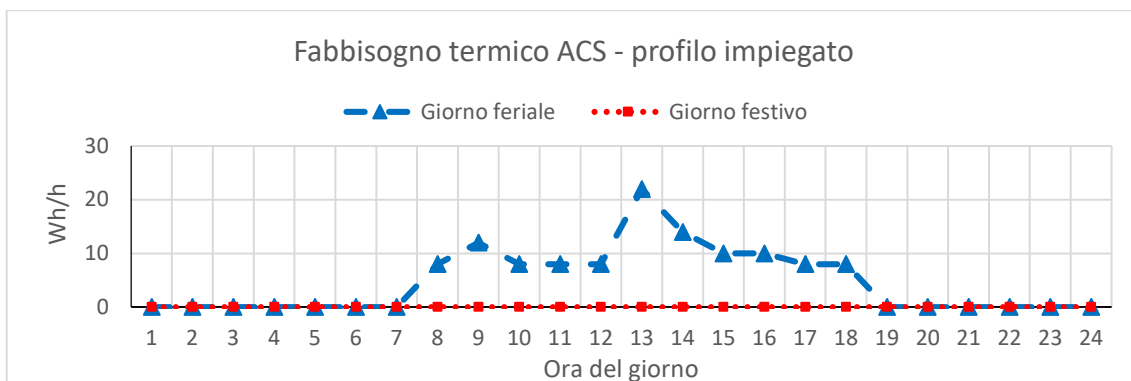


Figura 20. Profilo di fabbisogno energetico legato ad acqua calda sanitaria nella modalità "impiegato".

2.2.3 Tipologie di impianti e terminali

Gli edifici oggetto di analisi sono stati diversificati anche sulla base degli impianti presenti, in particolare per quanto riguarda le tipologie di terminali di emissione.

Appartamento

Per questa tipologia di edificio, si è ipotizzata la presenza di radiatori come terminali di impianto per riscaldamento. Il servizio è garantito dall’installazione di un sistema ibrido pompa di calore aria/acqua (elettrica e modulante) e caldaia a condensazione (a gas naturale e modulante). Quest’ultima può essere utilizzata anche per soddisfare il servizio di ACS in produzione istantanea. Si ipotizza che i fabbisogni di raffrescamento siano invece soddisfatti tramite un condizionatore split aria-aria dedicato, il cui consumo di energia elettrica andrà ad aggiungersi ai carichi richiesti per illuminazione e altre apparecchiature elettriche.

Per la valutazione delle richieste elettriche dovute al condizionatore, si è usato un modello ispirato a quello presentato dalla norme UNI EN 15316-4-2:2018 [29] e UNI/TS 11300-4:2016 [30], le quali calcolano la richiesta di energia elettrica in ingresso alla macchina riferendosi al suo *rendimento di secondo principio* o *exergetico*, ovvero:

$$\eta_c^II = \frac{EER}{EER_{id}} = \frac{EER}{\left(\frac{T_C + 273.15}{T_H - T_C}\right)}$$

dove T_C e T_H sono le temperature di riferimento per la sorgente fredda e calda del condizionatore (es. aria interna, T_{int} , e temperatura esterna, T_{ext} , alla zona termica). Usando i dati di prestazione delle macchine tratti dai cataloghi dei produttori, riferiti alle condizioni di rating imposte dalla UNI EN 14511-2:2018 [31], si

è ricavato un valore medio di $\eta_C^H = 0.12$ per condizionatori split aria-aria di potenza utile inferiore a 5 kW. Tale valore viene assunto costante in qualsiasi condizione di funzionamento.

Per tenere conto del fatto che in alcune ore del giorno può esserci richiesta di energia per raffrescamento anche se la temperatura esterna è minore della temperatura interna, si è modificata la formula dell' EER_{id} , utilizzando $T_C = T_{int} - 5^\circ C$ e $T_H = T_{ext} + 5^\circ C$, considerando quindi una temperatura equivalente del refrigerante nell'evaporatore e nel condensatore della macchina frigo).

In definitiva, l'energia elettrica aggiuntiva dovuta al condizionamento estivo per raffrescamento è stata calcolata come:

$$E_{el}(t) = \frac{Q_C(t)}{\eta_C^H \left(\frac{T_C(t) + 273.15}{T_H(t) - T_C(t)} \right)}$$

A causa della mancanza di una copertura ad uso esclusivo, nel caso di appartamento non viene considerata la possibilità di installare pannelli solari o moduli fotovoltaici.

Villa con copertura piana o con tetto a falda

Per questa tipologia di edificio, si è ipotizzata l'installazione di pannelli radianti a pavimento sull'80% della superficie calpestabile. In questo caso, i pannelli radianti possono soddisfare sia il servizio di riscaldamento che di raffrescamento. Il generatore per riscaldamento è un sistema ibrido pompa di calore aria/acqua (elettrica e modulante) e caldaia a condensazione (a gas naturale e modulante); la pompa di calore è reversibile, cioè può essere usata anche in modalità macchina frigorifera, per il raffrescamento estivo. È inoltre previsto un sistema di accumulo caldo, a temperatura compatibile con i servizi di riscaldamento e ACS. Avendo una copertura ad uso esclusivo, è prevista la possibilità di installare pannelli solari termici, collegati all'accumulo, e moduli fotovoltaici per la riduzione dello scambio elettrico con la rete.

Ufficio

Per soddisfare entrambe le richieste di riscaldamento e raffrescamento, si è ipotizzata l'installazione di fancoil, tipici terminali di emissione nel caso terziario. Il generatore scelto è, anche in questo caso, un sistema ibrido pompa di calore aria/acqua reversibile (elettrica e modulante) e caldaia a condensazione (a gas naturale e modulante). Essendo limitate le richieste di ACS, non viene considerata la possibilità di installazione di pannelli solari termici sulla copertura. Queste richieste saranno invece soddisfatte da piccoli scaldacqua elettrici, il cui consumo di energia elettrica andrà ad aggiungersi ai carichi richiesti per illuminazione e altre apparecchiature elettriche. È invece prevista l'installazione di moduli fotovoltaici, collegati a batterie ad accumulo elettrochimico, per la riduzione dello scambio elettrico con la rete. Viene inoltre prevista l'installazione di un serbatoio di accumulo freddo, a temperatura compatibile col servizio di raffrescamento.

2.3 Calcolo e analisi dei profili di fabbisogno di energia per gli edifici-tipo

2.3.1 Ottenimento fabbisogni di involucro (riscaldamento e raffrescamento)

I fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento ideali di involucro per i dieci edifici-tipo sono stati calcolati con SEAS Light, individuato come modello più idoneo per ottenere i risultati desiderati con un buon livello di accuratezza e ridotto costo computazionale. Rispetto al software TRNSYS 17, SEAS Light è infatti più indicato ad essere inserito all'interno di controllori integrati in apparati sperimentali, per la sua rapidità nei calcoli e per la possibilità di un progressivo aggiornamento automatico dei coefficienti di taratura, da effettuarsi in base a eventuali dati di monitoraggio raccolti durante il periodo di funzionamento.

Per i dieci edifici-tipo, si è proceduto ad una prima calibrazione dei coefficienti di taratura β_H , β_C e $\alpha_{sol,C}$ usando i risultati delle relative simulazioni effettuate tramite TRNSYS 17, per l'intera stagione di riscaldamento e raffrescamento. I valori ricavati di β_H , β_C e $\alpha_{sol,C}$ sono riportati in Tabella 10, insieme ai valori di fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento stagionali.

Tabella 10. Valori dei coefficienti di taratura e dei fabbisogni stagionali ideali di raffrescamento e riscaldamento.

ID	$\alpha_{sol,C}$	β_C	β_H	Q_C [kWh/m ²]	Q_H [kWh/m ²]
1	0.35	0.81	1.07	10.1	18.1
2	0.54	1.01	0.99	13.0	19.6
3	0.31	0.72	1.14	6.3	17.1
4	0.80	0.90	0.73	9.0	16.0
5	0.72	1.16	0.76	2.3	32.5
6	0.71	1.01	0.77	3.5	52.8
7	0.34	0.75	0.73	1.9	53.2
8	0.24	1.79	0.74	0.4	37.8
9	1.04	1.00	0.42	47.4	4.9
10	1.03	1.00	0.43	47.4	5.1

Sebbene i coefficienti di taratura siano ricavati da una calibrazione su scala stagionale, SEAS Light si dimostra accurato anche per l'analisi dei consumi su scala di tempo giornaliera. In Figura 21, Figura 22 e Figura 23 sono confrontati i risultati di SEAS Light e TRNSYS 17 in termini di richieste di riscaldamento e raffrescamento giornaliere per tre dei dieci edifici-tipo. Il buon valore del coefficiente di determinazione, R^2 , dimostra l'efficacia del processo di calibrazione e del modello SEAS Light nella simulazione dei fabbisogni effettivi dell'edificio. Come ulteriore esempio dell'efficacia di SEAS Light, in Figura 24, si riporta i profili di fabbisogno giornalieri per le intere stagioni di riscaldamento e raffrescamento dell'edificio-tipo ID 2.

Il modello SEAS Light risulta un utile strumento anche per la valutazione dei profili orari. Sebbene meno accurato rispetto al calcolo del consumo giornaliero, la dinamica del profilo di fabbisogno individuata da SEAS Light risulta sufficientemente simile a quella valutata con TRNSYS 17. Ad esempio, in Figura 25, si vede come per entrambi i modelli il profilo di fabbisogno di riscaldamento risulti caratterizzato da una forte richiesta mattutina a seguito dell'intermittenza notturna e da una minore, ma costante, richiesta durante le ore pomeridiane e serali. Il profilo di fabbisogno di raffrescamento, mostrato in Figura 26, risulta invece costante durante le ore pomeridiane e serali.

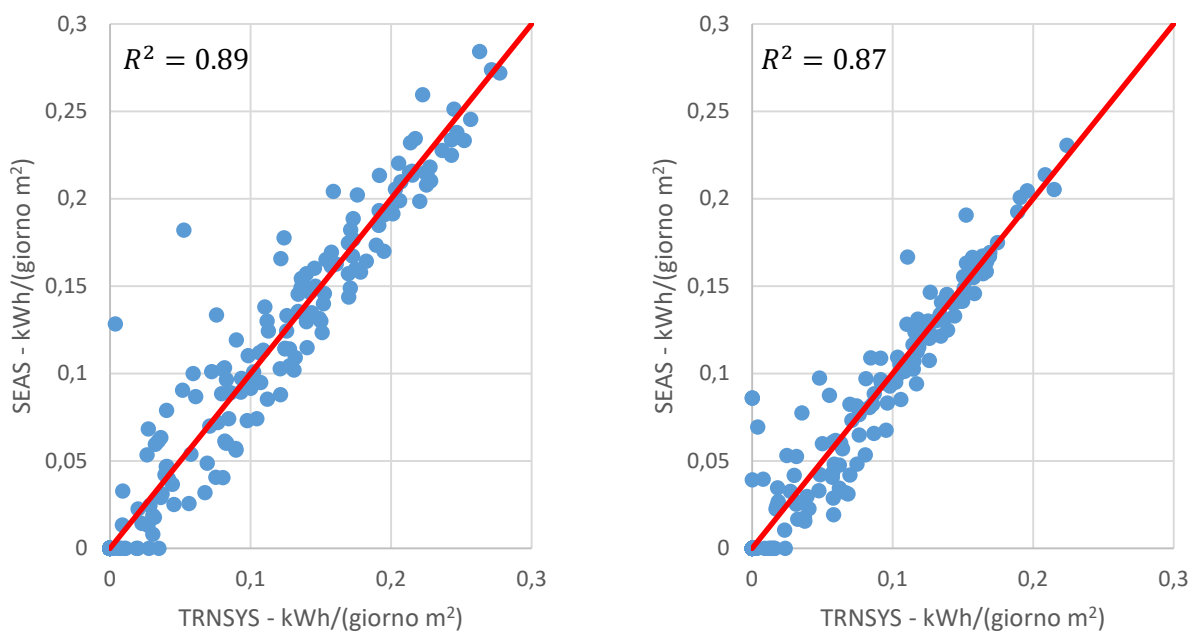


Figura 21. Coefficiente di determinazione tra SEAS Light e TRNSYS per l'edificio-tipo ID 2.

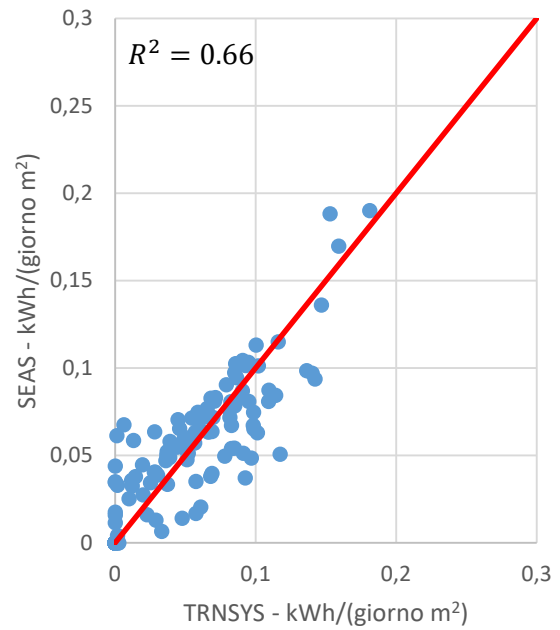
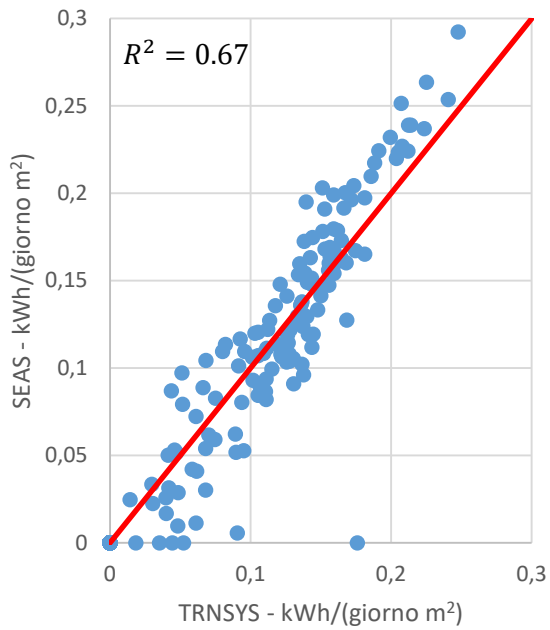


Figura 22. Coefficiente di determinazione tra SEAS Light e TRNSYS per l'edificio-tipo ID 3.

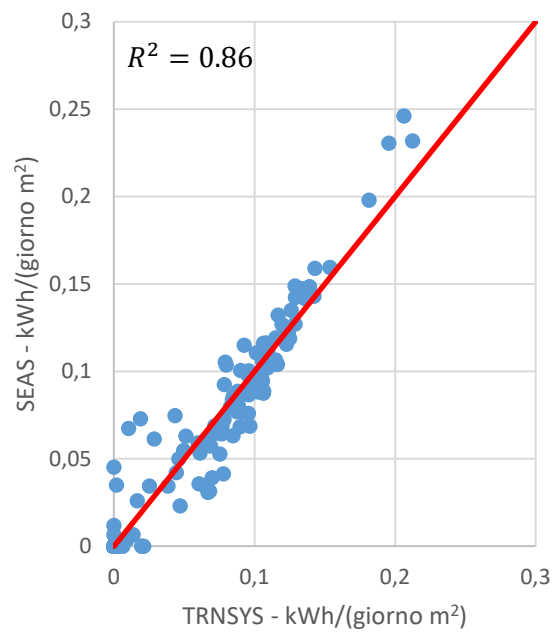
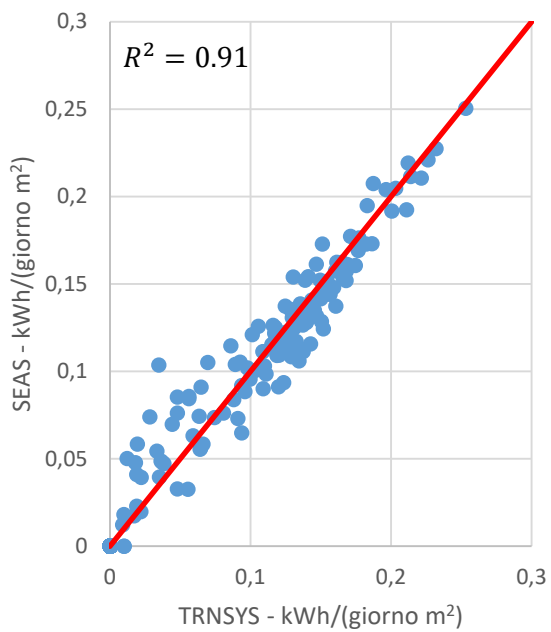


Figura 23. Coefficiente di determinazione tra SEAS Light e TRNSYS per l'edificio-tipo ID 4.

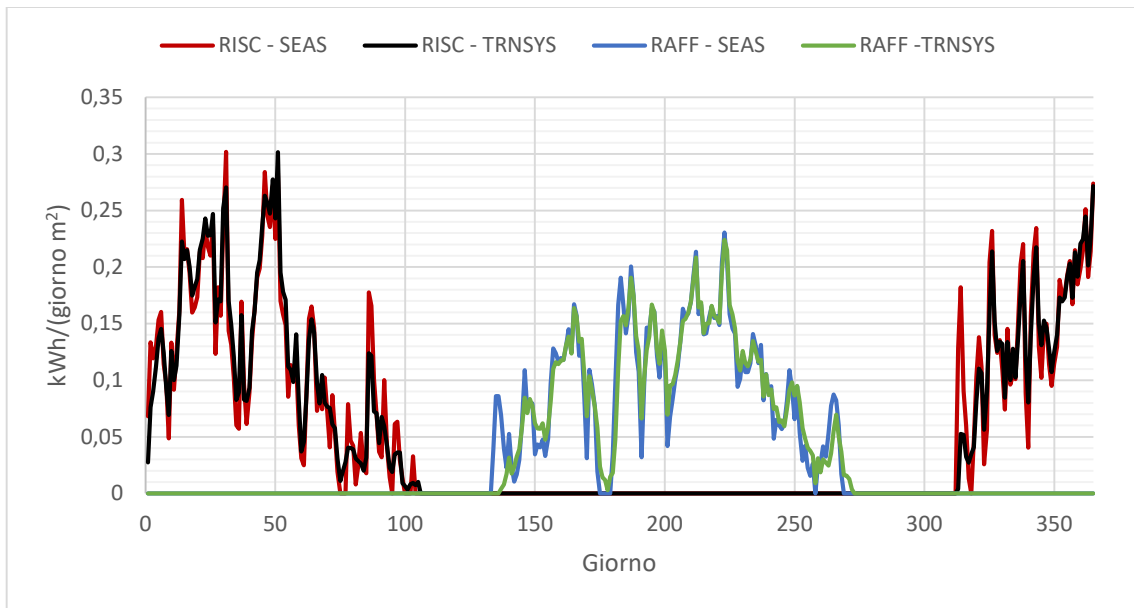


Figura 24. Confronto tra il profilo di fabbisogno giornaliero valutato con SEAS Light e TRNSYS per l'edificio-tipo ID 2.

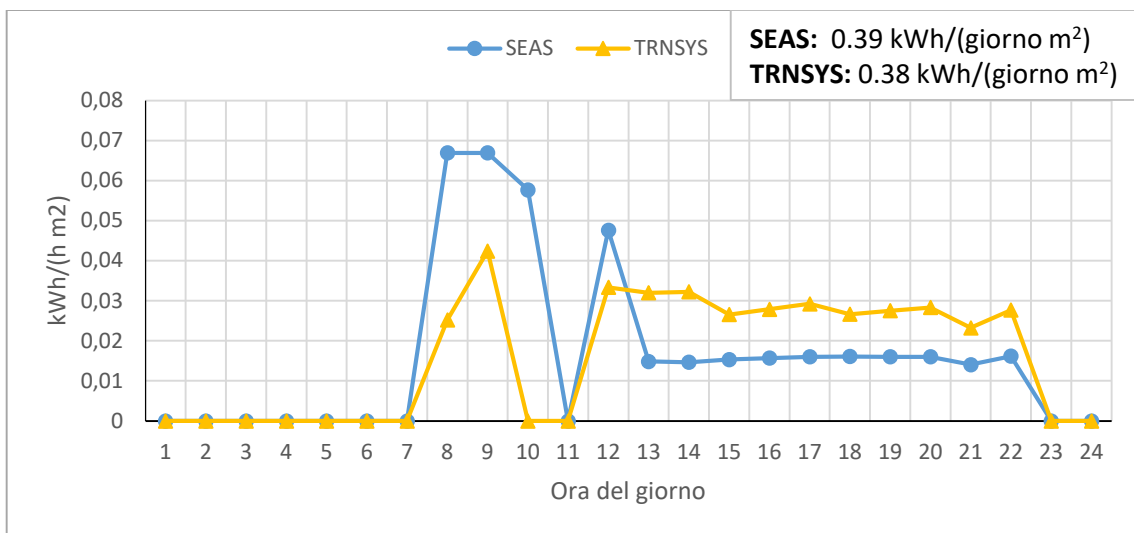


Figura 25. Giorni-tipo di riscaldamento stagionali per l'edificio-tipo ID 6.

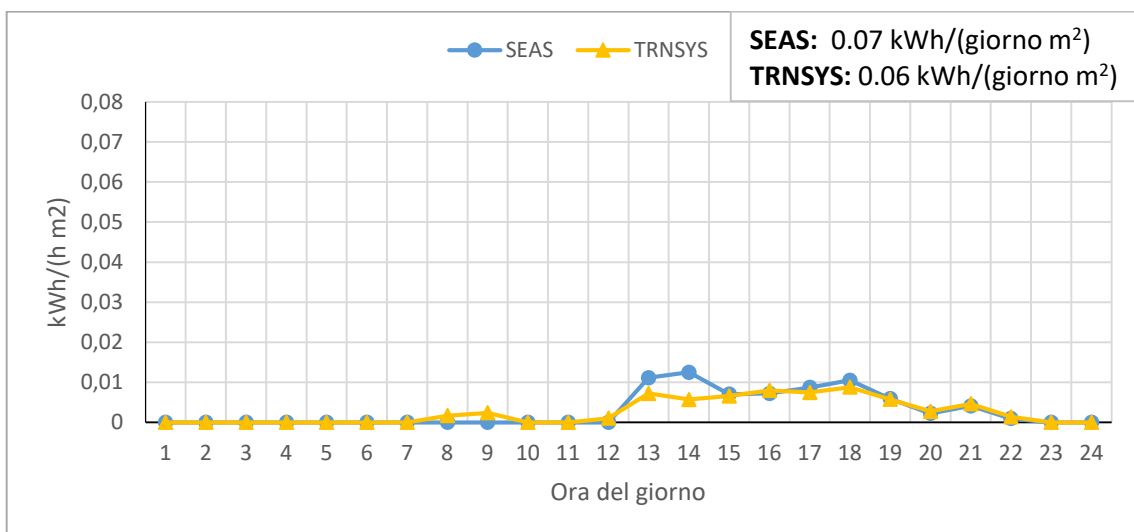


Figura 26. Giorni-tipo di raffrescamento stagionali per l'edificio-tipo ID 6.

2.3.2 Ottenimento fabbisogni elettrici e ACS

I fabbisogni dovuti a carichi elettrici e a richieste per ACS sono stati calcolati in base ai profili indicati nella Sezione 2.2.2, dipendenti dalla tipologia di utenza e delle caratteristiche degli edifici. In Tabella 11 sono riportate le richieste annuali dovute ad ACS, al carico elettrico dovuto alle esigenze di raffrescamento (solo per gli appartamenti poiché dotati di pompe di calore aria-aria) e ai carichi elettrici dovuti ad illuminazione e varie apparecchiature.

Tabella 11. Fabbisogni annuali per ACS e carichi elettrici (suddivisi in carico elettrico dovuto al raffrescamento estivo e carico elettrico per illuminazione e altre apparecchiature) per i 10 edifici-tipo.

ID	$Q_{ACS,tot}$ [kWh/m ²]	$Q_{el,chill}$ [kWh/m ²]	Q_{el} [kWh/m ²]
1	109.94	2.76	15.95
2	87.04	4.00	13.10
3	50.39	2.27	10.88
4	43.78	-	6.59
5	43.78	-	6.59
6	43.78	-	6.59
7	55.30	-	8.02
8	25.35	-	5.47
9	7.65	-	40.60
10	7.65	-	40.60

2.4 Individuazione dei “profili-tipo” più rappresentativi per l’implementazione nell’apparato sperimentale

A partire dai profili di carico annuali valutati con SEAS Light e secondo le assunzioni descritte nelle Sezioni 2.2 e 2.3, si sono individuati i classi di utilizzo dell’edificio che fungeranno da riferimento per i test sperimentali. Nello specifico, si sono individuati dei profili-tipo per il fabbisogno di riscaldamento e raffrescamento, che permettono di visualizzare le caratteristiche e gli andamenti principali dei carichi termici per i dieci edifici-tipo selezionati. Dall’analisi dei valori orari di Q_H e Q_C , attraverso una tecnica di *centroid-based clustering* [32], si sono selezionati i giorni-tipo raggruppati per mese e per giorno della settimana.

Questa tipologia di analisi ha evidenziato l’elevata dipendenza della dinamica dei profili di carico dagli apporti interni e dai profili di gestione di impianto. Sebbene i consumi siano ovviamente determinati dal contesto climatico, dalle dimensioni e dal rapporto superficie-volume dell’edificio, sono presenti evidenti analogie per quanto riguarda l’andamento orario dei fabbisogni termici su base giornaliera. Ad esempio, nei casi ID 4 e ID 6 (vedi Figura 38 e Figura 41), il clima più rigido di Torino si traduce in un maggiore fabbisogno di energia giornaliera rispetto allo stesso edificio posizionato a Catania, pur mantenendo un analogo andamento orario di Q_H , ovvero: una breve e elevata richiesta nelle ore mattutine, seguita da una richiesta moderata e costante nelle ore tardo-pomeridiane. In particolare, si sono individuate e raggruppate le seguenti classi di profilo:

- Classe “pensionato”, che si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana, sia per il riscaldamento (vedi Figura 31, Figura 38, Figura 41, Figura 42) che per il raffrescamento (vedi Figura 32, Figura 39, Figura 40).
- Classe “famiglia”, che si caratterizza per avere profili di carico che si differenziano tra i giorni feriali e i giorni festivi, sia nella stagione di riscaldamento (vedi Figura 29, Figura 35, Figura 36) che di raffrescamento (vedi Figura 30, Figura 37), indipendentemente dalla tipologia di edificio.
- Classe “lavoratore”, che si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana, sia per riscaldamento che per raffrescamento, a differenza del cluster “famiglia”. Tuttavia, l’andamento si discosta anche da quello del “pensionato” a causa di un diverso profilo di occupazione dell’edificio (vedi Figura 27, Figura 28).

- Classe “ufficio”, che si caratterizza per avere richieste di riscaldamento diverse tra il lunedì e gli altri giorni lavorativi, a causa dei due giorni di spegnimento dell’impianto durante il fine settimana, che comportano un maggiore richiesta di potenza il lunedì mattina per riportare in temperatura la zona termica (vedi Figura 33). Durante la stagione estiva, invece, non si notano significative differenze tra i giorni lavorativi, poiché l’inerzia termica dell’edificio concentra la richiesta di raffrescamento nelle ore serali (vedi Figura 34).

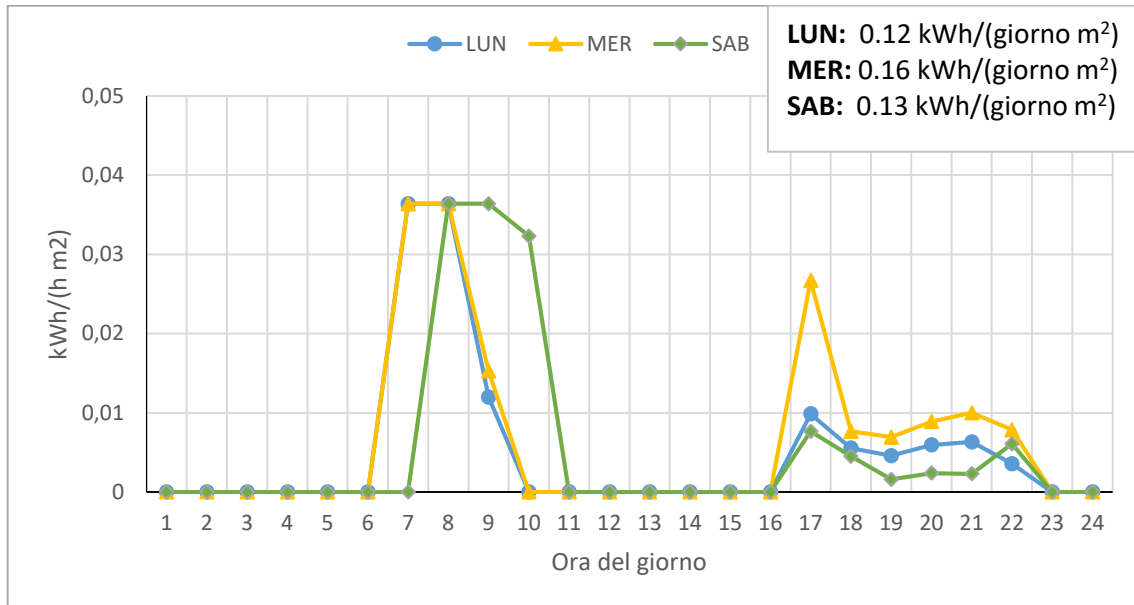


Figura 27. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 3 (Appartamento, Lavoratore, Catania).

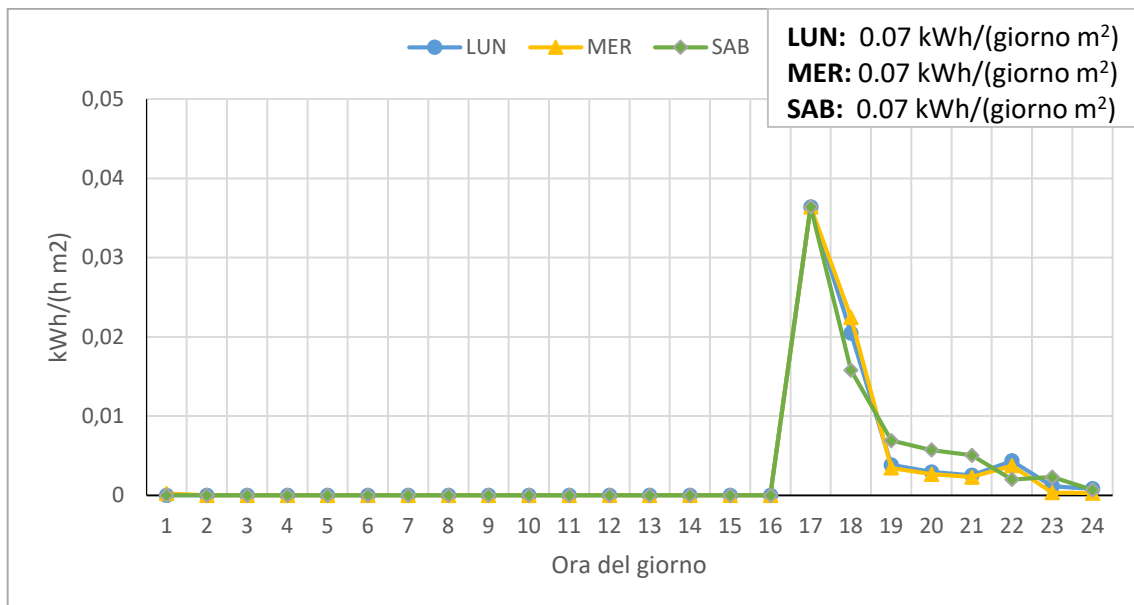


Figura 28. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 3 (Appartamento, Lavoratore, Catania).

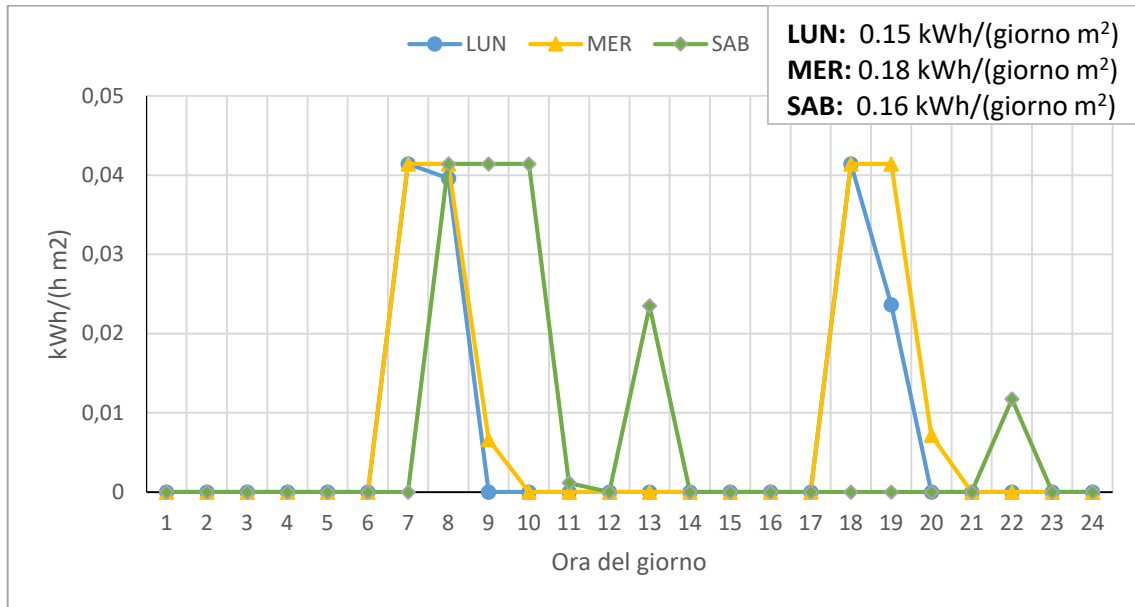


Figura 29. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 1 (Appartamento, Famiglia, Pisa).

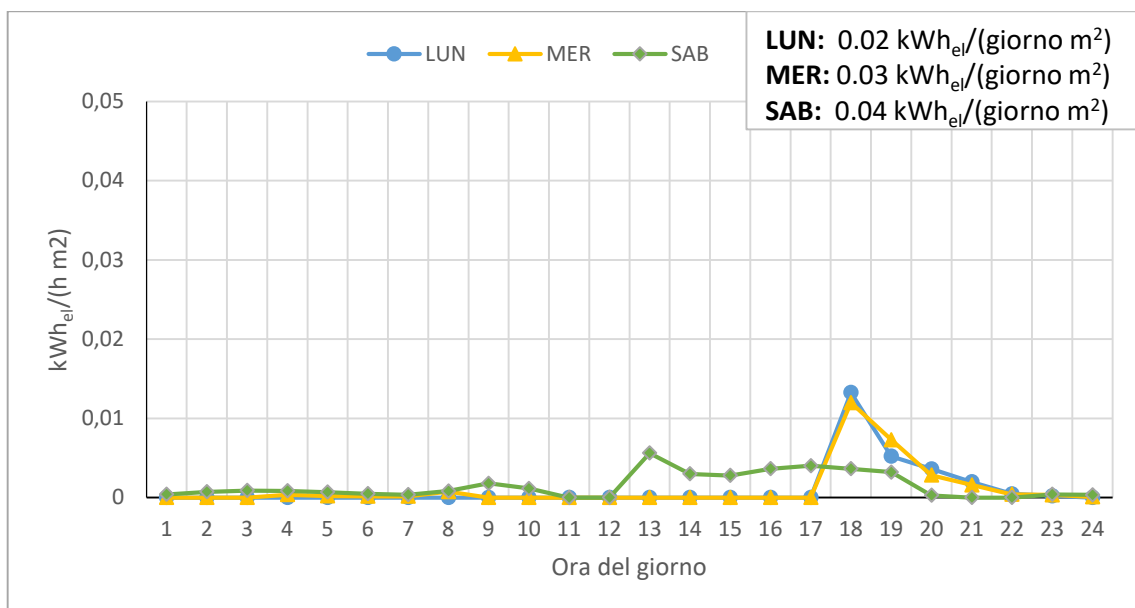


Figura 30. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 1 (Appartamento, Famiglia, Pisa).

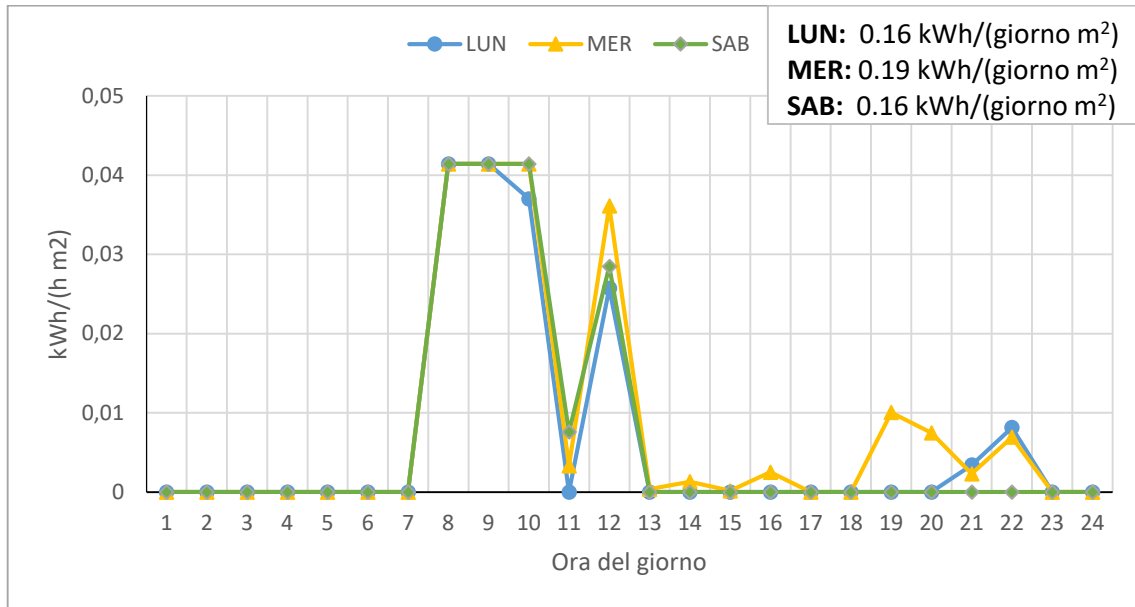


Figura 31. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 2 (Appartamento, Pensionato, Pisa).

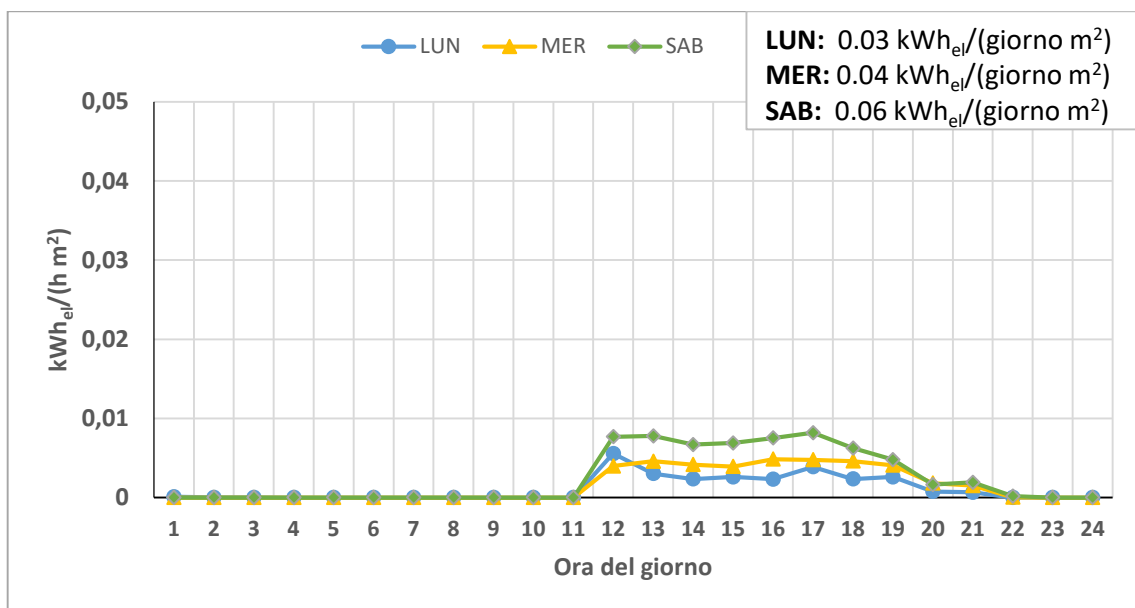


Figura 32. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 2 (Appartamento, Pensionato, Pisa).

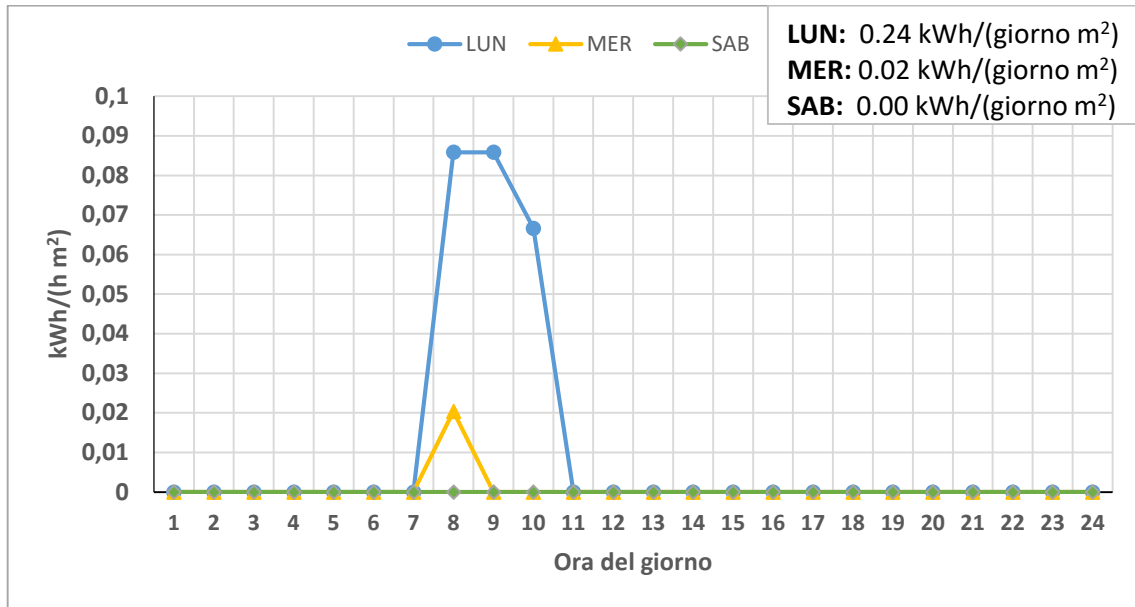


Figura 33. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 9 (Ufficio, impiegato, Pisa).

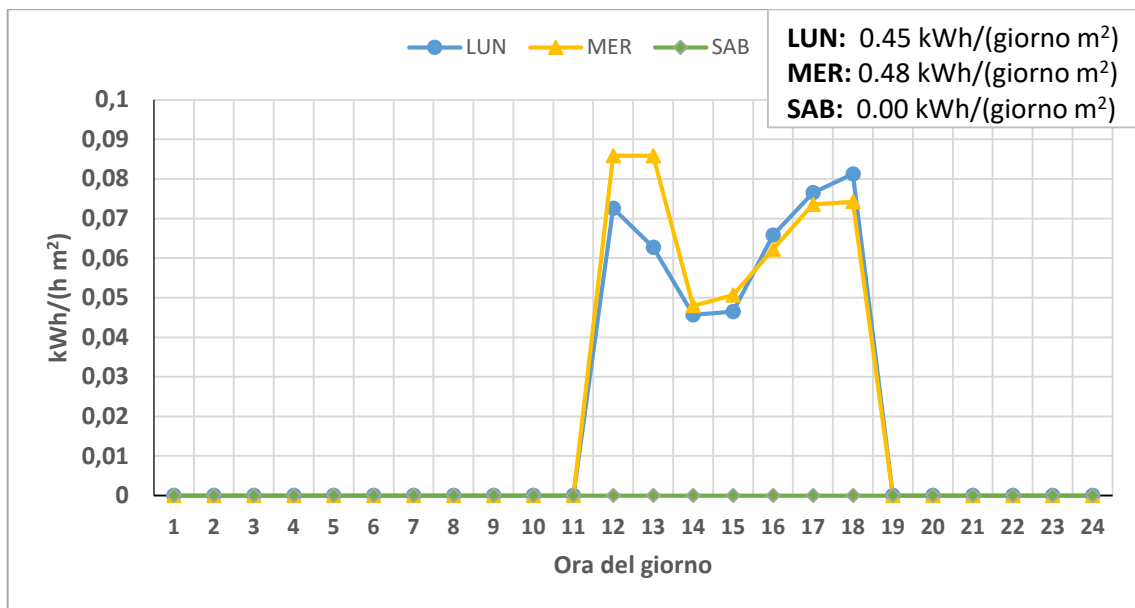


Figura 34. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 9 (Ufficio, impiegato, Pisa).

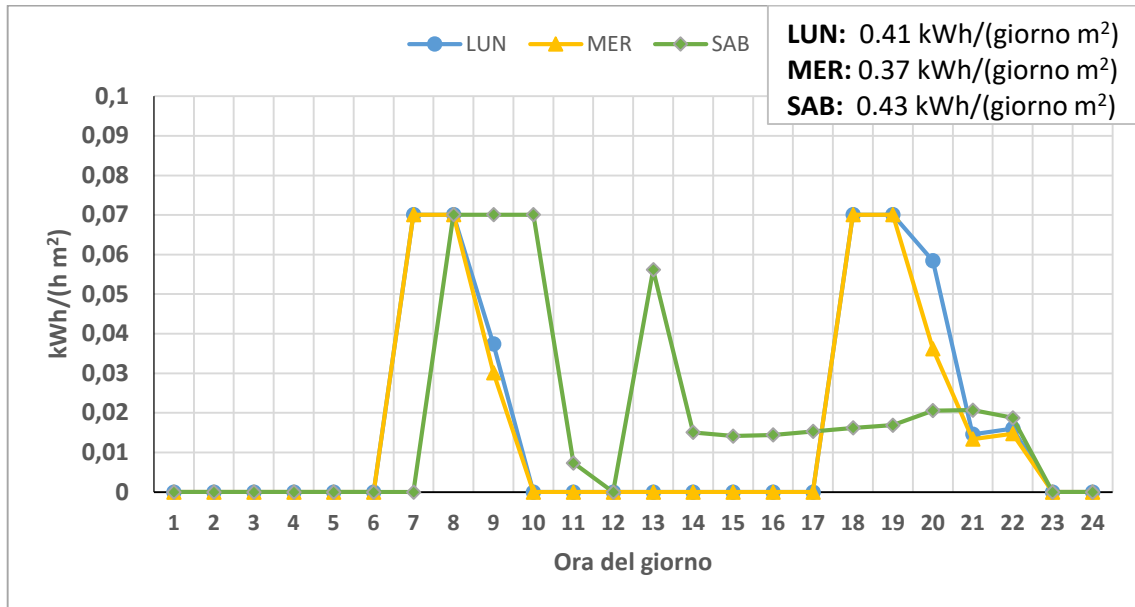


Figura 35. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 7 (Villa tetto a falda, famiglia, Torino).

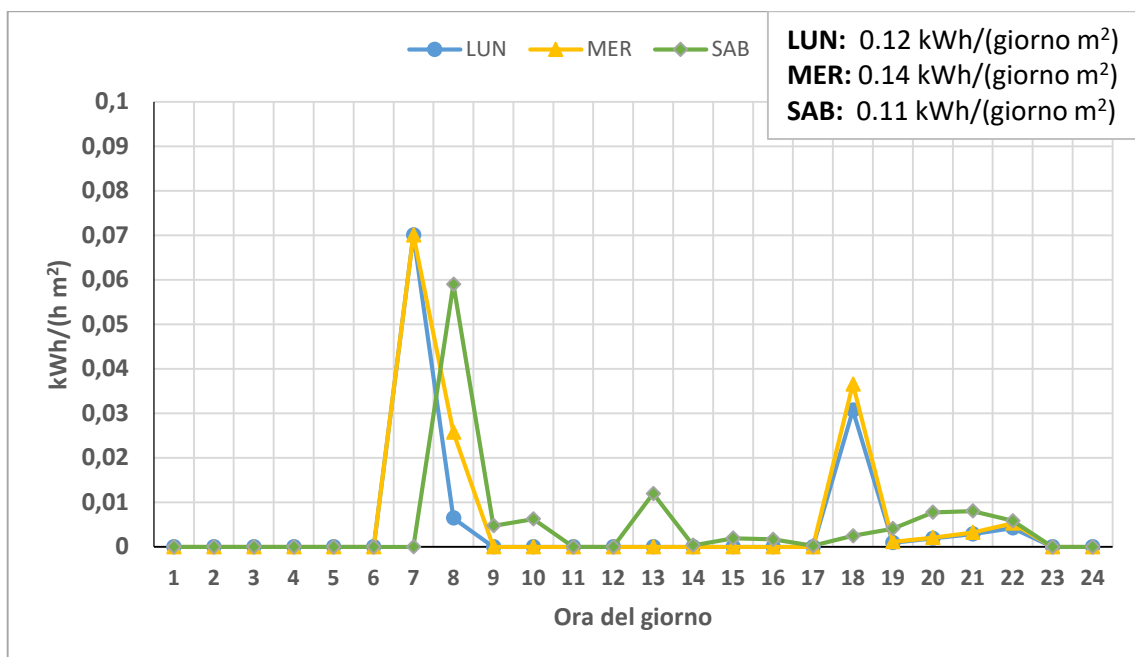


Figura 36. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di aprile per l'edificio-tipo ID 7 (Villa tetto a falda, famiglia, Torino).

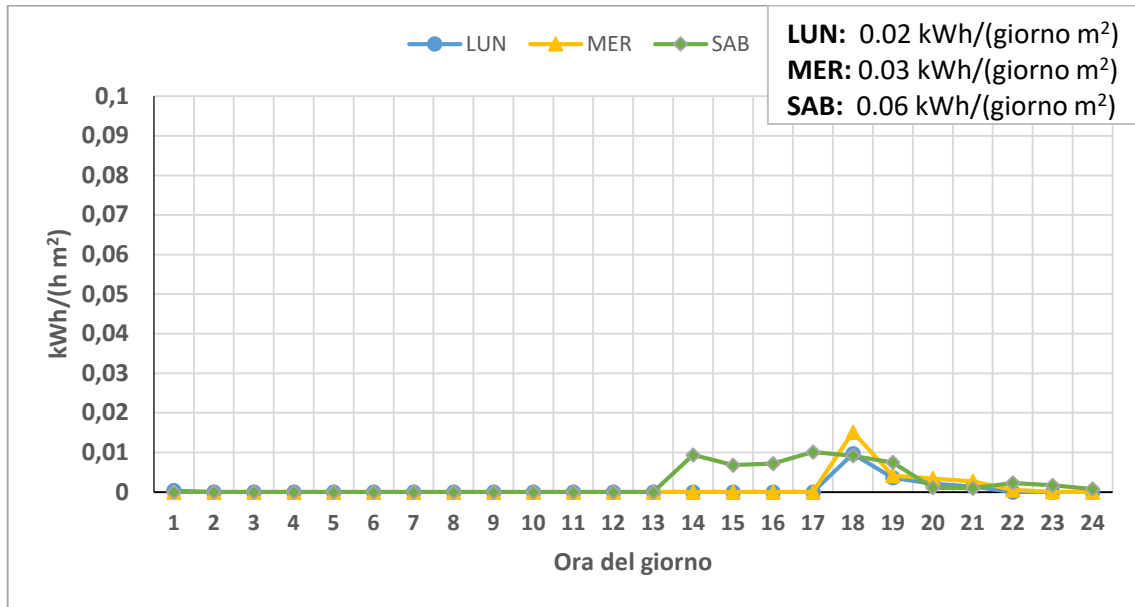


Figura 37. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 7 (Villa tetto a falda, famiglia, Torino).

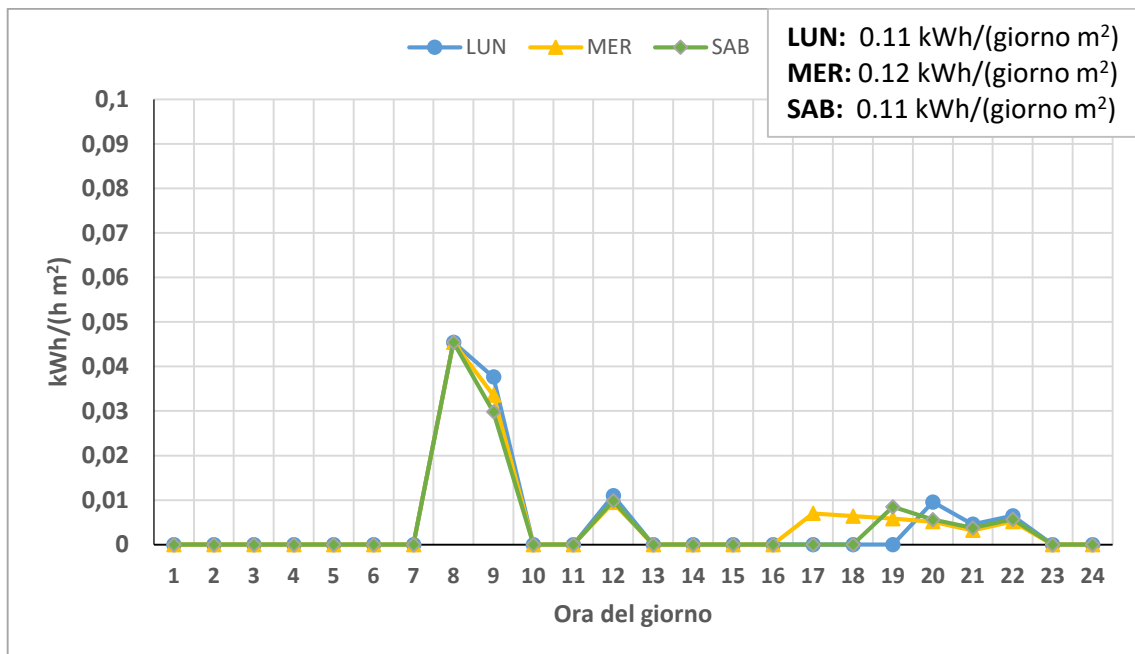


Figura 38. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 4 (Villa copertura orizzontale, pensionato, Catania).

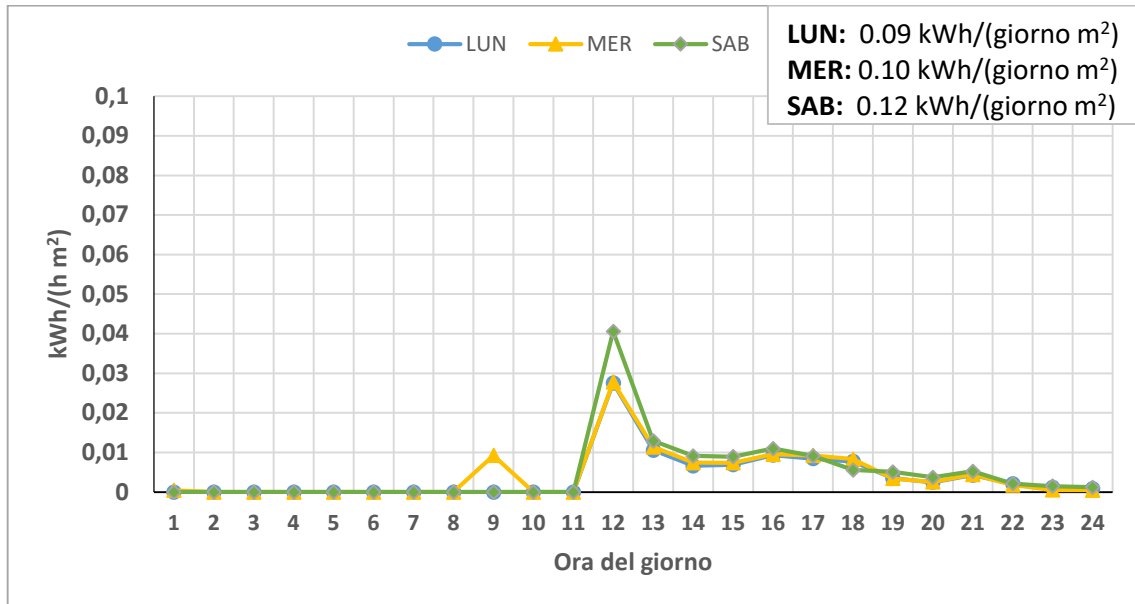


Figura 39. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di luglio per l'edificio-tipo ID 4 (Villa copertura orizzontale, pensionato, Catania).

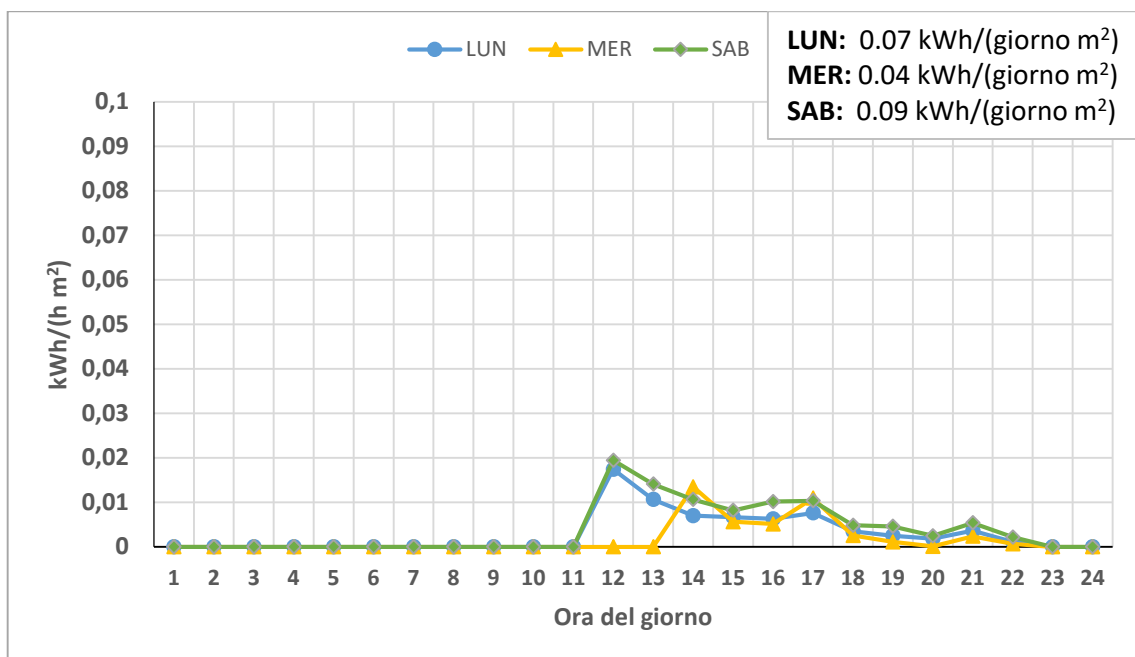


Figura 40. Giorni-tipo di raffrescamento per il mese di settembre per l'edificio-tipo ID 4 (Villa copertura orizzontale, pensionato, Catania).

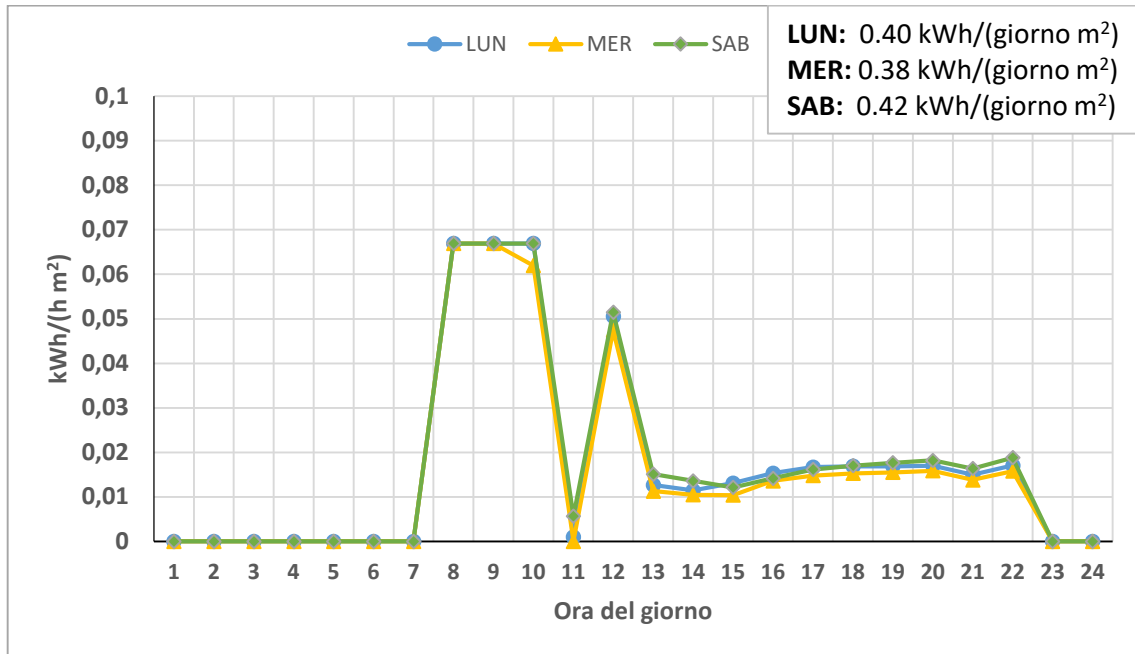


Figura 41. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di gennaio per l'edificio-tipo ID 6 (Villa copertura orizzontale, pensionato, Torino).

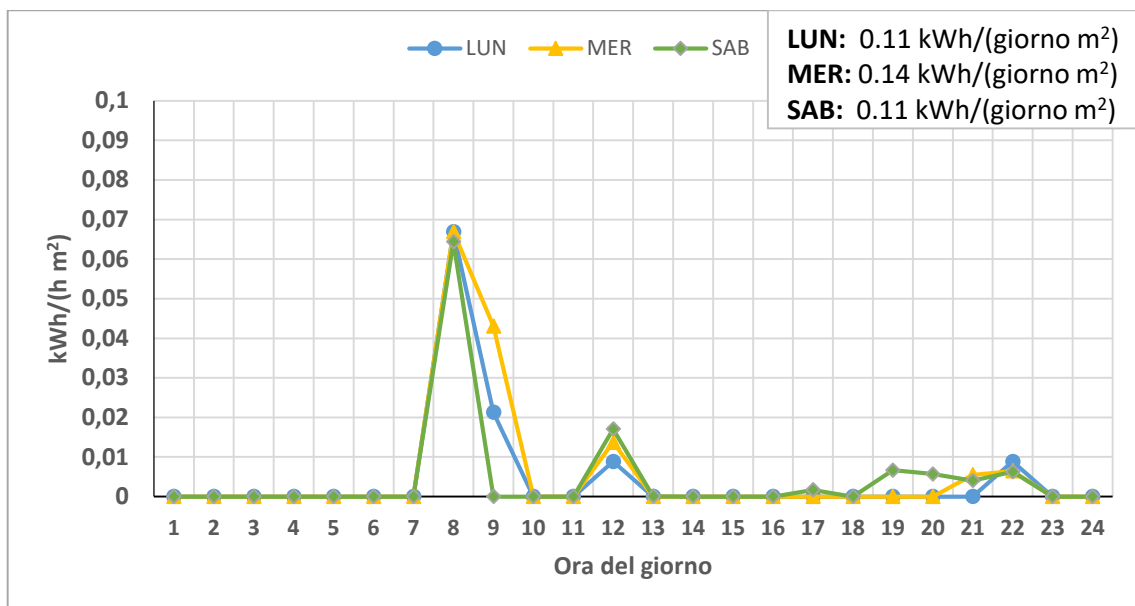


Figura 42. Giorni-tipo di riscaldamento per il mese di aprile per l'edificio-tipo ID 6 (Villa copertura orizzontale, pensionato, Torino).

3 Messa a punto di un apparato sperimentale emulatore di edifici ad alta efficienza alimentati con sistemi ibridi a pompe di calore

Le strategie di controllo per sistemi edificio-impianto sono tipicamente analizzate con un approccio simulativo utilizzando algoritmi di predizione della risposta dinamica del sistema edificio-impianto in funzione di azioni di controllo ottimizzato (es. *model predictive control*, algoritmi genetici). L'accuratezza e la rappresentatività di qualunque risultato simulativo dipendono però dalle scelte e dall'accuratezza dei modelli fisico-matematici utilizzati. Per questo motivo, l'esecuzione di campagne sperimentali rappresenta sicuramente un valore aggiunto, sia perché i risultati non vengono in alcun modo influenzati da ipotesi modellistiche, sia perché vengono misurate le reali prestazioni delle macchine termiche durante il loro funzionamento nei reali contesti operativi.

D'altro canto, l'esecuzione di una campagna sperimentale su vari edifici, in diversi contesti climatici, differenti destinazioni d'uso e profili di utilizzo sarebbe particolarmente onerosa e difficilmente realizzabile. L'utilizzo di apparati sperimentali emulatori di edifici permette invece di ottenere informazioni di tipo sperimentale, con la maggiore fattibilità e flessibilità di un esperimento condotto in laboratorio.

L'approccio *hardware-in-the-loop* per l'emulazione di sistemi edificio-impianto si basa su una cooperazione tra una sezione fisica e una di simulazione tramite calcolatore (vedi es. Figura 43). Gli elementi reali del sistema fisico (es. generatori e accumuli elettrici e termici) sono accoppiati a emulatori (es. edificio) comandati in tempo reale da simulazioni dinamiche. In questo modo, l'apparato sperimentale è in grado di riprodurre il funzionamento dinamico reale del sistema ibrido, ottenendo informazioni sperimentali generalmente non rilevabili dalle tradizionali procedure di caratterizzazione dei singoli dispositivi, in quanto dipendenti dagli effetti dinamici di accoppiamento e di controllo dell'intero sistema edificio-impianto.

In questa Sezione 3 viene descritta la messa a punto del dimostratore *hardware-in-the-loop* del DESTEC per riprodurre il funzionamento di sistemi ibridi a servizio degli edifici-tipo descritti nella Sezione 2.2.2, realizzando, misurando e analizzando le prestazioni ottenibili con logiche di controllo tradizionali e avanzate nella successiva fase dell'attività di ricerca.

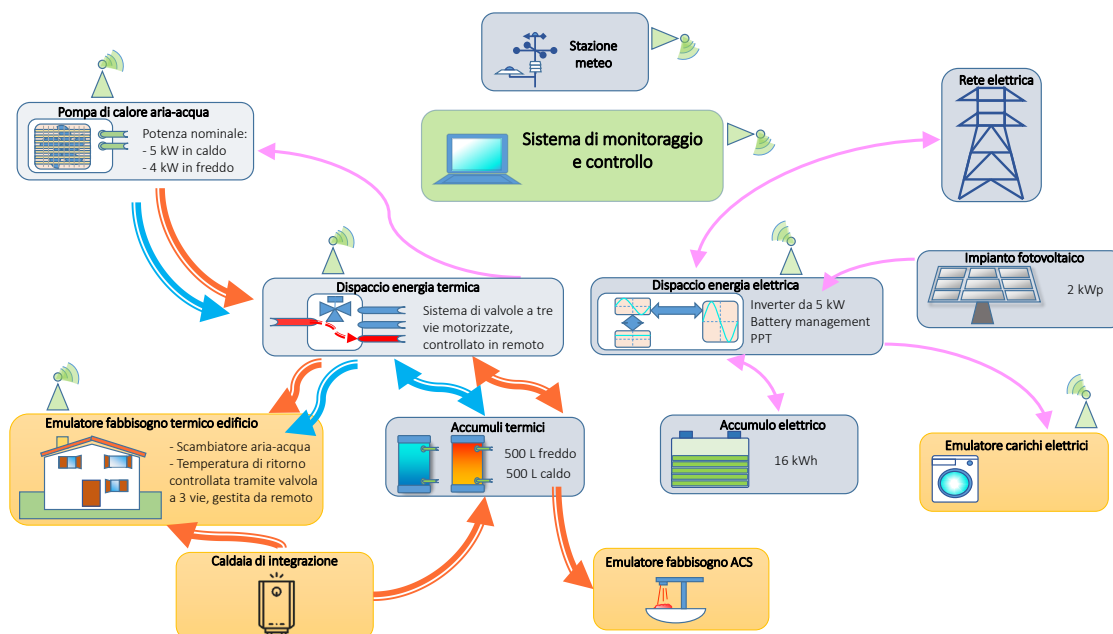


Figura 43. Schema concettuale apparato sperimentale *hardware-in-the-loop* del DESTEC. In giallo sono evidenziati i componenti emulati.

3.1 Componenti hardware apparato sperimentale DESTEC

L'impianto realizzato presso il DESTEC è costituito dai seguenti componenti fisici, suddivisi in componenti termici, componenti elettrici, acquisizione dei dati meteo e emulatori

Parte termica

- Pompa di calore aria-acqua, con potenza nominale in riscaldamento pari a 5 kW e potenza nominale in raffreddamento pari a 4 kW;
- 2 serbatoi da 520 L;
- Uno scambiatore aria acqua, connesso con una valvola miscelatrice a tre vie per l'emulazione del carico termico dell'edificio tramite la regolazione della temperatura di ritorno (vedi Sezione 3.3.1). L'apertura della valvola miscelatrice può essere gestita da remoto;
- Un gruppo idronico, controllabile da remoto, formato da 5 valvole a 3 vie, in grado di deviare la portata circolante nella sezione di generazione verso gli utilizzatori disponibili (accumulo caldo, accumulo freddo, scambiatore aria-acqua);

Parte elettrica

- Pannelli fotovoltaici in silicio policristallino, $8 \times 1.5 \text{ m}^2$ di superficie captante, 2 kWp. I pannelli sono dotati di regolatore di carica per il pacco di batterie, basato su tecnologia MPPT;
- Batterie del tipo LiFePO_4 con *battery management system* (BMS), con capacità complessiva pari a 16 kWh;
- Inverter bidirezionale, 5 kVA;
- Gateway per la raccolta dei parametri elettrici forniti dal regolatore di carica, dal BMS e dall'inverter;
- resistenze elettriche regolabili con dimmer in funzione dei profili di richiesta voluti, fino ad una potenza massima di 3 kW.

Acquisizione dati meteo

- Centralina meteo con sensori per il rilievo di:
 - temperatura esterna;
 - umidità esterna;
 - velocità e direzione del vento;
 - irraggiamento sul piano orizzontale nel campo spettrale $300 \text{ nm} \div 2800 \text{ nm}$ (piranometro);
 - irraggiamento sul piano orizzontale nel campo spettrale $5.5 \mu\text{m} \div 45 \mu\text{m}$ (pirgeometro).

Emulatori

- Emulazione fabbisogno di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio;
- Emulazione richieste acqua calda sanitaria;
- Emulazione della caldaia per riscaldamento dell'accumulo termico;
- Emulazione dei carichi elettrici.

3.2 Funzionalità obiettivo della messa a punto

L'obiettivo del lavoro di messa a punto sarà quello di realizzare dei sistemi di controllo e misura in grado di realizzare le emulazioni descritte nella Sezione 3.1, oltre ad avere un controllo e monitoraggio generale di tutti i componenti dell'apparato sperimentale, dispositivi reali inclusi. In questo modo, si otterrà un apparato sperimentale capace di testare le logiche di controllo tradizionali e avanzate di un sistema ibrido a pompa di calore, dotato di accumuli, a servizio di edifici ad alta efficienza.

3.2.1 Variabili ed elementi controllati

L'attuazione delle logiche di gestione implica che nell'apparato sperimentale sia possibile controllare:

- il valore di potenza associata ai carichi di riscaldamento, raffrescamento, ACS ed elettrici dell'edificio emulato;
- se soddisfare il carico termico tramite i generatori (es. pompa di calore, caldaia) o tramite la scarica del serbatoio caldo o serbatoio freddo a seconda della stagione;
- i momenti, la durata e la potenza di carica dell'accumulo caldo e dell'accumulo freddo;
- la temperatura di mandata della pompa di calore.

3.2.2 Variabili ed elementi monitorati

L'attuazione delle logiche di gestione implica che nell'impianto possa acquisire in tempo reale i seguenti dati:

- i flussi termici in ingresso a ciascun dispositivo utilizzatore attivo (emulatore di edificio e serbatoi di accumulo) e in uscita da ciascun generatore attivo (pompa di calore, caldaia, serbatoi di accumulo);
- le variabili meteo;
- i consumi elettrici della pompa di calore;
- la produzione di energia elettrica da fotovoltaico;
- lo stato di carica delle batterie;
- lo stato di carica (temperatura) dell'accumulo caldo e dell'accumulo freddo.

Uno schema riassuntivo delle funzionalità da implementare si trova in Figura 44. Lo schema di impianto realizzato per l'implementazione delle funzionalità specificate è in Figura 45. In giallo sono evidenziati i componenti emulati.

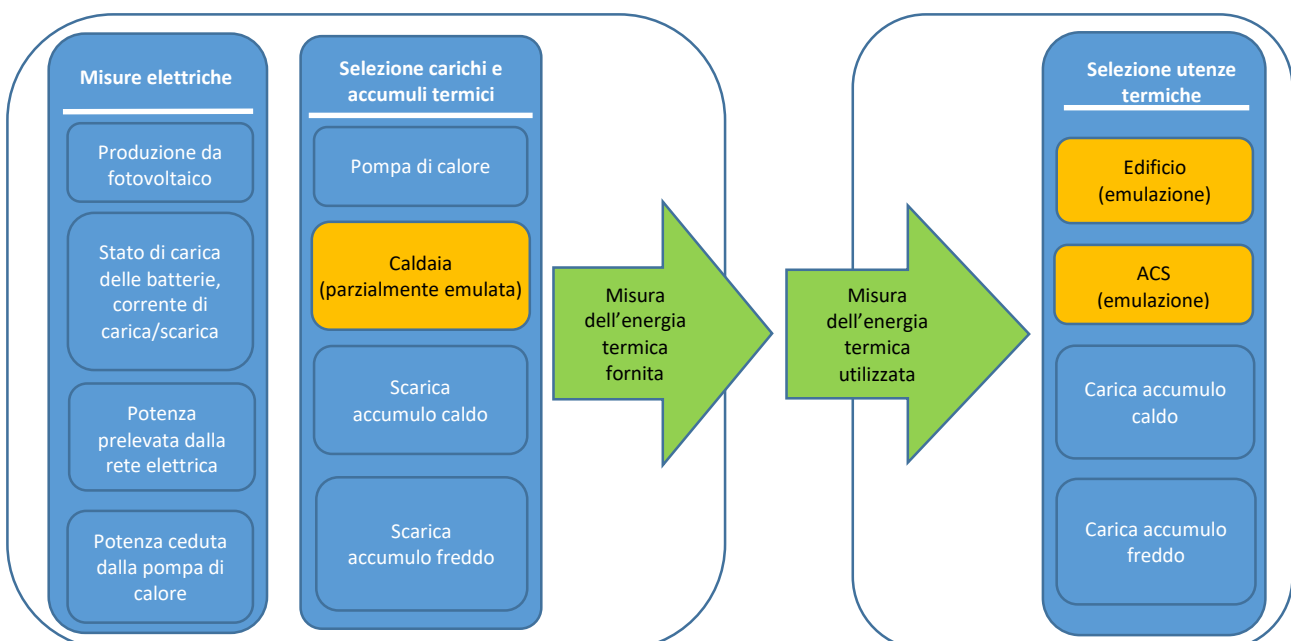


Figura 44. Funzioni del sistema *hardware-in-the-loop*.

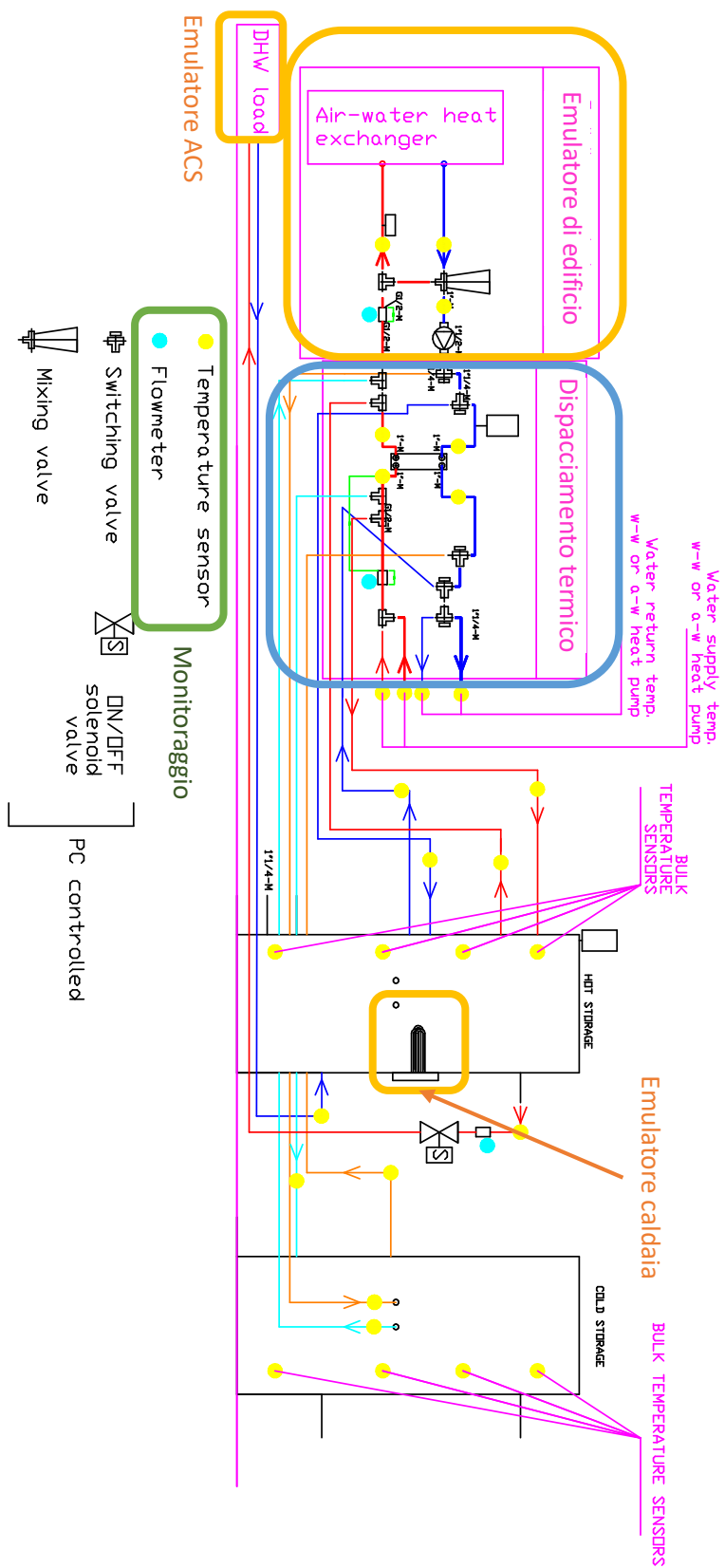


Figura 45. Componenti impianto e relative funzionalità.

3.3 Messa a punto degli emulatori

3.3.1 Emulatore del carico termico dell'edificio

L'emulatore di edificio è realizzato tramite un sistema circolatore – valvola miscelatrice (vedi Figura 46 e Figura 47) che regola la portata d'acqua che attraversa uno scambiatore esterno (vedi Figura 48), in modo da ottenere la temperatura di ritorno desiderata. L'apertura della valvola miscelatrice è controllabile attraverso un segnale di tensione (0 – 10 V). Il segnale viene generato da un microcontrollore che è programmato per ricevere via seriale il segnale di attuazione. Anche la portata d'acqua può essere regolata dal circolatore con segnale 0 – 10 V, generato nello stesso modo.

Il sistema di supervisione e controllo calcola la temperatura di ritorno desiderata, $T_{rit,set}$, attraverso il modello di edificio-impianto descritto nella Sezione "Modelli termodinamici per l'emulazione dinamica dell'edificio" e si occupa di attuarla intervenendo sul comando di apertura valvola. Il livello di apertura è calcolato tramite l'implementazione, sempre a livello di sistema di supervisione e controllo, di un controllore di tipo PI basato sulla differenza tra $T_{rit,set}$ e la T_{rit} misurata.

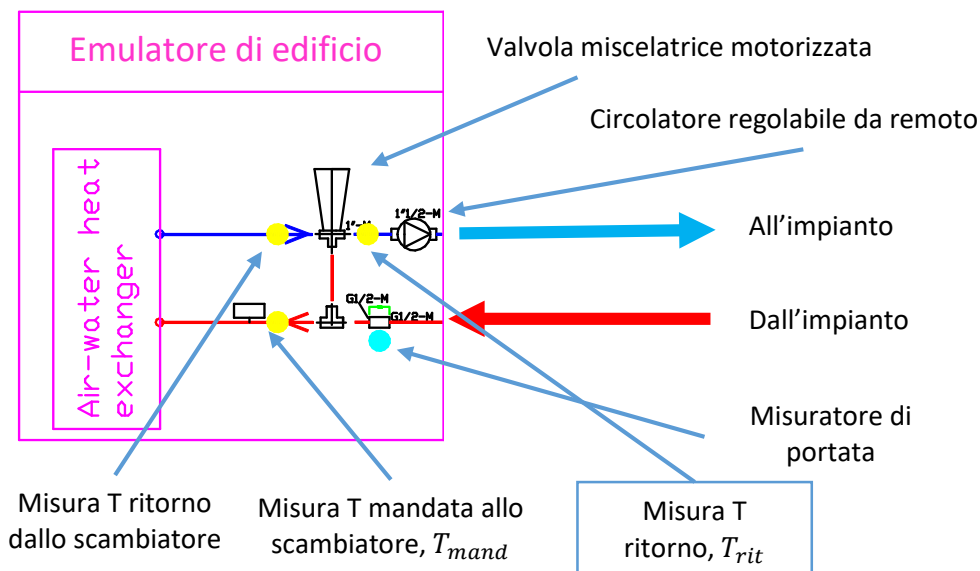


Figura 46. Componenti dell'emulatore di edificio.



Figura 47. Gruppo idronico dell'emulatore di edificio.



Figura 48. Scambiatore esterno.

Con riferimento alla Figura 46, nei tre punti di misura segnati in giallo sono presenti dei pozzetti per termistori del tipo NTC che rilevano le temperature dell'acqua, in celeste invece la posizione del misuratore di portata ad effetto vortex, con uscita in corrente nel range 4 – 20 mA, che viene convertita collegando in serie all'alimentazione dello strumento una resistenza calibrata da 250 ohm e leggendo la tensione ai suoi capi. Si ottiene in questo modo un segnale che varia tra 1 e 5 V.

La misura della resistenza degli NTC è stata realizzata con un partitore di tensione realizzato con resistenze di precisione (0.1 %). Il segnale in tensione del partitore viene rilevato e digitalizzato da una scheda elettronica. La tensione misurata viene acquisita dal sistema di supervisione e controllo che effettua la conversione in temperatura. Sia i termistori che il flussimetro sono stati calibrati prima dell'installazione secondo la procedura descritta di seguito.

Nel complesso, il sistema di emulazione dell'edificio sarà caratterizzato da:

- INPUT
 - Comando di apertura valvola (comunicazione seriale, tramite PC);
 - Comando di regolazione circolatore (comunicazione seriale, tramite PC);
- OUTPUT
 - Segnale in tensione dal partitore di misura degli NTC, da convertire in temperatura;
 - Segnale del flussimetro (1 – 5 V analogico).

Calibrazione termistori

Durante la procedura di calibrazione si immergono i sensori in un bagno termico stabilizzato nel quale viene immersa anche una termoresistenza campione.

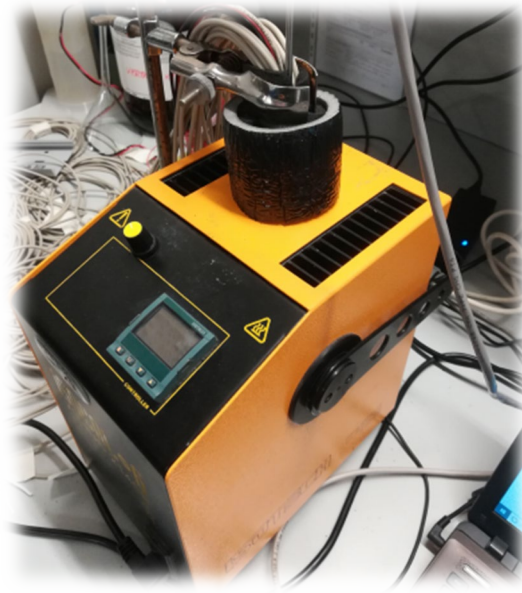


Figura 49. Bagno termostatico utilizzato per la calibrazione dei sensori NTC.

Una volta che il bagno termico si è stabilizzato, si acquisiscono i valori di resistenza forniti dal partitore di tensione, ad un passo temporale di 1 s e per circa 150 s. Il valore medio delle misure di resistenza così realizzate viene usato per costruire la curva di taratura. La procedura è ripetuta facendo stabilizzare il bagno a partire dalla minima temperatura che si intenderà misurare, fino alla massima, con un passo di 2°C. Le curve realizzate per ciascun sensore sono del tipo mostrato in Figura 50.

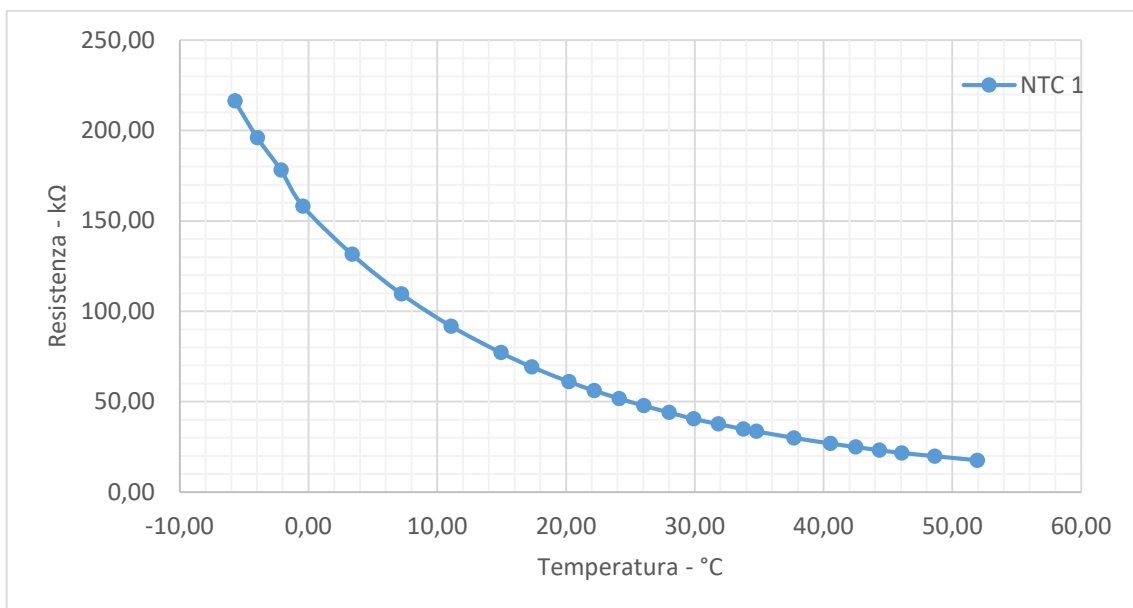


Figura 50. Curva di taratura per i sensori NTC.

L'errore associato alla singola misura può essere stimato misurando la deviazione standard dei valori di resistenza misurati durante la calibrazione, a temperatura fissata, e applicando la curva di calibrazione precedentemente ottenuta, per ottenere una distribuzione di temperature con dispersione σ : il valore di 2σ corrisponde al massimo errore compiuto con una confidenza del 95.4% e vale, nel peggiore dei casi, ~ 0.2 °C.

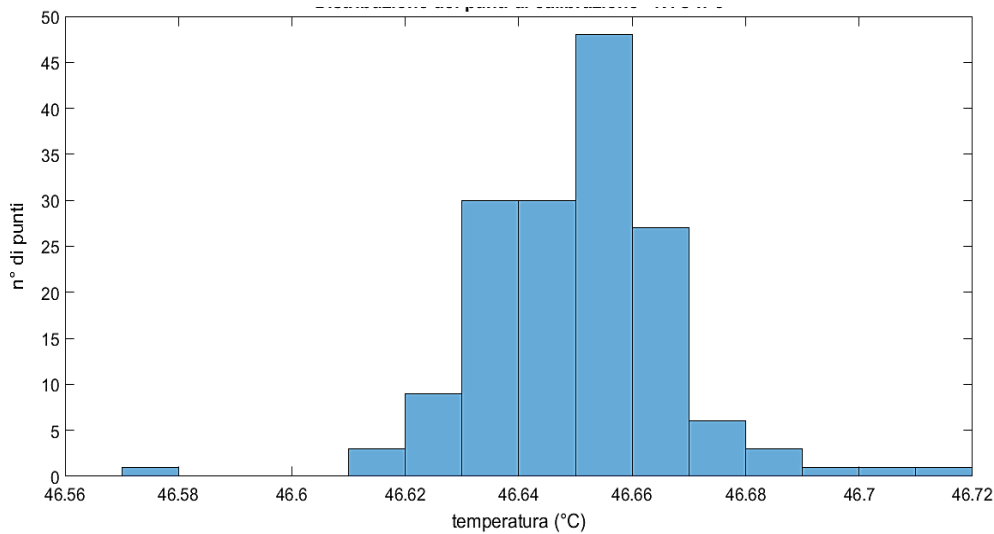


Figura 51. Distribuzione dei punti di calibrazione - NTC ID 3.

Calibrazione flussimetri

I flussimetri sono calibrati con un metodo “integrale”: si realizza un circuito che dal rubinetto, passando per una valvola di regolazione posta in serie al flussimetro da calibrare, scarica l’acqua all’interno di un serbatoio collocato sopra una bilancia con portata massima 150 kg e precisione 50 g. La bilancia è dotata di interfaccia seriale: i valori letti sono registrati tramite calcolatore e associati ad un tempo (con precisione < 1 ms). Vengono scelti sei livelli di apertura della valvola di regolazione, corrispondenti ad un range di portate che vanno da 5 a 25 l/min. Per ogni livello di apertura della valvola si procede come segue:

- si attende la stabilizzazione della portata;
- si registra il peso dell’acqua contenuta nel serbatoio e si dà inizio alla prova;
- quando il rubinetto ha fornito circa 50 kg di acqua la prova è interrotta, il peso registrato insieme al tempo alla fine della prova si può calcolare la portata media ottenuta col metodo della “pesata”. Il valore sarà affetto da un errore dovuto alla precisione della bilancia e alla precisione nella misura della variazione tempo (questo trascurabile).

Si procede per tutti i valori di apertura scelti ottenendo una tabella “corrente media vs. portata stimata” del tipo:

Tabella 12. Corrente media vs portata stimata.

\dot{m} [l/m]	4.8041	9.05152	13.022	17.212	21.722	24.529
I [mA]	5.7928	7.4733	9.0510	10.715	12.513	13.556

Per quanto riguarda l’errore relativo associato alle singole misure, da una stima di 2σ si ricava un valore di 0.0225 l/min.

Modelli termodinamici per l’emulazione dinamica dell’edificio

Come spiegato nella Sezione 3.3.1, il sistema di supervisione e controllo dell’apparato *hardware-in-the-loop* sfrutta un modello dinamico di edificio per il controllo dell’apparato emulatore dell’edificio. Nello specifico, il modello simula l’evoluzione dell’edificio analizzato ricevendo dall’apparato sperimentale i dati relativi ai componenti fisici e i dati climatici e restituisce il valore di setpoint per la temperatura di ritorno dall’apparato emulatore. Nel complesso, il sistema di emulazione dell’edificio sarà caratterizzato dalla seguente comunicazione dati:

- INPUT
 - Dati meteo acquisiti in tempo reale di temperatura, irraggiamento solare (piranometro), scambio per irraggiamento infrarosso col cielo (pirgeometro), velocità del vento, umidità relativa.
 - Portata e temperatura di mandata all'emulatore dell'edificio (vedi Figura 46)
- OUTPUT
 - Segnale di on-off per i generatori
 - Valore di setpoint per la temperatura di ritorno all'emulatore dell'edificio (vedi Figura 46)

Modello dinamico dell'edificio

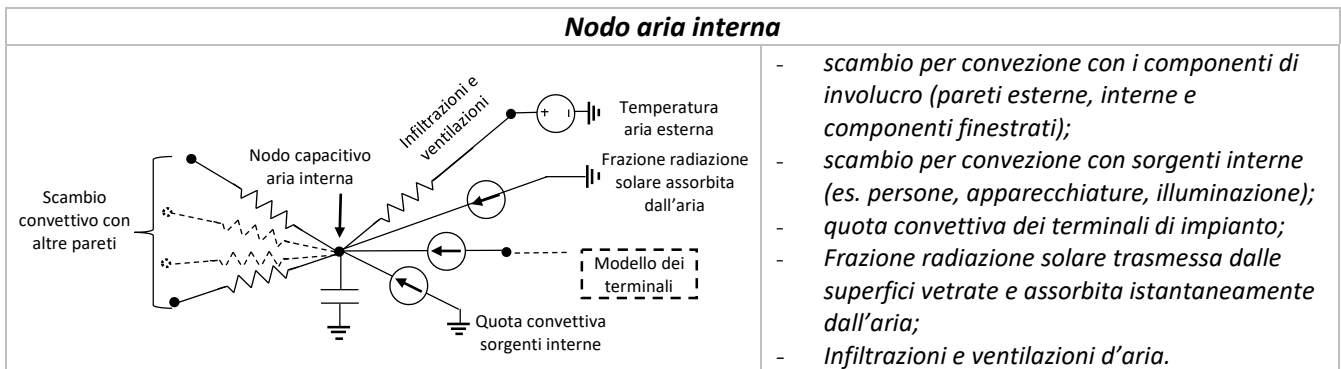
Il modello dinamico utilizzato e implementato nella libreria “*.dll” (vedi Sezione 3.7.1) consiste in una rete elettrica equivalente di capacità e resistenze, basato sull'approccio *thermal network*, ampiamente diffuso nella letteratura scientifica e tecnica (es. EN ISO 52016-1:2017 [33]). Gli elementi dell'edificio (o parte di essi) vengono modellati come nodi elettrici collegati tra loro tramite resistenze elettriche equivalenti che rappresentano i fenomeni di scambio di calore coinvolti (conduzione, convezione e irraggiamento). Ove necessario, il nodo è collegato ad un condensatore elettrico che rappresenta la sua capacità termica. Il risultato finale della modellazione è una rete elettrica di resistenze e capacità, la cui risoluzione corrisponde alla risoluzione del bilancio energetico dell'edificio tramite un sistema lineare di equazioni. L'apparato *hardware-in-the-loop* risolve questo sistema algebrico in ogni timestep di simulazione, ottenendo l'evoluzione di temperatura (tensione) e degli scambi di calore (correnti) tra i vari nodi del circuito nel tempo. I parametri che determinano l'evoluzione del sistema sono i dati climatici (es. temperatura dell'aria esterna, irraggiamento, temperatura del cielo), gli apporti gratuiti interni (es. persone, apparecchiature elettriche e illuminazione) e il calore scambiato dai terminali di impianto.

La Tabella 13 mostra le tipologie di nodo e i relativi fenomeni di scambio termico considerati. In particolare:

- L'edificio è caratterizzato da una sola zona termica. L'aria interna è assunta alla stessa temperatura (ipotesi di omogeneità) e dotata di una capacità termica corrispondente a tutta la volumetria interna dell'edificio.
- Le pareti opache esterne sono discretizzate con una serie di resistenze-capacità per tutti gli strati che le compongono, insieme ai nodi superficiali interni ed esterni, non associati ad alcuna capacità. Il numero di nodi necessari viene calibrato attraverso un'analisi di convergenza preliminare alla messa in funzione dell'apparato *hardware-in-the-loop*.
- Le pareti interne, anch'esse capacitive e responsabili della dinamica dell'edificio, vengono modellate in maniera analoga alle pareti opache esterne, ma entrambi i nodi superficiali sono collegati al nodo rappresentativo della temperatura dell'aria interna.
- I componenti vetrati sono assunti con capacità termica trascurabile. I coefficienti di trasmissione, riflessione, assorbimento equivalenti alla radiazione solare dipendono dalle proprietà ottiche dei vetri e dal loro numero (singolo, doppio, triplo).
- Gli apporti gratuiti interni sono modellati attraverso generatori di corrente che scambiano una quota convettiva e una radiativa rispettivamente con l'aria interna e i nodi superficiali interni dei componenti di involucro.

Tabella 13. Tipi di nodi e flussi di energia che formano il circuito equivalente dell'edificio.

Nodo superficie interna pareti opache	
	<ul style="list-style-type: none"> - scambio per conduzione con la capacità del primo strato interno della parete; - scambio per convezione con l'aria interna; - scambio per irraggiamento infrarosso con le altre superfici interne della stanza (sia opache che vetrate); - scambio per irraggiamento infrarosso con sorgenti interne (es. persone, apparecchiature, illuminazione) e con terminali di impianto. - assorbimento radiazione solare trasmessa dai componenti di involucro vetrati.
Nodo interno pareti opache	
	<ul style="list-style-type: none"> - scambio per conduzione con gli strati capacitivi adiacenti.
Nodo superficie esterna pareti opache	
	<ul style="list-style-type: none"> - scambio per conduzione con la capacità del primo nodo dello strato esterno della parete; - scambio per convezione con l'aria esterna; - scambio per irraggiamento infrarosso con l'ambiente esterno (assunto alla stessa temperatura con dell'aria); - scambio per irraggiamento infrarosso verso il cielo; - assorbimento radiazione solare.
Superfici vetrate	
	<ul style="list-style-type: none"> - scambio per conduzione tra i due nodi di superficiali o convezione-irraggiamento in caso di vetrocamera; - scambio per convezione con l'aria esterna; - scambio per irraggiamento infrarosso con l'ambiente esterno (assunto alla stessa temperatura con dell'aria); - scambio per irraggiamento infrarosso verso il cielo; - radiazione solare assorbita dai due nodi; - scambio convettivo con aria interna; - scambio per irraggiamento infrarosso con le altre superfici interne della stanza (sia opache che vetrate); - scambio per irraggiamento infrarosso con sorgenti interne (es. persone, apparecchiature, illuminazione).



Modelli per i terminali di impianto

Radiatori

I radiatori rappresentano il classico terminale di impianto ad acqua utilizzato in edifici residenziali. La loro diffusione è notevolmente diminuita nei nuovi edifici a causa delle alte temperature dell'acqua di alimentazione di cui necessitano per funzionare (60 – 80 °C) e dell'impossibilità di effettuare il servizio di raffrescamento. La loro presenza è tuttavia possibile in contesti e ambienti a ridotto fabbisogno di raffrescamento (es. bagni) o negli edifici riqualificati. c

Il modello utilizzato si basa sui parametri caratteristici dei singoli elementi $\dot{q}_{ref}, \Delta T_{ref}, K_{ref}, n$ forniti dalle ditte costruttrici. In particolare, si utilizza il seguente sistema di equazioni per il calcolo della resa termica \dot{Q} , basato sulla conservazione dell'energia e sull'equazione caratteristica di resa termica.

$$\begin{cases} \dot{Q} = \dot{m}_f c_f (T_{f,in} - T_{f,out}) \\ \dot{Q} = (N_{el} K_{ref}) (\bar{T}_f - T_{a,z})^n \end{cases}$$

Con semplici passaggi algebrici, ipotizzando un salto termico di progetto dell'acqua pari a 10 K e una portata costante in qualsiasi condizione di funzionamento, si ottiene la seguente espressione che consente il calcolo della resa termica, \dot{Q} , a partire dalla temperatura di mandata, $T_{f,in}$, o viceversa.

$$\dot{Q} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{\Delta T_{ref}^n} \left(T_{f,in} - 5 \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{ref}} - T_{a,z} \right)^n$$

I valori degli altri parametri sono assunti pari a: $\Delta T_{ref}^n = 50 K$, $n = 1.3$, $T_a = 20^\circ C$ e \dot{Q}_{ref} pari al carico termico di progetto della zona termica servita.

Ventilconvettori o fancoil

I ventilconvettori sono terminali ad acqua che utilizzano una o più batterie alettate, uno o più ventilatori per il riscaldamento, raffrescamento e deumidificazione dell'aria. Sono tradizionalmente impiegati in edifici del settore terziario (es. uffici), ma trovano una sempre maggiore applicazione anche in altri ambiti per la loro capacità di essere utilizzati in entrambe le stagioni e per la possibilità di utilizzare fluidi a media-bassa temperatura (40 ÷ 50 °C). Questa caratteristica li rende accoppiabili a generatori a fonti rinnovabili e/o ad alta efficienza come sistemi solari e pompe di calore.

La valutazione delle prestazioni dei ventilconvettori richiede due differenti modelli in caso che la batteria si trovi in condizioni tali da "attivare" fenomeni di condensa dell'umidità dell'aria (tipica del periodo estivo), oppure se lo scambio di calore tra acqua e aria avviene unicamente in forma sensibile.

Nel caso più complesso, il processo di raffrescamento e deumidificazione che avviene durante l'attraversamento della batteria coinvolge fenomeni legati alla fluidodinamica multicomponente bifase, alla trasmissione del calore, al trasporto di massa e alla geometria della batteria, anch'essa complessa (batterie alettate-multi rango). Uno dei modelli più diffusi in letteratura, tale da conciliare facilità, rapidità di implementazione, generalità e accuratezza è quello denominato *actual line* ("linea esatta"). Il modello rappresenta la trasformazione di raffrescamento e deumidificazione come una curva a pendenza variabile

sul diagramma psicrometrico $x - T$ (vedi Figura 52). Il valore della derivata di questa curva, $\frac{dx_a}{dT_a}$, è funzione del fattore di condensazione, C_d , che dipende dalla differenza di condizioni di temperatura e umidità tra il flusso d'aria e la superficie esterna della batteria [34]. Dall'analogia tra la trasmissione del calore e il trasporto di massa, si ricavano le seguenti eguaglianze, da cui è possibile vedere il legame tra C_d e la pendenza della *actual line*:

$$C_d = \frac{x_{a,out} - x_{a,in}}{T_{a,out} - T_{a,in}} = \frac{x_{a,in} - x_R}{T_{a,in} - T_R}$$

Il valore di C_d non è costante lungo la curva e viene tipicamente calcolato "a tratti", discretizzando la *actual line* in un numero sufficiente di segmenti, N_T . Per ognuno degli N elementi deve essere risolto un sistema di equazioni per il bilancio di massa e di energia. Questo sistema di equazioni varia in funzione della formazione di condensa, che si verifica quando la temperatura superficiale della batteria, T_R^N , è inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria in ingresso alla N -esima sezione $T_{dew}(T_{a,in}^N)$. Per la modalità di riscaldamento, è praticamente impossibile la formazione di condensa.

Tabella 14. Set di equazioni e condizioni di formazione di condensa nel modello *actual line*.

Condizione di controllo	Set di equazioni da risolvere per ogni sezione N	Equazioni di connessione tra le diverse sezioni N
<p>Se $T_R^N \leq T_{dew}(T_{a,in}^N)$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Presenza di condensa sulla batteria - Deumidificazione dell'aria - Scambio di calore in forma sensibile e latente 	$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{tot}^N = \dot{m}_{f,ref} c_f (T_{f,out}^N - T_{f,in}^N) \\ \dot{Q}_s^N = \dot{m}_{a,vel} c_{p,a} (T_{a,in}^N - T_{a,out}^N) \\ \dot{Q}_{tot}^N = \dot{Q}_s^N + \dot{Q}_l^N \\ \dot{Q}_l^N = \dot{m}_{a,vel} \Lambda (x_{a,in}^N - x_{a,out}^N) \\ x_R^N = x_{sat}(T_R^N) \\ \frac{x_{a,out}^N - x_{a,in}^N}{T_{a,out}^N - T_{a,in}^N} = \frac{x_{a,in}^N - x_R^N}{T_{a,in}^N - T_R^N} \\ \dot{Q}_{tot}^N = \frac{UA_{h,vel}}{N_T} (\bar{h}_a^N - \bar{h}_R^N) \\ \dot{Q}_{tot}^N = \frac{UA_w}{N_T} (T_R^N - \bar{T}_f^N) \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} T_{f,in}^N = \begin{cases} T_{f,in}^1, & se\ N = N_T \\ T_{f,out}^{N+1} \end{cases} \\ T_{a,in}^N = \begin{cases} T_{a,z}, & se\ N = 1 \\ T_{a,out}^{N-1} \end{cases} \\ x_{a,in}^N = \begin{cases} x_{a,z}, & se\ N = 1 \\ x_{a,out}^{N-1} \end{cases} \end{array} \right.$
<p>Se $T_R^N > T_{dew}(T_{a,in}^N)$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Situazione per la modalità di riscaldamento - Assenza di condensa sulla batteria - Nessuna deumidificazione dell'aria - Scambio di calore solo in forma sensibile 	$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{tot}^N = \dot{m}_{f,ref} c_f (T_{f,out}^N - T_{f,in}^N) \\ \dot{Q}_s^N = \dot{m}_{a,vel} c_{p,a} (T_{a,in}^N - T_{a,out}^N) \\ \dot{Q}_{tot}^N = \dot{Q}_s^N + \dot{Q}_l^N \\ \dot{Q}_l^N = 0 \\ x_{a,in}^N = x_{a,out}^N \\ \dot{Q}_{tot}^N = \frac{UA_{tot,vel}}{N_T} (\bar{T}_a^N - \bar{T}_f^N) \end{array} \right.$	<p>(configurazione controcorrente)</p>

I valori di $\dot{m}_{a,vel}$, $UA_{h,vel}$, $UA_{tot,vel}$, UA_w , $\dot{m}_{f,ref}$ sono determinabili dai dati di catalogo del ventilconvettore. La portata di aria $\dot{m}_{a,vel}$, il coefficiente di scambio globale entalpico $UA_{h,vel}$, il coefficiente di scambio globale di calore $UA_{tot,vel}$, dipendono dalla velocità del ventilatore: generalmente, le unità sono a tre velocità a cui corrispondono tre valori per ciascuno dei parametri $\dot{m}_{a,vel}$, $UA_{tot,vel}$ e

$UA_{h,vel}$. Ricordiamo che il coefficiente di scambio globale della batteria “asciutta”, $UA_{tot,vel}$, è determinabile dai dati di catalogo in modalità di riscaldamento forniti dal costruttore.

Analizzando le equazioni e assumendo la costanza dei parametri $\dot{m}_{a,vel}$, $UA_{h,vel}$, UA_w , \dot{m}_f e le proprietà termofisiche $c_{p,a}$, c_w , Λ , si nota che l’unica espressione non lineare è data dalla relazione $x_{sat}(T)$ che lega l’umidità di saturazione al valore della temperatura (es EN ISO 13788:2012 [35]). Linearizzando a tratti quest’espressione è possibile implementare e risolvere il modello del ventilconvettore in forma matriciale. Un procedimento iterativo è comunque necessario per determinare la presenza di condensa o meno sul tratto N-esimo di batteria (condizione illustrata in Tabella 14).

La prestazione globale del fancoil si ottiene facilmente come: $\dot{Q}_{tot} = \sum_{N_T} \dot{Q}_{tot}^N$, $\dot{Q}_s = \sum_{N_T} \dot{Q}_{tot}^S$, $\dot{Q}_L = \sum_{N_T} \dot{Q}_l^S$, $T_{a,out} = T_{a,out}^N$, $x_{a,out} = x_{a,out}^N$, $T_{f,out} = T_{f,out}^1$.

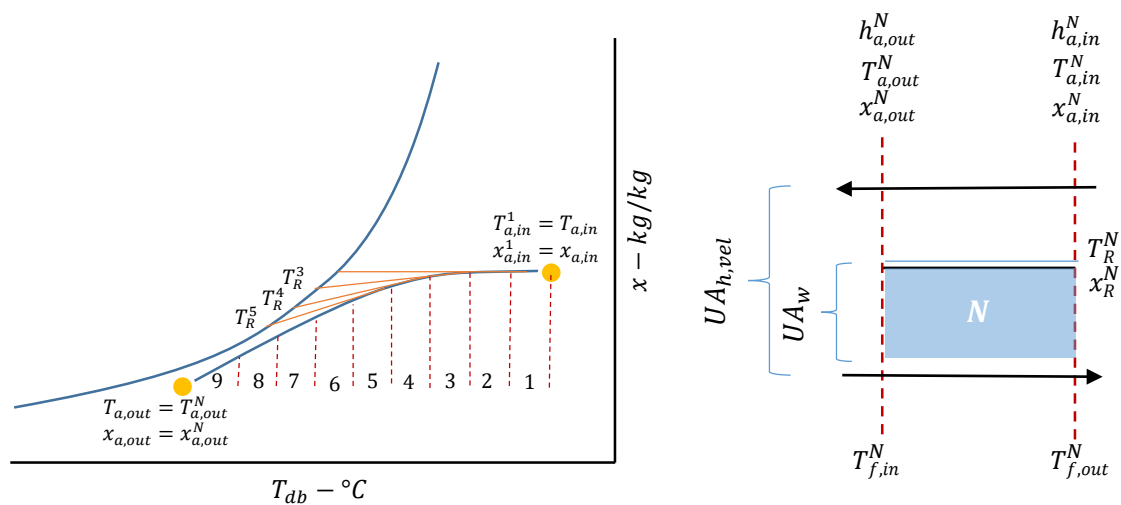


Figura 52. Modello actual-line discretizzato: rappresentazione sul diagramma psicrometrico e parametri di riferimento per elemento N.

Pannelli radianti

I pannelli radianti sono una tipologia di terminale d’impianto che utilizza le superfici interne dell’edificio (pavimenti, pareti o soffitto) per scambiare calore con l’ambiente climatizzato. Sono costituiti da tubazioni posizionati all’interno strutture edilizie, in cui circola fluido caldo o refrigerato a seconda del servizio desiderato.

Grazie alla loro elevata superficie di scambio, i pannelli radianti utilizzano un fluido a temperatura molto vicina a quella dell’aria interna alla zona termica. Questo si traduce in temperature nell’intervallo 25 – 35 °C per il riscaldamento, e 19 – 23 °C per il raffreddamento. Non sono ovviamente utilizzabili per la deumidificazione, difatti la loro temperatura superficiale deve rimanere sempre al di sopra della temperatura di rugiada dell’aria. Analogamente, al fine di evitare le sensazioni di malessere da parte degli occupanti, se installati a pavimento, la temperatura della superficie del quale non deve superare i 28 ÷ 29 °C. Valori più elevati sono tollerati in caso di posizionamento su parete verticale o soffitto.

Il modello di calcolo della resa termica fornita dai pannelli radianti è presentato dalla normativa UNI EN 1264-2:2013 [36], che permette la valutazione delle prestazioni in condizioni quasi-stazionarie. Come per gli altri terminali, il modello consente il calcolo della resa termica \dot{Q} a partire dalla temperatura di mandata dell’acqua $T_{f,in}$ o viceversa.

Assumendo che il pannello radiante sia stato dimensionato secondo la norma tecnica UNI EN 1264-2:2013 per soddisfare il carico di progetto \dot{Q}_{ref} con un salto termico nominale del fluido $\Delta T_f = 5 K$, che la portata d’acqua sia sempre costante e pari al valore nominale $\dot{m}_{f,ref}$ e che le proprietà termofisiche dei materiali siano invarianti, si può scrivere il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} Q = K S_u (T_{pav} - T_z)^n \\ Q = \frac{S_u (\bar{T}_f - T_{pav})}{R_{cond}} \\ Q = \dot{m}_{f,ref} c_f (T_{f,in} - T_{f,out}) \end{cases}$$

dove S_u è la superficie utile a disposizione del pannello e R_{cond} è la resistenza termica conduttiva-conduttiva tra la temperatura media del fluido circolante, \bar{T}_f , e quella del pavimento T_{pav} . K e n sono due parametri di scambio termico tra pavimento e zona termica: il loro valore dipende dal posizionamento del pannello (a pavimento, parete o soffitto) e dalla modalità (riscaldamento o raffreddamento). Ad esempio, per pannelli a pavimento in modalità riscaldamento $K = 8.92$ e $n = 1.1$. I valori suggeriti per altre configurazioni sono riportati nella norma UNI EN 1264-3:2009 [37].

Da semplici passaggi algebrici, utilizzando i valori riferiti al calcolo del carico termico di progetto, si ottiene l'espressione:

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{ref}} = \frac{\left(T_{f,in} - 2.5 \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{ref}} - T_z + \left(\frac{\dot{Q}}{K S_u} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}{\left(T_{f,in,ref} - 2.5 - T_{z,ref} + \left(\frac{\dot{Q}_{ref}}{K S_u} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}$$

$T_{f,in,ref}$ è di solito compresa nell'intervallo 30 – 35 °C se il pannello radiante è stato dimensionato in funzione del carico termico di riscaldamento, mentre è pari a 19 °C se il carico di progetto è quello di raffreddamento. Analogamente, la temperatura di riferimento della zona climatizzata si può assumere pari 20 °C o 26 °C a seconda della stagione utilizzata come riferimento per la progettazione. Il valore di S_u può essere assunto pari all'80% della superficie utilizzata per il posizionamento del pannello (es. pavimento):

3.3.2 Emulatore delle richieste di acqua calda sanitaria

La produzione di acqua calda sanitaria da parte dell'impianto emulatore avviene nel serbatoio di accumulo caldo. L'accumulo presente, della capacità di 520 L, ha al suo interno 3 serpentine (vedi Figura 53): l'acqua fredda dell'acquedotto entra nel serpentino più grande (punto 2 di Figura 53), ed esce dopo aver attraversato il serbatoio in altezza (punto 10 di Figura 53). Il prelievo di ACS viene controllato da un'elettrovalvola pilotata da un relè tramite microcontrollore (vedi Figura 54). Il flusso di acqua viene monitorato attraverso un flussimetro, due pozzetti con sonde NTC rilevano la temperatura in ingresso e la temperatura in uscita dal serbatoio.

Nel complesso, il sistema di emulazione delle richieste di ACS fornisce al sistema di supervisione e controllo l'interfaccia:

- INPUT
 - Comando di apertura valvola (comunicazione seriale al microcontrollore, tramite PC).
- OUTPUT
 - Segnale in tensione dal partitore di misura degli NTC, da convertire in temperatura;
 - Segnale del flussimetro (0 – 10 V analogico).

Il supervisore, che contiene i profili di richiesta da simulare durante il periodo di test, attiva l'elettrovalvola ed interrompe il flusso una volta che l'integrale della portata misurata dal flussimetro ha raggiunto il valore richiesto.

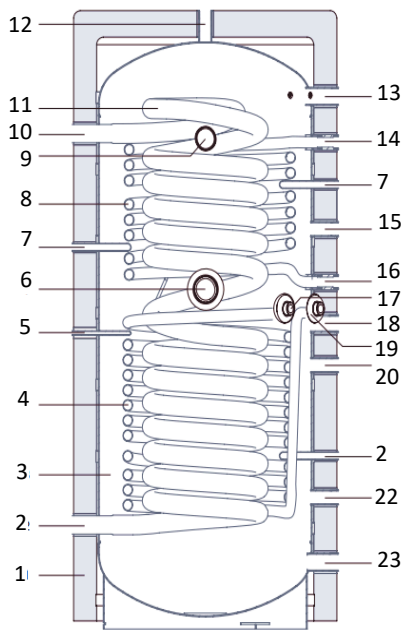


Figura 53. Sezione del serbatoio di accumulo.

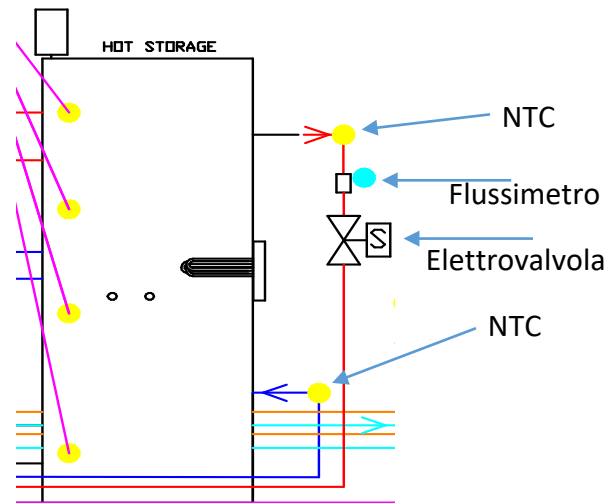


Figura 54. Apparato di emulazione e misura delle richieste di ACS

3.3.3 Emulatore della caldaia

La caldaia può agire nell'apparato *hardware-in-the-loop* in due modalità distinte, a cui corrispondono due diverse finalità: fornitura di potenza termica ai terminali di riscaldamento dell'edificio emulato, fornitura di potenza all'accumulo caldo.

Riscaldamento dell'accumulo

L'acqua all'interno dell'accumulo viene scaldata in questo caso tramite una resistenza da 6 kW che emula una fornitura di potenza da parte di una caldaia. La resistenza è interfacciata alla rete elettrica attraverso un dimmer che permette la regolazione in potenza. Il dimmer è pilotato da un microcontrollore attraverso un segnale in tensione 0-10 V.

Riscaldamento diretto dell'edificio

In questo caso il comportamento della caldaia è modellato all'interno dell'algoritmo che simula le prestazioni del sistema edificio-impianto (vedi Sezione 3.3.1) e non è presente un generatore fisico. L'effetto della caldaia viene simulato con un codice integrato al modello edificio-impianto, mentre l'acqua contenuta nel circuito dell'apparato sperimentale è mantenuta in temperatura dalla pompa di calore, in modo da poter riprendere il riscaldamento "a caldo" se la simulazione richiede di nuovo l'intervento della pompa di calore come generatore principale.

Modello per la valutazione delle prestazioni di caldaia in riscaldamento diretto dell'edificio

Il modello per la simulazione della caldaia in modalità riscaldamento valuta sia l'output termico del generatore, \dot{Q} , sia il rendimento dello stesso, η_{boil} , a partire dai dati di riferimento forniti dal costruttore. Il valore di \dot{Q} dipende dal modello dei terminali d'impianto, in quanto si assume l'equilibrio tra la potenza termica in uscita dal generatore e quella erogata dai corpi scaldanti (ipotesi di quasi-stazionarietà dell'impianto). Il calcolo di η_{boil} si basa sulla metodologia prevista dalla norma UNI/TS-11300-2:2019, Appendice B [28], la quale prevede un'interpolazione lineare delle perdite di generazione in funzione della temperatura dell'acqua e del fattore di carico della caldaia.

La routine di simulazione si articola in tre passaggi sequenziali:

1. $\dot{Q} = G_{em}(T_{f,in}, T_z, params)$ calcolo della resa termica dei terminali e della caldaia
2. $\eta_{boil} = F_{boil}(FC, \bar{T}_f)$ calcolo del rendimento di caldaia (UNI/TS-11300-2:2019)
3. $\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{Q}}{\eta_c} \times \frac{1}{PCI_{fuel}}$ calcolo del consumo di combustibile

L'intera routine si basa sul valore di temperatura di mandata ai terminali, $T_{f,in}$, la quale dipende dal tipo di controllo previsto (climatica o punto fisso), ma rappresenta comunque un input del modello di caldaia. F_{boil} rappresenta l'interpolazione lineare prevista dalla norma UNI/TS 11300-2:2019 (Appendice B), G_{em} rappresenta il modello di terminale utilizzato, $FC = \dot{Q}/\dot{Q}_{ref}$ è il fattore di carico della caldaia, \bar{T}_f è la media aritmetica tra la temperatura di mandata ai terminali $T_{f,in}$ e la temperatura di ritorno, $T_{f,out}$, T_z è il valore di temperatura dell'aria interna alla zona termica, $params$ è l'insieme di parametri richiesti dal modello di terminale a seconda della tipologia utilizzata (es. \dot{Q}_{ref} , ΔT_{ref} e n per i radiatori).

Nel complesso, il modello di simulazione della caldaia sarà caratterizzato dalla seguente comunicazione dati:

- INPUT
 - temperatura di mandata ai terminali, $T_{f,in}$, corrispondente alla temperatura di mandata all'emulatore di edificio (vedi Figura 46);
 - potenza nominale del generatore, \dot{Q}_{ref} ;
 - rendimento nominale, a potenza intermedia e minima forniti dal costruttore, $F_{boil}()$;
- OUTPUT
 - Potenza utile erogata, \dot{Q} ;
 - rendimento di caldaia, η_{boil} ;
 - consumo di combustibile, \dot{m}_{fuel} .

3.3.4 Emulatore dei carichi elettrici

L'emulatore di carichi elettrici è realizzato tramite un gruppo di resistenze elettriche alimentato tramite un dimmer collegato al sistema di dispacciamento dell'energia elettrica (vedi Sezione 3.5) che regola la potenza dissipata fino ad un massimo di 3 kW. Il dimmer è controllabile attraverso un segnale di tensione (0 – 10 V). Il segnale viene generato da un microcontrollore che è programmato per ricevere via seriale il segnale di attuazione.

3.4 Messa a punto del sistema di dispacciamento di energia termica: selezione dei carichi e dei generatori attivi

Per poter indirizzare la portata d'acqua riscaldata/raffrescata, è stato predisposto un sistema di dispacciamento automatizzato di energia termica, composto da un sistema di valvole a tre vie motorizzate (vedi Figura 55 e Figura 56).

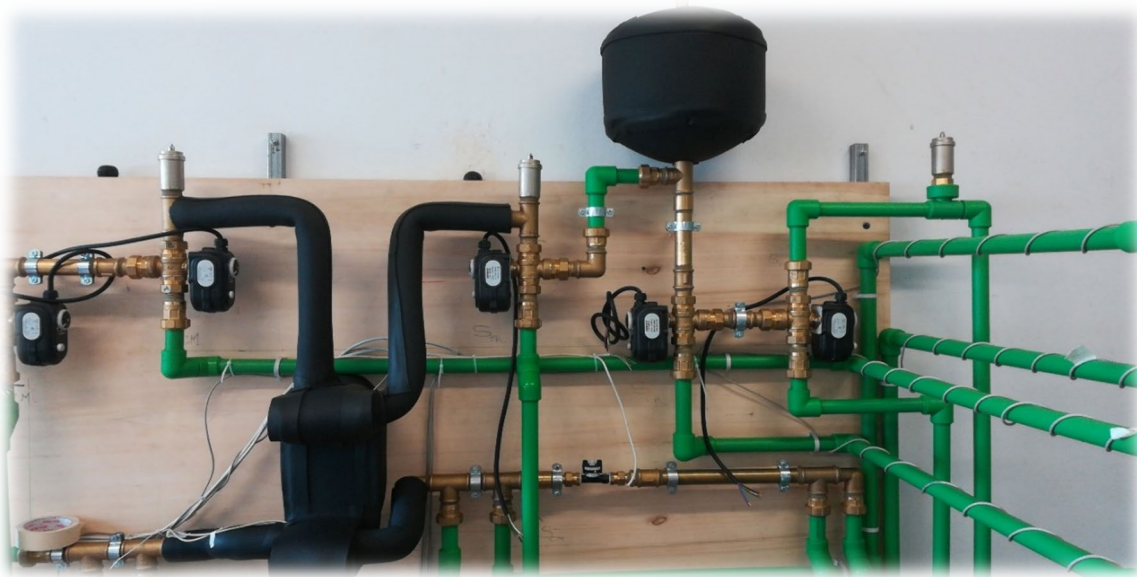


Figura 55. Realizzazione gruppo valvole per dispaccio carichi termici.

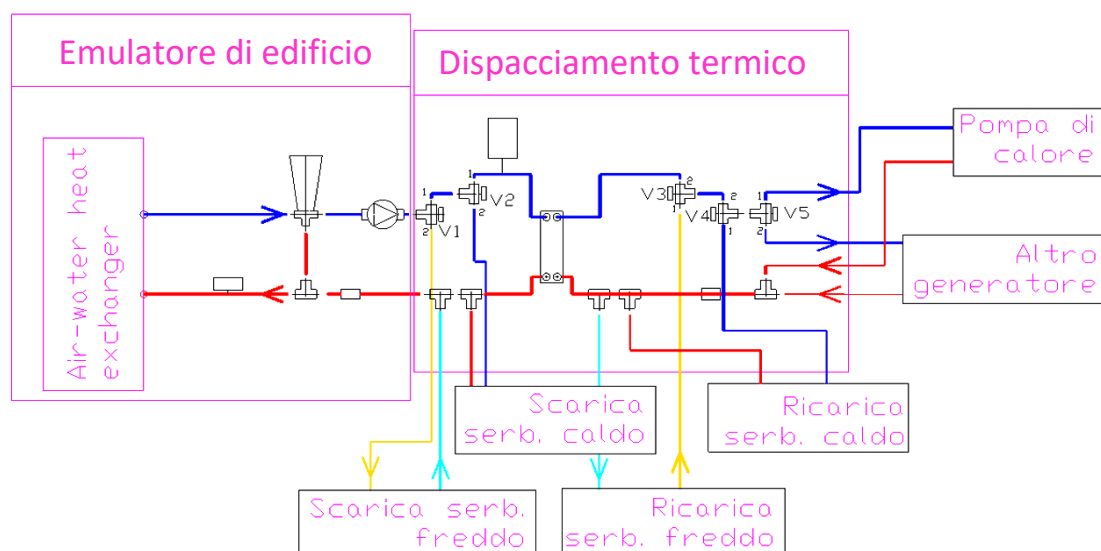


Figura 56. Gruppo valvole per dispaccio carichi termici – schema.

Ciascuna valvola è comandata tramite un microcontrollore che, attraverso l'attivazione di un interruttore elettronico, alimenta o meno la valvola (24 V alternata), deviando il flusso tra le due possibili vie della valvola alimentata (vedi Figura 56). Possono essere realizzati i seguenti percorsi:

- Azione su valvole 1 e 2: si seleziona quale sorgente tra serbatoio caldo, serbatoio freddo, pompa di calore o altro generatore effettuerà il servizio di riscaldamento all'emulatore di edificio;
- Azione su valvole 3 e 4: si seleziona quale carico tra ricarica serbatoio caldo, ricarica serbatoio freddo o riscaldamento/raffrescamento edificio deve essere collegato ai generatori pompa di calore o "altro generatore";
- Azione su valvola 5: in questo modo viene scelto quale generatore collegare all'impianto. Attualmente è presente soltanto la pompa di calore ma il sistema è predisposto per essere collegato anche ad un altro generatore.

3.5 Messa a punto del sistema di dispacciamento dell'energia elettrica

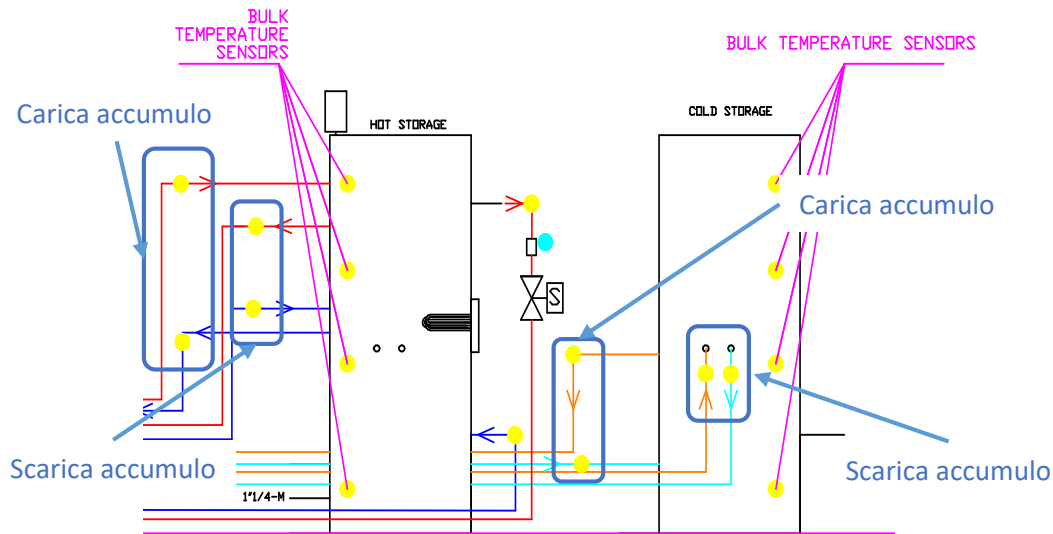


Figura 58. Punti di misura nel sistema di accumuli.

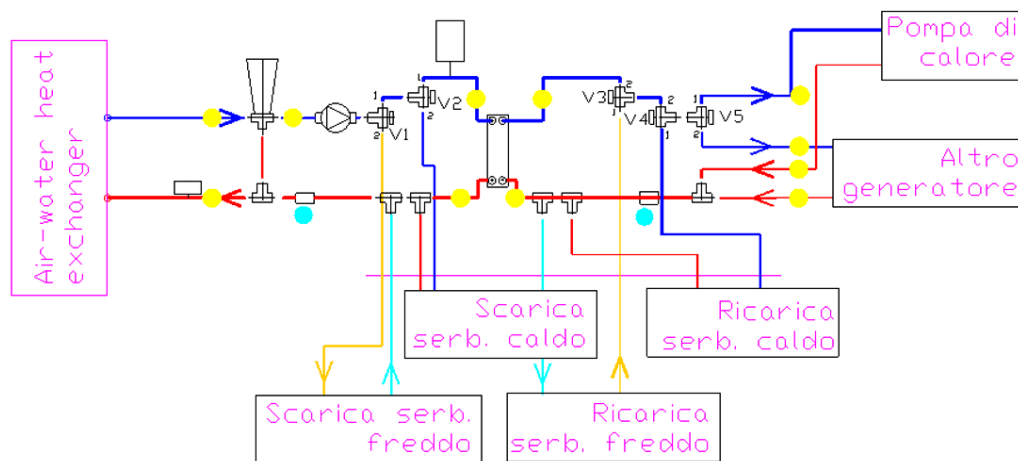


Figura 59. Posizione dei sensori di temperatura (giallo) e dei flussimetri (celeste).

I dati dei sensori così disposti sono campionati con frequenza impostabile dall'operatore (es. ogni 5 s) da una scheda elettronica di acquisizione che digitalizza il segnale e lo rende disponibile al sistema di supervisione e controllo tramite protocollo Modbus su TCP/IP.

3.6.2 Variabili meteo

Per il rilievo delle grandezze meteo di utilizzo è stata installata una stazione dotata di un rilevatore che integra i seguenti strumenti:

Tabella 15. Stazione meteo - precisione dei sensori.

Tipo di sensore	Precisione
Sensore di temperatura esterna (Pt100)	$\pm 0.15 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.1\%$ della misura
Sensore di umidità	± 1.5 (% U.R.) ± 1.5 della misura
Sensore di pressione	± 50 Pa

Anemometro ad ultrasuoni	Direz. Vento: $\pm 1^\circ$ Velocità vento: $\pm 0.2 \text{ m/s} \pm 2\%$
Piranometro a termopila	Classe 2 ($\pm 10\%$)
Pirgeometro a termopila	$\pm 0.1 \text{ W/m}^2$

Un datalogger riceve i segnali dai sensori e li rende disponibili attraverso il protocollo Modbus su TCP/IP in modalità *slave*; il sistema di supervisione si incaricherà di raccogliere con una frequenza impostabile ed utilizzarli per la simulazione del comportamento dinamica dell'edificio.

3.6.3 Registrazione dell'utilizzo di energia elettrica da parte della pompa di calore

La pompa di calore ha un contatore di energia elettrica dedicato. Il contatore è interrogabile da remoto tramite protocollo Modbus su linea RS 485 e fornisce i valori di potenza istantanea, attiva (Classe 1 conforme a IEC 62053-21) e reattiva (Classe 2, conforme a IEC 62053-23), corrente e tensione istantanea. Il contatore rileva il consumo del gruppo motocondensante (compressore, ventilatore, elettronica) e del gruppo idronico (circolatore, elettronica), aggregati in un solo dato. Tra i dati esposti sui registri Modbus della pompa di calore c'è inoltre l'assorbimento elettrico del solo compressore.

3.7 Messa a punto del software di supervisione e controllo

Il sistema software di supervisione e controllo è stato sviluppato in ambiente LabVIEW, implementando un'architettura in tre componenti: la prima si occupa della comunicazione con i dispositivi di monitoraggio, controllo e attuazione; la seconda processa i dati, effettua la simulazione del comportamento dell'edificio, attua i profili di utilizzo impostati per i servizi (es. setpoint riscaldamento/raffreddamento, utilizzo ACS), realizza logiche avanzate di gestione e salva i dati; la terza si occupa di organizzare e visualizzare i dati in interfacce facilmente leggibili dagli operatori.

Le tre sezioni comunicano tra di loro attraverso variabili di tipo *global*. Questo tipo di variabile può essere condiviso da molteplici processi di LabVIEW attivi in parallelo.

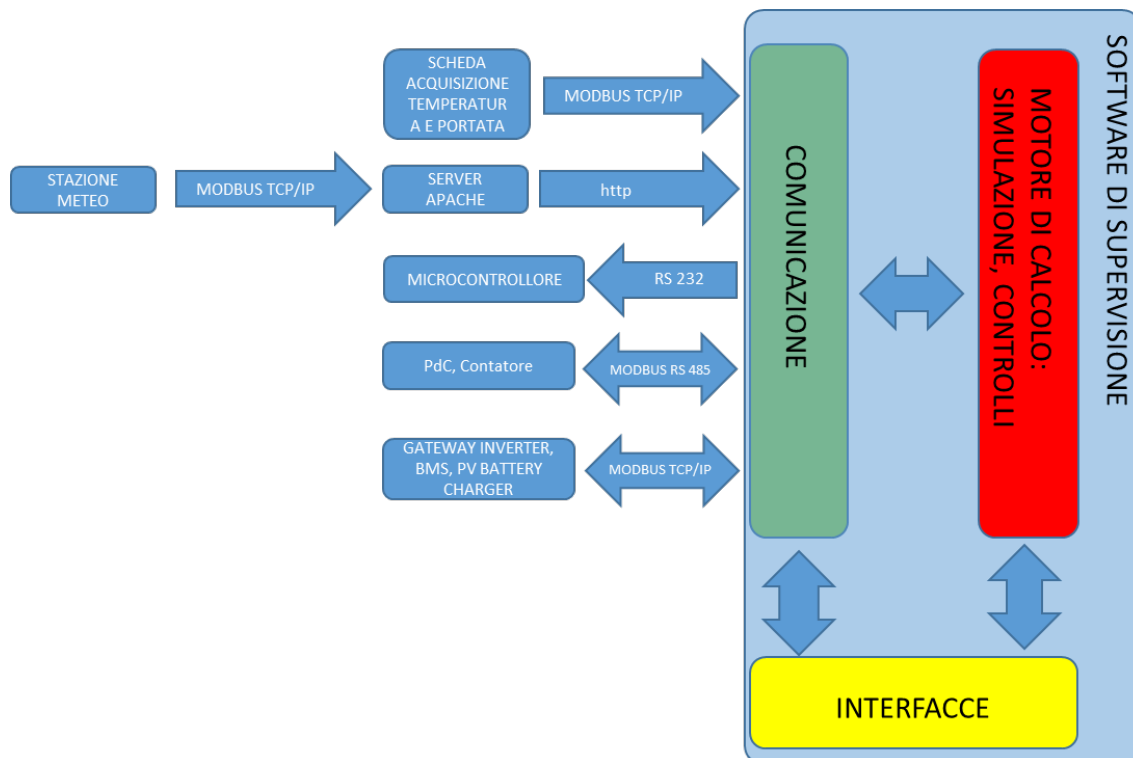


Figura 60. Architettura del software di supervisione e controllo.

3.7.1 Motore di calcolo

Il motore di calcolo dell'architettura software riceve dal layer di comunicazione i dati necessari per effettuare la simulazione (temperature e portate impianto, meteo, profili di carico da realizzare, scelte di gestione dei generatori) e calcola i valori di setpoint da impostare agli attuatori sulla base dei risultati (es. setpoint della temperatura di ritorno dall'emulatore dell'edificio).

Con lo scopo di velocizzare il calcolo e per facilità di programmazione, il codice di simulazione è stato scritto in ambiente MATLAB e poi convertito in un file libreria ".*dll". La routine LabVIEW chiama la libreria e riceve i dati, il processo occupa circa 1 ms.

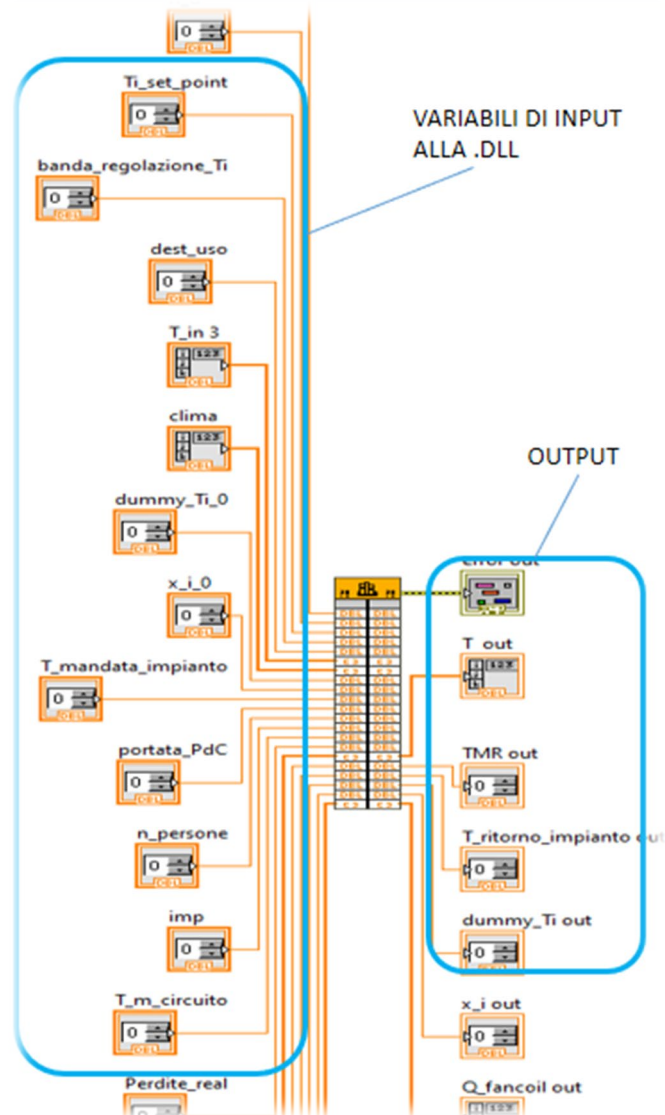


Figura 61. Passaggio dati all'interno del motore di calcolo.

3.7.2 Interfacce di comunicazione

Gestione dei dati di temperatura e portata dell'impianto

La scheda di acquisizione dati utilizzata per campionare e digitalizzare i dati provenienti dai sensori di temperatura e portata viene distribuita dalla casa produttrice con delle librerie software che permettono di interfacciarla ai più comuni linguaggi di programmazione.

Sono state utilizzate le librerie LabVIEW all'interno di un VI (virtual instrument, la routine LabVIEW) che si occupa di configurare lo strumento per l'acquisizione dei dati, impostando i seguenti parametri:

- Indirizzo strumento;
- Risoluzione (impostata a 16 bit, la massima);
- Finestra temporale di campionamento (500 μs);
- Passo temporale di campionamento (1 s).

Il software acquisisce i valori per poi assegnarli alle variabili di tipo global, le variabili sono utilizzate dal motore per le elaborazioni e il salvataggio, inoltre vengono parallelamente visualizzate in un'interfaccia grafica che mostra le letture nei diversi punti dell'impianto (vedi Figura 64).

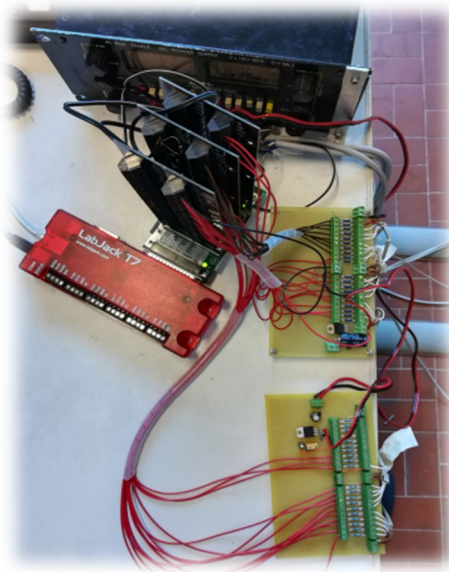


Figura 62. Scheda di acquisizione e partitore di tensione.

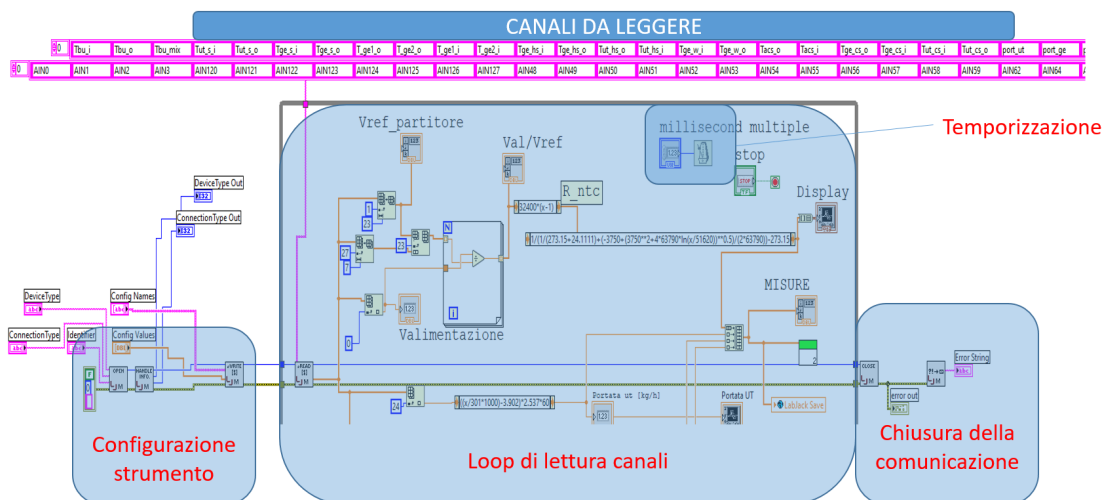


Figura 63. Routine LabVIEW per acquisizione dei valori di temperatura e portata nell'impianto.

DATI METEO STAZIONE DESTEC

Connesso. localhost via TCP/IP

Tempo	Temp.(°C)	Umid.(%)	Vel. vento (m/s)	Dir. vento (°)	Irrag. (W/m2)	Pressione (mBar)	Irrag. p.irg. (W/m2)
2020-01-17 18:50:35 Europe/Rome	10.1	86	1.32	120	5.87747e-39	1022.6	360.133

2019-07-23 2019-07-30 CARICA DATI SALVA

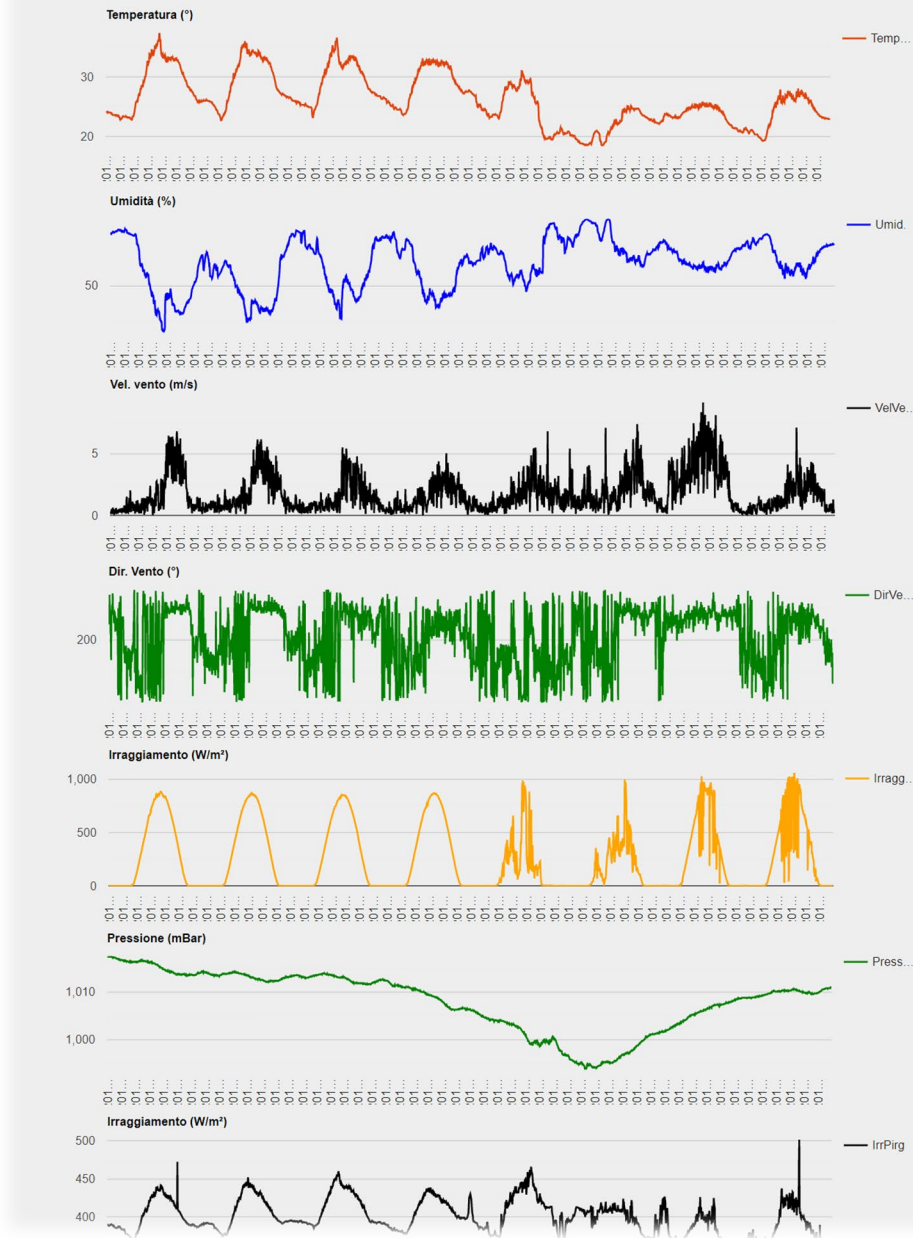


Figura 65. Interfaccia web della stazione meteo.

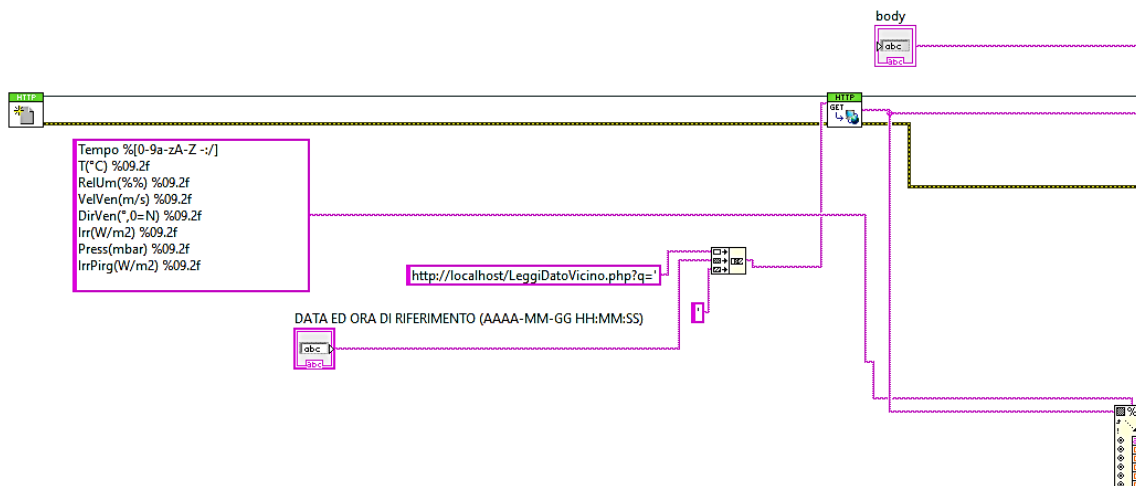


Figura 66. Routine LabVIEW per la richiesta al server dei dati meteo.



Figura 67. Dati meteo: struttura server-client-stazione meteo.

Sezione elettrica dell'apparato sperimentale

Il gateway, che raccoglie i dati provenienti dai dispositivi connessi alla rete elettrica dell'apparato, è interrogato via Modbus su TCP/IP. Il layer di comunicazione (vedi Figura 68) acquisisce tutti i registri resi disponibili dai singoli componenti della rete e scrive su variabili di tipo *global* le grandezze di interesse per il calcolo delle di prestazioni dell'impianto, per poi visualizzarle sul layer di interfaccia (vedi Figura 69).

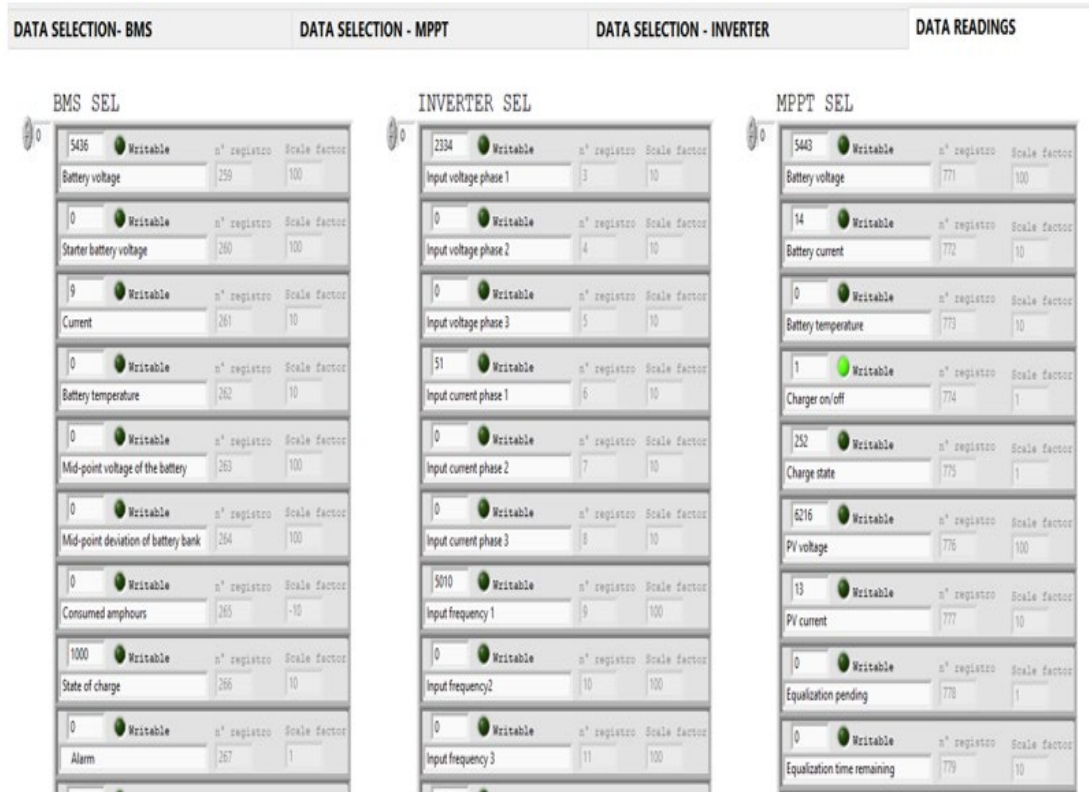


Figura 68. LabVIEW: layer di comunicazione per i componenti elettrici.

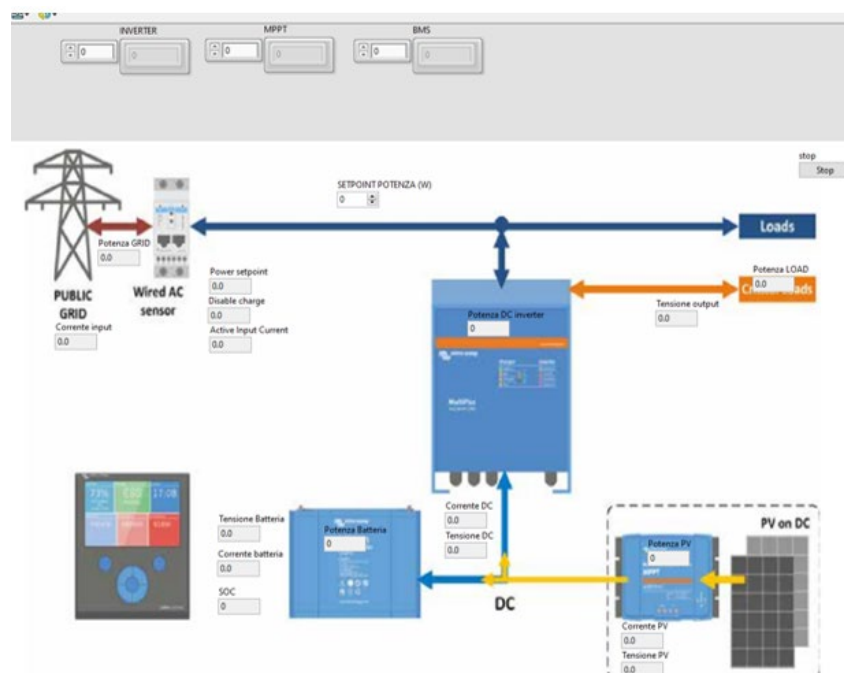


Figura 69. LabVIEW: layer di interfaccia per la visualizzazione dei parametri di funzionamento dell'impianto.

Microcontrollori

Per il controllo dei dispositivi di attuazione si utilizzano schede Arduino Due. La scheda Arduino Due è dotata di due uscite analogiche programmabili con rappresentazione a 12 bit nel range 0.55 – 2.75 V; le uscite vengono condizionate in modo da ottenere il segnale 0 – 10 V necessario per l'attuazione della valvola miscelatrice e del circolatore. La scheda può inoltre gestire pin digitali, con uscita 0 o 2.75 V, che sono usati per il controllo delle valvole a tre vie. Il microcontrollore è stato programmato per ricevere da parte della routine LabVIEW, su protocollo RS 232, una stringa del tipo "4095000010000...<CR>", dove:

- i primi 4 caratteri/byte corrispondono al valore da attuare sul canale analogico 1 (4095: massimo valore nella rappresentazione a 12 bit, corrispondente a 10 V);
- i secondi 4 caratteri/byte corrispondono al valore da attuare sul canale analogico 2;
- il nono carattere/byte corrisponde al valore da attuare sul pin digitale 1 (es. attuazione della valvola a tre vie n. 1);
- il decimo carattere/byte corrisponde al valore da attuare sul pin digitale 2 (es. attuazione della valvola a tre vie n. 2);
- <altri pin digitali>
- ...
- ...
- <CR> carattere di fine pacchetto

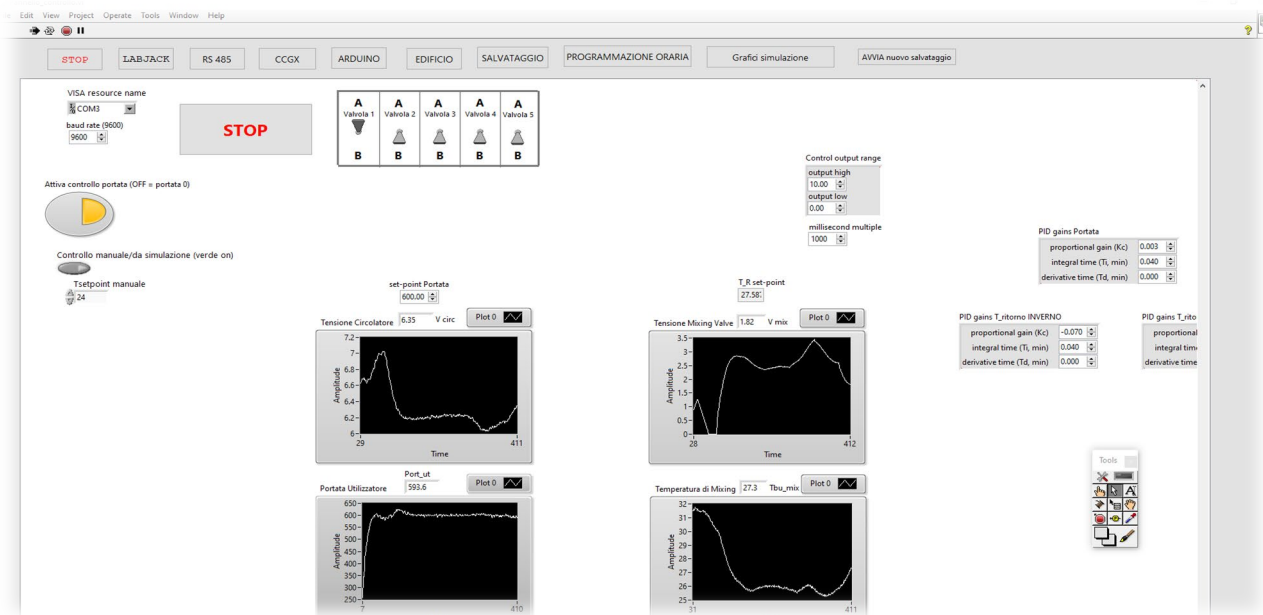


Figura 70. Interfaccia per i controlli delle schede Arduino Due.

Oltre alla routine di comunicazione è stata creata una VI di controllo dotata di interfaccia. La VI implementa un controllo di tipo PID (con coefficienti impostabili dall'utente) e permette di scegliere se settare i valori obiettivo delle variabili da controllare in maniera manuale oppure passare alla modalità simulazione, nella quale i valori di temperatura e portata da attuare sono calcolati dal simulatore di edificio. Il PID si occupa di calcolare il segnale in tensione necessario e di trasmetterlo al layer di comunicazione col microcontrollore.

La risposta ad una variazione a gradino del setpoint mostra come nel caso del *controllo della portata* i tempi di messa a regime siano dell'ordine di qualche decina di secondi per la portata, circa un minuto e mezzo per la temperatura.

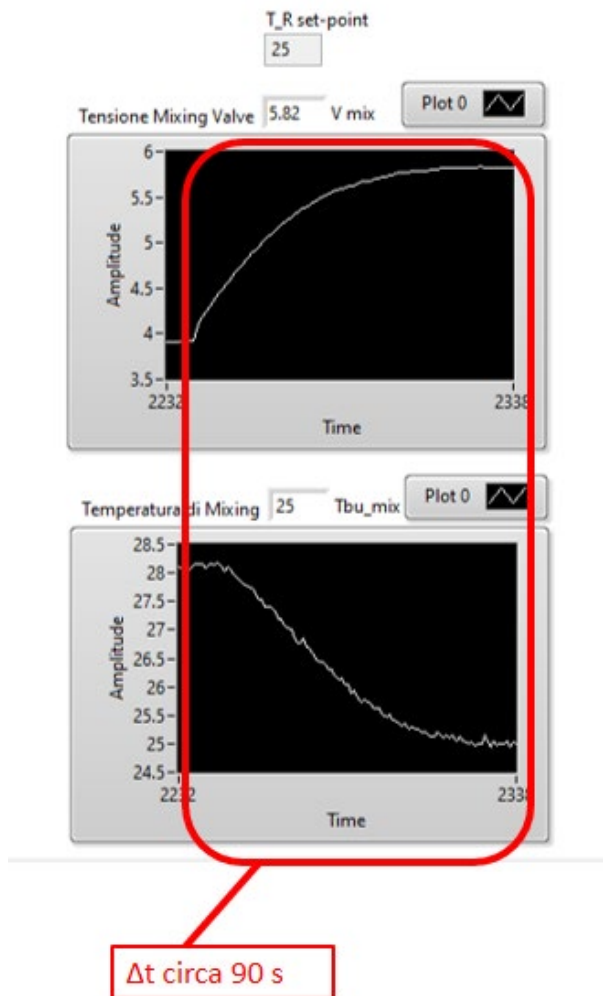


Figura 71. Risposta del sistema di controllo della temperatura alla variazione a gradino del setpoint.

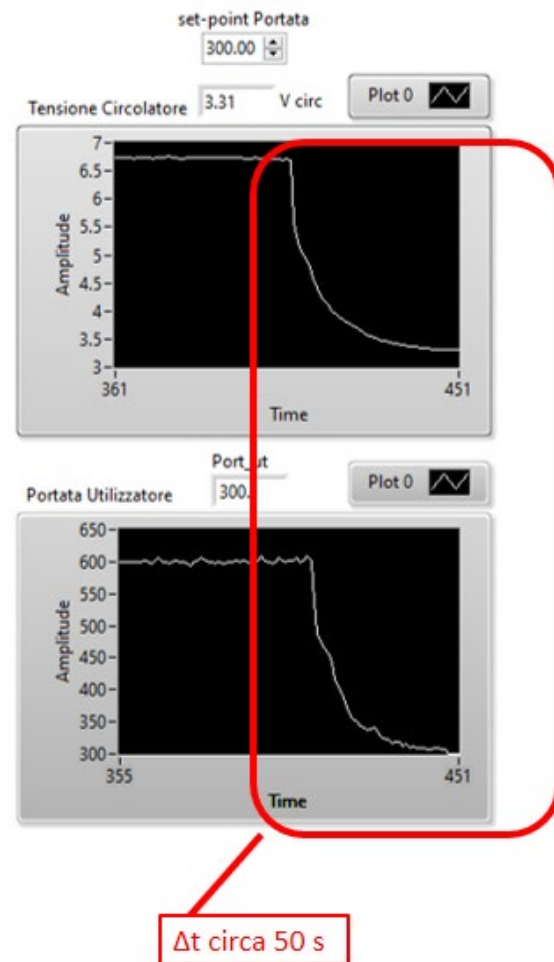


Figura 72. Risposta del sistema di controllo della portata alla variazione a gradino del setpoint.

Anche per il settaggio dei pin digitali che controllano le valvole a tre vie è possibile effettuare un'impostazione manuale oppure attuare i valori che la simulazione richiede, implementando logiche di controllo più avanzate.

Controllo della temperatura di mandata della pompa di calore

Per il controllo della temperatura di mandata della pompa di calore si è scelta una pompa di calore che potesse essere interfacciata con un sistema di controllo industriale. La pompa di calore selezionata è dotata di un'interfaccia Modbus su RS485; la scheda opera come *slave* esponendo nei registri dati sul funzionamento del ciclo frigo, sull'assorbimento elettrico della macchina, sullo stato della macchina e sulle temperature dell'acqua in uscita. A livello di supervisore si è implementato un master Modbus che interroga la macchina e può cambiare i dati scritti su alcuni registri modificabili.

Tra i registri modificabili ci sono quelli che controllano:

- accensione della macchina;
- modalità di funzionamento (estate/inverno);
- temperatura di mandata.

Attraverso l'azione su questi registri possono essere implementate le logiche di gestione più avanzate da parte del sistema di supervisione e controllo.

4 Test della messa a punto effettuata

L'obiettivo del test è quello di verificare la corretta comunicazione tra la componente di simulazione dell'apparato *hardware-in-the-loop* e i dispositivi fisici, il corretto funzionamento dell'emulatore dell'edificio che deve essere in grado di realizzare i profili di temperatura e potenza richiesti, insieme ad un generale corretto funzionamento del sistema di supervisione e controllo.

A titolo dimostrativo dei diversi test effettuati, viene qui di seguito riportata una prova nella quale l'impianto viene fatto funzionare per due giorni in modalità raffreddamento. L'emulatore dell'edificio dovrà quindi restituire una temperatura di ritorno, T_{rit} , maggiore della temperatura di mandata, T_{mand} , secondo quanto impostato dalla simulazione dinamica, $T_{rit,set}$. Il confronto tra il profilo di temperatura di ritorno da attuare (linea nera tratteggiata in Figura 73) e quello effettivamente realizzato dall'emulatore (linea arancione continua in Figura 73) mostra un'ottima accuratezza qualitativa nell'inseguimento del setpoint.

L'analisi quantitativa dello scostamento tra il valore di setpoint, $T_{rit,set}$ e valore misurato, T_{rit} , fornisce un errore quadratico medio pari a 0.1 K. Passando all'analisi della potenza scambiata dall'emulatore, si vede che il carico teorico (linea tratteggiata nera in Figura 74) ha delle rapide variazioni dovute al cambio repentino degli apporti gratuiti collegati ai profili di occupazione e al cambiamento a gradino della temperatura di setpoint della zona termica. Qualitativamente, si nota un'ottima corrispondenza anche dal punto di vista della potenza termica. Dal punto di vista quantitativo, lo scostamento quadratico medio durante la prova è stato pari a 76 W. I risultati confermano la capacità dell'emulatore di realizzare le azioni imposte dalla simulazione dinamica.

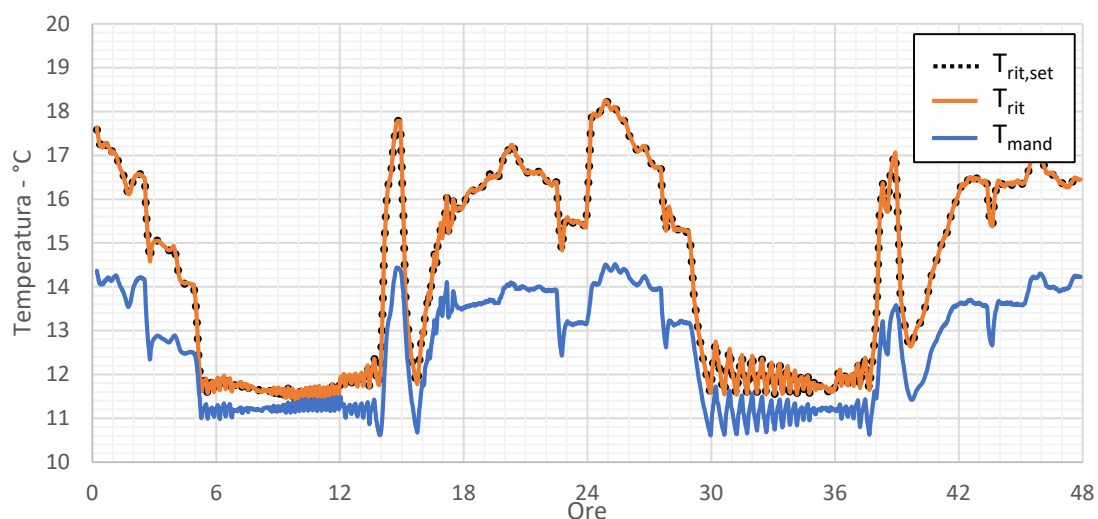


Figura 73. Esempio di temperature dell'emulatore di edificio in caso di raffrescamento estivo: $T_{rit,set}$ da simulazione (linea tratteggiata nera), T_{rit} realizzata dal dispositivo (linea continua arancione), T_{mand} (linea continua blu).

Come ulteriore test dell'apparato sperimentale, in Figura 75 si riportano 24 ore di funzionamento in riscaldamento. L'edificio simulato è un appartamento di circa 100 m² in cui è presente una termostatazione di zona per l'aria interna di 20±1°C. In questa prova, all'emulatore dell'edificio è stato richiesto di riprodurre la potenza scambiata dai terminali di impianto (fancoil), alimentati con una temperatura nominale fissa di 38 °C, secondo quanto simulato dal codice dinamico e dai modelli presentati nella Sezione 3.3.1.

Si nota come l'andamento qualitativo della potenza termica, $\dot{Q}_{fancoil,simu}$, e \dot{Q}_{emu} siano praticamente coincidenti. Quantitativamente, l'errore quadratico medio nel periodo di test è stato di circa 116 W, valore pienamente compatibile con le incertezze di misura dell'apparato. In termini di energia, lo scostamento relativo tra il valore simulato e quello realizzato dall'emulatore nelle 24 ore di test è circa pari al 4%.

Nella Figura 75, viene riportato anche l'output termico della pompa di calore, \dot{Q}_{pdc} . Dall'analisi dei profili si nota uno scostamento tra l'energia fornita dalla pompa di calore e quella ceduta dai fancoil. Questa

discrepanza è rappresentativa dei transitori dovuti alla capacità termica dell'acqua dell'impianto di riscaldamento e, nei tre momenti principali in cui si raggiunge una condizione stazionaria, delle perdite del sistema di distribuzione. In Figura 76, vengono riportati gli andamenti di temperatura relativi al test. Si vede come la pompa di calore riesca a mantenere la zona termica al valore di setpoint desiderato.

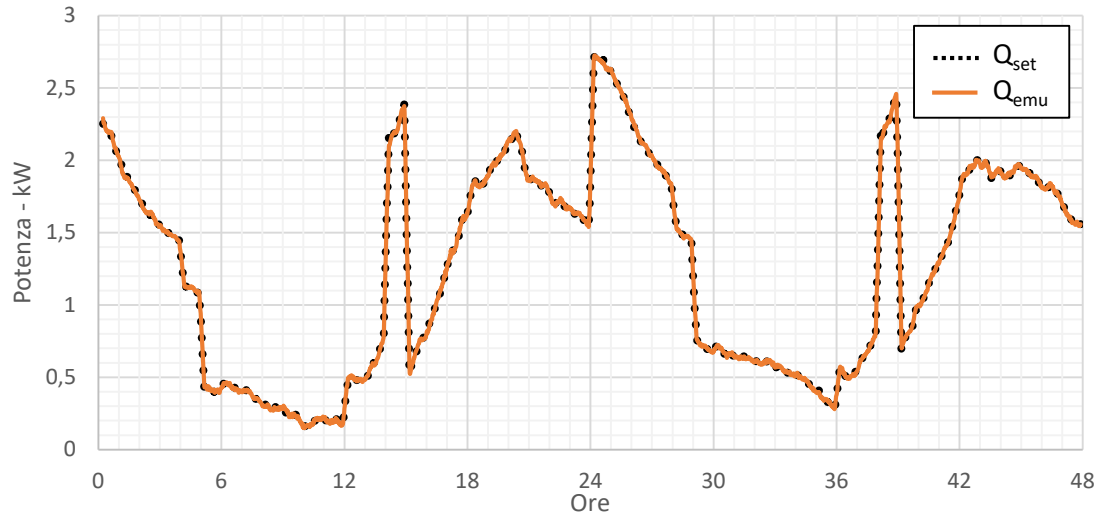


Figura 74. Esempio di potenza scambiata dell'emulatore di edificio in caso di raffreddamento estivo: Q_{set} da simulazione (linea tratteggiata nera), Q_{emu} realizzata dal dispositivo (linea continua arancione).

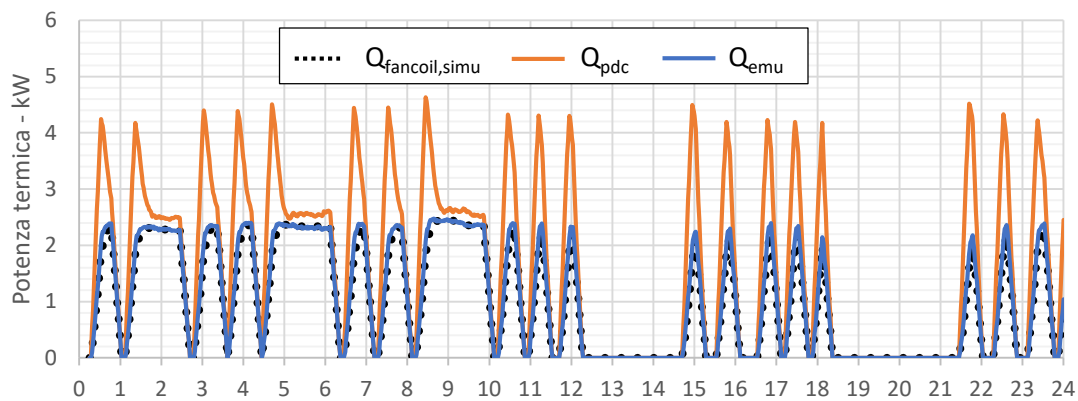


Figura 75. Esempio di potenza scambiata dell'emulatore di edificio in caso di riscaldamento: $Q_{fancoil,simu}$ da simulazione (linea tratteggiata nera), Q_{emu} potenza scambiata dall'emulatore.

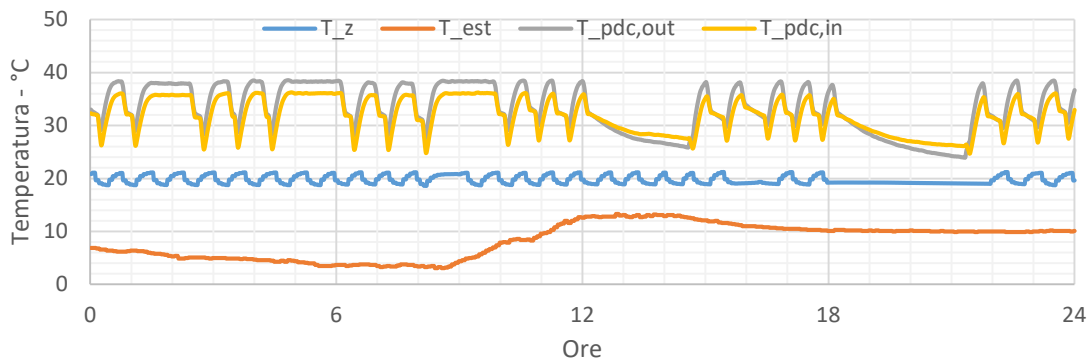


Figura 76. Temperatura della zona termica simulata, T_z , temperatura esterna reale, T_{est} , temperatura di mandata, $T_{pdc,out}$, e ritorno della pompa di calore, $T_{pdc,in}$.

Complessivamente, i risultati dimostrano come l'apparato sperimentale sia in grado di emulare anche una dinamica di impianto relativamente veloce come quella che si verifica in presenza di un ridotto fabbisogno

di riscaldamento e regolazione on-off di zona con terminali veloci. Inoltre, è confermato che l'apparato sperimentale riesce a riprodurre e monitorare i transitori del sistema edificio-impianto.

5 Descrizione regole di controllo tradizionali e avanzate da implementare nell'apparato sperimentale

5.1 Regole di controllo/integrazione attualmente utilizzate dagli operatori per i sistemi ibridi commerciali

Per gli edifici-tipo ad alta efficienza in esame, la regolazione degli impianti termici ed elettrici disponibili (descritti nella Sezione 2.2.3) ha lo scopo di garantire la corretta climatizzazione degli ambienti in riscaldamento e raffrescamento e la produzione di acqua calda sanitaria alla corretta temperatura di erogazione. Attraverso opportune regole di controllo di questi impianti, si mira a realizzare i servizi in modo efficace ed efficiente, agendo su più livelli:

- 1) il controllo della temperatura della zona termica dell'edificio, sia in riscaldamento che in raffrescamento;
- 2) il controllo della temperatura di mandata verso i terminali di emissione, sia in riscaldamento che in raffrescamento;
- 3) la modalità di gestione dell'impianto di generazione ibrido pompa di calore elettrica aria/acqua e caldaia a gas naturale, in termini di accensione e commutazione tra i due generatori, sia in riscaldamento, sia per il servizio di ACS;
- 4) il controllo della temperatura del serbatoio caldo;
- 5) il controllo della temperatura del serbatoio freddo;
- 6) la modalità di gestione di carica e scarica delle batterie ad accumulo elettrochimico.

Per ognuno di questi 6 livelli di controllo/integrazione, laddove siano presenti i relativi componenti nel sistema edificio-impianto, sono previste regole di tipo tradizionale, mostrate di seguito, e regole di tipo avanzato, oggetto della prossima Sezione 5.2.

Come regole di tipo tradizionale si intendono quelle attualmente utilizzate dagli operatori nei sistemi ibridi commerciali. In particolare, la Tabella 16 definisce le regole di controllo tradizionali da considerare come baseline di riferimento, nell'ottica di mostrare (nelle successive annualità del PTR, sia per via sperimentale che simulativa) come l'introduzione di regole di tipo avanzato possa portare a un effettivo efficientamento energetico e a un risparmio economico sui costi operativi rispetto a questo riferimento.

Tabella 16. Definizione delle regole di controllo tradizionali (baseline di riferimento).

Tipo di edificio	Livello di controllo	Descrizione	Codice
Appartamento	Temperatura dell'aria nella zona termica dell'edificio	Setpoint fisso e regolazione con isteresi in banda morta di ampiezza fissa per il servizio di riscaldamento.	<u>A1.0</u>
Appartamento	Temperatura dell'acqua di mandata ai terminali	Regolazione di tipo climatico (riduzione della temperatura di mandata al crescere della temperatura dell'aria esterna) per il servizio di riscaldamento.	<u>A2.0</u>
Appartamento	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i generatori in funzione della temperatura dell'aria esterna (al di sotto di un valore fisso, accensione della caldaia). Produzione di ACS, solo in modalità istantanea, con accensione della caldaia al momento della richiesta.	<u>A3.0</u>
Appartamento	Temperatura del serbatoio caldo	Serbatoio caldo non presente.	--
Appartamento	Temperatura del serbatoio freddo	Serbatoio freddo non presente.	--

Appartamento	Gestione delle batterie	Batterie non presenti.	--
Villa	Temperatura dell'aria nella zona termica dell'edificio	Setpoint fisso e regolazione con isteresi in banda morta di ampiezza fissa per i servizi di riscaldamento e raffrescamento.	<u>V1.0</u>
Villa	Temperatura dell'acqua di mandata ai terminali	Regolazione di tipo climatico (riduzione della temperatura di mandata al crescere della temperatura dell'aria esterna) per il servizio di riscaldamento. Temperatura di mandata fissa per il raffrescamento.	<u>V2.0</u>
Villa	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento e per la ricarica del serbatoio caldo, commutazione tra i generatori in funzione della temperatura dell'aria esterna (al di sotto di un valore fisso, accensione della caldaia).	<u>V3.0</u>
Villa	Temperatura del serbatoio caldo	Setpoint fisso compatibile col servizio di ACS e regolazione con isteresi in banda morta di ampiezza fissa.	<u>V4.0</u>
Villa	Temperatura del serbatoio freddo	Serbatoio freddo non presente.	--
Villa	Gestione delle batterie	Batterie non presenti.	--
Ufficio	Temperatura dell'aria nella zona termica dell'edificio	Setpoint fisso e regolazione con isteresi in banda morta di ampiezza fissa per i servizi di riscaldamento e raffrescamento.	<u>U1.0</u>
Ufficio	Temperatura dell'acqua di mandata ai terminali	Regolazione di tipo climatico (riduzione della temperatura di mandata al crescere della temperatura dell'aria esterna) per il servizio di riscaldamento. Temperatura di mandata fissa per il raffrescamento.	<u>U2.0</u>
Ufficio	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i generatori in funzione della temperatura dell'aria esterna (al di sotto di un valore fisso, accensione della caldaia).	<u>U3.0</u>
Ufficio	Temperatura del serbatoio caldo	Serbatoio caldo non presente.	--
Ufficio	Temperatura del serbatoio freddo	Serbatoio termicamente in evoluzione libera (sempre bypassato dall'impianto di raffrescamento).	<u>U5.0</u>
Ufficio	Gestione delle batterie	In surplus di energia elettrica rispetto alla domanda, ricarica delle batterie prioritaria rispetto alla cessione di energia elettrica alla rete. In deficit di energia elettrica, scarica delle batterie prioritaria rispetto al prelievo di energia elettrica dalla rete.	<u>U6.0</u>

5.2 Regole di controllo/integrazione avanzate per l'efficientamento dei sistemi ibridi

Nell'ottica di migliorare l'efficienza energetica e ridurre i costi di esercizio dei sistemi edificio-impianto scelti, si propongono regole di controllo avanzate, riguardanti la gestione dei generatori termici del sistema ibrido e degli accumuli di energia elettrica (batterie) e termica (serbatoio caldo e serbatoio freddo). Come indicatore di efficienza energetica si usa il Primary Energy Ratio (PER), dato dal rapporto tra l'effetto utile relativo al servizio o ai servizi considerati (energia fornita per riscaldamento, raffrescamento, ACS) e il corrispondente utilizzo di energia primaria, determinato attraverso opportuni coefficienti di conversione, dipendenti dal vettore energetico impiegato (gas naturale o energia elettrica).

In Tabella 17 sono riportati possibili esempi di regole avanzate, da confrontare, caso per caso, con la baseline definita nella Sezione 5.1. Alcune di queste regole si basano sulle previsioni meteorologiche e sulle richieste future di energia per i vari servizi, oltre che sulla presenza, in certe ore del giorno, di tariffe dell'energia elettrica più convenienti qualora si attuino azioni di riduzione del prelievo di energia elettrica dalla rete (*demand-response*). Laddove non espressamente indicato, si intende che la regola di controllo del caso di riferimento sia mantenuta inalterata.

Tabella 17. Definizione delle regole di controllo avanzate.

Tipo di edificio	Livello di controllo	Descrizione	Codice
Appartamento	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i generatori in funzione del Coefficient of Performance (COP) della pompa di calore in condizioni operative, con accensione della caldaia quando la pompa di calore opererebbe con un COP inferiore ad un valore di soglia fisso. Tale valore è determinato su basi di efficienza energetica, cioè di massimizzazione istantanea del PER.	<u>A3.1</u>
Appartamento	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i generatori in funzione del COP della pompa di calore in condizioni operative, con accensione della caldaia quando la pompa di calore opererebbe con un COP inferiore ad un valore di soglia variabile nel tempo. Tale valore è determinato su basi economiche, cioè di minimizzazione istantanea dei costi operativi, e varia in funzione della fascia oraria, tenendo anche conto di richieste di <i>demand-response</i> (D-R).	<u>A3.2</u>
Villa	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento e per la precarica del serbatoio caldo, accensione e commutazione tra i generatori prestabilite da un algoritmo di ottimizzazione predittivo, avente come obiettivo la massimizzazione del PER dei servizi di riscaldamento e ACS.	<u>V3.1</u>
Villa	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento e per la precarica del serbatoio caldo, accensione e commutazione tra i generatori prestabilite da un algoritmo di ottimizzazione predittivo, avente come obiettivo la minimizzazione dei costi operativi dei servizi di riscaldamento e ACS, tenendo anche conto di richieste di D-R.	<u>V3.2</u>
Villa	Temperatura del serbatoio caldo	Precarica del serbatoio in orari e a temperatura prestabiliti da un ottimizzatore predittivo, che ha come obiettivo la massimizzazione del PER. Mantenimento della temperatura minima compatibile col servizio di ACS.	<u>V4.1</u>
Villa	Temperatura del serbatoio caldo	Precarica del serbatoio in orari e a temperatura prestabiliti da un ottimizzatore predittivo, che ha come obiettivo la minimizzazione dei costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R. Mantenimento della temperatura minima compatibile col servizio di ACS.	<u>V4.2</u>
Ufficio	Gestione del sistema	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i	<u>U3.1</u>

	ibrido pompa di calore e caldaia	generatori in funzione del COP della pompa di calore in condizioni operative, con accensione della caldaia quando la pompa di calore opererebbe con un COP inferiore ad un valore di soglia fisso. Tale valore è determinato su basi di efficienza energetica, cioè di massimizzazione istantanea del PER.	
Ufficio	Gestione del sistema ibrido pompa di calore e caldaia	Per il servizio di riscaldamento, commutazione tra i generatori in funzione del COP della pompa di calore in condizioni operative, con accensione della caldaia quando la pompa di calore opererebbe con un COP inferiore ad un valore di soglia variabile nel tempo. Tale valore è determinato su basi economiche, cioè di minimizzazione istantanea dei costi operativi, e varia in funzione della fascia oraria, tenendo anche conto di richieste di D-R.	<u>U3.2</u>
Ufficio	Temperatura del serbatoio freddo	Precarica del serbatoio in orari e a temperatura prestabiliti da un ottimizzatore predittivo, che ha come obiettivo la massimizzazione del PER.	<u>U5.1</u>
Ufficio	Temperatura del serbatoio freddo	Precarica del serbatoio in orari e a temperatura prestabiliti da un ottimizzatore predittivo, che ha come obiettivo la minimizzazione dei costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R.	<u>U5.2</u>
Ufficio	Gestione delle batterie	Gestione dello stato di carica, su indicazione di un ottimizzatore predittivo che tiene conto delle condizioni di autoconsumo, prelievo di energia elettrica dalla rete e cessione alla rete, al fine di massimizzare il PER dei servizi di riscaldamento e raffrescamento.	<u>U6.1</u>
Ufficio	Gestione delle batterie	Gestione dello stato di carica, su indicazione di un ottimizzatore predittivo che tiene conto delle condizioni di autoconsumo, prelievo di energia elettrica dalla rete e cessione alla rete, al fine di minimizzare i costi operativi dei servizi di riscaldamento e raffrescamento, tenendo anche conto di richieste di D-R.	<u>U6.2</u>

5.3 Predisposizione dell'apparato sperimentale all'implementazione delle strategie di controllo

In riferimento alle regole di controllo, tradizionali e avanzate, descritte rispettivamente nelle Sezioni 5.1 e 5.2, si illustrano le procedure di implementazione a livello dell'apparato *hardware-in-the-loop* (descritto nella Sezione 3), ai fini della determinazione sperimentale delle prestazioni del sistema impiantistico e della validazione dei modelli simulativi, distinguendo tra controllo effettivo dei componenti *hardware* e gestione dei *software* di emulazione. Di seguito, ci si riferisce all'implementazione delle strategie di controllo precedentemente illustrate, attraverso i codici riportati nell'ultima colonna della Tabella 16 e Tabella 17.

Implementazione delle regole di controllo con codici A1.0, V1.0 ed U1.0

Il controllore con isteresi, con parametri impostabili dall'utente, è modellato a livello software all'interno della "*.dll" che simula il comportamento del sistema edificio + terminali. La "*.dll" comunica al sistema di supervisione, tramite scrittura su di una variabile booleana, se l'impianto deve trovarsi in stato di on o di off. Il valore della variabile è quindi trasmesso via Modbus al generatore che attua fisicamente il comando.

Implementazione della regola di controllo con codice A2.0

I parametri che identificano la curva di regolazione sono impostabili dall'utente e definiscono una relazione univoca tra la temperatura esterna e la temperatura di mandata. Il motore di calcolo, una volta acquisita la temperatura esterna, calcola la temperatura di mandata e la trasmette via Modbus alla scheda del generatore che si occuperà dell'attuazione.

Implementazione della regola di controllo con codice A3.0

La temperatura di commutazione è impostabile dall'utente attraverso l'interfaccia software. Il sistema di supervisione confronta la temperatura esterna con quella di commutazione e scrive su una variabile di tipo boolean la configurazione che deve assumere il sistema, cioè caldaia on o pompa di calore on. Per quanto riguarda il servizio di riscaldamento, nel primo caso (caldaia on) la variabile è letta dalla "*.dll" che si occupa di simulare il comportamento della caldaia, mantenendo accesa la pompa di calore per il mantenimento della temperatura dell'acqua nell'impianto; invece nel secondo caso (pompa di calore on), inviato il segnale di accensione alla pompa di calore, la "*.dll" legge dalla variabile dedicata la temperatura di mandata in arrivo e calcola la temperatura di ritorno da attuare, scrivendola in una variabile che il sistema di supervisione utilizza per la stima, tramite controllo proporzionale-integrale (PI), del livello di apertura della valvola da comunicare all'emulatore di edificio.

Per il servizio di ACS, la gestione è sempre a carico della caldaia; il servizio di produzione istantanea viene modellato all'interno della "*.dll".

Implementazione delle regole di controllo con codici V2.0 e U2.0

Per il servizio di riscaldamento, si applicano le stesse procedure descritte al punto A2.0.

Per il servizio di raffrescamento, la temperatura di mandata fissa, impostabile dall'utente, viene comunicata alla scheda elettronica della macchina. La modalità di funzionamento della macchina (riscaldamento o raffrescamento) è scelta dall'utente attraverso l'interfaccia software.

Implementazione della regola di controllo con codice V3.0

Per il servizio di riscaldamento e per la ricarica del serbatoio caldo, si applicano le stesse procedure di accensione e commutazione tra i generatori descritte al punto A3.0.

Implementazione della regola di controllo con codice V4.0

Il controllore con isteresi, con parametri impostabili dall'utente, è modellato a livello di sistema di supervisione. Dalla lettura della temperatura di serbatoio, il sistema decide se attuare la ricarica. Il generatore attivo è selezionato secondo i criteri esposti al punto precedente (V3.0).

Se il generatore attivo è la caldaia, il sistema comunica al microcontrollore l'accensione della resistenza immersa nel serbatoio, a potenza massima.

Se il generatore attivo è la pompa di calore, il sistema si occupa prima di comunicare al microcontrollore l'azione di switch della valvola a tre vie n. 4 sulla via 1 (vedi Figura 56), dopodiché, se necessario, comunica alla scheda della macchina l'accensione a temperatura di mandata massima.

Implementazione della regola di controllo con codice U3.0

Per il servizio di riscaldamento, si applicano le stesse procedure descritte al punto A3.0.

Implementazione della regola di controllo con codice U5.0

Il controllore con isteresi, con parametri impostabili dall'utente, è modellato a livello di sistema di supervisione. Dalla lettura della temperatura di serbatoio, il sistema decide se attuare la ricarica. Prima dell'avvio della pompa di calore in modalità macchina frigorifera, il sistema si occupa di comunicare al microcontrollore l'azione di switch della valvola a tre vie n. 4 sulla via 2 e della valvola n. 3 sulla via 1 (vedi Figura 56), dopodiché, se necessario, comunica alla scheda della macchina l'accensione a temperatura di mandata minima.

Implementazione della regola di controllo con codice U6.0

Il sistema di supervisione gestisce tramite il gateway Modbus i parametri relativi ai dispositivi collegati alla rete elettrica. In particolare, è possibile controllare la potenza da scambiare con la rete (in prelievo o in cessione). Settando il parametro a 0, il dispaccio di energia elettrica avverrà con logica a "isola".

Lo stato di carica delle batterie (SoC) è monitorato e può essere impostato un valore di soglia al di sotto del quale non si intende proseguire a scaricare l'accumulo.

In una condizione di surplus di energia elettrica (grazie alla produzione fotovoltaica), essa sarà utilizzata per caricare le batterie. Se lo SoC si trova al 100% (batterie completamente cariche), essa sarà ceduta alla rete.

In una condizione di deficit di energia elettrica, essa sarà prelevata dalle batterie. Se lo SoC si trova al valore minimo di soglia, l'energia mancante sarà prelevata dalla rete.

Implementazione delle regole di controllo con codici A3.1 e U3.1

Il COP di commutazione è impostabile dall'utente attraverso l'interfaccia software. Se la pompa di calore è accesa, il sistema calcola il COP effettivo attraverso i dati monitorati e lo confronta con quello di switch per decidere se cambiare generatore. Se ad essere accesa è la caldaia, il sistema valuta il COP che avrebbe la pompa di calore attraverso una correlazione che richiede la conoscenza della temperatura esterna, della temperatura di mandata richiesta e del carico termico da fornire.

L'attuazione dello switch *hardware/software* avviene secondo le procedure descritte al punto A3.0.

Implementazione delle regole di controllo con codici A3.2 e U3.2

In questo caso, il COP di commutazione dipende dalla fascia oraria, tenendo anche conto di richieste di *demand-response*. Il profilo orario del COP di commutazione è impostabile dall'utente attraverso l'interfaccia software o calcolabile attraverso un semplice programma che richiede la conoscenza dei prezzi orari dell'energia elettrica e del gas naturale e del rendimento termico della caldaia. Se la pompa di calore è accesa, il sistema calcola il COP effettivo attraverso i dati monitorati e lo confronta con quello di switch per quella fascia oraria e decide se cambiare generatore. Se ad essere accesa è la caldaia, il sistema valuta il COP che avrebbe la pompa di calore attraverso una correlazione che richiede la conoscenza della temperatura esterna, della temperatura di mandata richiesta e del carico termico da fornire.

L'attuazione dello switch *hardware/software* avviene secondo le procedure descritte al punto A3.0.

Implementazione della regola di controllo con codice V3.1

La scelta del generatore da attivare è attuata implementando un profilo di utilizzo determinato da un ottimizzatore predittivo, che si basa anche sulle previsioni meteorologiche e sulle richieste future di energia. L'ottimizzatore comunica al sistema di controllo quale generatore deve risultare attivo, con l'obiettivo di massimizzare l'efficienza energetica dell'impianto, ossia il PER.

Per il servizio di riscaldamento e per la precarica del serbatoio caldo, si applicano le stesse procedure di accensione e commutazione tra i generatori descritte al punto A3.0.

Implementazione della regola di controllo con codice V3.2

La scelta del generatore da attivare è attuata implementando un profilo di utilizzo determinato da un ottimizzatore predittivo, che si basa anche sulle previsioni meteorologiche e sulle richieste future di energia. L'ottimizzatore comunica al sistema di controllo quale generatore deve risultare attivo, con l'obiettivo, in questo caso, di minimizzare i costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R.

Per il servizio di riscaldamento e per la precarica del serbatoio caldo, si applicano le stesse procedure di accensione e commutazione tra i generatori descritte al punto A3.0.

Implementazione della regola di controllo con codice V4.1

L'ottimizzatore predittivo comunica al sistema di controllo quando iniziare la precarica, quale generatore attivare per la sua effettuazione e a quale temperatura di serbatoio arrestare l'operazione (compatibilmente con le potenzialità del generatore accesso di fornire un'adeguata temperatura di mandata). L'obiettivo è la massimizzazione del PER, sfruttando anche l'autoconsumo di energia prodotta dall'impianto fotovoltaico.

Se l'ottimizzatore considera attiva la caldaia, il sistema comunica al microcontrollore l'accensione della resistenza immersa nel serbatoio, a potenza massima.

Se l'ottimizzatore considera attiva la pompa di calore, il sistema si occupa prima di comunicare al microcontrollore l'azione di switch della valvola a tre vie n. 4 sulla via 1 (vedi Figura 56), dopodiché comunica alla scheda della macchina l'accensione a temperatura di mandata massima.

In ogni caso, il sistema garantirà il mantenimento della temperatura minima compatibile col servizio di ACS.

Implementazione della regola di controllo con codice V4.2

L'ottimizzatore predittivo comunica al sistema di controllo quando iniziare la precarica, quale generatore attivare per la sua effettuazione e a quale temperatura di serbatoio arrestare l'operazione (compatibilmente con le potenzialità del generatore acceso di fornire un'adeguata temperatura di mandata). L'obiettivo è la minimizzazione dei costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R e sfruttando l'autoconsumo di energia prodotta dall'impianto fotovoltaico.

Per quanto riguarda l'implementazione delle azioni sul serbatoio, dipendenti dalla sua temperatura e da quale generatore è attivo, si applicano le stesse procedure descritte al punto precedente (V4.1).

Implementazione della regola di controllo con codice U5.1

L'ottimizzatore predittivo comunica al sistema di controllo quando iniziare la precarica e a quale temperatura di serbatoio arrestare l'operazione (compatibilmente con le potenzialità della pompa di calore, in modalità raffrescamento, di fornire un'adeguata temperatura di mandata). L'obiettivo è la massimizzazione del PER.

Implementazione della regola di controllo con codice U5.2

L'ottimizzatore predittivo comunica al sistema di controllo quando iniziare la precarica e a quale temperatura di serbatoio arrestare l'operazione (compatibilmente con le potenzialità della pompa di calore, in modalità macchina frigorifera, di fornire un'adeguata temperatura di mandata). L'obiettivo è la minimizzazione dei costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R.

Implementazione della regola di controllo con codice U6.1

Lo stato di carica delle batterie è gestito attraverso l'implementazione di un opportuno profilo di prelievo, determinato dall'ottimizzatore predittivo, il quale tiene conto delle condizioni di autoconsumo dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico, prelievo di energia elettrica dalla rete e cessione alla rete, al fine di massimizzare il PER.

In una condizione di surplus di energia elettrica, l'ottimizzatore comunicherà al sistema di supervisione e controllo se è globalmente più conveniente cederla alla rete, utilizzarla per caricare le batterie oppure utilizzarla per caricare il serbatoio freddo, sfruttando l'energia elettrica in eccesso per alimentare, parzialmente o interamente, la pompa di calore, da accendere in modalità macchina frigorifera.

In una condizione di deficit di energia elettrica, l'ottimizzatore comunicherà al sistema di supervisione e controllo se è globalmente più conveniente prelevare l'energia mancante dalle batterie o dalla rete.

Implementazione della regola di controllo con codice U6.2

Si seguono le stesse procedure descritte al punto precedente (U6.1), ma implementando un profilo di gestione del sistema elettrico (cioè, carica o prelievo dalle batterie, cessione o prelievo dalla rete, accensione della pompa di calore in modalità macchina frigorifera per caricare il serbatoio freddo) determinato dall'ottimizzatore predittivo che, in questo caso, ha come obiettivo la minimizzazione dei costi operativi, tenendo anche conto di richieste di D-R.

6 Conclusioni

La presente relazione tecnica ha presentato le attività e i risultati ottenuti nel primo anno di attività del PTR 2019-2021. La linea di attività 3.28 del WP 3, dal titolo “Messa a punto dell’apparato sperimentale e definizione dei test sulle logiche di controllo avanzate per impianti ibridi in edifici ad alta efficienza” ha riguardato parallelamente una componente modellistica e una sperimentale.

Nella prima parte, quella simulativa, sono stati individuati e analizzati i “profili-tipo” giornalieri di carico elettrico e termico di edifici residenziali e del settore terziario attraverso simulazioni dinamiche e tecniche di clustering. L’analisi ha permesso di sintetizzare i carichi elettrici e termici in quattro classi di profili di carico e dieci edifici-tipo. Gli edifici tipo riguardano appartamenti, villette e uffici in tre contesti climatici: Torino, Pisa e Catania. Le classi di carico permettono di visualizzare le caratteristiche della richiesta giornaliera di energia in funzione del mese e del giorno della settimana. La classe “pensionato” si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana. La classe “famiglia” si caratterizza per avere profili di carico che si differenziano tra i giorni feriali e i giorni festivi. La classe “lavoratore” si caratterizza per avere simili profili di carico nei vari giorni della settimana, ma con andamenti diversi dal “pensionato” a causa di un diverso profilo di occupazione dell’edificio. La classe “ufficio” si caratterizza per avere richieste di riscaldamento diverse tra il lunedì e gli altri giorni lavorativi, a causa dei due giorni di spegnimento dell’impianto durante il fine settimana; non si notano invece differenze significative tra i giorni lavorativi della stagione estiva, poiché l’inerzia termica dell’edificio concentra la richiesta di raffrescamento nelle ore serali. Come si evince dalla classificazione appena descritta, l’analisi dei carichi ha evidenziato che, per edifici ad alta efficienza, i profili di utilizzazione (apporti interni) e la programmazione di accensione degli impianti sono elementi predominanti nel determinare l’evoluzione oraria dei fabbisogni. Sebbene i consumi stagionali siano ovviamente dipendenti dal contesto climatico, dalle dimensioni e dal rapporto superficie -volume dell’edificio, sono presenti evidenti analogie per quanto riguarda l’andamento orario dei fabbisogni su base giornaliera, in funzione della tipologia di utenza considerata. I “profili-tipo” ottenuti fungeranno da riferimento per le prove sperimentali da effettuare nelle successive annualità, in quanto permettono di individuare le condizioni operative più rappresentative da analizzare sperimentalmente.

La seconda parte delle attività ha riguardato la messa a punto dell’apparato sperimentale *hardware-in-the-loop* da utilizzare per la valutazione dei consumi di sistemi ibridi pompa di calore e caldaia nei casi sopra descritti. Il lavoro ha riguardato la messa a punto degli emulatori, dei modelli di simulazione, di tutta la strumentazione di misura e controllo e della programmazione di un interfaccia *software* finalizzata all’implementazione delle strategie di gestione da analizzare sperimentalmente. Tutti i componenti fisici e gli emulatori sono stati collegati al sistema di supervisione e il loro corretto funzionamento è stato valutato attraverso alcuni test preliminari. L’apparato è ora in grado di simulare, tramite un modello dinamico *thermal-network*, l’evoluzione dei carichi di riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria ed energia elettrica dell’edificio, in funzione degli esatti dati climatici esterni, acquisiti in tempo reale. I risultati delle simulazioni costituiscono l’azione di controllo per gli emulatori, la cui fase di test ha dimostrato la loro capacità di riprodurre in maniera più che adeguata la dinamica del carico elettrico e/o termico per i generatori e gli accumuli a cui sono collegati e di misurarne le prestazioni effettive. Ad esempio, l’emulatore di carico dell’edificio è in grado di riprodurre gli andamenti di potenza previsti dalla simulazione con uno scarto quadratico medio giornaliero di circa 100 W. Questo valore è pienamente compatibile sia con gli obiettivi dell’attività, sia con le inevitabili incertezze sperimentali del sistema di misura. La messa a punto ha riguardato anche gli apparati di dispacciamento termico ed elettrico, che sono in grado di selezionare in ogni momento quale dispositivo utilizzare per il soddisfacimento dei carichi.

Infine, si è predisposta una lista di strategie di gestione tradizionali e avanzate per impianti ibridi da implementare nel sistema di supervisione e controllo, al fine di misurarne le prestazioni reali. Per ottenere alcune regole di controllo avanzate, si farà uso di algoritmi di ottimizzazione, anche basati sulle previsioni meteorologiche e sulle richieste future di energia, oltre che su eventuali richieste di *demand-response*. In particolare, l’ottimizzazione sarà condotta su obiettivi sia di efficienza energetica sia di economicità.

7 Riferimenti bibliografici

- [1] N. Pardo, A. Montero, J. Martos e J. F. Urchueguía, «Optimization of hybrid – ground coupled and air source – heat pump systems in combination with thermal storage,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, n. 8 - 9, pp. 1073-1077, 2010.
- [2] F. Li, G. Zheng e Z. Tian, «Optimal operation strategy of the hybrid heating system composed of centrifugal heat pumps and gas boilers,» *Energy and Buildings*, vol. 58, pp. 27-36, 2013.
- [3] A. Arteconi, N. Hewitt e F. Polonara, «Domestic demand-side management (DSM): Role of heat pumps and thermal energy storage (TES) systems,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, n. 1-2, pp. 155-165, 2013.
- [4] K. Aduda, T. Labeodan, W. Zeiler, G. Boxem e Y. Zhao, «Demand side flexibility: Potentials and building performance implications,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 22, pp. 146-163, 2016.
- [5] G. Bagarella, R. Lazzarin e M. Noro, «Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 99, pp. 485-494, 2016.
- [6] J. Ø. Søren, H. Madsen, R. Lopes, R. G. Junker, D. Aelenei , R. Li, S. Metzger , K. B. Lindberg, A. J. Marszal, M. Kummert , B. Bayles, E. Mlecnik, R. Lollini e W. Pasut, «Annex 67: Energy Flexible Buildings- Energy Flexibility as a key asset in a smart building future,» IEA EBCAnnex 67Energy Flexible Buildings, 2017.
- [7] F. D’Ettorre, P. Conti, E. Schito e D. Testi, «Model predictive control of a hybrid heat pump system and impact of the prediction horizon on cost-saving potential and optimal storage capacity,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 524-535, 2019.
- [8] F. D’Ettorre, M. De Rosa, P. Conti, D. Testi e D. Finn, «Mapping the energy flexibility potential of single buildings equipped with optimally-controlled heat pump, gas boilers and thermal storage,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101689, 2019.
- [9] C. Di Perna, G. Magri, G. Giuliani e G. Serenelli, «Experimental assessment and dynamic analysis of a hybrid generator composed of an air source heat pump coupled with a condensing gas boiler in a residential building,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 76, pp. 86-97, 2015.
- [10] A. Franco e F. Fantozzi, «Experimental analysis of a self consumption strategy for residential building: The integration of PV system and geothermal heat pump,» *Renewable Energy*, vol. 86, pp. 1075-1085, 2016.
- [11] A. Stafford, «An exploration of load-shifting potential in real in-situ heat-pump/gas-boiler hybrid systems,» *Building Services Engineering Research and Technology*, vol. 38, n. 4, pp. 450-460 , 2017.
- [12] D. Testi, W. Grassi, D. Della Vista, E. Menchetti, S. Comelato, M. Rocca, A. Taverni, V. Vannucci, P. Signoretti e L. Terrinoni, «Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione NZEB – Studio dell’edificio scolastico di riferimento nella zona climatica Centro Italia (zona D: 1.400 < GG ≤ 2.100),» *Ricerca di Sistema Elettrico*, 2016.
- [13] D. Testi, E. Schito, P. Conti, E. Menchetti, S. Comelato, W. Grassi, S. Paolo e L. Terrinoni, «Riqualificazione energetica degli edifici pubblici esistenti: direzione nZEB – Studio dell’edificio di riferimento uso uffici della PA nella zona climatica Centro Italia (zona D: 1.400 < GG ≤ 2.100),» *Ricerca di Sistema Elettrico*, 2017.
- [14] D. Testi, E. Schito, D. Allegra, M. Acernese, A. Eccher, P. Signoretti e D. Iatauro, «Studio di un edificio di edilizia residenziale pubblica di riferimento nella zona climatica (zona D: 1.400 < GG ≤ 2.100),» *Ricerca di Sistema Elettrico*, 2018.
- [15] D. Testi, E. Schito, E. Menchetti, P. Conti, D. Della Vista, G. Pellegrini, E. Tiberi, W. Grassi, G. Fasano e P. Signoretti, «Il software SEAS per le diagnosi energetiche: interventi di assistenza e formazione e sviluppo di un modello semplificato per gli edifici ad uso residenziale.,» *Report RdS/PAR2014/068.*, 2015.

- [16] D. Testi, M. Barbieri, E. Schito, P. Conti, P. Signoretti e D. Iatauro, «Aggiornamento del software SEAS per diagnosi energetiche di edifici finalizzato al miglioramento delle valutazioni relative al condizionamento estivo,» *Report Rds/PAR2017*, p. 71, 2018.
- [17] S. Klein, *A Transient System Simulation Program (TRNSYS 17) Manual*, 2010.
- [18] EN ISO 13786:2017, "Thermal performance of building components. Dynamic thermal characteristics. Calculation methods," European Committee for Standardization, Brussels, 2017.
- [19] UNI EN ISO 6946:2018, « Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2018.
- [20] EN 15265:2007, «Energy performance of buildings. Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods. General criteria and validation procedures,» European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
- [21] D. Testi, M. Barbieri, E. Schito, P. Conti e P. Signoretti, «New simplified dynamic algorithm for energy estimation in buildings: description and validation,» in *Building Simulation 2019 Conference Proceedings*, Rome, 2019.
- [22] CTI - Comitato Termotecnico Italiano, [Online]. Available: <https://shop.cti2000.it/>.
- [23] UNI/TR 11552:2014, «Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2014.
- [24] UNI 10349-1:2016, «Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1.,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2016.
- [25] UNI EN ISO 13792:2012, «Prestazione termica degli edifici - Calcolo della temperatura interna estiva di un locale in assenza di impianti di climatizzazione - Metodi semplificati,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2012.
- [26] UNI EN ISO 7730:2006, «Ergonomia degli ambienti termici - Determinazione analitica e interpretazione del benessere termico mediante il calcolo degli indici PMV e PPD e dei criteri di benessere termico locale,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2006.
- [27] EN 16147:2017, « Heat pumps with electrically driven compressors - Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units,» European Committee for Standardization, Brussels, 2017.
- [28] UNI/TS 11300-2:2019, «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria [omissis],» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2019.
- [29] UNI EN 15316-4-2:2018, «Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo delle richieste di energia e delle efficienze del sistema - Parte 4-2: Sistemi di generazione per il riscaldamento degli ambienti, pompe di calore,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2018.
- [30] UNI/TS 11300-4:2016, «Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2016.
- [31] UNI EN 14511-2:2018, «Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico - Parte 2: Condizioni di prova,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2018.
- [32] L. Kaufman e P. J. Rousseeuw, *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1990.
- [33] EN ISO 52016-1:2017, «Energy performance of buildings. Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads. Calculation procedures,» European Committee for Standardization, Brussels, 2017.
- [34] C. K. LEE, «A simplified explicit model for determining the performance of a chilled water cooling coil,»

International Journal of Refrigeration, vol. 43, pp. 167-175, 2014.

- [35] EN ISO 13788:2012, «Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation. Calculation methods,» European Committee for Standardization, Brussels, 2012.
- [36] UNI EN 1264-2:2013, «Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento integrati nelle strutture - Parte 2: Riscaldamento a pavimento: metodi per la determinazione della potenza termica mediante metodi di calcolo e prove,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2013.
- [37] UNI EN 1264-3:2009, « Sistemi radianti alimentati ad acqua per il riscaldamento e il raffrescamento integrati nelle strutture - Parte 3: Dimensionamento,» UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, 2009.

8 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Paolo Conti, nato a Jesi (AN) nel 1987, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria “Leonardo da Vinci” Energetica Elettrica e Termica presso l’Università di Pisa, discutendo la tesi “Sustainable design of ground-source heat pump systems: optimization of operative life performances”. Dal 2015 al 2017 è stato Assegnista di Ricerca e Borsista presso il Dipartimento di Ingegneria dell’Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC), Università di Pisa. Da aprile 2017 è Ricercatore a Tempo Determinato, sempre presso il DESTEC. La sua attività principale riguarda la progettazione e la gestione ottimizzata degli impianti per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici. I suoi settori d’interesse professionale sono: gli impianti di climatizzazione ad acqua e ad aria, lo sviluppo di modelli al calcolatore per la simulazione e la valutazione delle prestazioni energetiche dei sistemi edificio-impianto, lo studio e sviluppo di metodologie per la diagnosi energetica negli edifici, l’individuazione di buone pratiche di progettazione e gestione dei sistemi edifici-impianto. È autore di 24 articoli indicizzati sui database internazionali della ricerca. Socio AiCARR, FTI e dell’American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Nel triennio 2015-2017 è stato membro del Consiglio UGI e nominato Segretario esecutivo. Membro dell’International Geothermal Association (IGA) Resources & Reserves Committee e del gruppo di lavoro IGA-UNECE (International Geothermal Association, United Nations Economic Commission for Europe) per la stesura delle specifiche riguardanti l’applicazione del protocollo UNFC-2009 alle applicazioni geotermiche (pompe di calore incluse). Dal 2011 al 2015 ha supportato il Gestore Servizi Energetici (GSE) nella rilevazione dati e nel monitoraggio dello sviluppo in Italia delle applicazioni geotermiche per usi termici. I risultati di questo lavoro sono stati adottati dal Ministero dello Sviluppo Economico e compaiono nei dati Eurostat. Docente e relatore in numerosi corsi di formazione su diagnosi e certificazione energetica degli edifici e seminari in ambito geotermico. Attualmente è titolare del corso di Termoenergetica dell’Edificio, Laurea in Ingegneria dell’Energia.

Michele Barbieri, nato a Livorno nel 1987, ha conseguito la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l’Università di Pisa (marzo 2018), discutendo la tesi dal titolo “Modellazione e simulazione termoenergetica dinamica di coperture verdi”. Nel 2018 è stato borsista del DESTEC, con Borsa di Ricerca dal titolo “Analisi delle prestazioni energetiche di coperture verdi”, nell’ambito del progetto “Soluzioni per la riqualificazione energetica degli edifici in diverse zone climatiche”. Ha collaborato al Progetto della Regione Toscana (Bando FAR-FAS 2014) “Sistema Integrato Geotermico Solare di riscaldamento e raffrescamento in logica smart grid (SIGS)”. Nel 2019 è stato Assegnista di Ricerca per l’attività “Prove sperimentali e simulazioni energetiche su sistemi ibridi di generazione termica con ottimizzazione delle logiche di funzionamento”. Attualmente collabora al Progetto Regionale “Struttura Urbana Multifunzionale Attiva (SUMA)” ed è titolare di un Assegno di Ricerca dal titolo “Algoritmi e funzioni per la gestione energetica di sistemi elettrici di utenze con generazione rinnovabile, accumulo e carico”.

Davide Della Vista, nato a Cascina (PI) nel 1977, laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale all’Università di Pisa (2004). Tecnico di laboratorio ed elaborazione dati dal 2004 presso il DESTEC, Università di Pisa, con esperienza nella realizzazione di programmi di acquisizione dati, nella messa a punto di apparecchiature sperimentali, nell’esecuzione di misure termofluidodinamiche e di monitoraggio energetico degli ambienti abitati e nella simulazione dinamica dei sistemi edificio-impianto. Ha collaborato alla stesura del Piano Energetico della Provincia di Pisa (2009) e ha partecipato a numerosi progetti di ricerca per enti istituzionali e aziende in ambito termotecnico. È autore di 7 pubblicazioni scientifiche su rivista internazionale.

Eva Schito, nata a Pisa nel 1990, ha conseguito con lode la Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica presso l'Università di Pisa (luglio 2013), discutendo la tesi dal titolo "Modellizzazione dinamica di un sistema pompa di calore – edificio". Ha ottenuto l'Attestato di Merito previsto per gli studenti del Percorso di Eccellenza. Nel 2017 ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni presso l'Università di Pisa, con una tesi intitolata "Methods and tools for a rational and efficient use of energy in museum environments". I suoi principali campi di interesse sono: modellizzazione cycle-based delle pompe di calore e progettazione ottimizzata, simulazione dinamica e riqualificazione energetica degli edifici, anche di valore storico, ed ambienti museali. È autrice di 21 articoli indicizzati sui database internazionali della ricerca. Esperto Junior CasaClima e Socia FTI e dell'Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria Riscaldamento e Refrigerazione (AiCARR). Ha collaborato come Borsista col DESTEC, nell'ambito di contratti di ricerca e consulenza nel campo della diagnosi e simulazione energetica degli edifici e dei sistemi energetici. Dal 2017 al 2019, come Assegnista di Ricerca, ha svolto le attività "Sperimentazione e simulazione di impianti di generazione ibridi per la climatizzazione efficiente degli edifici" e "Sperimentazione, simulazione e ottimizzazione di impianti integrati a fonti rinnovabili per la climatizzazione degli edifici". Docente in numerosi corsi di formazione su diagnosi e certificazione energetica degli edifici. Ha svolto supporto alla didattica per il corso di Energia e Sistemi Energetici, Laurea in Ingegneria Gestionale. Dall'anno accademico 2017-18 è codocente di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, e da quest'anno svolge anche didattica sussidiaria per il corso di Impianti Termotecnici Integrati, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Attualmente, sempre presso il DESTEC, è titolare di un Assegno di Ricerca dal titolo "Simulazioni dinamiche di edifici di riferimento e sviluppo di una metodologia per l'autoapprendimento delle caratteristiche termofisiche e impiantistiche".

Daniele Testi, nato a Pietrasanta (LU) nel 1977, dal 2014 è Professore Associato di Fisica Tecnica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Dal 2018 è abilitato al ruolo di Professore Ordinario di Fisica Tecnica. Laureato con lode in Ingegneria Aerospaziale (2002), Dottore di Ricerca in Energetica Elettrica e Termica (2006), Assegnista di Ricerca (2006-2009), Borsista di Ricerca (2010-2011) e Ricercatore Universitario a tempo indeterminato (2011-2014) presso l'Università di Pisa. Ha svolto supporto alla didattica per i corsi di Termodinamica Applicata, Fisica Tecnica e Termoenergetica dell'Edificio. È stato codocente dei corsi di Teoria dei Sistemi, Laurea in Ingegneria Energetica, e di Risparmio Energetico in Edilizia, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Attualmente è Presidente del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e titolare dei corsi di Fisica Tecnica, Laurea in Ingegneria dell'Energia, Termofluidodinamica, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, e Impianti Termotecnici Integrati, Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica. Principali campi di studio: termofluidodinamica monofase e bifase, tecniche d'incremento dello scambio termico convettivo, tecniche di misura nella fisica tecnica, scambiatori e dissipatori di calore, microgravità, termofisica degli ambienti abitati, impianti di climatizzazione, efficienza energetica in edilizia, simulazione, integrazione e ottimizzazione di sistemi energetici, pianificazione energetica. Autore di oltre 100 pubblicazioni su riviste internazionali o in atti di congressi. Docente in numerosi corsi di formazione, master e seminari sulla gestione dell'energia, la diagnosi e la certificazione energetica degli edifici e gli impianti termotecnici. Titolare di consulenze o collaboratore per vari contratti di ricerca nell'ambito della diagnosi, dell'efficienza, della normativa, della pianificazione e della conversione energetica. Socio dell'Unione Italiana Termofluidodinamica (UIT) e dell'Associazione della Fisica Tecnica Italiana (FTI). È stato responsabile scientifico dello sviluppo del *software* nazionale SEAS per la diagnosi energetica negli edifici.