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

Tecnologie avanzate e sistemi complessi: Sviluppo di logiche di controllo avanzate per il defrosting di pompe di calore ad aria attraverso l'uso di frosting map dedicate (LA4.9)

G.L. Morini, M. Dongellini, C. Naldi, T.P.E. Randazzo

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

RdS_PTR 22-24_PR1.7_LA4.9_398

Tecnologie avanzate e sistemi complessi: Sviluppo di logiche di controllo avanzate per il defrosting di pompe di calore ad aria attraverso l'uso di frosting map dedicate

Tecnologie avanzate e sistemi complessi: Sviluppo di logiche di controllo avanzate per il defrosting di pompe di calore ad aria attraverso l'uso di frosting map dedicate (LA4.9)

G.L. Morini, M. Dongellini, C. Naldi, T.P.E. Randazzo (Alma Mater Studiorum – Università di Bologna)

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: 4.9

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Raniero Trinchieri, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Gian Luca Morini, Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Mese inizio previsto: dicembre 2022

Mese inizio effettivo: dicembre 2022

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: Standardizzazione di test dinamici di impianti integrati e sviluppo di logiche di controllo avanzate per lo sbrinamento di pompe di calore ad aria con l'uso di frosting map dedicate.

Indice

1 Risultati attesi 4
2 Risultati ottenuti 5
3 Prodotti attesi 13
4 Prodotti sviluppati 14
5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati 15
6 Sintesi delle attività svolte 16
7 Dettaglio delle attività svolte 17
8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte 23
9 Pubblicazioni scientifiche 24
10 Eventi di disseminazione 25

Indice delle figure

Figura 1 – Frosting map sperimentale e teorica della pompa di calore da 10 kW 6

Figura 2 – Frosting map teoriche della pompa di calore da 60 kW: due compressori attivi e iniezione di vapore (a); due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata (b); un compressore attivo e iniezione di vapore disattivata (c) 7

Figura 3 – Frosting map sperimentale della pompa di calore da 60 kW operante con due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata 8

Figura 4 – Confronto fra frosting map teorica e sperimentale della pompa di calore da 60 kW con due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata 8

Figura 5 – Diagramma di flusso della logica di controllo avanzata per il controllo dei cicli di sbrinamento di una pompa di calore ad aria 10

Figura 6 – Pompa di calore da 10 kW testata per definire la sua frosting map 17

Figura 7 – Pompa di calore da 60 kW testata per definire la sua frosting map 17

Figura 8 – Posizionamento termocoppie su alette e tubi della batteria della pompa di calore da 60 kW 18

Figura 9 – Suddivisione della frosting map della pompa di calore da 60 kW in zone sulla base delle condizioni climatiche riportate nel TRY di Bologna 22

Indice delle tabelle

Tabella 1 – Prestazioni energetiche della pompa di calore da 60 kW con la logica di sbrinamento attuale e la logica di controllo avanzata 12

Tabella 2 – Condizioni climatiche impostate all'interno della camera climatica per i test condotti sulla pompa di calore da 60 kW con due compressori attivi e iniezione del vapore disattivata 19

1 Risultati attesi

L'obiettivo della LA4.9 è studiare le prestazioni delle pompe di calore ad aria in regime di brinamento, andando in particolare a sviluppare logiche di controllo avanzate in grado di evitare cicli di sbrinamento indesiderati (cicli di mal-defrost). In particolare, tali logiche si basano sulla frosting map della pompa di calore in oggetto, un diagramma temperatura-umidità relativa dell'aria esterna in cui vengono tracciate la zona di "non frosting", caratterizzata da assenza di formazione di condensa o brina sull'evaporatore esterno, la zona di "condensazione" in corrispondenza della quale si verifica la condensa del vapore acqueo sulla batteria esterna, e la zona di "frosting" nella quale la brina si deposita sulla superficie dello scambiatore esterno. Sulla base della "frosting map" è possibile definire logiche di controllo più efficaci ed accurate, attraverso le quali evitare l'attivazione erronea di cicli di sbrinamento anche in situazioni in cui non ce ne sarebbe bisogno.

I risultati previsti per la LA permetteranno di valutare la relazione tra la frosting map di una pompa di calore e le sue caratteristiche costruttive (es. geometria degli scambiatori, possibilità di utilizzare l'iniezione di vapore) e operative (es. numero di compressori attivi). Attraverso la frosting map verranno realizzate logiche di controllo avanzate, validate sperimentalmente. Verranno inoltre realizzate delle linee guida per la costruzione della frosting map associata ad una generica pompa di calore.

2 Risultati ottenuti

Fra i principali risultati ottenuti si riporta l'implementazione di una procedura per ricavare la frosting map di una specifica pompa di calore con una serie limitata di misure sperimentali.

La frosting map di una pompa di calore che utilizza l'aria ambiente come sorgente termica esterna consiste in un diagramma temperatura-umidità relativa dell'aria utilizzato per guidare il controllo dello sbrinamento. Attraverso l'utilizzo della frosting map è possibile definire la logica di controllo per i cicli di sbrinamento in corrispondenza delle condizioni climatiche in cui la superficie esterna dell'evaporatore brina realmente, riducendo così l'attivazione di cicli di sbrinamento non necessari (cicli di mal-defrost) e ottimizzando le prestazioni della macchina.

La caratterizzazione di una frosting map, e quindi la sua realizzazione, dipende dai valori delle seguenti variabili:

- T_a= Temperatura dell'aria esterna;
- RH= Umidità relativa dell'aria esterna;
- T_dp= Temperatura di rugiada (dew point) dell'aria esterna;
- T_w= Temperatura di parete dell'evaporatore;
- T_f= Temperatura di congelamento dell'acqua;
- ΔT= Differenza tra la temperatura dell'aria esterna e la temperatura di parete dell'evaporatore.

Sulla base di tali variabili è possibile costruire il diagramma e definire tre zone al suo interno:

- Non-frosting region: Se T_w> T_dp non si verifica né condensa, né formazione di brina sulla superficie dello scambiatore di calore;
- Condensing region: se T_w< T_dp e T_w>T_f si verifica la condensazione di vapore acqueo sulla superficie dello scambiatore esterno;
- Frosting region: se T_w< T_dp e T_w<T_f si deposita brina sull'evaporatore.

La realizzazione della frosting map può anche essere utilizzata per valutare l'adeguato utilizzo di una pompa di calore in una specifica zona. Per esempio, non è raccomandata l'installazione di una pompa di calore in aree dove la maggior parte della stagione invernale è caratterizzata da condizioni climatiche che ricadono nella zona di frosting, poiché frequenti cicli di sbrinamento ravvicinati portano a un consistente calo delle prestazioni della macchina.

I passaggi per costruire la frosting map riguardano innanzitutto la definizione delle curve a temperatura di rugiada costante sul diagramma, per poi passare alla costruzione delle diverse regioni. Per questa fase è fondamentale introdurre una correlazione fra la temperatura dell'aria esterna, la temperatura di parete dell'evaporatore e la temperatura di evaporazione. Tale relazione si può ricavare attraverso prove sperimentali oppure si possono utilizzare correlazioni empiriche pubblicate in letteratura, come ad esempio quella riportata in Zhu et al [1]. Le prove sperimentali da condurre per definire nel dettaglio le regioni della frosting map devono essere svolte per condizioni climatiche gravose (in termini di formazione di brina) e devono valutare se sulla superficie della batteria alettata si depositi ghiaccio o semplice condensa.

La Figura 1 riporta la frosting map della pompa di calore da 10 kW testata sperimentalmente, con l'indicazione delle regioni caratteristiche. Nella figura vengono anche confrontati gli andamenti teorici del diagramma con quelli ottenuti tramite i test. Dal confronto tra la frosting map teorica e quella sperimentale si nota come la frosting region reale della macchina risulti essere meno estesa di quella teorica. Tale risultato costituisce ovviamente un vantaggio per la pompa di calore, poichè la macchina attiverà cicli di defrost per combinazioni meno frequenti di temperatura di bulbo secco-umidità relativa dell'aria. La minore estensione della frosting region sperimentale rispetto a quella teorica è dovuta al fatto che la temperatura superficiale reale della batteria alettata è più alta di quella teorica (pari a quella di evaporazione), calcolata mediante il software di selezione del produttore. Da questo primo risultato si evince come lo svolgimento di test sperimentali per validare le frosting map teoriche sia necessario per definire in maniera corretta l'estensione delle regioni sul diagramma e, quindi, implementare i corretti valori dei parametri delle logiche di controllo.

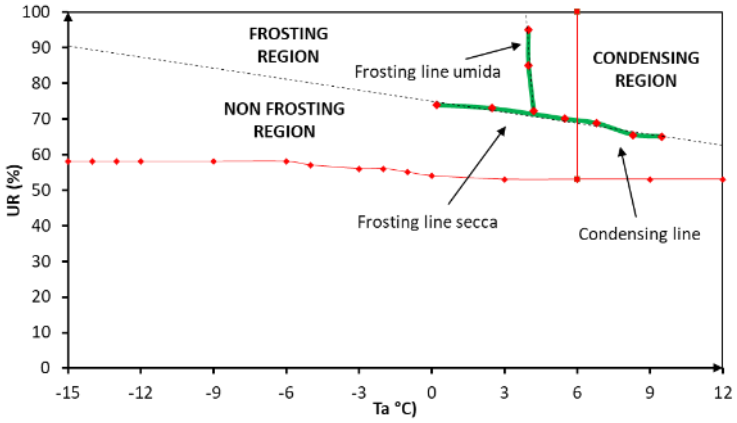

Figura 1 – Frosting map sperimentale e teorica della pompa di calore da 10 kW

Nella Figura 2 sono riportate le frosting map teoriche per la pompa di calore da 60 kW, ottenute per diverse condizioni operative: a) due compressori attivi e iniezione di vapore; b) due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata; c) un compressore attivo e iniezione di vapore disattivata.

I risultati ottenuti, riportati in Figura 2, evidenziano che la frosting map della pompa di calore operante con due compressori attivi non è particolarmente influenzata dall'iniezione del vapore. La linea di confine fra non frosting region e condensing-frosting region si trova in corrispondenza del valore di umidità relativa pari al 48% per temperatura dell'aria di 12°C e aumenta con il diminuire della temperatura, fino al valore di 57% in corrispondenza della temperatura dell'aria di -15°C.

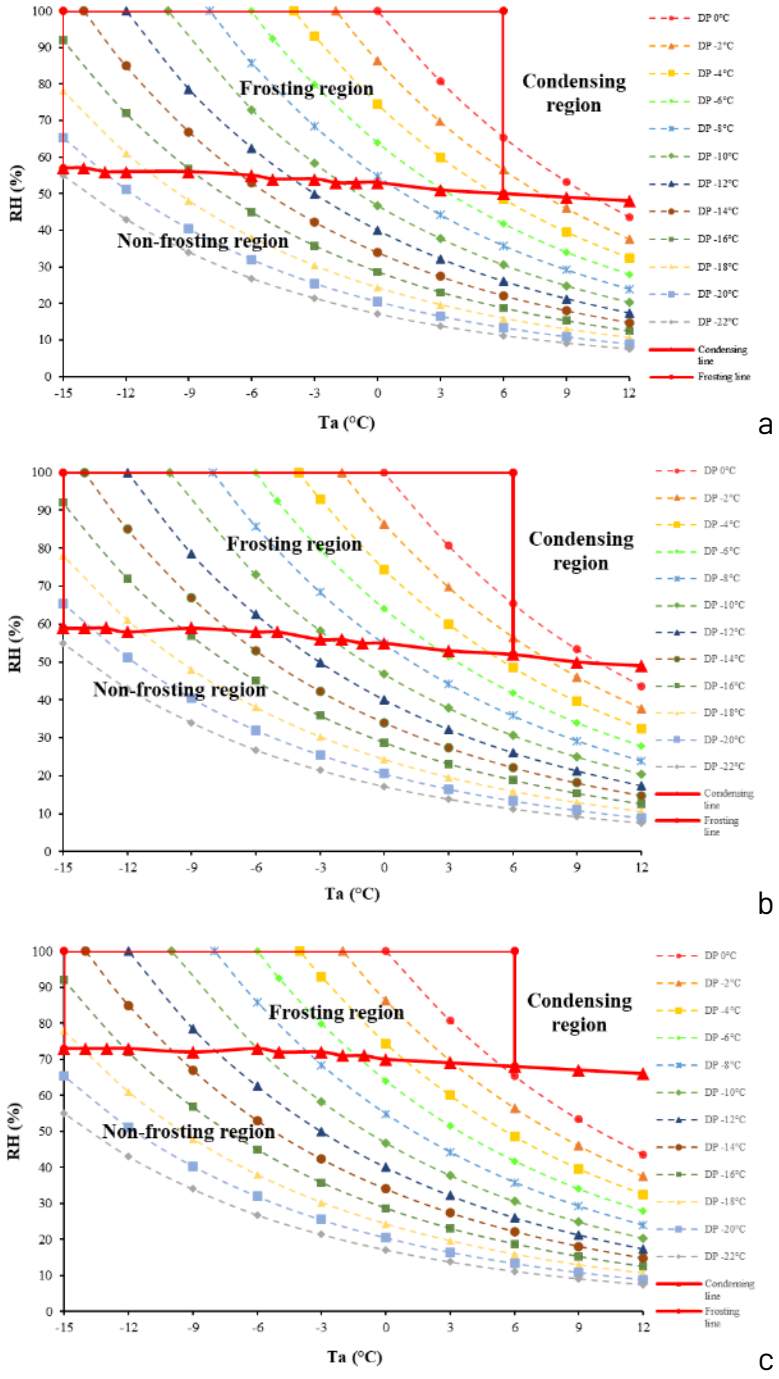

Figura 2 – Frosting map teoriche della pompa di calore da 60 kW: due compressori attivi e iniezione di vapore (a); due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata (b); un compressore attivo e iniezione di vapore disattivata (c)

Maggiori differenze si riscontrano quando la pompa di calore opera con un solo compressore attivo (si confrontino i grafici di Figura 2b e 2c). La frosting region per il funzionamento a un solo compressore è molto più ridotta rispetto a quella relativa al funzionamento a due compressori. A carico parziale, infatti, la portata di refrigerante circolante è circa la metà di quella nominale, ma la superficie di scambio all'evaporatore è la medesima. Pertanto, la macchina in queste condizioni lavora con un rapporto portata refrigerante / superficie di scambio molto più grande e di conseguenza è più efficiente e la temperatura di evaporazione aumenta. Il valore dell'umidità relativa limite (linea di confine fra non frosting region e condensing-frosting region) si alza del 17% per temperature dell'aria maggiori di 6°C. Scendendo poi con le temperature l'incremento diminuisce fino al 14% in più. Da tale risultato

si ricava quindi che le condizioni operative di una pompa di calore, quali ad esempio il grado di parzializzazione, influenzano in maniera notevole l'estensione della frosting map ad essa associata e, quindi, le sue prestazioni in regime di brinamento. Di conseguenza, appare evidente che logiche di controllo dei cicli di sbrinamento debbano tenere conto di tali variabili per risultare efficienti.

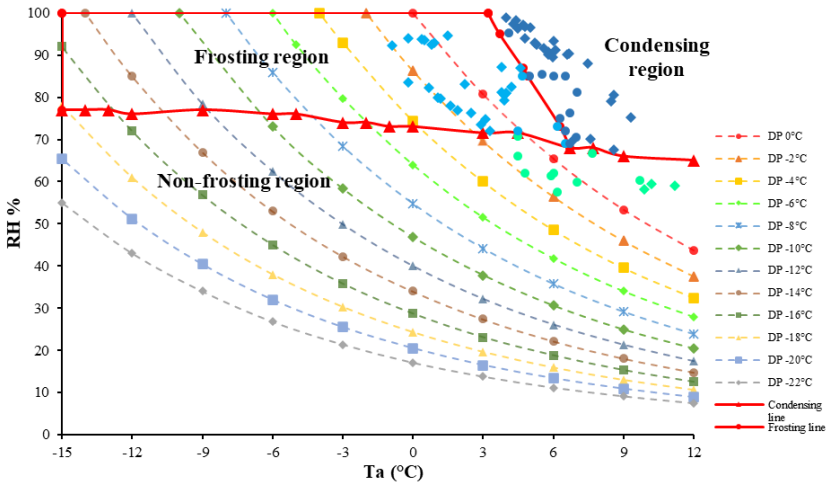

Figura 3 – Frosting map sperimentale della pompa di calore da 60 kW operante con due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata

In Figura 3 sono riportati i punti ottenuti dalle prove sperimentali condotte in camera climatica sulla pompa di calore da 60 kW (due compressori attivi, iniezione di vapore disattivata). Sulla base di tali punti è stato possibile definire una frosting map sperimentale, del tutto affidabile e utilizzabile per successive analisi o per definire logiche di controllo efficaci. Dal confronto tra la frosting map teorica e quella sperimentale mostrato in Figura 4 si nota come la frosting region reale della macchina risulti essere meno estesa di quella teorica. Ciò è chiaramente un vantaggio, perché la frequenza con cui la batteria alettata brina è minore di quella stimata. La motivazione di una minore estensione della frosting region sperimentale rispetto a quella teorica è dovuta al fatto che la temperatura superficiale dell'evaporatore in condizioni di funzionamento reali è più alta di quella teorica (assunta pari alla temperatura di evaporazione).

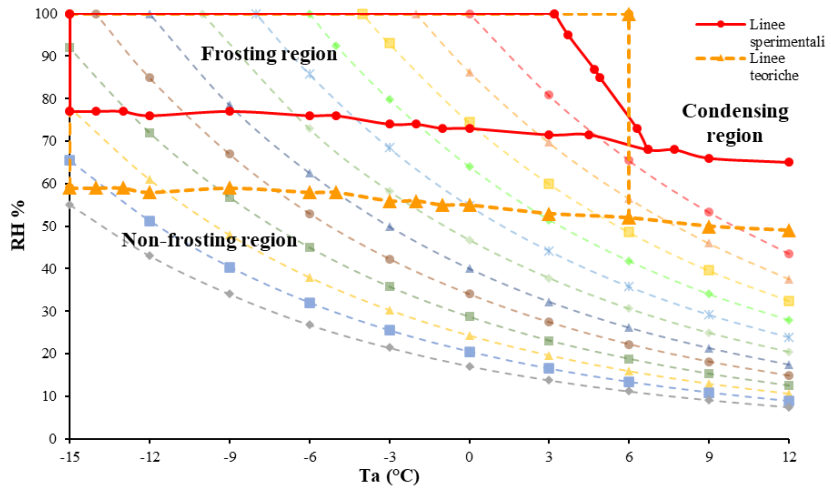

Figura 4 – Confronto fra frosting map teorica e sperimentale della pompa di calore da 60 kW con due compressori attivi e iniezione di vapore disattivata

Mentre la linea di confine teorica fra condensing region e frosting region è una linea verticale in corrispondenza della temperatura dell'aria di 6°C, quella reale passa per punti con temperatura minore al crescere dell'umidità relativa. Tale linea infatti incontra la curva limite della non frosting region in corrispondenza di una temperatura dell'aria di 6,2°C e umidità relativa pari al 68% e presenta poi un trend decrescente al diminuire della temperatura (e all'aumentare dell'umidità relativa). Ciò accade perché al crescere dell'umidità relativa dell'aria lo scambio termico all'evaporatore migliora e solo se la temperatura dell'aria si abbassa le prestazioni della macchina peggiorano, con la conseguente formazione di brina. Infine, l'umidità relativa della linea di confine fra non frosting region e condensing/frosting region è salita di circa il 16-18% rispetto alla valutazione preliminare teorica.

Attraverso la frosting map sperimentale è stata in seguito sviluppata una logica di controllo avanzata che permettesse di definire i parametri ottimali per la gestione di un ciclo di sbrinamento basato sull'inversione del ciclo in base alle condizioni ambientali e operative della macchina. Il diagramma di flusso contenente i diversi step della logica è riportato in Figura 5. Si sottolinea che i valori dei parametri di tale logica sono stati ricavati dalle stesse prove sperimentali che hanno portato alla definizione della frosting map.

Innanzitutto, viene distinto il regime di funzionamento della macchina, ossia il numero di compressori attivi (o la frequenza di rotazione dell'inverter se la logica venisse estesa a macchine di questa tipologia). Come visto in precedenza, l'estensione della frosting region dipende dal regime di funzionamento della macchina a carico parziale: minore il numero di compressori attivi, minore l'estensione della regione. Pertanto, è utile avere un controllo diverso a seconda del caso in cui ci si trova. Il diagramma di flusso della logica è lo stesso per tutte le condizioni operative, ma i valori dei parametri di controllo cambiano a seconda del fattore di carico.

Seguendo il diagramma di flusso di Figura 5, il primo controllo eseguito è sul numero di compressori attivi: in base a questo dato viene scelto un diverso set di parametri. Successivamente il digramma si divide in tre rami verticali, ognuno dei quali porta all'attivazione di un consenso. Tutti e tre i consensi devono essere contemporaneamente attivi affinché ci sia la possibilità di avviare un ciclo di sbrinamento.

Il primo consenso viene attivato se la condizione esterna di temperatura e umidità relativa dell'aria corrisponde ad un punto all'interno della frosting region. In questo modo la macchina non dovrebbe più avviare cicli di defrost quando non è presente la brina sulla batteria alettata, poiché queste condizioni si trovano al di fuori della regione critica e quindi il consenso non viene attivato. Sono stati introdotti degli intervalli di tempo di riferimento tra uno ciclo di defrost e il successivo in base alla zona della frosting region in cui la macchina lavora. Se la macchina effettua un ciclo di sbrinamento al di fuori di questi intervalli è possibile si verifichino cicli di mal-defrost, per cui viene dato un allarme in modo da permettere all'operatore o al manutentore di accertarsi del corretto funzionamento della pompa di calore. Se la condizione esterna in cui sta funzionando la macchina non si trova nella frosting region il consenso non viene attivato e nel diagramma di flusso si ritorna al calcolo del punto di lavoro all'interno della frosting map.

Il secondo consenso si basa sul calcolo del tempo a cui viene raggiunto uno spessore di brina massimo accettabile. Imponendo come spessore massimo di brina accettabile il 75% del passo

alette e conoscendo la velocità di accrescimento dello strato, viene poi calcolato il tempo tra l'inizio del brinamento e il raggiungimento dello spessore massimo di ghiaccio accettato. Anche la velocità di accrescimento dello strato di ghiaccio è stata determinata attraverso le prove sperimentali condotte sulla macchina in esame. Quando il tempo passato dal ciclo di defrost precedente supera il valore soglia, aumentato di un certo intervallo temporale, il consenso basato sullo spessore di ghiaccio si attiva.

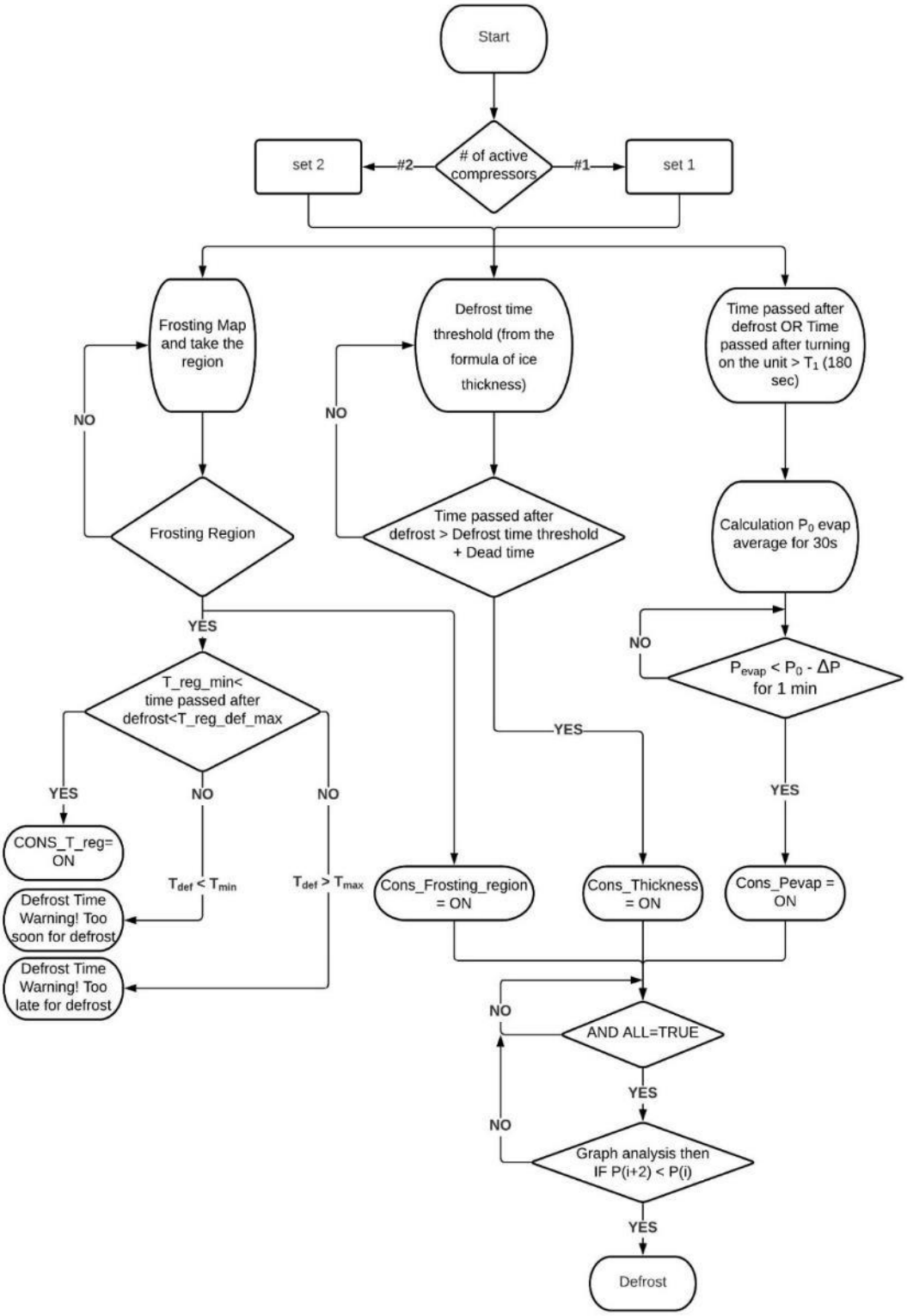

Figura 5 – Diagramma di flusso della logica di controllo avanzata per il controllo dei cicli di sbrinamento di una pompa di calore ad aria

Il terzo consenso è un controllo sulla pressione di evaporazione. Passati 30 s dalla fine di un ciclo di sbrinamento oppure dopo l'accensione della macchina, viene calcolata una pressione di evaporazione di riferimento come media di quella misurata in 30 secondi. Quando la pressione di evaporazione scende sotto tale valore di riferimento diminuito di una certa quantità per un minuto, il consenso si attiva. In questo modo si tiene conto del calo di pressione di evaporazione senza imporre però una soglia di pressione fissa, ma riferendolo al valore di pressione di partenza. Se il consenso non viene attivato dopo un minuto, il calcolo viene ripetuto.

Una volta che siano attivi contemporaneamente i tre consensi, viene fatto un ultimo controllo prima che il ciclo di defrost venga avviato:

- Si misura la pressione di evaporazione all'istante i;
- Si misura nuovamente la pressione di evaporazione dopo un minuto;
- Si misura nuovamente la pressione di evaporazione dopo un altro minuto;
- Viene fatto il confronto tra il valore iniziale e quello dopo 2 minuti: se la pressione di evaporazione si è ridotta, allora il ciclo di defrost viene avviato.

Se il ciclo di sbrinamento non viene avviato, si torna a controllare che tutti i consensi derivanti dai tre rami nel diagramma di flusso siano contemporaneamente attivi e in caso affermativo viene eseguito di nuovo il calcolo della pressione di evaporazione a distanza di un minuto per tre volte e il confronto tra i valori viene rifatto.

Infine, per valutare l'efficacia della logica di controllo innovativa appena descritta, si riportano i risultati di una valutazione condotta numericamente e considerando la pompa di calore da 60 kW utilizzata per definire la logica. I dettagli della procedura sono riportati nel successivo capitolo 6. In particolare, sono state valutate le prestazioni della pompa di calore lungo l'intera stagione di riscaldamento, considerando sia l'attuale logica di controllo implementata dal costruttore, basata su soglie statiche di pressione di evaporazione per innescare i cicli di sbrinamento, e la logica innovativa.

Conoscendo il numero di ore in cui le condizioni climatiche della località scelta (Bologna) ricadono in ciascuna delle sette zone in cui è stata suddivisa la frosting map (si veda la successiva sezione 6), è possibile calcolare l'energia termica erogata dalla macchina e l'energia elettrica assorbita nel caso di funzionamento con l'attuale logica di controllo del defrost e con la nuova logica di sbrinamento. Facendo la differenza tra i valori nei due casi si ottiene l'energia termica che viene dissipata e il maggior consumo di energia elettrica conseguente ad un numero di cicli di defrost più elevato del dovuto indotti dalla logica di controllo attuale. I risultati ottenuti per ogni zona climatica sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 – Prestazioni energetiche della pompa di calore da 60 kW con la logica di sbrinamento attuale e la logica di controllo avanzata

Zona climatica	A (3°C/90%)	B (0°C/95%)	C (-3°C/95%)	D (4°C/75%)	E (1°C/80%)	F (-2°C/85%)	G (-3°C/70%)
N° ore	225	210	71	325	226	39	52
ΔEth (kWh)	635	876	227	228	87	32	629
ΔEel (kWh)	246	372	103	88	34	14	305

In tabella 1:

- ΔEth = Differenza tra l'energia termica erogata dalla pompa di calore con la nuova logica di controllo del defrost e quella fornita con l'uso della logica attualmente implementata;
- ΔEel = Minore consumo di energia elettrica nel caso di utilizzo della nuova logica di controllo del defrost rispetto all'uso della logica attualmente implementata.

Il risparmio di energia elettrica risulta più consistente nelle zone della frosting region caratterizzate dalle condizioni climatiche più gravose (zone A, B e C) ed è massimo per la zona G. Con l'utilizzo della nuova logica di controllo, in tale zona la macchina non avvia più cicli di sbrinamento non necessari (mal-defrost) poiché tutti i punti si trovano al di fuori della frosting region e il consenso per l'attivazione del ciclo non viene mai dato. Il risparmio totale di energia elettrica stimato per l'intera stagione risulta essere pari a circa 1160 kWh, corrispondenti ad un risparmio economico di circa 230 € considerando un prezzo dell'energia elettrica di 0,20 €/kWh. L'utilizzo della nuova logica di controllo, oltre a un vantaggio economico, può portare ad un minor discomfort termico all'interno dei locali asserviti alla pompa di calore. Infatti, grazie all'ottimizzazione del processo di sbrinamento, il numero di cicli di defrost compiuti durante la stagione si può ridurre notevolmente e il calo di temperatura negli ambienti interni legato all'inversione del funzionamento della macchina diventa più contenuto.

[1] J. H. Zhu, Y. Y. Sun, W. Wang, S. M. Deng, Y. J. Ge, L. T. Li, «Developing a new frosting map to guide defrosting control for air-source heat pump units», Applied Thermal Engineering 90, pp. 782-791, 2015.

3 Prodotti attesi

Rapporto tecnico contenente le linee guida per realizzare la frosting map di una pompa di calore ad aria e le caratteristiche di una logica di controllo innovativa, dipendente dalle caratteristiche costruttive della macchina in esame e dalle condizioni operative, attraverso la quale valutare l'effettiva necessità di rimozione della brina dalla superficie esterna dell'evaporatore.

4 Prodotti sviluppati

Rapporto tecnico contenente le linee guida per realizzare la frosting map di una pompa di calore ad aria e le caratteristiche di una logica di controllo innovativa, dipendente dalle caratteristiche costruttive della macchina in esame e dalle condizioni operative, attraverso la quale valutare l'effettiva necessità di rimozione della brina dalla superficie esterna dell'evaporatore.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non si rilevano scostamenti tecnici/economici rispetto a quanto preventivato, né criticità.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte in questa LA hanno riguardato l'analisi delle prestazioni energetiche di pompe di calore ad aria in regime di brinamento, allo scopo di delineare i passaggi attraverso i quali costruire una frosting map della macchina. Attraverso la frosting map, un diagramma temperatura-umidità dell'aria ambiente suddiviso in varie zone, è possibile definire per quali condizioni climatiche la pompa di calore andrà incontro al fenomeno del brinamento. Sono state sviluppate frosting map di due diverse pompe di calore sulla base di test sperimentali al variare di condizioni ambientali e condizioni operative, come ad esempio il numero di compressori attivi, al fine di valutare l'influenza di tali parametri sulle dimensioni della zona di frosting all'interno della frosting map. È stata in seguito sviluppata una logica di controllo innovativa, validata sperimentalmente, che permette di ridurre la frequenza dei cicli di defrost e di eliminare il fenomeno del mal-defrost

7 Dettaglio delle attività svolte

Le attività scientifiche della LA hanno riguardato inizialmente lo sviluppo di frosting map di due modelli di pompa di calore aria-acqua di taglia diversa. Le frosting map sono state sviluppate prima per via teorica, utilizzando software di selezione forniti dal costruttore. In un secondo momento, sono state svolte due campagne di monitoraggio sperimentali sulle pompe di calore all'interno di una camera climatica ubicata presso il laboratorio R&D del produttore. I test sono stati effettuati in condizioni di funzionamento invernali, imponendo all'interno della camera di prova condizioni ambientali gravose (bassa temperatura dell'aria e, contemporaneamente, alti valori dell'umidità relativa), al fine di innescare la formazione di brina sulla batteria alettata della pompa di calore e studiare così le effettive prestazioni della macchina durante l'intero transitorio (formazione brina e successivo sbrinamento effettuato per mezzo dell'inversione del ciclo frigorifero).

Figura 6 – Pompa di calore da 10 kW testata per definire la sua frosting map

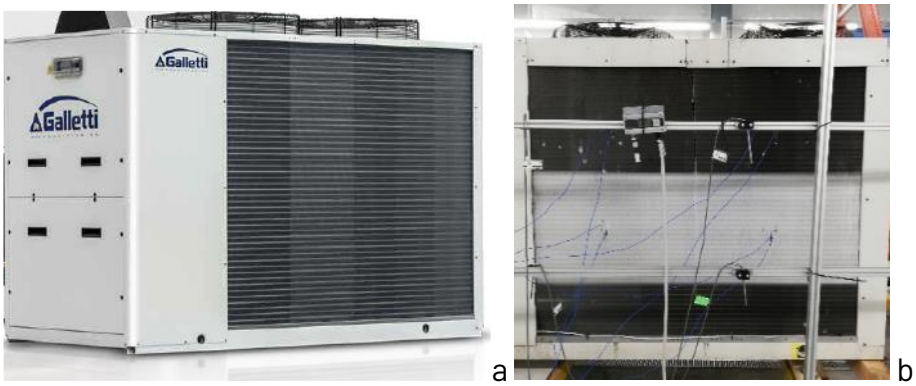

Figura 7 – Pompa di calore da 60 kW testata per definire la sua frosting map

La prima pompa di calore considerata è un modello di potenza termica nominale di circa 10 kW, equipaggiato con un compressore singolo a velocità di rotazione variabile. Il refrigerante

utilizzato all'interno del circuito frigorifero è l'R410A. Alcune immagini della pompa di calore oggetto di studio sono riportate in Figura 6 in assenza di brina e con deposizione di uno strato di ghiaccio durante le prove. In Figura 7 sono riportate alcune immagini della seconda pompa di calore considerata. Si tratta di un'unità di potenza termica nominale pari a 60 kW, utilizzante R410A come refrigerante, e basata su due compressori scroll a giri fissi ad iniezione di vapore, Entrambe le pompe di calore, in quanto reversibili, utilizzano l'inversione del ciclo come metodo di sbrinamento.

Mediante l'ausilio del software di selezione e di fogli di calcolo per il bilancio termodinamico delle macchine è stata sviluppata la frosting map teorica delle pompe di calore in esame per diverse condizioni operative. La pompa di calore di taglia più piccola è stata considerata operante a pieno carico. Per la pompa di calore di taglia maggiore sono stati considerati:

- Funzionamento con due compressori attivi ed iniezione di vapore attiva;
- Funzionamento con due compressori attivi ed iniezione di vapore disattivata;
- Funzionamento con un solo compressore attivo ed iniezione di vapore disattivata.

La temperatura di parete dell'evaporatore è stata ipotizzata uguale alla temperatura di evaporazione, calcolata in base alle condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria esterna. Questa assunzione tende a sovrastimare l'estensione della condensing region e della frosting region poiché in realtà la batteria alettata, essendo a contatto con l'aria esterna, ha una temperatura di parete maggiore della temperatura di evaporazione.

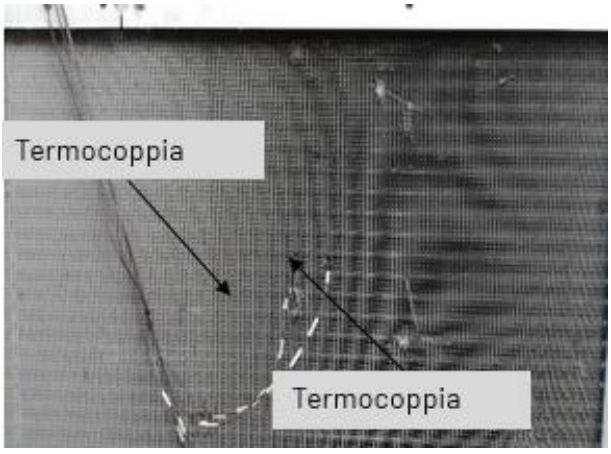

Figura 8 – Posizionamento termocoppie su alette e tubi della batteria della pompa di calore da 60 kW

Al fine di monitorare il funzionamento delle macchine e ottenere informazioni riguardo i diversi parametri operativi della macchina, sono stati installati all'interno della camera climatica e sul circuito frigorifero delle pompe di calore oggetto di test diversi sensori: termoresistenze e termoigrometri per misurare la temperatura e l'umidità relativa interna, termocoppie per misurare la temperatura superficiale di alette e tubi della batteria alettata, trasduttori di pressione e un misuratore di portata per determinare la portata di acqua circolante al condensatore. Per misurare la temperatura dei tubi sono state rimosse alcune alette e, una volta fissata la termocoppia al tubo con l'ausilio di una fascetta, si è proceduto ad isolare lo strumento. La Figura 8 riporta un'immagine sulla disposizione delle termocoppie su tubo e aletta dell'evaporatore della pompa di calore.

Usando la frosting map teorica come base di partenza, sono state eseguite una serie di prove sperimentali al fine di individuare i reali andamenti della condensing region e della frosting region per entrambe le macchine oggetto di analisi.

Tabella 2 – Condizioni climatiche impostate all'interno della camera climatica per i test condotti sulla pompa di calore da 60 kW con due compressori attivi e iniezione del vapore disattivata

Temperatura dell'aria (°C)	Umidità relativa dell'aria (%)	Formazione condensa	Formazione brina
9,7	60,2	NO	NO
7,7	66,5	NO	NO
7	59,9	NO	NO
6,5	69	NO	SI
6,2	57,5	NO	NO
6	62	NO	NO
5,9	61,4	NO	NO
4,8	62	NO	NO
4,5	66	NO	NO
4,5	70,7	NO	NO
4,5	72	NO	SI
6,7	69	SI	NO
7	70,5	SI	NO
6,5	72	SI	NO
6,2	73	NO	SI
6,3	75	SI	NO
6,7	76,3	SI	NO
7	81,2	SI	NO
6,5	85	SI	NO
6	85	SI	NO
5	85	SI	NO
4,7	85	NO	SI
5,5	85,5	SI	NO
4,1	95,3	SI	NO

Si riportano nella successiva Tabella 2, a titolo di esempio, le condizioni imposte all'interno della camera climatica per lo svolgimento dei test sulla pompa di calore da 60 kW operata senza iniezione di vapore e con entrambi i compressori attivi. Durante i test, sono state considerate diverse combinazioni di temperatura ed umidità relativa dell'aria molto diverse fra loro, al fine di valutare le prestazioni della macchina su di un range molto ampio.

Sulla base dei risultati sperimentali, sono state sviluppate le frosting map reali delle pompe di calore analizzate. I grafici ottenuti e il confronto con le curve teoriche sono riportati nella Sezione 2.

L'analisi delle prove condotte in camera climatica ha messo inoltre in luce alcune inefficienze dell'attuale logica di sbrinamento impostata sulla macchina. Ad esempio, si è osservato l'avvio di molti cicli di defrost in condizioni di bassi valori di temperatura e umidità relativa dell'aria, anche in assenza di deposizione di brina sulla superficie esterna dell'evaporatore (cicli di mal-defrost). Ciò avviene in quanto la logica attualmente implementata (così come tutte le strategie di controllo commerciali) si basa su valori fissi dei parametri operativi (es. soglia di pressione di evaporazione al di sotto della quale innescare un ciclo di sbrinamento). Di conseguenza, per bassi valori della temperatura dell'aria, la pressione di evaporazione inevitabilmente si riduce. Ma per bassi valori dell'umidità relativa, non si deposita alcuno strato di brina sull'evaporatore a causa del basso contenuto assoluto di vapore acqueo nell'aria.

Di conseguenza, per poter migliorare le prestazioni della pompa di calore e ridurre al minimo gli sprechi di energia durante i cicli di defrost è stata ideata una nuova logica di controllo dei cicli di sbrinamento. Tale logica è caratterizzata da un controllo dinamico basato su diversi parametri e non più solo sull'utilizzo di soglie statiche (es. pressione di evaporazione). I dettagli su tale logica, il relativo flowchart e una descrizione dei principali parametri operativi sono riportati in Sezione 2. In questa sezione si vuole ricordare che la strategia di controllo innovativa sviluppata tiene innanzitutto conto delle variabili operative della macchina: grado di parzializzazione (numero di compressori attivi o frequenza dell'inverter) e condizioni climatiche al contorno. Infatti, come evidenziato dall'analisi delle frosting map ottenute al variare del numero di compressori attivi per la macchina da 60 kW, le dimensioni della frosting region sono più limitate in condizioni di carico parziale. Di conseguenza, per evitare che la macchina avvii cicli di sbrinamento quando questi non sono necessari, è utile avere un settaggio diverso dei parametri a seconda del grado di parzializzazione. Il diagramma di flusso della logica è indipendente dal profilo di carico della macchina, ma cambiano i valori dei parametri.

La logica di controllo sviluppata si basa sull'attivazione di tre diversi consensi, i quali devono essere simultaneamente soddisfatti per attivare un ciclo di defrost: i. condizioni climatiche (combinazione dei valori di temperatura e umidità relativa dell'aria) che ricadono all'interno della frosting region; ii. raggiungimento di uno spessore dello strato di brina critico, pari al 75% del passo alette; iii. riduzione della pressione di evaporazione al di sotto di un valore di riferimento che si aggiorna continuamente (soglia dinamica di pressione).

Si sottolinea infine che la logica di controllo definita con questa LA è stata validata sperimentalmente con i risultati delle prove sperimentali descritte in precedenza e con nuovi test, il cui obiettivo era quello di dimostrare l'efficacia della nuova logica nell'eliminazione dei cicli di mal-defrost che la pompa di calore avrebbe compiuto in corrispondenza di condizioni climatiche al di fuori della frosting region. I nuovi test hanno confermato che l'utilizzo della logica di controllo innovativa sviluppata porta all'eliminazione dei cicli di sbrinamento indesiderati e, quindi, ad un incremento dell'efficienza energetica complessiva della pompa di calore.

Per poter esprimere i miglioramenti ottenibili dall'adozione della nuova logica in termini di energia elettrica risparmiata durante l'intera stagione di riscaldamento è stata condotta

un'analisi di tipo numerico considerando di ubicare la pompa di calore da 60 kW attraverso la quale è stata validata la strategia di controllo nella città di Bologna. Sulla base dei dati climatici riportati nel Test Reference Year (TRY) di Bologna, fornito dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI), è stato calcolato il numero di ore in cui la pompa di calore si troverebbe a lavorare all'interno della frosting region. Il TRY è infatti una sequenza di dati meteorologici orari selezionati da una serie storica che permette di definire un anno climatico tipico per una determinata località, calcolato secondo la procedura descritta nella norma UNI EN ISO 15927-4. Ai fini del calcolo dei vantaggi ottenibili dall'implementazione della nuova logica, è stata imposta la durata della stagione di riscaldamento pari al periodo massimo di esercizio degli impianti termici per la zona climatica E: dal 15 Ottobre al 15 Aprile, periodo corrispondente a 183 giorni. Inoltre, è stata fatta l'ipotesi di funzionamento continuo della macchina a pieno carico lungo tutta la stagione, al fine di dare un riferimento indipendente dalle condizioni di carico e, quindi, della specifica applicazione.

Grazie all'analisi dei dati del TRY di Bologna nel periodo considerato è stato possibile riportare nella frosting map i punti di funzionamento della macchina all'interno delle diverse regioni, come mostrato in Figura 9. Per semplicità, non sono rappresentate le condizioni appartenenti alla condensing region, in quanto non influenzanti le prestazioni della macchina in regime di brinamento, e le condizioni appartenenti alla non-frosting region con temperature dell'aria superiori a 0°C. Essendo forniti dal TRY i dati orari di temperatura e umidità relativa, ogni punto rappresenta un'ora di funzionamento della pompa di calore nelle condizioni di temperatura e umidità relativa dell'aria ambiente corrispondenti.

Avendo condotto un numero limitato di test sulla pompa di calore considerata, attraverso le quali stimare le prestazioni energetiche in termini di potenza termica erogata e potenza elettrica assorbita, e volendo però caratterizzare il suo funzionamento su base stagionale (quindi per tutti i punti riportati in Figura 9), è stato necessario dividere la frosting map in sette zone. Tali zone sono state scelte in base alla posizione dei punti corrispondenti alle prove effettuate in camera climatica, presi come punti di riferimento. In questo modo le prestazioni della macchina per ogni punto di una generica zona sono state considerate uguali a quelle che la pompa di calore ha registrato nel punto di riferimento corrispondente. La divisione delle zone è riportata in Figura 9 con le lettere A, B, C, D, E, F e G e per ogni zona è stato segnato in nero il punto di riferimento. La parte della frosting region che corrisponde a temperature dell'aria inferiori a -5°C non è stata tenuta in conto nella suddivisione poiché non si ricade mai in queste condizioni per la città di Bologna. La zona G è posta al di fuori della frosting region e ha come punto di riferimento quello nelle condizioni -3°C – 70%. Tale zona corrisponde alle condizioni in cui la macchina, funzionando con la logica di controllo del defrost attualmente implementata, avvierebbe cicli di sbrinamento non necessari.

Attraverso l'analisi condotta, i cui risultati sono riportati nella Sezione 2, sono stati valutati il numero di ore in cui si registrano, a Bologna, condizioni climatiche appartenenti alle sette zone climatiche, l'energia termica erogata dalla pompa di calore e l'energia elettrica assorbita dalla stessa per ognuno dei punti di riferimento considerando la logica di controllo dei cicli di defrost attualmente impiegata e quella sviluppata. In questo modo, è possibile stimare su base stagionale i potenziali risparmi energetici ed economici conseguibili dall'implementazione della nuova logica.

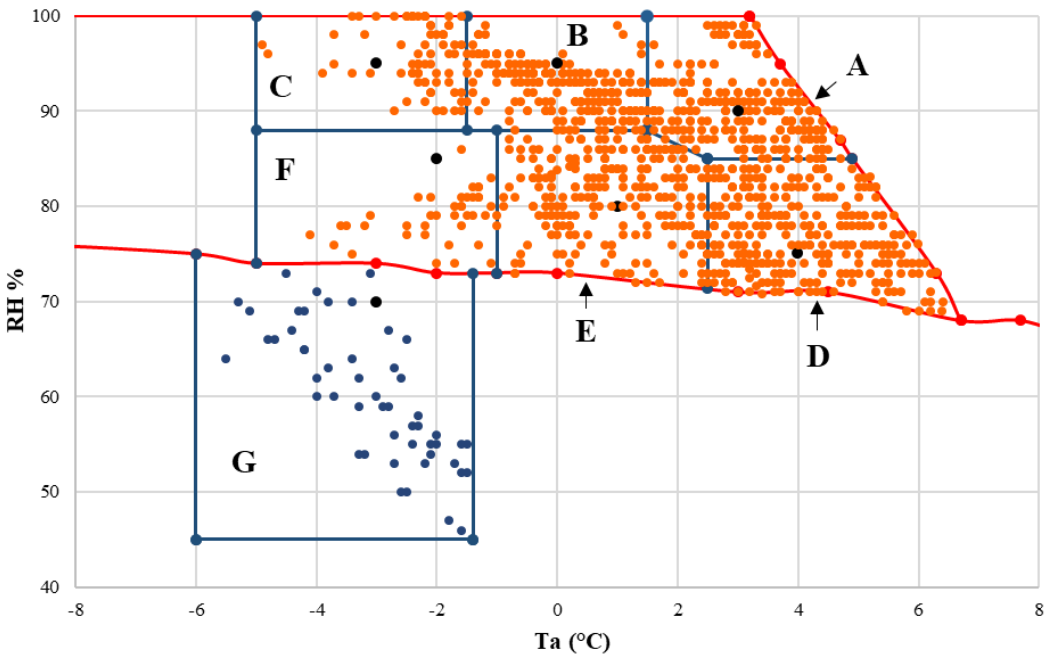

Figura 9 – Suddivisione della frosting map della pompa di calore da 60 kW in zone sulla base delle condizioni climatiche riportate nel TRY di Bologna

Comitato Termotecnico Italiano (CTI), Anni climatici tipo (TRY), https://try.cti2000.it/.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state affidate consulenze all'interno della LA.

9 Pubblicazioni scientifiche

Dongellini M., Natale C., Naldi C., Morini G.L., *Design of a new test bench based on the Hardware-in-the Loop methodology for dynamic performance testing of hydronic heat pumps*, Atti della 40th UIT Heat Transfer Conference, 26-28 giugno 2023, Assisi.

Dongellini M., Naldi C., Moser C., Varga S., Soares J., Morini G.L., *Seasonal energy performance assessment of a hybrid HVAC system driven by solar and biomass energy for space heating and cooling in residential buildings*, Journal of Physics: Conference Series 2766, 2024, n° 012100https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2766/1/012100.

Ballerini V., Natale C., Dongellini M., Naldi C., Rossi di Schio E., Valdiserri P., Pulvirenti B., Morini G.L., *Apparato sperimentale per l'analisi delle prestazioni energetiche di pompe di calore*, AICARR Journal 88, 2024, pag. 56-64.

Camponeschi C., Goni M., Cioffi F., Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., Germano L., Genovese F., Cervellati A., Casolari A., Corsaro F., Ciancamerla M., Ballotta L., *Potential energy savings of the refurbishment of a university building's heating system with a R290 air-to-water heat pump*, Atti della 41st UIT Heat Transfer Conference, 19-21 giugno 2024, Napoli.

10 Eventi di disseminazione

Presentazione dell'articolo *Design of a new test bench based on the Hardware-in-the Loop methodology for dynamic performance testing of hydronic heat pumps* presso 40th UIT Heat Transfer Conference, 26-28 giugno 2023, Assisi.

Presentazione dell'articolo *Seasonal energy performance assessment of a hybrid HVAC system driven by solar and biomass energy for space heating and cooling in residential buildings* presso 9th European Thermal Sciences Conference (Eurotherm 2024), 10-13 giugno 2024, Bled (Slovenia).

Presentazione dell'articolo *Potential energy savings of the refurbishment of a university building's heating system with a R290 air-to-water heat pump* presso 41st UIT Heat Transfer Conference, 19-21 giugno 2024, Napoli.