RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA 4.6: Sistemi integrati: Definizione di un Flexibility Label e sviluppo di metodologie di controllo e design ottimizzato per pompe di calore flessibili

Alessia Arteconi, Fabio Polonara

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

RdS_PTR22-24_PR1.7_ LA4.6_031

LA 4.6: SISTEMI INTEGRATI: DEFINIZIONE DI UN FLEXIBILITY LABEL E SVILUPPO DI METODOLOGIE DI CONTROLLO E DESIGN OTTIMIZZATO PER POMPE DI CALORE FLESSIBILI

Alessia Arteconi, Fabio Polonara

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 4.6
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Università Politecnica delle Marche - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
Mese inizio previsto: gennaio 2022
Mese inizio effettivo: gennaio 2022
Mese fine previsto: giugno 2023
Mese fine effettivo: giugno 2023

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"
Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pieve
Responsabile scientifico Co-beneficiario: Alessia Arteconi

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 4
3 PRODOTTI ATTESI 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI 6
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 7
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 8
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 16
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 17
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 18

1 Risultati attesi

I risultati attesi nella presente LA riguardano la definizione di un approccio metodologico per quantificare la flessibilità energetica di dispositivi a pompa di calore e ottimizzarne il dimensionamento in funzione dei sistemi di controllo.
In particolare, il primo risultato atteso è la definizione di un **flexibility label**, cioè di un indicatore univoco di confronto, in termini di flessibilità d'uso, tra diverse configurazioni d'impianto.
In secondo luogo, grazie alla conoscenza del comportamento dinamico dei sistemi, si proporrà un **metodo per la progettazione ottimizzata** di sistemi a pompa di calore tenendo in considerazione sia gli aspetti tecnici, sia di controllo in modo da fornire delle linee guida per la progettazione ottimizzata di sistemi reali.

2 Risultati ottenuti

I risultati ottenuti sono in linea con quelli attesi.

2.1 Flexibility Label

Per quanto riguarda il primo risultato atteso, è stata proposta la definizione di un Flexibility Label per sistemi che includono una pompa di calore, un sistema di accumulo termico e un sistema di controllo. L'indicatore di flessibilità può essere calcolato a partire dalla conoscenza delle caratteristiche tecniche di progetto del sistema considerato. Grazie a questo metodo è possibile confrontare soluzioni impiantistiche diverse in termini di tempo per la carica e scarica dell'accumulo ed efficienza del processo. Questo indicatore risulta utile sia all'utente finale che debba scegliere la propria soluzione impiantistica, ma fornisce informazioni interessanti anche per i gestori di rete per avere una quantificazione delle riserve di flessibilità disponibili presso le utenze.

2.2 *Sviluppo di una metodologia per l'ottimizzazione contemporanea di parametri di design e controllo in installazioni con pompe di calore*

Vista la mutua influenza dei parametri di design e controllo in installazioni a pompe di calore, è stata messa a punto una metodologia per l'ottimizzazione del design di sistemi a pompa di calore tenendo in considerazione le logiche di controllo. Attraverso un problema di ottimizzazione che considera contemporaneamente sia i parametri di progetto sia quelli di controllo, sono state predisposte delle mappe da utilizzare per la scelta ottimale delle componenti di impianto. Le mappe per il design sono uno strumento molto utile per gli installatori/progettisti e permettono di superare le presenti difficoltà nel settore che vedono l'applicazione di regole pratiche non sempre ottimali per la gestione dei sistemi. Questo supporterà l'ulteriore installazione di pompe di calore e il loro impiego efficace in programmi dove è richiesta flessibilità energetica dalla rete

3 Prodotti attesi

Il prodotto atteso da questa LA sono è la stesura di “Linee guida per etichettatura sistemi integrati”, cioè la descrizione di una procedura di etichettatura per la valutazione della flessibilità energetica di sistemi integrati in pompa di calore (descritta di seguito nel Rapporto Tecnico delle attività svolte).

4 Prodotti sviluppati

Come previsto dal capitolato è stato sviluppato un metodo per l'etichettatura della flessibilità energetica di sistemi contenenti pompe di calore, accumuli termici e controlli per applicazioni residenziali. La descrizione dettagliata è reperibile nella pubblicazione: M. Evens, A. Mugnini, A. Arteconi. Design energy flexibility characterisation of a heat pump and thermal energy storage in a Comfort and Climate Box, Applied Thermal Engineering Volume 216, 5 November 2022, 119154, (https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119154)

In particolare, il lavoro propone una metodologia di quantificazione per valutare il potenziale di flessibilità di progettazione di un sistema con pompa di calore, accumulo e controlli. Essa si basa su diversi cicli separati di carica e scarica degli accumulatori di energia termica. La procedura esamina diverse condizioni climatiche e programmi operativi della pompa di calore per considerare anche l'efficienza operativa. La metodologia fornisce tre parametri di flessibilità: l'efficienza della fornitura di flessibilità, il tempo medio di ricarica e il tempo medio di scarica. Il metodo consente un confronto corretto e semplice della flessibilità progettuale tra sistemi di diversi produttori, tipologie di pompe di calore e indipendenti dal sistema di emissione di calore in uso. L'applicazione della procedura di valutazione della flessibilità a diverse combinazioni di una pompa di calore acqua/acqua che fornisce riscaldamento degli ambienti e/o acqua calda sanitaria ha dimostrato la capacità della metodologia ai fini della valutazione della flessibilità di progettazione.

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

Le attività svolte sono state suddivise nelle seguenti fasi al fine di definire un energy flexibility label e per indentificare delle mappe per il corretto dimensionamento di sistemi a pompa di calore:

- Identificazione delle configurazioni impiantistiche (pompa di calore, stoccaggio, controllo) da analizzare e condizioni al contorno da considerare nell'analisi;
- Modellazione dei sistemi considerati;
- Elaborazione di un metodo ripetibile di calcolo di indicatori di flessibilità rilevanti, cioè il tempo di carica, il tempo di scarica e l'efficienza del processo flessibile;
- Formulazione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo, che tiene in considerazione sia il costo di gestione che quello di investimento;
- Elaborazione di mappe di dimensionamento ottimizzate, cioè delle curve di Pareto che consentono di scegliere la migliore configurazione di taglia pompa di calore/taglia dello stoccaggio;
- Test su casi di studio e analisi dei risultati.

7 Dettaglio delle attività svolte

Nel seguito verranno descritte in dettaglio le attività svolte nella LA.

7.1 Flexibility Label

7.1.1 Identificazione delle condizioni al contorno necessarie nell'analisi

La combinazione di pompa di calore, accumulo termico e sistema di controllo in un unico prodotto è stata definita dall'IEA (International Energy Agency) come Comfort and Climate Box (CCB).
La Figura 1 fornisce una descrizione generale del CCB per tre principali configurazioni. Si può distinguere in base ai servizi termici erogati (riscaldamento/space heating, SH, e/o acqua calda sanitaria/domestic hot water, DHW) e alla configurazione del TES (separata o combinata).

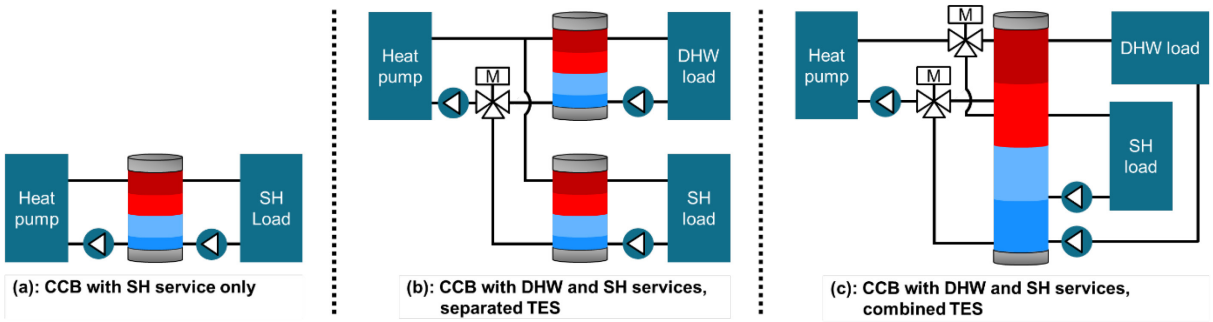

Figura 1. Rappresentazione delle possibili configurazioni di un sistema CCB

Partendo da tale rappresentazione generale di CCB, la procedura di rating di flessibilità si basa sulla distinzione delle due fasi di funzionamento, cioé la carica e scarica dell'accumulo (TES), come mostrato rispettivamente nella Figura 2(a) e nella Figura 2(b). Questo approccio presuppone che durante il processo di carica del TES non venga consumato alcun carico SH o DHW, mentre durante la scarica del TES la pompa di calore rimane spenta. La metodologia proposta comporta diversi cicli di carico e scarico di un TES SH e DHW in quattro diverse condizioni di temperatura esterna per raggiungere un migliore accordo con le condizioni operative reali. I calcoli vengono eseguiti con le temperature di fornitura minime richieste Tmin per il carico SH e DHW, mentre due diversi livelli di temperatura massima (Tmax,1 e Tmax,2) vengono utilizzati per rappresentare meglio la prestazione energetica del CCB durante la fornitura di flessibilità. La distinzione tra questi due livelli massimi di temperatura dipende dalla disponibilità e indisponibilità di un riscaldatore elettrico (back up heater) di riserva per i servizi di flessibilità della pompa di calore.

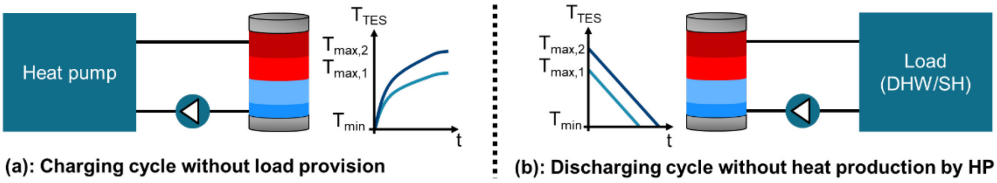

Figura 2. Fasi di carica e scarica del TES

Le condizioni al contorno necessarie per applicare il metodo sono:

1) Dati climatici
2) Carico del riscaldamento dell'ambiente
   Ai fini dello SH, il produttore del CCB fornisce la potenza nominale del CCB (QSH,nominale). È la potenza termica per la quale il CCB è progettato ad una temperatura esterna di -10 °C. Poiché la temperatura esterna di progetto viene raggiunta raramente in condizioni reali, lo standard per il test delle pompe di calore considera anche condizioni di carico parziale a quattro diversi livelli di temperatura esterna. Questi livelli di temperatura corrispondono alle temperature dell'aria esterna di -7 °C, 2 °C, 7 °C e 12 °C.

Le prestazioni della pompa di calore sono di norma fornite a diverse temeprature di mandata. In questo studio, l'analisi considera solo una temperatura di fornitura SH di 35 °C.

3) Carico acqua calda sanitaria
Analogamente alle condizioni al contorno SH, è necessaria la determinazione del carico DHW. Poiché la richiesta giornaliera di energia per acqua calda sanitaria è generalmente costante durante l'anno, viene utilizzato un solo livello di carico ACS. A seconda della taglia del TES, la EN 16147 imposta un profilo di carico giornaliero predefinito che definisce fasce orarie con una portata di prelievo predefinita.

7.1.2 Modellazione del sistema analizzato

Di seguito sono descritti come sono stati realizzati i modelli dei vari componenti di un CCB, cioè l'accumulo e la pompa di calore.

Modello del sistema di stoccaggio (TES)

Per il TES è stato sviluppato un semplice modello 1D come mostra la Figura 3: il volume del TES è generalmente diviso in n segmenti verticali n_{seg} di uguali dimensioni con volume $V_{TES,i}$ e massa $m_{TES,i}$ per rappresentare la stratificazione termica verticale. Si presuppone che ciascun segmento i sia completamente miscelato alla temperatura Ti e pertanto la distribuzione orizzontale della temperatura viene trascurata. Lo strato 1 rappresenta lo strato TES più alto, mentre lo strato n rappresenta lo strato TES più basso. Durante i processi di carica, la pompa di calore fornisce acqua nello strato 1 ed estrae acqua nello strato n, mentre durante i processi di scarica, l'acqua viene estratta nello strato 1 e reimmessa nello strato n. Dove $\dot{m}$ rappresenta la portata massica, c la capacità termica specifica e Qloss,i la perdita di calore dello strato i, l'Eq. (1) e l'equazione (2) descrivono rispettivamente il processo di carica e scarica.

$$m_{TES,i} \cdot c \cdot \frac{dT_i}{dt} = \dot{m} \cdot c \cdot T_{i-1}(t) - \dot{m} \cdot c \cdot T_i(t) - Q_{loss,i}(t) \quad (1)$$

$$m_{TES,i} \cdot c \cdot \frac{dT_i}{dt} = \dot{m} \cdot c \cdot T_{i+1}(t) - \dot{m} \cdot c \cdot T_i(t) - Q_{loss,i}(t) \quad (2)$$

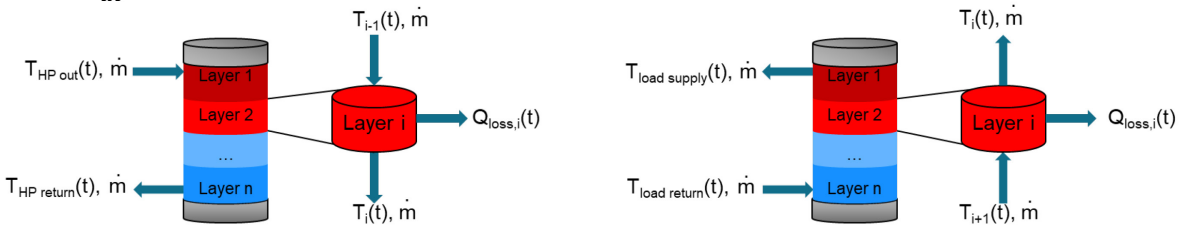

Figura 3. TES stratificato: processo di carica (sinistra) e di scarica (destra)

Modello della pompa di calore

Il modello della pompa di calore si basa su mappe di prestazione, che prestazioni a carico parziale a diversi livelli di modulazione, ad es. 30%, 50%, 70%, 90% e 100% al variare delle temperature di ingresso dell'evaporatore e di uscita del condensatore.

Un limitatore di modulazione viene utilizzato per limitare le capacità di modulazione della pompa di calore secondo le specifiche del produttore, ad es. 30% – 100%. Le pompe di calore disponibili sul mercato possono anche essere dotate di una resistenza come riscaldatore di riserva (BUH) per aumentare ulteriormente la temperatura di mandata e ridurre le dimensioni di progettazione del compressore poiché le temperature esterne alle condizioni di progetto sono raramente raggiunte. In genere l'utilizzo di un BUH per scopi di flessibilità aumenta il comportamento flessibile, ma provoca anche un calo significativo dell'efficienza complessiva del sistema. Pertanto, la metodologia utilizza due diversi cicli di flessibilità come mostrato nella Figura 2, un primo ciclo chiamato Flex1 fino alla massima temperatura di mandata del compressore raggiungibile Tmax,1 senza BUH e un secondo ciclo Flex2 fino alla massima temperatura di mandata HP raggiungibile Tmax,2 con un BUH attivato. Il produttore del CCB fornisce queste due temperature, comprese le aree operative del compressore e della BUH, accompagnate dalle capacità di modulazione del riscaldatore di riserva.

7.1.3 Definizione del metodo di quantificazione della flessibilità

Il processo di quantificazione della flessibilità consiste nella valutazione del comportamento del sistema in diversi cicli separati di carico e scarico. La Figura 4 fornisce una panoramica della metodologia.

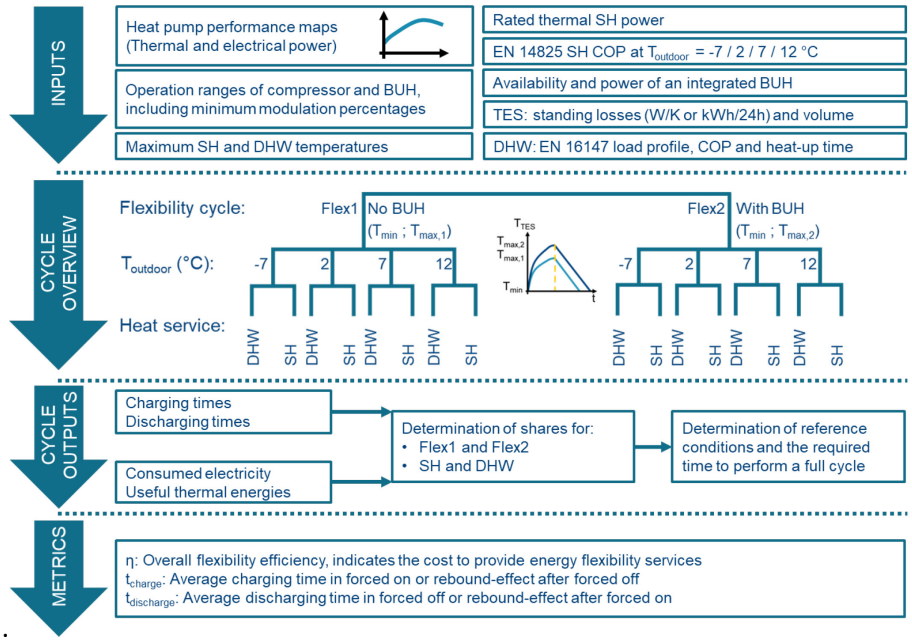

Figura 4. Panoramica del metodo per il flexibility label

Gli indicatori introdotti per il flexibility label sono l'efficienza del sistema flessibile, il tempo di carica e il tempo di scarica, come descritto nelle equazioni 3-4.

$$\eta = \frac{\left(t_{Flex1} \cdot \frac{COP_{Flex1}}{COP_{ref}}\right) + \left(t_{Flex2} \cdot \frac{COP_{Flex2}}{COP_{ref}}\right)}{t_{Flex1} + t_{Flex2}} \quad (3)$$

$$t_{charge} = \frac{\sum_1^4 (t_{ch,Flex1} + t_{ch,Flex2})}{8} \quad (4)$$

$$t_{discharge} = \frac{\sum_1^4 (t_{disch,Flex1} + t_{disch,Flex2})}{8} \quad (5)$$

7.1.4 Test su casi di studio

I casi simulati con i rispettivi numeri di caso sono mostrati nella Figura 5.

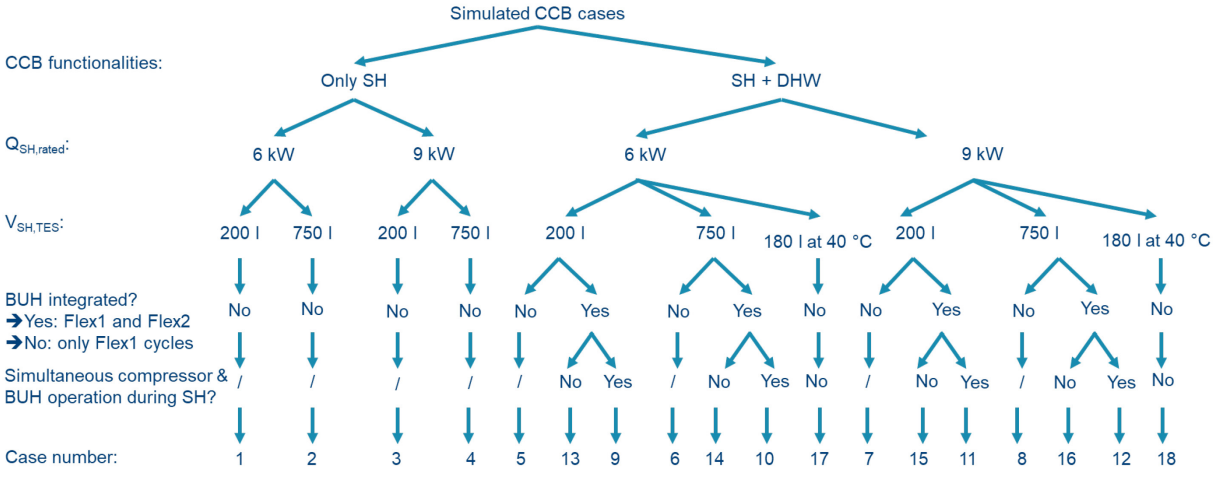

Figura 5. Casi simulati per il test del metodo proposto

Un confronto dei risultati dell'applicazione ai casi studio ha rivelato gli effetti delle dimensioni dell'accumulo, delle dimensioni della pompa di calore, della disponibilità del servizio di acqua calda sanitaria e della disponibilità del riscaldatore di riserva.

A) Dimensioni dello stoccaggio.
   L'aumento delle dimensioni dello storage ha consentito una maggiore flessibilità, ma ha comportato anche costi operativi aggiuntivi. Poiché le perdite di calore aumentano all'aumentare dei volumi di stoccaggio, il valore economico aggiuntivo della prestazione di flessibilità viene in parte perso nelle perdite di stoccaggio che sono sempre presenti in qualsiasi condizione operativa.
B) Taglia della pompa di calore:
   La modifica della dimensione della pompa di calore ha mostrato l'effetto delle regole di dimensionamento sul potenziale di flessibilità. L'aumento della potenza termica nominale del CCB presuppone che aumentino anche le perdite di calore dell'edificio. Mantenendo invariato il volume di accumulo al crescere della potenza nominale, le perdite di accumulo diminuiscono poiché diminuiscono sia i tempi di carica che di scarica e l'efficienza del sistema viene influenzata positivamente.
C) Presenza di un accumulo per acqua calda sanitaria
   La disponibilità di un accumulo di acqua calda sanitaria aumenta il potenziale di flessibilità del CCB.
D) Attivazione del riscaldatore di riserva (BHU)
   L'attivazione del riscaldatore di riserva per aumentare la potenza elettrica e il potenziale di accumulo dell'energia ha mostrato riduzioni fino al 30,77% nell'efficienza di flessibilità complessiva perché riduce il COP complessivo.

7.2 *Sviluppo di una metodologia per l'ottimizzazione contemporanea di parametri di design e controllo in installazioni con pompe di calore*

7.2.1 Definizione dell'approccio di determinazione delle mappe progettuali

La metodologia proposta consente il dimensionamento di pompe di calore ad aria residenziali con diversi sistemi di distribuzione (ad esempio, con e senza TES, riscaldamento ad aria o a pavimento). La metodologia si basa su modelli dinamici delle varie parti del sistema (ovvero, sistema di edificio, emissione e generazione) che interagiscono in un unico problema di ottimizzazione multi-obiettivo. Nell'ottimizzazione vengono presi in considerazione sia i costi di investimento che i costi operativi, cioè legati al consumo energetico complessivo. La metodologia determina sia i parametri di progettazione (ovvero la dimensione dell'HP o il volume dei TES, se previsti) sia il funzionamento dinamico dell'HP (ovvero il segnale di accensione dinamico e la modulazione). Vengono inoltre valutate diverse strategie di controllo della pompa di calore riguardanti la regolazione della produzione termica (ad esempio, temperatura fissa o regolazione climatica). La metodologia consente di ottenere mappe come fronti di Pareto. Questi forniscono una rappresentazione sintetizzata per la progettazione ottimizzata di un HP che tiene conto del ruolo della strategia di controllo, della configurazione dell'impianto e del funzionamento. La Figura 6 riassume i vari passaggi, la cui descrizione dettagliata è riportata nei sottoparagrafi successivi.

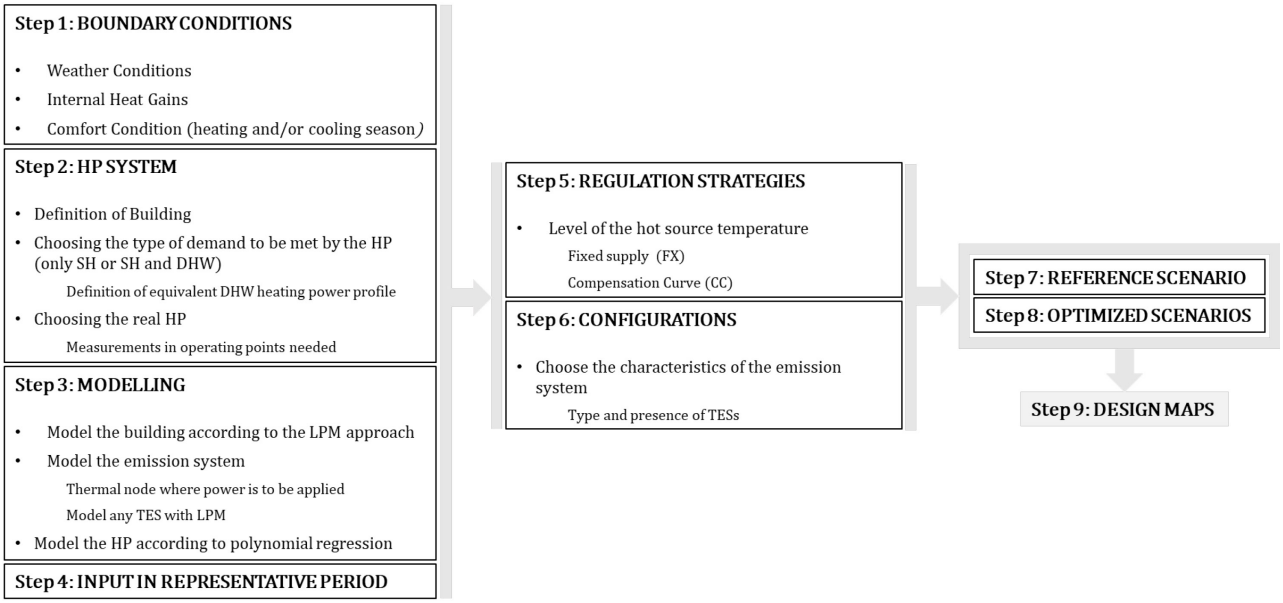

Figura 6. Passaggi di implementazione della procedura di design ottimizzato.

7.2.2 Modellazione del sistema

La richiesta di calore negli edifici è dovuta sia alla produzione di riscaldamento sia di acqua calda sanotari. Per questo, le mappe di progettazione possono essere generate in due configurazioni. Uno in cui viene considerata solo la domanda di SH e l'altro in cui sia la domanda di SH che quella di DHW. In questa sottosezione sono descritte le tecniche di modellizzazione per ottenere la domanda dinamica di potenza termica per SH e DHW, il modello del TES e della pompa di calore.

Domanda di riscaldamento

La domanda di riscaldamento è stata ottenuta tramite un modello semplificato di un edificio schematizzato come resistenze e capacità, si veda Figura 7.

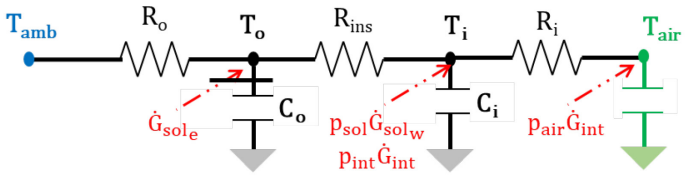

Figura 7. Schema del modello per la determinazione della domanda termica.

Accumulo termico

I serbatoi di acqua calda (TES) possono essere collegati alla pompa di calore sia per SH che per DHW. In particolare, il serbatoio è modellato come un modello a parametri concentrati in cui c'è un singolo nodo termico (T_tes, C_tes) e il TES è considerato completamente miscelato. La Figura 8 mostra uno schema del modello in cui il termine generale $\dot{Q}$ si riferisce alla potenza termica rimossa dal serbatoio (cioè richiesta di calore per SH o richiesta di DHW) e $\dot{Q}$_HP è la potenza di riscaldamento fornita dalla pompa di calore. R_tes rappresenta la resistenza termica alle dispersioni termiche con l'ambiente in cui è installato il serbatoio (T_env).

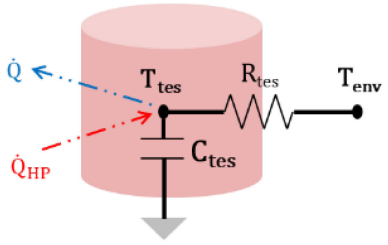

Figura 8. Modello del serbatoio di accumulo termico.

Pompa di calore ad aria

E' modellata una pompa di calore aria-acqua a carico variabile. La prestazione, definita dal coefficiente di prestazione COP, varia in funzione: (i) della temperatura della sorgente calda (es. acqua di alimentazione, T_sup), (ii) della temperatura della sorgente fredda (ovvero aria esterna, T_amb) e (iii)la modulazione della capacità.

$$\dot{Q}_{HP} = \dot{Q}_{HP_r} \cdot CR \cdot A(T_{sup}) \cdot B(T_{amb}) \quad (6)$$

7.2.3 Applicazione dell'ottimizzazione e identificazione delle "mappe" per il design ottimizzato

Per prima cosa si definisce una condizione di riferimento rispetto alla quale si paragonano le soluzioni ottimizzate. Questa si ottiene risolvendo una ottimizzazione mono-obiettivo, cioè la minimizzazione della domanda termica per garantire il comfort.

Le mappe progettuali si derivano invece come soluzione di un problema di ottimizzazione multi-obiettivo da cui si identificano le frontiere di pareto:

$$\min \{w \cdot OBJ_1 + (1 - w) \cdot OBJ_2\} \quad (7)$$

dove w è il peso assegnato alla funzione obiettivo (OBJ_1) che assume valori tra 0 e 1, mentre OBJ_1 e OBJ_2 sono le due funzioni obiettivo definite rispettivamente come:

$$OBJ_1 = {Elec_{norm}}^{-1} \cdot \sum_{k=0}^{k_{rp}} \dot{Q}_{HP_k} \cdot {COP_k}^{-1} \quad (8)$$

$$OBJ_2 = \dot{Q}_{HP_r} \cdot cost_{HP} \cdot {Cost_{HP_{norm}}}^{-1} \quad (9)$$

In relazione all'equazione 7, OBJ_1 rappresenta la minimizzazione della domanda elettrica nel periodo di riferimento (k_{rp}). OBJ_2 invece rappresenta la minimizzazione del costo energetico operativo. Al fine di avere una funzione adimensionale, si introduce $Elec_{norm}$ definito come.

$$Elec_{norm} = \dot{Q}_{load} \cdot A(T_{sup}) \cdot B(T_{amb}) \cdot L(T_{sup})^{-1} \cdot M(T_{amb})^{-1} \cdot N(CR)^{-1} \quad (10)$$

Una volta risolti il caso di riferimento e i problemi di ottimizzazione multi-obiettivo in diverse configurazioni di impianto e strategie di controllo, è possibile costruire mappe di progettazione. Queste sono divisi in due tipi di diagrammi: (i) i risultati dell'ottimizzazione multi-obiettivo in relazione al caso di riferimento; (ii) risultati relativi ai parametri di progettazione ottimali. I primi diagrammi mostrano la percentuale del consumo elettrico stagionale negli scenari ottimizzati (K_SEC) in relazione alle percentuali del costo totale dell'investimento (K_TIV). In entrambi i casi le percentuali sono calcolate in relazione ai risultati dello scenario base. Il secondo tipo di diagramma mostra la percentuale della dimensione della pompa di calore (K_HP) e del volume del TES rispetto a quello dello scenario di riferimento (K_TES). In quest'ultimo caso K_HP e K_TES sono mostrati in relazione ai pesi nel problema di ottimizzazione multi-obiettivo (w nell'Equazione 7).

Un esempio delle mappe è illustrato in Figura 9 che mostra le mappe di progettazione per la configurazione in cui la pompa di calore soddisfa sia la domanda di riscaldamento che quella di acqua calda sanitaria. I fronti di Pareto per il sistema di emissione a inerzia termica più elevata (cioè HtI) rappresentano l'insieme di soluzioni ottimali (Figura 9a).

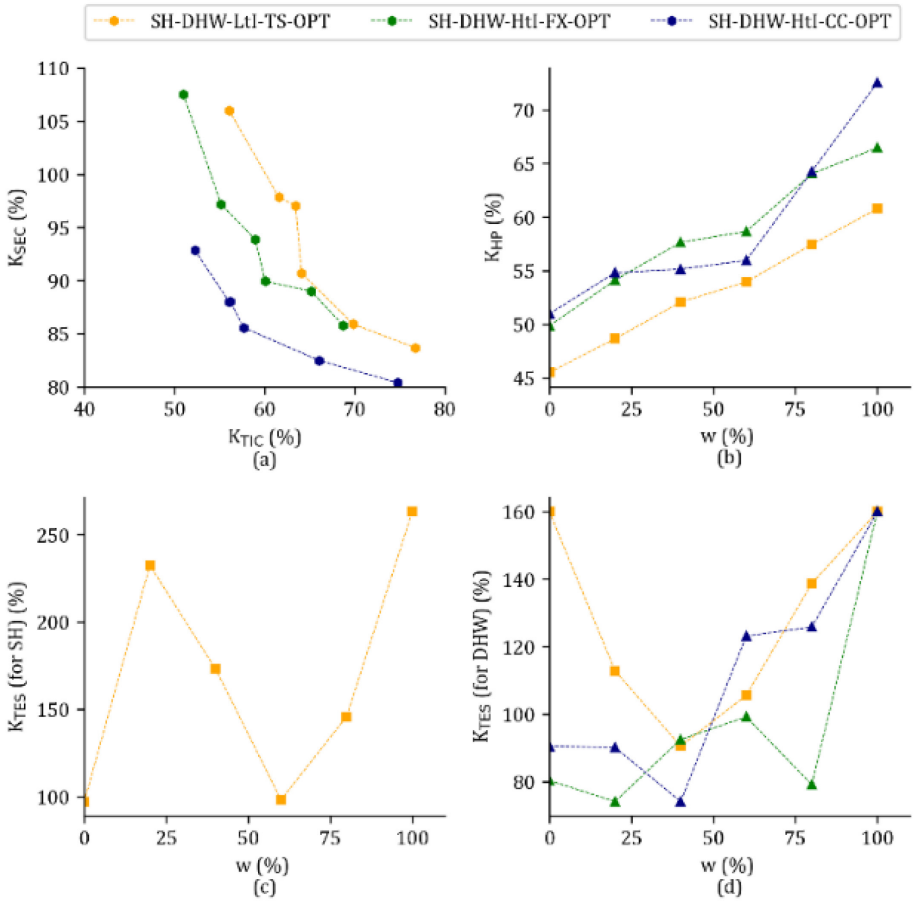

Figura 9. Mappe di progetto per scenari con SH e DHW: (a) Fronti di Pareto (b) variazione percentuale della taglia ottimale HP (ottimizza vs dimensionamento di riferimento), in funzione del peso w, (c) variazione percentuale del TES per taglia ottimale SH , K_TES, (ottimizza vs dimensionamento di riferimento) in funzione del peso w e (d) variazione percentuale del TES per taglia ottimale DHW, K_TES, (ottimizza vs dimensionamento di riferimento) in funzione del peso w

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non applicabile.

9 Pubblicazioni scientifiche

Elenco delle pubblicazioni scientifiche eventualmente risultanti dall'attività svolta:

M. Evens, A. Mugnini, A. Arteconi. Design energy flexibility characterisation of a heat pump and thermal energy storage in a Comfort and Climate Box, Applied Thermal Engineering Volume 216, 5 November 2022, 119154, https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119154.

É stata approvata la seguente pubblicazione:
Alice MUGNINI, Fabio POLONARA, Alessia ARTECONI, Selection maps based on multi-objective optimization of design and control for residential Heat Pumps systems, ICR2023 | 26th International Congress of Refrigeration | August 21st-25th, 2023 | Paris, France

Eventi di disseminazione

È prevista la partecipazione al seguente eventi di disseminazione, nel quale verranno descritti i risultati dell'attività oggetto di questo report:

- ICR2023 | 26th International Congress of Refrigeration | August 21st-25th, 2023 | Paris, France