

Ricerca di Sistema elettrico



LA4.7: Sistemi integrati: Sviluppo di logiche di controllo per gestione flessibile di pompe di calore e validazione sperimentale

Alessia Arteconi



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

LA4.7: Sistemi integrati: Sviluppo di logiche di controllo per gestione flessibile di pompe di calore e validazione sperimentale

A. Arteconi, DIISM, Università Politecnica delle Marche

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 – Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 4.7

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alessia Arteconi, DIISM, Università Politecnica delle Marche

Mese inizio previsto: Luglio 2023

Mese inizio effettivo: Luglio 2023

Mese fine previsto: Dicembre 2024

Mese fine effettivo: Dicembre 2024

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Etichettatura e logiche di controllo per la gestione flessibile di sistemi integrati in pompa di calore

Si ringrazia per la collaborazione alle attività svolte Alice Mugnini

Indice

1	Risultati attesi	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Logiche di controllo ottimizzate e loro validazione	5
2.2	Gestione ottimizzata di pompe di calore dual source	5
3	Prodotti attesi	6
4	Prodotti sviluppati	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
6.1	Logiche di controllo ottimizzate per pompe di calore	9
6.2	Gestione di pompe di calore dual source	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
7.1	Logiche di controllo ottimizzate per pompe di calore	10
7.1.1	Definizione degli archetipi.....	10
7.1.2	Metodologia della modellazione degli archetipi	11
7.1.3	Validazione sperimentale	13
7.2	Gestione di pompe di calore dual source	14
7.2.1	Descrizione dell'impianto a pompa di calore dual source	14
7.2.2	Descrizione del modello di simulazione.....	15
7.2.3	Risultati ottenuti dalla gestione delle sorgenti	17
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	19
9	Pubblicazioni scientifiche	20
10	Eventi di disseminazione	21

Indice delle figure

Figura 1 - Rappresentazione schematica degli schemi di impianto: (a) archetipo 1; (b) archetipo 2; (c) archetipo 3	10
Figura 2 - Rete RC per archetipi 1 e 2 nel caso di: (a) 1 zona termica e (b) 2 zone termiche.....	11
Figura 3 - Rete RC per archetipo 3 nel caso di: (a) 1 zona termica e (b) 2 zone termiche	11
Figura 4 - (a) Collegamento idraulico del serbatoio; (b) schema della modellazione multinodo del serbatoio.....	12
Figura 5 - Rappresentazione concettuale dell'MPC.....	12
Figura 6 - Schema del sistema HIL	13
Figura 7 - Validazione sperimentale dell'MPC con archetipo 1	13
Figura 8 - (a) Accuratezza di previsione dei modelli dei diversi archetipi e (b) efficacia dell'MPC nel trovare la soluzione ottima.....	14
Figura 9 - Schema del circuito HIL per impianto geotermia e test pompe di calore ad alta temperatura (Fonte ENEA)	14
Figura 10 - Profili carico termico continuo e discretizzato per zona climatica D (rielaborazione dati statistici).	15
Figura 11 - (a) Configurazione reale e (b) configurazione modellata per il campo geotermico ..	15
Figura 12 - Schema modello TRNSYS	16

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Risultati modello di simulazione su tutta la stagione di riscaldamento.....	17
Tabella 2 - Risultati modello di simulazione su periodo più caldo (10 giorni)	18
Tabella 3 - Risultati modello di simulazione su periodo più freddo (10 giorni).....	18

1 Risultati attesi

I risultati attesi nella presente attività di ricerca sono duplici.

In primo luogo si vogliono sviluppare logiche di controllo ottimizzato per impianti di riscaldamento residenziale con pompe di calore così da poter implementare strategie di gestione della domanda (DSM - Demand Side Management).

In secondo luogo tali logiche saranno verificate e testate sperimentalmente. Relativamente a questa seconda parte, si sono verificate le logiche di demand side management su impianti specifici, prendendo a riferimento l'apparato sperimentale con pompa di calore dual source disponibile presso i laboratori Enea.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono in linea con quelli attesi e vengono descritti nel seguito.

2.1 Logiche di controllo ottimizzate e loro validazione

Sono stati sviluppati gli algoritmi di controllo ottimizzato per implementare logiche di DSM (es. minimizzazione dell'uso dell'energia elettrica dalla rete) in impianti residenziali a pompa di calore. Sono state identificate diverse configurazioni di impianto per le quali sono stati realizzati dei modelli predittivi. Tali modelli sono rappresentativi di tipiche installazioni impiantistiche e sono stati sviluppati in modo da poter essere facilmente replicabili per configurazioni simili. Questi modelli rappresentativi, denominati *archetipi*, sono stati sviluppati con un approccio di tipo gray-box, dove la conoscenza di dati reali e misurazioni consente di adattare il modello al caso considerato. Gli archetipi sono stati testati sperimentalmente in una infrastruttura di laboratorio Hardware in the Loop (HIL) e resi disponibili come tool open source. Essi possono essere utilizzati all'interno di MPC (model predictive control). Questo risultato consente una più facile implementazione e diffusione di controlli ottimizzati per pompa di calore, rendendo più facile attivare strategie di gestione flessibile della domanda con tutti i vantaggi dimostrati in letteratura per la rete elettrica (incremento dell'uso delle rinnovabili, riduzione dei picchi di domanda elettrica, partecipazione attiva degli utenti e riduzione delle reimmessioni di fotovoltaico in rete, etc.).

2.2 Gestione ottimizzata di pompe di calore dual source

Per verificare le logiche di controllo DSM, si è analizzato il funzionamento della pompa di calore geotermica dual source disponibile presso ENEA. L'analisi ha evidenziato le strategie di utilizzo delle sorgenti (aria e terreno), cercando di mettere in evidenza la reciproca convenienza e il ruolo della flessibilità energetica nella gestione del sistema. Le linee guida ottenute sono di grande utilità per la valutazione di sistemi simili e per la miglior selezione della sorgente da utilizzare in modo da aumentare l'efficienza della pompa di calore e ridurre l'energia elettrica utilizzata dalla rete.

3 Prodotti attesi

Il prodotto atteso da capitolato è rappresentato dalla descrizione dei risultati ottenuti (logiche di controllo DSM e loro validazione sperimentale) come descritti nel presente Rapporto tecnico: "Sistemi integrati: Sviluppo di logiche di controllo per gestione flessibile di pompe di calore e validazione sperimentale".

4 Prodotti sviluppati

In aggiunta a quanto previsto dal piano delle attività, tra i prodotti sviluppati si includono i modelli archetipi per MPC di impianti di riscaldamento residenziale a pompa di calore, sviluppati e validati, disponibili come open software in:

- github.com/diismunivpm/PredictiveArchHP

Maggiori dettagli sono reperibili nella pubblicazione:

- Alice Mugnini, Maarten Evens, Alessia Arteconi, Model predictive controls for residential buildings with heat pumps: Experimentally validated archetypes to simplify the large-scale application, *Energy and Buildings*, Volume 320, , 1 October 2024, 114632, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114632>

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono evidenziabili scostamenti rispetto alle attività e ai risultati previsti in sede di capitolato. Le attività sono state svolte come da programma concordato.

6 Sintesi delle attività svolte

6.1 Logiche di controllo ottimizzate per pompe di calore

Di seguito sono riassunte le principali attività svolte:

- Definizione di 3 diversi archetipi di installazioni con pompe di calore per il riscaldamento residenziale
- Modellazione matematica degli elementi che costituiscono l'archetipo.
- Formulazione di un problema di ottimo economico per il Model Predictive Control che sfrutta la flessibilità disponibile nell'involucro dell'edificio e nell'accumulo termico.
- Verifica sperimentale delle prestazioni dei modelli definiti negli archetipi e dei controlli ottimizzati basati su di essi.

6.2 Gestione di pompe di calore dual source

La pompa di calore a terreno/aria disponibile presso i laboratori di ENEA-Casaccia è stata studiata come segue:

- Sviluppo di un modello dinamico in Trnsys dell'impianto
- Simulazione dell'impianto per soddisfare una curva di domanda data
- Simulazione dell'impianto applicando delle strategie di DSM basate sul PUN
- Confronto ed analisi dei risultati

7 Dettaglio delle attività svolte

Nel seguito sono descritte in dettaglio le principali attività svolte e le metodologie adottate per ottenere i risultati attesi elencati in precedenza.

7.1 Logiche di controllo ottimizzate per pompe di calore

7.1.1 Definizione degli archetipi

Al fine di rappresentare diverse configurazioni di impianto in cui la pompa di calore (HP) può soddisfare la domanda di riscaldamento di un edificio residenziale, le seguenti installazioni sono state incluse negli archetipi definiti nell'ambito di questo lavoro (Figura 1¹):

- Archetipo 1: HP con sistema di riscaldamento a radiatori a bassa temperatura (Figura 1a).
- Archetipo 2: HP con sistema di riscaldamento a radiatori a bassa temperatura con un serbatoio di acqua calda come TES (Figura 1b).
- Archetipo 3: HP con sistema di riscaldamento a pavimento (Figura 1c).

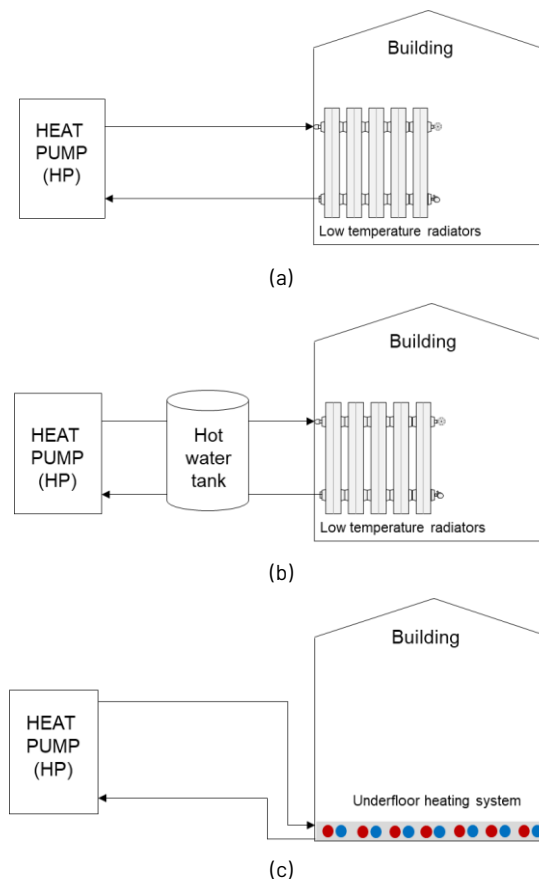


Figura 1 - Rappresentazione schematica degli schemi di impianto: (a) archetipo 1; (b) archetipo 2; (c) archetipo 3

Per tutti gli archetipi è stato implementato un MPC (Model Predictive Control). L'obiettivo dell'MPC è minimizzare una particolare funzione obiettivo (ad esempio il consumo elettrico) sfruttando la flessibilità energetica della massa termica dell'edificio e dell'impianto.

¹ Nota: tutte le figure riportate nella sezione 7.1 sono prese dalla pubblicazione riportata nella sezione 9 del presente documento.

7.1.2 Metodologia della modellazione degli archetipi

Data la loro efficacia nel prevedere la domanda di energia per riscaldamento negli edifici, gli archetipi si basano su modelli a parametri concentrati costituiti da una rete di resistenze e capacità termiche (rete RC). La rete RC differisce in base al tipo di sistema di riscaldamento riportato in Figura 1. Le Figura 2 e la Figura 3 mostrano la struttura delle reti RC per entrambi i tipi di edifici e sistemi di riscaldamento. Per entrambi i tipi di sistema di riscaldamento, si distinguono due tipi di reti RC nel caso di una singola zona termica o due zone termiche distinte.

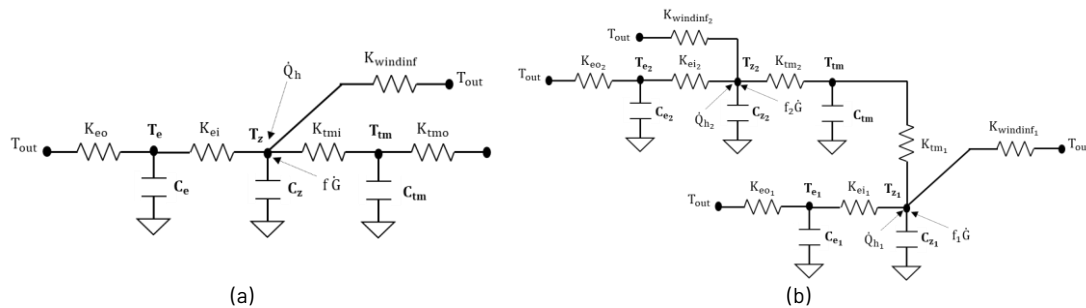


Figura 2 - Rete RC per archetipi 1 e 2 nel caso di: (a) 1 zona termica e (b) 2 zone termiche

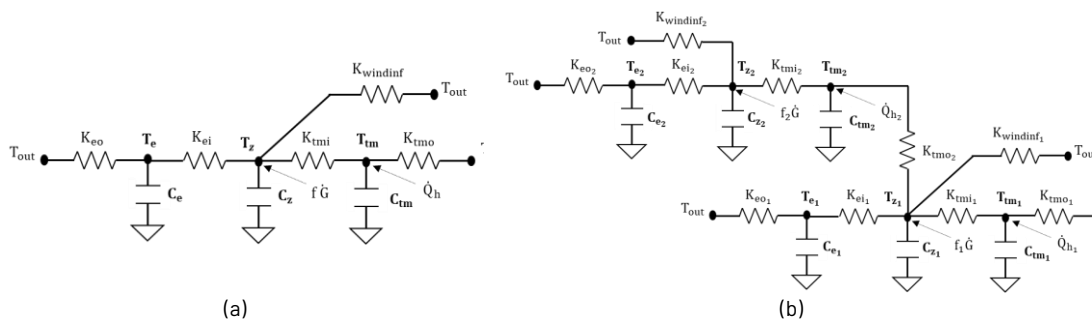


Figura 3 - Rete RC per archetipo 3 nel caso di: (a) 1 zona termica e (b) 2 zone termiche

I valori dei parametri numerici delle reti RC devono essere ottenuti utilizzando un approccio grey-box. Per questo è necessario disporre di dati misurati sul comportamento dell'edificio reale. Di seguito sono riportati maggiori dettagli riguardo ai diversi componenti dell'impianto.

Impianto di emissione

Le unità di riscaldamento contenute negli archetipi proposti sono: (i) radiatori a bassa temperatura (archetipi 1 e 2) e (ii) sistema di riscaldamento a pavimento (archetipo 3). Il sistema di riscaldamento a pavimento è modellato applicando la potenza termica prodotta dalla pompa di calore al nodo termico del pavimento. Per quanto riguarda il modello del radiatore, si calcola la capacità di riscaldamento dell'unità di riscaldamento in funzione delle condizioni operative, cioè della temperatura superficiale del radiatore e temperatura dell'aria interna.

Accumulo termico

Si considera un serbatoio di acqua calda stratificato (categoria di modello 1D multi-nodo) collegato da un lato alla pompa di calore e dall'altro all'edificio. Il modello realizzato rappresenta un serbatoio di accumulo di energia sensibile riempito di fluido, soggetto a stratificazione termica, modellato assumendo che il serbatoio sia costituito da N segmenti di volume uguale

completamente miscelati. Uno schema dettagliato del modello del serbatoio di accumulo è mostrato nella Figura 4.

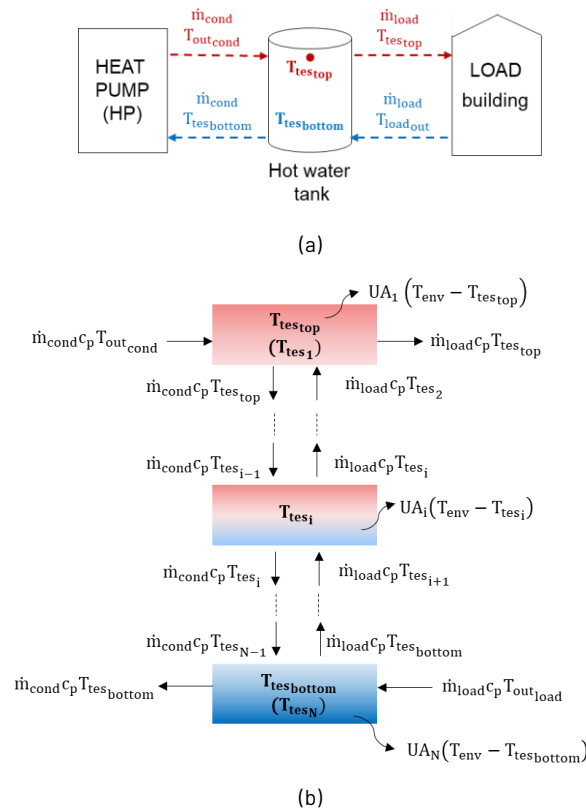


Figura 4 - (a) Collegamento idraulico del serbatoio; (b) schema della modellazione multinodo del serbatoio

Pompa di calore

La potenza termica ed elettrica della pompa di calore viene modellata a partire dalle curve di prestazione fornite dai costruttori, rappresentate da equazioni polinomiali.

Model Predictive Control

La Figura 5 mostra la struttura tipica di un MPC applicato al controllo del sistema con pompa di calore. L'MPC è costituito da: (i) il modello di previsione e (ii) l'ottimizzatore. Il modello di previsione deve prevedere la risposta energetica dell'edificio in un certo periodo (orizzonte di previsione) in risposta a input incontrollati (i disturbi). I disturbi, che per gli archetipi sono rappresentati da dati meteorologici devono essere noti in tutto l'orizzonte di previsione.

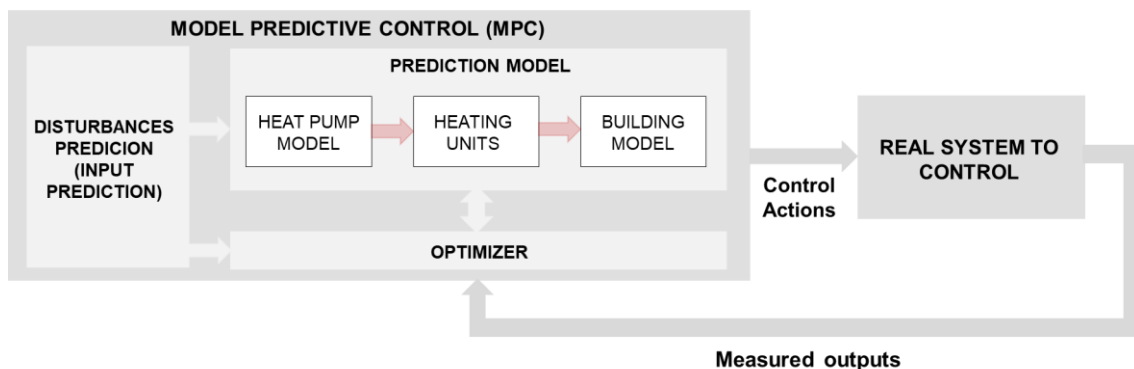


Figura 5 - Rappresentazione concettuale dell'MPC

7.1.3 Validazione sperimentale

La Figura 6 mostra lo schema idraulico dell'installazione hardware-in-the-loop (HIL), inclusi i punti di misura, utilizzato per validare i controlli. Le dinamiche termiche dell'edificio da controllare nell'HIL vengono ricavate da un modello dettagliato dell'edificio sviluppato in Modelica.

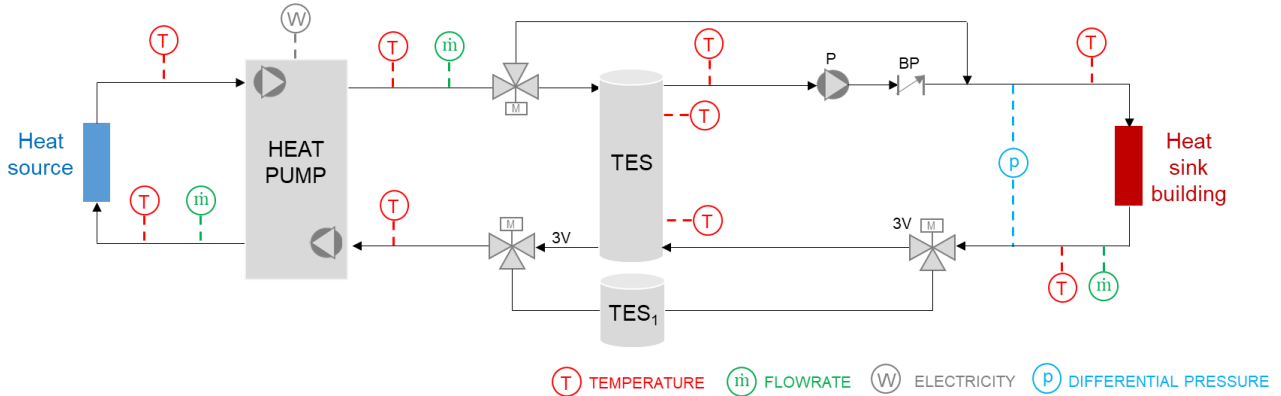


Figura 6 - Schema del sistema HIL

La Figura 7 mostra come esempio la validazione sperimentale dell'archetipo 1, cioè il confronto tra la temperatura dell'aria interna nelle due zone termiche dell'edificio prevista dal modello all'interno dell'MPC e misurata durante il test di validazione nell'HIL. L'MPC risulta efficace nel soddisfare la domanda di riscaldamento dell'edificio.

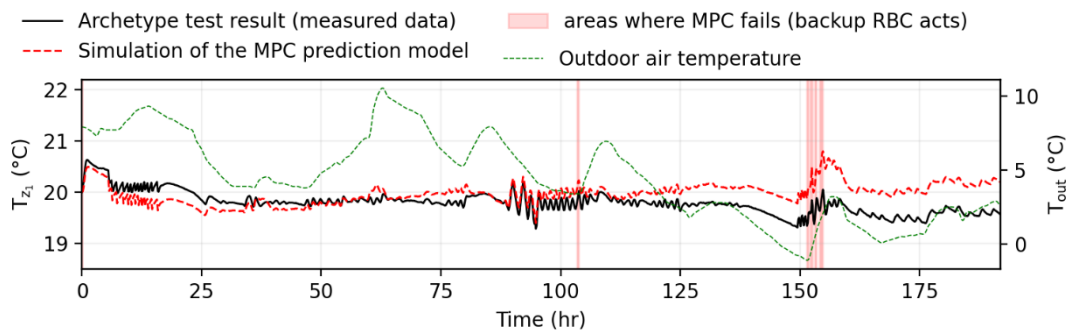


Figura 7 - Validazione sperimentale dell'MPC con archetipo 1

La Figura 8 riporta i risultati della validazione per tutti e tre gli archetipi sperimentati. Sulla base dei risultati, si può concludere che i modelli proposti rappresentano un buon compromesso tra facilità di applicazione e precisione nella previsione. Essi possono essere adattati facilmente a configurazioni nelle categorie identificate e facilitano l'implementazione di controlli ottimizzati.

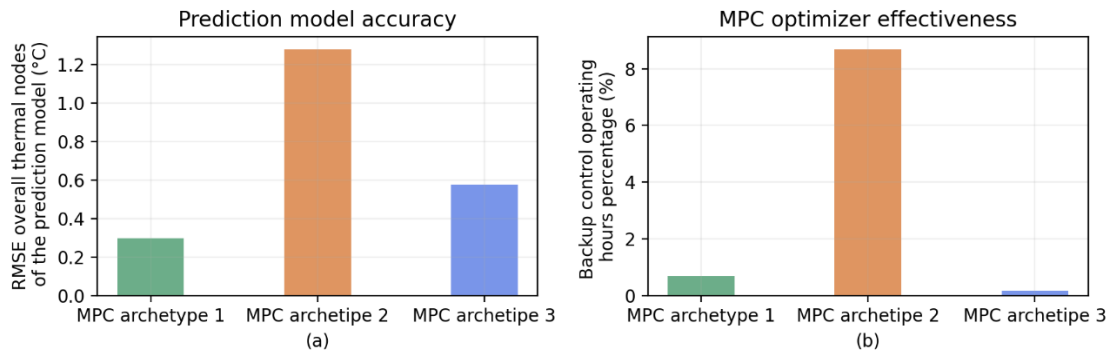


Figura 8 - (a) Accuratezza di previsione dei modelli dei diversi archetipi e (b) efficacia dell'MPC nel trovare la soluzione ottima

7.2 Gestione di pompe di calore dual source

7.2.1 Descrizione dell'impianto a pompa di calore dual source

Il sistema reale consiste in un apparato sperimentale per il test di Pompe di Calore Dual Source in grado di sfruttare o sorgenti geotermiche a bassa entalpia o l'aria esterna come sorgente termica. La descrizione del sistema reale può essere distinta nei seguenti punti: (i) campo geotermico, (ii) Pompa di Calore, (iii) configurazione d'impianto e (iv) carico termico. Il sistema si trova presso la sede ENEA di Casaccia, nel seguito verranno riportate solo le informazioni utili per comprendere come il modello di simulazione è stato sviluppato.

L'impianto è schematizzato in Figura 9 ed è costituito dai seguenti componenti principali:

- Pompa di calore TEON T10 a R600a di taglia 10 kW, potenza elettrica massima dichiarata 2.5 kW;
- Impianto a sonde geotermiche, potenza termica stimata 10 kW;
- Dry-cooler TEON ad aria da 10 kW termici;
- Pompa di mandata lato sorgente Grundfos Magna modello MAGNA3 25-100 o similare;
- Serbatoio di accumulo termico (TES) da 500 l;
- Chiller da 15 kW;
- Elettronica di misura e controllo;
- Valvole di intercettazione.

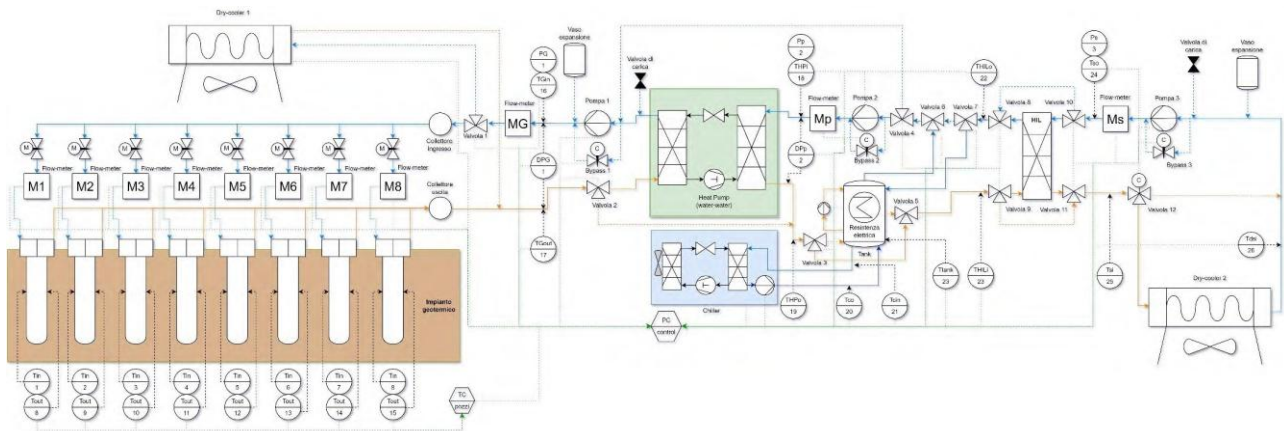


Figura 9 - Schema del circuito HIL per impianto geotermia e test pompe di calore ad alta temperatura (Fonte ENEA)

Per quanto riguarda il carico termico, è stato ricostruito un andamento giornaliero a partire da dati statistici. In particolare, per ogni zona climatica sono stati stimati due profili, uno continuo e l'altro discretizzato. Il profilo continuo è stato stimato in modo che il valore di energia totale,

noto statisticamente, sia distribuito sulle 24 ore in base alla differenza di temperatura tra quello limite di accensione impianto (16 °C) e quella esterna. Invece, in quello discretizzata la potenza è distribuita sulle ore di funzionamento di legge degli impianti di riscaldamento. La Figura 10 mostra l'andamento giornaliero per la zona climatica D.

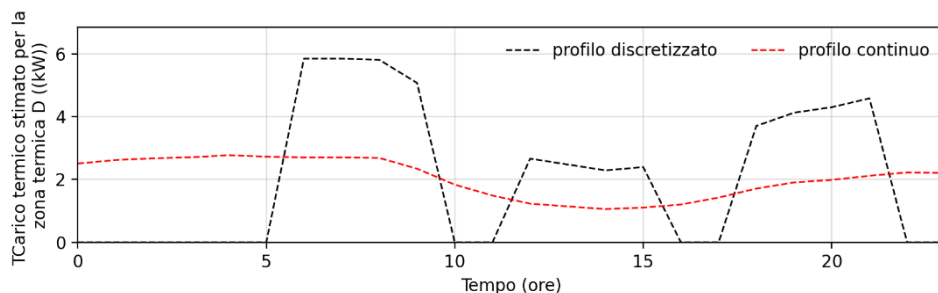


Figura 10 - Profili carico termico continuo e discretizzato per zona climatica D(rielaborazione dati statistici).

7.2.2 Descrizione del modello di simulazione

L'impianto per Pompe di Calore Dual Source ad Alta Temperatura è stato modellato in TRNSYS 17. Di seguito elencati i principali type utilizzati i quali sono stati modellati con i seguenti componenti:

- **Type 557** (Vertical Ground Heat Exchanger) nella configurazione tubo a U per il campo geotermico. Il Type 557 modella uno scambiatore di calore verticale che interagisce termicamente con il terreno. Un fluido vettore di calore viene fatto circolare attraverso lo scambiatore di calore del terreno e rilascia o assorbe calore dal terreno, a seconda delle temperature del fluido vettore di calore e del terreno. Il Type 557 prevede che i fori siano posizionati uniformemente all'interno di un volume cilindrico di terreno. Per questo motivo è stata modellata la configurazione mostrata in Figura 11. La configurazione modellata (Figura 11b) differisce da quella reale (Figura 11a) per la distanza e la lunghezza dei tubi. In particolare, nel modello sono state calcolate come profondità e lunghezze media rispetto ai dati reali.

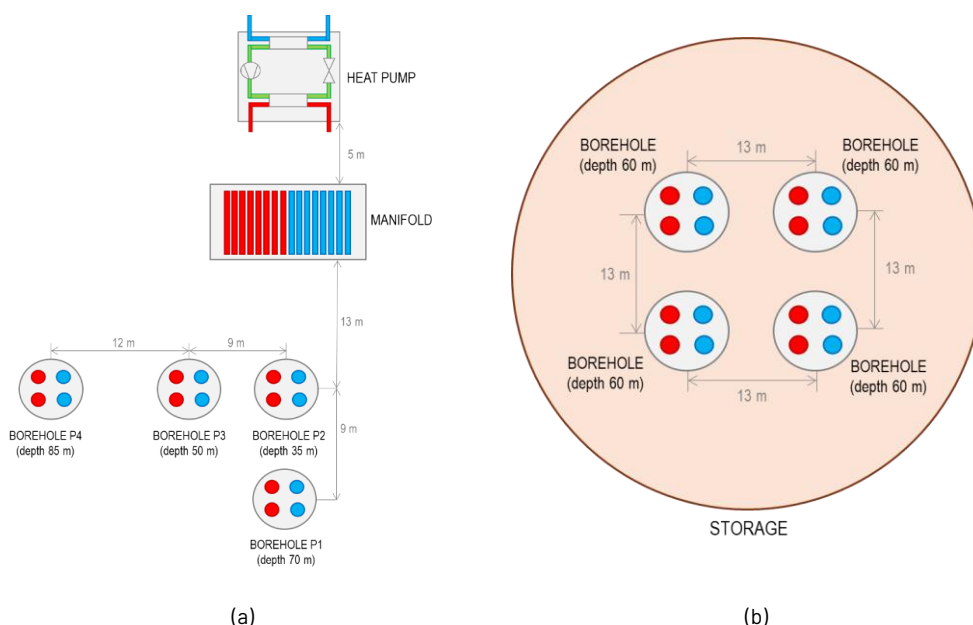


Figura 11 - (a) Configurazione reale e (b) configurazione modellata per il campo geotermico

- **Type 508** (Cooling Coil Using Bypass Fraction Approach - Free Floating Coil) e **Type 744** (Variable Speed Fan/Blower - Flow Rate Passes Through). Per la sorgente aria. In particolare, il Type508 modella uno scambiatore di calore aria-acqua mentre il Type744 rappresenta un ventilatore a velocità costante o variabile (il consumo energetico della ventola viene calcolato in base a un polinomio specificato dall'utente).
- **Type 927** (Water to Water Heat Pump - Normalized Data File Approach) per la pompa di calore acqua-acqua. Il Type 927 si basa su file di dati forniti dall'utente contenenti dati di catalogo per la capacità normalizzata e il consumo di potenza, basati sulle temperature di ingresso del carico e della sorgente e sui flussi normalizzati di sorgente e carico. In questo modo le prestazioni della pompa di calore modellata sono state adattate ai dati misurati in campo.
- **Type 4** (Storage Tank; Fixed Inlets, Uniform Losses) per il serbatoio di accumulo stratificato. Il Type 4 modella le prestazioni termiche di un serbatoio di accumulo di energia sensibile riempito con fluido, soggetto a stratificazione termica. In particolare, si assume che il serbatoio sia composto da N segmenti di volume uguale e completamente mescolato ($N \leq 100$) con posizioni di ingresso fisse definite all'interno della proforma del type.
- **Type 15** (Weather Data Processor; Combines data reading, radiation processing and sky temperature calculations) per la lettura del file meteo. Nello specifico è stato utilizzato un file meteo per un anno tipico (TMY) per la città di Roma.
- **Type 114** (Single Speed Pump) per le pompe di circolazione. Il Type114 rappresenta una pompa idronica a velocità costante in grado di mantenere un flusso di massa del fluido in uscita costante. Le caratteristiche di avvio e arresto della pompa non sono modellate, né gli effetti della perdita di pressione.
- **Type 1502** (N-Stage Aquastat) per i controllori. Il Type 1502 simula un controllore on/off che mantiene la temperatura in un intervallo stabilito.
- **Type 81** (1D interpolation) per la curva di compensazione.
- Altri type sono: **Type 935** (Controller for Tempering Valves), **Type 649** (Mixing Valve for Fluids w/Up to 100 Inlets) e **Type 11** (Contributors are listed in manuals) per la regolazione delle temperature di mandata lato carico (miscelazione con ritorno)

La Figura 12 mostra il modello nell'ambiente Simulation Studio.

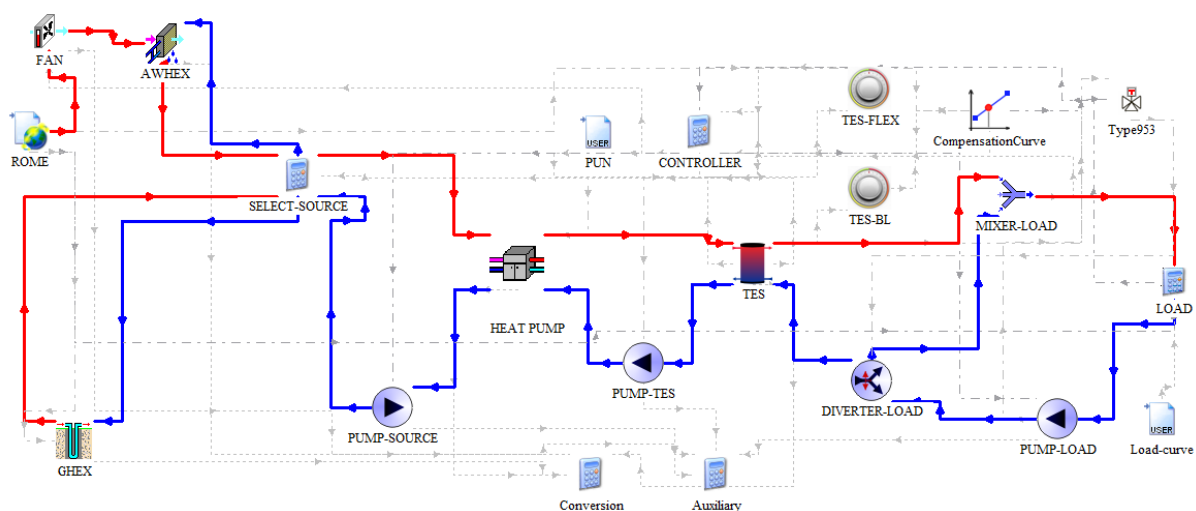


Figura 12 - Schema modello TRNSYS

7.2.3 Risultati ottenuti dalla gestione delle sorgenti

Il modello è stato applicato considerando le due sorgenti separatamente: uno scenario con sorgente aria (APdC) e l'altro con sorgente terreno (GPdC). Per ogni sorgente, due scenari di controllo sono stati modellati:

- (1) Scenario di riferimento (**BASELINE**): In questo scenario l'azione di controllo della PdC è determinata dalla temperatura del nodo più alto nell'accumulo (mantenuta tra 50°C e 60°C dal controllore TES-BL in Figura 12).
- (2) Scenario flessibile (**FLEXIBLE**): In questo scenario si applica una logica di controllo RBC (Ruled Based Control) per ridurre il costo dell'energia elettrica assorbita (sia ausiliari che compressore PdC). Il controllore si basa su un segnale di prezzo (il prezzo è stato assunto pari al PUN per la stagione di riscaldamento 2023-2024, da dati GME). In particolare, se il prezzo è inferiore alla media stagionale (100.4 EUR MWh⁻¹) la PdC si accende per caricare l'accumulo fino a raggiungere la massima temperatura di 60°C, se invece, il prezzo è maggiore della media stagionale, la PdC rimane spenta (accumulo si scarica per soddisfare la domanda) fino a quando la temperatura del nodo più alto dell'accumulo non raggiunge la temperatura di mandata richiesta dalla curva di compensazione. In questo ultimo caso, interviene un controllo di backup che accende la PdC per portare la temperatura del nodo termico più alto dell'accumulo ad 1°C sopra la temperatura di mandata richiesta dalla curva di compensazione.

I risultati sono stati ottenuti per: (i) l'intera stagione di riscaldamento a Roma dal 1° novembre al 15 Aprile, (ii) i 10 giorni più caldi dal File Climatico e (iii) i 10 giorni più freddi dal file climatico con passo temporale di 5 minuti.

Le Tabella 1, Tabella 2 e 3 riassumono i principali risultati valutati per l'intera stagione di riscaldamento, il periodo più caldo e quello più freddo. Si osserva che l'applicazione di strategie di controllo nello scenario flessibile consentono un aumento del COP medio della macchina a e una riduzione dell'energia elettrica utilizzata. Nel confronto tra le due sorgenti è evidente il vantaggio della sorgente terreno rispetto all'aria. Tale conclusione può tuttavia cambiare in base alle condizioni di temperatura della sorgente e quindi in base alla località di installazione.

Tabella 1 - Risultati modello di simulazione su tutta la stagione di riscaldamento

	APdC		GPdC	
	BASELINE	FLEXIBLE	BASELINE	FLEXIBLE
Consumo energia elettrica PdC (kWh_e)	1948.61	1856.48	1789.92	1693.9
Consumo energia elettrica ausiliari (kWh_e)	621.8	608.03	186.01	182.04
Consumo energia totale (kWh_e)	2570.41	2464.51	1975.93	1875.94
Spesa energia elettrica (con PUN) (EUR)	255.47	236.5	197.2	179.72
COP Medio (comprende ausiliari)	3.1	3.2	4.03	4.21
Temperatura media in ingresso all'evaporatore (°C)	7.14	6.96	10.23	10.06

Tabella 2 - Risultati modello di simulazione su periodo più caldo (10 giorni)

	APdC		GPdC	
	BASELINE	FLEXIBLE	BASELINE	FLEXIBLE
Consumo energia elettrica PdC (kWh_e)	62.48	52.89	61.24	51.17
Consumo energia elettrica ausiliari (kWh_e)	19.47	17.63	6.35	5.84
Consumo energia totale (kWh_e)	81.95	70.52	67.59	57.01
Spesa energia elettrica (con PUN) (EUR)	8.82	6.91	7.25	5.74
COP Medio (comprende ausiliari)	3.4	3.69	4.15	4.55
Temperatura media in ingresso all'evaporatore (°C)	10.7	10.53	11.38	11.1

Tabella 3 - Risultati modello di simulazione su periodo più freddo (10 giorni)

	APdC		GPdC	
	BASELINE	FLEXIBLE	BASELINE	FLEXIBLE
Consumo energia elettrica PdC (kWh_e)	140.67	135.62	116.85	109.82
Consumo energia elettrica ausiliari (kWh_e)	46.3	45.63	12.05	11.71
Consumo energia totale (kWh_e)	186.97	181.25	128.9	121.53
Spesa energia elettrica (con PUN) (EUR)	19.32	18.28	13.36	12.26
COP Medio (comprende ausiliari)	2.72	2.79	4.01	4.16
Temperatura media in ingresso all'evaporatore (°C)	3.21	3.2	10.23	10.06

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non applicabile.

9 Pubblicazioni scientifiche

Alice Mugnini, Maarten Evens, Alessia Arteconi, Model predictive controls for residential buildings with heat pumps: Experimentally validated archetypes to simplify the large-scale application, *Energy and Buildings*, Volume 320, 1 October 2024, 114632, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114632>

10 Eventi di disseminazione

Non ci sono eventi di disseminazione da menzionare oltre a quanto riportato nella sezione 9.