



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici
reali “all-electric” nel settore terziario.
Analisi comparativa degli impianti a pdc e
strumenti applicativi: frosting map

Nardi I., Lavinia C., Iatauro D., Calabrese N.

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore terziario. Analisi comparativa degli impianti a pdc e strumenti applicativi: frosting map

Nardi I., Lavinia C., Iatauro D., Calabrese N. (ENEA)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

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

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

Linea di attività 3.25: *Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore terziario: analisi dei dati*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 IL RUOLO DELLA TECNOLOGIA A POMPA DI CALORE NEL CONTESTO DELLE POLITICHE ENERGETICHE EUROPEE	8
2.1 IL PERCORSO TRACCIATO DAL GREEN DEAL PER LE POMPE DI CALORE	8
2.2 LA TABELLA DI MARCIA AL 2030 E AL 2050 PER LE POMPE DI CALORE	15
3 LE TECNOLOGIE DELLA POMPA DI CALORE E CALDAIA A CONFRONTO	21
3.1 L'INDAGINE COMPARATIVA: CALDAIA VS POMPA DI CALORE	21
3.2 L'ANALISI DI SENSIBILITÀ PER LA POMPA DI CALORE	23
4 IL SET DI INCENTIVI DISPONIBILI PER LA TECNOLOGIA A POMPA DI CALORE	26
4.1 L'ECOBONUS - FOCUS: POMPE DI CALORE	26
4.2 IL SUPERBONUS 110% - FOCUS: POMPE DI CALORE	29
4.3 IL BONUS CASA – FOCUS: POMPE DI CALORE	32
4.4 IL CONTO TERMICO- FOCUS: POMPE DI CALORE	34
5 I SISTEMI DI MONITORAGGIO COME STRUMENTO TECNICO PER LA MISURA DELLA PRESTAZIONE ENERGETICA DELLE POMPE DI CALORE	37
6 MAPPE DI BRINAMENTO: ASPETTI TECNICI E METODOLOGICI	41
6.1 FROSTING E DEFROSTING NELLE POMPE DI CALORE	41
6.2 IL PIANO TEMPERATURA-UMIDITÀ RELATIVA DELL'ARIA PER LA COSTRUZIONE DELLA FROSTING MAP	48
6.3 LA CORRELAZIONE TRA TEMPERATURA DEL COIL E TEMPERATURA ESTERNA	52
6.4 LA COSTRUZIONE DELLA FROSTING MAP	55
7 METODOLOGIA APPLICATA AL CASO STUDIO	59
7.1 LA METODOLOGIA	59
7.2 I DATI DELLA STAZIONE METEOROLOGICA	61
7.3 L'INTEGRAZIONE DEI DATI METEOROLOGICI CON I DATI DI MONITORAGGIO	64
7.4 L'ANALISI DEI DATI	64
7.5 UN CONFRONTO TRA LOCALITÀ MEDIANTE L'IMPIEGO DELLE FROSTING MAP	70
8 CONCLUSIONI	73
8.1 SVILUPPI FUTURI	75
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	78
10 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	83
11 ELENCO DELLE FIGURE	84
12 ELENCO DELLE TABELLE	85

Sommario

Nella presente attività di ricerca, sono illustrate le opportunità di installazione delle pompe di calore (pdc), tecnologia che concorrerà fortemente al raggiungimento degli obiettivi nazionali previsti dai recenti accordi e pacchetti legislativi, come il Green Deal che comprende la Renovation Wave ed il Fit For 55, accompagnando il graduale phase out delle fonti fossili, ed apportando significativi vantaggi sul piano tecnico, oltre ai benefici ambientali derivanti dallo sfruttamento di energia di tipo rinnovabile.

Si sono operati, quindi, confronti tra pompe di calore e sistemi tradizionali e una disamina sugli strumenti di tipo economico che favoriscono l'installazione delle pdc, ovvero gli incentivi.

Nondimeno, è importante monitorare nel tempo le strategie di efficientamento energetico introdotte e, di riflesso, le reali prestazioni anche degli impianti. Pertanto, strumenti di tipo tecnico come le diagnosi obbligatorie richiedono di realizzare un accurato piano di monitoraggio delle prestazioni energetiche che, come illustrato nella precedente attività di ricerca, necessita di un opportuno filtraggio dei dati acquisiti, e della loro analisi su appropriate scale temporali che sappiano offrire una comprensibile misura della efficienza (o delle inefficienze) del sistema, evidenziandone le criticità.

Scale di misura ampie permettono di analizzare le prestazioni operative su base mensile o stagionale, confrontabili con il Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) ed il Seasonal Coefficient Of Performance (SCOP); scale di misura piccole (orario o sub-orarie) permettono di individuare meglio criticità sorte per fenomeni tempo-varianti su piccola scala, come ad esempio il brinamento sulla batteria di scambio termico durante la climatizzazione invernale.

Questo fenomeno, piuttosto comune nelle pompe di calore aerotermiche, è una delle principali cause delle inefficienze delle macchine stesse, ed essendo un fattore piuttosto critico, si riporta un breve excursus sul fenomeno del brinamento (o frosting), sulle modalità della sua risoluzione (defrosting), e sulle condizioni che ne determinano la formazione, ovvero le specifiche condizioni di temperatura e umidità dell'aria, e la temperatura superficiale della batteria di scambio.

Tali condizioni possono essere sinteticamente descritte attraverso le "frosting map" (mappe di brinamento), che permettono di individuare, sotto opportune ipotesi relative al modello di temperatura della batteria di raffreddamento, le condizioni di brinamento.

Pertanto, incrociando *a posteriori* i dati derivanti dal monitoraggio con le frosting map costruite negli stessi istanti, è possibile determinare (in mancanza di un rilievo a mezzo foto o video) se si sono verificate le condizioni di brinamento, e anche riscontrare, per le stesse, le effettive prestazioni operative della pompa di calore.

Questo approccio all'analisi dei dati permette, se effettuato *a priori* e sulla base di dati meteorologici affidabili, di determinare l'entità locale del fenomeno di brinamento, e dunque di valutare anche quale pdc, e quale modalità di defrosting siano raccomandabili per lo specifico sito in relazione proprio alle sue condizioni meteorologiche tipo.

Questo metodo, che offre degli sviluppi futuri notevoli, anche in relazione al risparmio energetico derivante dall'ottimizzazione delle pdc e dei sistemi di defrosting, pone sfide interessanti, come ad esempio la verifica della capacità dei tool di modellazione dei sistemi edificio-impianto di tener conto del frosting (e del defrosting) nelle diverse località climatiche e geografiche.

1 Introduzione

L'edificio si configura come elemento cruciale della vita dell'uomo. Esso ha conosciuto una forte evoluzione nel tempo, sia per le caratteristiche intrinseche che per la capacità di rispondere alle esigenze ed alle aspettative umane. Ripercorrendo la storia, risulta evidente come siano variati le tipologie costruttive, i dati geometrici, gli schemi impiantistici e le caratteristiche prestazionali degli edifici sotto l'aspetto del consumo energetico e del comfort indoor [1].

Il cambiamento climatico, tuttavia, mette in luce la centralità della dotazione di impianti di climatizzazione invernale ed estiva ai fini della garanzia del comfort per gli edifici. In linea generale, il cambiamento climatico evidenzia la necessità dell'implementazione della transizione energetica, ossia del processo di trasformazione della risposta alla domanda di energia. Tale processo punta a soluzioni caratterizzate da minore impatto ambientale e ridotte emissioni di gas climalteranti. Di conseguenza, risulta fondamentale che gli impianti di climatizzazione seguano tale traiettoria.

Si tratta di un ambito dalle grandi potenzialità di decarbonizzazione considerando che, in riferimento all'Unione Europea, agli edifici si deve attribuire il 40% del consumo energetico totale ed il 36% delle emissioni di gas a effetto serra derivanti dall'energia. Inoltre, i servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento sono i principali responsabili del consumo finale di energia e rappresentano circa il 50% della domanda totale di energia, di cui l'80 % proviene dagli edifici.

In tale contesto, si sta puntando fortemente sulla tecnologia della pompa di calore, che sarà il componente centrale del futuro sistema energetico europeo [2].

La pdc si configura come uno strumento di accelerazione della transizione ecologica puntando sull'effetto combinato di efficienza energetica e fonti rinnovabili [3].

L'aspetto di efficienza energetica della pdc è inteso come il conseguimento di un risparmio energetico rispetto ad una tecnologia tradizionale a parità di condizioni. Il fabbisogno energetico per riscaldare una casa con caldaia a gas, se convertito in elettricità, è sufficiente per riscaldare da due a tre case con la tecnologia della pdc [2].

L'effetto di implementazione di fonte rinnovabile si evince dalla Direttiva 2009/28/CE che ha assimilato a fonte rinnovabile l'energia termica prelevata dalle pdc in modalità di riscaldamento, mentre la Direttiva (UE) 2018/2001 ha esteso il criterio di rinnovabile anche alla modalità di raffrescamento [1].

Nel contesto europeo, la Commissione disegna un profilo di ampio respiro per le pdc. Infatti, gli obiettivi al 2050 implicano un'elettificazione del parco immobiliare del 50÷70% per il settore residenziale e del 60% per il terziario, per cui le pdc rappresentano una tecnologia cruciale per la realizzazione del Green Deal [4], ossia della strategia con cui l'Europa punta ad essere il primo continente ad impatto climatico zero.

A livello nazionale, la pdc fa riferimento ad un comparto produttivo e ad una filiera industriale di eccellenza e fortemente radicata sul territorio che coinvolge numerosi soggetti: produttori, installatori elettrici e termoidraulici, progettisti nell'ottica della riqualificazione degli edifici, distributori di energia elettrica per l'azione di potenziamento della rete per accompagnare il processo di progressiva elettificazione dei consumi [3].

Stanti tali premesse, occorre sottolineare che solo la disponibilità di dati caratterizzati da consistenza e congruenza permette di abbattere le barriere tecniche, economiche, formative ed informative alla diffusione della tecnologia della pdc e, quindi, di perseguire gli sfidanti obiettivi europei e di fare da volano per lo sviluppo della filiera italiana.

In tale contesto, si è collocata l'attività di ricerca della seconda annualità. In particolare, sono stati illustrati i risultati del piano di monitoraggio di alcuni impianti a pdc a servizio di filiali bancarie del gruppo Banco Popolare di Milano (BPM).

Dopo l'estesa fase di individuazione dei casi studio, si è perseguito l'obiettivo dell'identificazione dei consumi e, in generale, dei parametri caratteristici del funzionamento delle macchine a pdc in condizioni reali di esercizio.

Occorre premettere che l'aspetto qualitativo deve essere privilegiato rispetto a quello quantitativo, ossia conta maggiormente la consistenza e congruenza dei dati piuttosto che la numerosità, in riferimento alle stagioni termiche di interesse.

Come primo passaggio, è risultato opportuno, ove possibile, verificare attraverso un sopralluogo i tratti distintivi degli strumenti di misura per non ottenere valori anomali causati dal posizionamento o dal settaggio scorretti o, in generale, dalla mancata considerazione di tale aspetto.

In secondo luogo, poiché la correttezza dei risultati è funzione delle ipotesi di lavoro assunte, sono state eseguite numerose operazioni di filtraggio dei dati, estremamente selettive, di modo da gestire valori caratterizzati da bontà qualitativa e quantitativa. Partendo dai dati restituiti dai misuratori senza alcun trattamento degli stessi a monte (dati grezzi), si è proceduto alla costruzione di una metodologia di approccio ai raw data che tenesse conto delle difficoltà di misurazione e privilegiasse la qualità dei dati.

La metodologia ha messo in luce due aspetti cruciali legati al fattore tempo, ossia: i tempi di osservazione e la scala temporale di aggregazione.

In relazione all'osservazione, bisogna considerare sia i tempi caratteristici di variazione delle cause e manifestazione degli effetti che quelli di acquisizione da parte degli strumenti di misura, di modo da garantire una registrazione corretta ai fini del monitoraggio. Inoltre, non è necessario acquisire i dati con un passo temporale troppo stretto, in quanto l'analisi del funzionamento della pdc può rivelarsi complessa ed onerosa (anche sotto il profilo gestionale) a causa della mole di dati da elaborare. Risulta, invece, importante che i dati siano di buona qualità e senza interruzioni ed outlier rilevanti.

La letteratura scientifica pertinente è carente per quanto riguarda la scala temporale di aggregazione dei dati. Mentre, il lavoro evidenzia un importante risultato, ossia che non c'è una scala temporale ottimale, bensì la scala deve essere selezionata in funzione della grandezza oggetto di indagine. Infatti, le diverse scale temporali (sub-oraria, oraria, giornaliera, settimanale, mensile) consentono di analizzare in maniera differente le prestazioni complessive della macchina. In generale, tanto minore è la scala temporale, più si ottiene una valutazione delle prestazioni della pdc in condizioni transitorie e non a regime. La scala oraria o sub-oraria risulta adatta per la rappresentazione delle variazioni di temperatura in una o più giornate tipiche, ma non si presta a descrivere le prestazioni di una pdc. La scala temporale giornaliera rappresenta un buon compromesso nella comprensione di tutte le grandezze caratteristiche del funzionamento di una pdc. La scala settimanale aiuta ad individuare il trend generale delle grandezze ma non sempre è possibile definire una "settimana tipo", ovvero intercettare (a valle delle operazioni di filtraggio dei dati) cinque o sette giorni consecutivi che possano essere ritenuti rappresentativi del funzionamento della pdc. La scala mensile risulta un valido supporto per la rappresentazione dell'andamento generale delle grandezze.

In conclusione, dal lavoro della seconda annualità è emerso che i sistemi di monitoraggio sono elementi centrali ai fini dell'individuazione delle prestazioni in campo delle pdc che possono discostarsi, anche in modo consistente, dai dati di targa. Lo studio ha messo in luce gli aspetti critici di un piano di misura e fornito le strategie di soluzione dipingendo un quadro dalle enormi potenzialità per il monitoraggio come mezzo di acquisizione del dato, il quale risulta cruciale come strumento di orientamento delle scelte di tutti gli stakeholder coinvolti nello sviluppo delle pdc.

L'attività di ricerca della seconda annualità è approdata alla produzione di una mappatura dei parametri prestazionali delle pdc indagate. Tali parametri sono fortemente influenzati dalle condizioni operative della macchina, in particolare, dalle temperature di evaporazione e di condensazione e dal fattore di carico ma un ulteriore elemento da mettere sotto la lente di ingrandimento, in quanto condizionante le prestazioni delle pdc aerotermiche, è rappresentato dai cicli di sbrinamento [1].

La formazione della brina è un processo di natura transitoria. Esso coinvolge effetti simultanei di trasferimento di calore e massa, e la variabilità degli stessi nel tempo genera il cambiamento di spessore del manto brinato e la contemporanea variazione delle proprietà termofisiche e delle strutture cristalline [5].

Quando una pdc ad aria funziona in modalità di riscaldamento, si può presentare brina sulla superficie dello scambiatore esterno, ossia sull'evaporatore. Questo fenomeno avviene quando la temperatura superficiale risulta inferiore sia al punto di congelamento dell'acqua che al punto di rugiada dell'aria umida [1]. La brina depositatasi, agendo come isolante e riducendo la sezione utile al passaggio dell'aria, comporta, in particolare, una progressiva diminuzione della temperatura di evaporazione che potrebbe causare danni anche gravi danni al compressore e, in generale, un degrado delle prestazioni della pdc [1].

I dati sperimentali indicano che la formazione di uno strato di ghiaccio sulla superficie dello scambiatore esterno può ridurre il flusso di calore di circa il 40% e la capacità di riscaldamento di una pdc ad aria può diminuire del 35% in condizioni di brinamento [6].

Per contrastare la formazione della brina sulla superficie dell'evaporatore che può condurre al blocco del funzionamento della pdc, sono necessari cicli periodici di sbrinamento.

In condizioni di temperatura esterna rigida, la quantità di vapore contenuta nell'aria e, quindi, condensabile sull'evaporatore è minore rispetto alle condizioni di temperatura mite, a parità di umidità relativa. In sintesi, la maggiore formazione di ghiaccio sullo scambiatore si può avere quando la temperatura esterna è mite e l'umidità relativa è elevata [7]. Questo aspetto evidenzia che la temperatura dell'aria esterna e l'umidità relativa sono i driver del fenomeno del brinamento delle pdc ad aria. Senza conoscere entrambi i parametri, risulta ostico giungere alla conclusione che un'unità in pdc stia, effettivamente, operando in condizioni di gelo e non è possibile l'individuazione corretta del livello di ghiaccio. Risulta necessario conoscere come le differenti combinazioni di temperatura dell'aria esterna ed umidità relativa influenzano il brinamento ed il livello dello stesso [6].

In riferimento a tale esigenza, è stata sviluppata l'attività di ricerca della terza annualità, volta alla costruzione di frosting map per la pdc aria-acqua, e a titolo esemplificativo si è fatto riferimento ai dati di monitoraggio di una pompa di calore installata in una filiale bancaria del gruppo BPM.

La frosting map è basata su un grafico temperatura-umidità che indica la condizione ed i livelli di gelo sulla superficie dello scambiatore esterno [8].

Tale mappa consente l'analisi delle frosting performance sia sulla base della temperatura dell'aria esterna che dell'umidità relativa per una pdc ad aria.

L'abbinamento fra i dati di monitoraggio e le mappe permette di valutare l'idoneità di una data pdc all'installazione in un determinato luogo e di suggerire gli intervalli temporali ottimali dei cicli di sbrinamento, al fine di evitare l'errata valutazione delle condizioni di sbrinamento favorevoli, ossia l'azione in assenza di brina o, al contrario, in presenza di uno strato di ghiaccio già troppo spesso.

Le frosting map pertanto possono costituire un utile strumento di progettazione e gestione degli impianti a pompa di calore, utilizzabile anche in combinazione con un metodo di controllo convenzionale dello sbrinamento, nell'ambito di strategie di verifica del gelo e di ottimizzazione dell'efficienza delle pdc ad aria.

2 Il ruolo della tecnologia a pompa di calore nel contesto delle politiche energetiche europee

2.1 Il percorso tracciato dal Green Deal per le pompe di calore

L'Europa punta ad essere il primo continente ad impatto climatico zero, a tal fine sta implementando la strategia del Green Deal presentata a dicembre 2019 che riformula su nuove basi l'impegno della CE ad affrontare le criticità legate al clima e all'ambiente [9] ed è finanziata da un terzo dei 1800 miliardi di euro di investimenti del piano per la ripresa NextGenerationEU e dal bilancio settennale dell'UE [10]

Da un'indagine dell'Agenzia Eurobarometro condotta da marzo ad aprile 2021 e pubblicata a luglio 2021 che ha sondato oltre 26.500 cittadini degli Stati Membri dell'UE appartenenti a diversi gruppi socio-demografici, emerge che per oltre un quarto del campione i cambiamenti climatici costituiscono la criticità più grave che il mondo deve affrontare, per il quale trattasi di criticità grave (93%) o molto grave (78%). In termini di risposta politica, nove europei su dieci concordano sulla necessità di ridurre al minimo le emissioni di gas a effetto serra. A tal fine, le fonti rinnovabili e l'efficienza energetica risultano strumenti cardine. Infatti, l'87% degli europei pensa che sia importante che l'UE fissi obiettivi ambiziosi per aumentare l'impiego delle rinnovabili e che fornisca il sostegno per il miglioramento dell'efficienza energetica. In tema di responsabilità sui cambiamenti climatici, i cittadini sottolineano l'esigenza di riforme strutturali per accompagnare le azioni individuali, indicando nei governi nazionali (63%), nel settore commerciale e industriale (58%) e nell'UE (57%), i principali soggetti coinvolti. Tre quarti degli europei ritengono che gli investimenti per la ripresa economica debbano concentrarsi sull'economia verde. La maggioranza dei cittadini dell'UE (64%) sta agendo, individualmente, a favore del clima e compie, consapevolmente, scelte sostenibili nella vita quotidiana. In ultimo, oltre sette europei su dieci (74%) concordano sull'aspetto per il quale i costi dei danni causati dai cambiamenti climatici siano superiori agli investimenti necessari per la transizione verde [11].

In tale contesto, gli obiettivi al 2030 e al 2050 dell'UE in materia di clima vengono introdotti nel Climate Target Plan di settembre 2020 [12] e sanciti nella European Climate Law di giugno 2021 [13] che istituisce un quadro per la riduzione irreversibile e graduale delle emissioni antropogeniche di gas a effetto serra dalle fonti e l'aumento degli assorbimenti dai pozzi regolamentati nel diritto dell'UE. Gli obiettivi si configurano, per tutta l'UE, come:

- neutralità climatica al 2050, ossia raggiungimento dell'equilibrio tra le emissioni e gli assorbimenti dei gas a effetto serra così da realizzare l'azzeramento delle emissioni nette;
- riduzione interna netta, al 2030, delle emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55% rispetto ai livelli del 1990.

In questo percorso, nel 2020 le emissioni di gas a effetto serra dell'UE (inclusa l'aviazione internazionale) registrano un calo del 31% rispetto al 1990 per gli effetti della pandemia sul consumo di energia ma anche per le costanti tendenze di decarbonizzazione come attestato dallo State of the Energy Union Report [14].

La Energy System Integration Strategy [15], ossia la pianificazione e il funzionamento coordinati del sistema energetico nel suo complesso (che comprende molteplici vettori energetici, infrastrutture e settori di consumo) risulta la strada che conduce ad una decarbonizzazione profonda, efficace e a costo accessibile dell'economia europea. La recente diminuzione del costo delle tecnologie per le energie rinnovabili, la digitalizzazione dell'economia e le tecnologie emergenti applicate a batterie, pdc, veicoli elettrici o idrogeno offrono la possibilità di accelerare, nei prossimi vent'anni, la trasformazione della struttura del sistema energetico [15],

Il futuro energetico dell'UE deve basarsi su una quota ampia di energie rinnovabili geograficamente distribuite, integrare in modo flessibile diversi vettori energetici e, al tempo stesso, restare efficiente sotto il profilo delle risorse ed evitare inquinamento e perdita di biodiversità. Questa idea abbraccia il concetto della maggiore elettrificazione diretta dei settori d'uso finale, in particolare, nell'edilizia, mediante l'installazione di pdc per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti.

Nel settore residenziale, la quota di energia elettrica nella domanda di riscaldamento dovrebbe crescere raggiungendo il 40% entro il 2030 e il 50÷70% entro il 2050; nel settore dei servizi, le percentuali

dovrebbero attestarsi intorno al 65% entro il 2030 e all'80% entro il 2050. Per raggiungere tali numeri, risulta importante sviluppare un codice di rete sulla flessibilità sul lato della domanda per liberare il potenziale dei consumi di energia elettrica come quello delle pdc, di modo da contribuire alla flessibilità del sistema energetico [15].

Dalla Renovation wave di ottobre 2020 [16], emerge che le misure di efficienza energetica e l'integrazione delle fonti energetiche rinnovabili risultano elementi cruciali, e l'edilizia è un settore nel quale occorre intensificare l'impegno. Per abbattere le emissioni negli edifici del 55% entro il 2030, l'UE dovrebbe ridurre:

- le emissioni di gas serra del 60%;
- il consumo di energia finale del 14%;
- il consumo energetico per riscaldamento e raffrescamento del 18% rispetto ai livelli del 2015.

Risulta necessario rendere gli edifici più efficienti sotto il profilo energetico, a minore intensità di carbonio durante tutto il ciclo di vita e più sostenibili in termini di soluzioni e materiali edili [16].

Gli obiettivi che si perseguono con la Renovation wave sono: almeno il raddoppio del tasso annuo di ristrutturazione energetica degli edifici residenziali e non residenziali entro il 2030 e lo stimolo ad intraprendere ristrutturazioni energetiche profonde. Questi traguardi si concretizzano nella ristrutturazione di 35 milioni di unità immobiliari entro il 2030. Dopo il 2030, non si deve rallentare il ritmo, al fine di conseguire la neutralità climatica, a livello di UE, entro il 2050 [16].

Le smart home possono promuovere il comfort degli abitanti e aumentare sia l'integrazione delle energie rinnovabili sia la quantità di energia prodotta in surplus negli edifici. In alcuni progetti pilota condotti in condomini, vengono installati pannelli fotovoltaici sui tetti, impianti di accumulo termico e pdc e ciascun edificio viene collegato a una rete locale che alimenta punti di ricarica per le auto elettriche, inoltre, l'applicazione di contatori intelligenti supporta il bilanciamento tra domanda e offerta di energia in modo efficiente. Di conseguenza, gli edifici vengono trasformati da elementi di consumo a centri di produzione di energia con un'elevata efficienza energetica, una riduzione dei costi dell'energia per le famiglie, l'integrazione della mobilità elettrica e benefici sistemici per la stabilità delle reti [16].

In sintesi, l'implementazione della Renovation wave implica l'azione sui consumi dei settori residenziale e terziario mediante un ruolo centrale conferito all'efficienza energetica e all'aumento dell'impiego delle fonti rinnovabili termiche. In sintesi, essa si basa sulla sinergia tra gli investimenti per il miglioramento dell'efficienza energetica e le soluzioni di riscaldamento e raffrescamento da fonti rinnovabili. In tale contesto, il ruolo delle pdc risulta cruciale.

Nel luglio 2021, ai fini del perseguimento degli obiettivi al 2030 e 2050, la CE ha presentato il pacchetto Fit for 55% [17] che rappresenta l'insieme di proposte più completo che sia stato mai presentato dalla CE in materia di clima ed energia. Esso parte dalla considerazione che l'uso dell'energia è all'origine del 75% delle emissioni dell'UE e che le ambizioni climatiche non possono prescindere dalla trasformazione del sistema energetico [17]. Per il pacchetto, l'efficienza energetica e le rinnovabili risultano gli strumenti chiave per le minori emissioni, la crescita economica e l'aumento dell'occupazione.

In riferimento all'energia, il pacchetto si compone di atti importanti, quali:

- proposta di revisione della Direttiva sulle fonti rinnovabili (RED);
- proposta di revisione della Direttiva sull'efficienza energetica (EED);
- proposta di revisione della Direttiva sul sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra (Direttiva ETS).

A dicembre 2021, al gruppo si unisce la proposta di revisione della Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD).

Nel 2020, per la prima volta, le rinnovabili superano i combustibili fossili come principale fonte di energia elettrica dell'UE. La torta relativa all'elettricità, infatti, si compone per il 38% di rinnovabili, il 37% di combustibili fossili e il 25% di nucleare. La quota di fonti energetiche rinnovabili, nel mix energetico complessivo dell'UE, dovrebbe aver raggiunto almeno il 22% [14].

La proposta di revisione della RED [18] propone l'obiettivo vincolante complessivo del 40% di rinnovabili, nel mix energetico dell'UE, al 2030. Vengono, inoltre, stabiliti i contributi nazionali al raggiungimento del target collettivo. La proposta supporta gli Stati Membri nell'impiego delle energie rinnovabili in tutti gli

ambiti con efficienza di costo, grazie a una combinazione di obiettivi e misure settoriali e mira a rendere il sistema energetico più pulito ed efficiente favorendo l'elettrificazione basata sulle rinnovabili [17].

Nelle regolamentazioni e nei codici in materia edilizia e, se del caso, nei rispettivi regimi di sostegno, gli Stati Membri introducono misure volte ad aumentare la quota di energia elettrica e di riscaldamento e raffrescamento da fonti rinnovabili nel parco immobiliare. Per quanto riguarda gli ultimi due servizi energetici, la quota di rinnovabili si attesta al 22,1% al 2019 con un contributo del 75% da parte della biomassa. In relazione al riscaldamento e raffrescamento, in linea generale, ciascuno Stato Membro aumenta la quota di energia rinnovabile dell'1,1 % come media annuale calcolata per i periodi dal 2021 al 2025 e dal 2026 al 2030, partendo dalla quota di energia rinnovabile destinata al riscaldamento e al raffrescamento nel 2020, espressa in termini di quota nazionale di consumo finale lordo di energia. In tale quadro, grazie alla rapida crescita ed ai costi sempre più competitivi, la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili può essere utilizzata per soddisfare in misura sempre maggiore la domanda di energia, a titolo esemplificativo, utilizzando le pdc per il riscaldamento dell'ambiente [18].

Si tiene conto dell'energia dell'ambiente e geotermica utilizzata per il riscaldamento e il raffrescamento, mediante la pdc, a condizione che l'energia finale fornita ecceda, in maniera significativa, l'apporto energetico primario necessario per far funzionare la pdc. Tale aspetto si traduce in un requisito minimo per le pdc, ossia vengono prese in considerazione quelle per le quali il fattore di rendimento medio stagionale (SPF) sia superiore al coefficiente 1,15 moltiplicato per l'inverso del rendimento del sistema elettrico. Quest'ultimo viene definito come il rapporto tra la produzione totale lorda di energia elettrica e il consumo di energia primaria per la produzione di elettricità e deve essere calcolato come media, a livello di UE, sulla base di dati Eurostat. Nel momento in cui il requisito minimo viene soddisfatto, la quantità di energia aerotermica, geotermica o idrotermica prelevata dalla pdc e da considerarsi come energia da fonti rinnovabili viene calcolata come il prodotto fra la stima del calore totale generato dalla pdc ed il termine $(1 - 1/SPF)$ [19].

Gli ultimi dati disponibili indicano che il consumo di energia primaria dell'UE è diminuito dell'1,9% e il consumo di energia finale dello 0,6% nel 2019 rispetto al 2018 ma la dipendenza dalle importazioni nette di energia dell'UE è aumentata raggiungendo il 60,6% nel 2019 rispetto al 58,2% nel 2018 e al 56% nel 2000, trattasi al 2019 del livello più alto degli ultimi 30 anni [14].

In tale quadro, la proposta di revisione della EED [20] suggerisce di innalzare il livello di ambizione degli obiettivi pertinenti dell'UE e di renderli vincolanti. Viene fissato il target di riduzione, al 2030, del 9% del consumo di energia rispetto allo scenario di riferimento del 2020. In tale contesto, l'azione degli Stati Membri viene guidata da indicatori nazionali di efficienza energetica calcolati secondo una metodologia comune [17]. Il nuovo modo di esprimere il livello di ambizione degli obiettivi dell'UE non incide sul livello effettivo degli sforzi necessari e corrisponde a una riduzione, per il 2030, del 36% del consumo di energia finale e del 39% del consumo di energia primaria rispetto allo scenario di riferimento 2007 [20].

In merito all'obbligo di risparmio energetico, gli Stati Membri realizzano, cumulativamente, risparmi energetici nell'uso finale equivalenti almeno a:

- nuovi risparmi annui, dal primo gennaio 2021 al 31 dicembre 2023, pari allo 0,8% del consumo medio annuo di energia finale realizzato nel triennio precedente al primo gennaio 2019 (ad eccezione di Cipro e Malta);
- nuovi risparmi annui, dal primo gennaio 2024 al 31 dicembre 2030, pari all'1,5% del consumo medio annuo di energia finale realizzato nel triennio precedente al primo gennaio 2020 [20].

L'edilizia risulta fra i settori che maggiormente consumano energia e rilasciano emissioni.

I servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento rappresentano la metà del consumo di energia finale dell'UE, trattasi del contesto di maggiore consumo di energia finale. Il riscaldamento e il raffrescamento svolgono, quindi, un ruolo primario nell'ambizione dell'UE di passare a un'economia neutra in termini di emissioni di carbonio entro il 2050. Gran parte dello sforzo deve compiersi negli interventi di isolamento dell'involucro degli edifici, ma sussiste un notevole potenziale anche in termini di fornitura più efficiente del calore per la climatizzazione. Risulta opportuno che gli Stati Membri promuovano l'ammodernamento dei sistemi di riscaldamento nell'ambito delle ristrutturazioni profonde, in linea con l'obiettivo a lungo termine della neutralità in carbonio; questo significa ridurre la domanda di riscaldamento e sfruttare una fonte di

energia senza emissioni di carbonio per soddisfare la domanda di climatizzazione invernale residua. La EED definisce il quadro per la pianificazione dei servizi di riscaldamento e raffrescamento disponendo che gli Stati Membri individuino il potenziale di efficienza energetica e di fonti rinnovabili. Prevede, inoltre, il monitoraggio delle politiche e delle misure per sfruttare tale potenziale.

Infatti, entro il 31 ottobre 2025 e, successivamente, ogni quattro anni, la CE valuta le misure vigenti finalizzate all'aumento dell'efficienza energetica e alla decarbonizzazione del riscaldamento e del raffrescamento [20].

La EED, a mezzo di uno specifico articolo, fornisce la base giuridica per l'applicazione del principio Energy Efficiency First (EE First), per il quale gli Stati Membri provvedono affinché si tenga conto di soluzioni di efficienza energetica nelle decisioni strategiche e di pianificazione e in quelle relative a grandi investimenti per i sistemi energetici e i settori non energetici, ove essi incidano sul consumo di energia e sull'efficienza energetica [20].

Dalla Raccomandazione EE First di settembre 2021 [21] si evince che il principio mira a trattare l'efficienza energetica come il "primo combustibile", una fonte di energia in sé, nella quale il settore pubblico e quello privato possono investire prima che in altre fonti di energia più complesse o costose. Il principio comporta il passaggio dal modello tradizionale di produzione e consumo dell'energia, basato su grandi fornitori che utilizzano, prevalentemente, combustibili fossili e su consumatori passivi che subiscono la definizione dei prezzi, a un sistema più flessibile che integra tecnologie relative a fonti di energia rinnovabili e si concentra su consumatori di energia coinvolti attivamente [21].

Inoltre, l'efficienza energetica al primo posto, associata all'efficienza delle risorse costituisce un fattore abilitante importante nel contesto della strategia di decarbonizzazione a lungo termine dell'UE. Questo aspetto implica che entro la metà del secolo il sistema energetico, basato in gran parte sui combustibili fossili, deve cambiare, profondamente, mediante un'elettificazione su larga scala trainata dalla diffusione delle energie rinnovabili, anche a livello di utenti finali [21].

In riferimento all'applicazione del principio dell'efficienza energetica al primo posto nel settore dell'edilizia, risultano importanti, principalmente, due aspetti:

- il primo è relativo all'inclusione degli edifici a 360° nei programmi di ristrutturazione, dal miglioramento dell'integrità termica dell'involucro fino all'ottimizzazione degli impianti tecnici attraverso tecnologie digitali e all'integrazione di risorse energetiche rinnovabili distribuite e decentrate, in maniera da ottimizzare l'efficienza complessiva del sistema;
- il secondo è riferito alla promozione di sinergie tra l'elettificazione diretta e indiretta in termini di efficienza e i costi complessivi del sistema per promuovere l'uso ottimale di energie rinnovabili, comprese le pdc [21].

La EED è strettamente legata alla RED, in particolare in relazione al riscaldamento e al raffrescamento, in quanto le misure riferite agli stessi perseguono gli obiettivi di entrambe le Direttive e, inoltre, contribuiscono al conseguimento dei traguardi della strategia per l'integrazione del sistema energetico. A sua volta, la proposta di revisione della EPBD [22] è connessa alle EED e alla RED. Infatti, la EPBD, avendo come principio chiave l'efficienza energetica al primo posto, contribuisce al raggiungimento degli obiettivi globali di efficienza energetica fissati nella EED, mentre, il maggior numero di ristrutturazioni e gli obblighi, per le nuove costruzioni, di installazione di sistemi di riscaldamento a zero emissioni dirette di gas serra e di integrazione delle energie rinnovabili per diventare edifici a emissioni zero consentono di raggiungere l'obiettivo, al 2030, per la quota di energie rinnovabili nel consumo finale di energia degli edifici in linea con la RED.

La EPBD presenta una nuova configurazione: l'edificio a emissioni zero, il cui fabbisogno energetico molto basso è interamente coperto da energia da fonti rinnovabili, ove tecnicamente fattibile. Tutti i nuovi edifici devono essere edifici a zero emissioni entro il primo gennaio 2030 (se edifici pubblici entro il primo gennaio 2027) e tutti gli edifici esistenti devono essere trasformati in edifici a zero emissioni entro il 2050 [22].

Gli edifici sono responsabili delle emissioni di gas serra prima, durante e dopo la loro vita operativa. Il potenziale di riscaldamento globale durante l'intero ciclo di vita indica il contributo complessivo dell'edificio alle emissioni che provocano il cambiamento climatico. Esso riunisce le emissioni di gas serra incorporate

nei prodotti da costruzione (culla) con le emissioni dirette e indirette dalla fase di utilizzo fino alla demolizione dell'edificio e al recupero e/o smaltimento dei materiali (tomba). Dal primo gennaio 2027, il potenziale di riscaldamento globale del ciclo di vita deve essere calcolato per i nuovi edifici qualora superino un valore soglia in termini di superficie utile; ciò sarà necessario per tutti i nuovi edifici indipendentemente dalla superficie dal primo gennaio 2030. L'obbligo di calcolare il potenziale di riscaldamento globale del ciclo di vita dei nuovi edifici costituisce un primo passo verso una maggiore considerazione delle prestazioni dell'intero ciclo di vita degli edifici e l'economia circolare [22].

Due terzi dell'energia utilizzata per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici proviene da combustibili fossili. Per decarbonizzare il settore edile, risulta di particolare importanza eliminare, gradualmente, i combustibili fossili nel riscaldamento e nel raffrescamento. La proposta sostiene la sostituzione delle caldaie a combustibili fossili inefficienti con sistemi come le pdc e l'annullamento di sistemi incentivanti per l'installazione di caldaie a combustibili fossili a decorrere dal primo gennaio 2027 [22].

Ciò, ovviamente, ha dei risvolti anche sul mercato di scambio delle emissioni di gas.

Un'analisi della CE indica che, a legislazione invariata, i settori attualmente coperti dall'ETS europeo darebbero, al 2030, un contributo insufficiente rispetto all'obiettivo generale dell'UE di riduzione di almeno il 55% delle emissioni rispetto al 1990 [23].

Di conseguenza, la proposta di revisione della Direttiva ETS [23] stabilisce che la copertura di tutte le emissioni derivanti dalla combustione di combustibili fossili nel settore degli edifici e l'integrazione delle stesse nel sistema di scambio di quote di emissione dell'UE apportino notevoli benefici in termini di efficacia della riduzione delle emissioni. Infatti, allo stato attuale l'ETS europeo copre, direttamente o indirettamente, circa il 30% delle emissioni degli edifici dovute al riscaldamento, in quanto è riferito al teleriscaldamento e all'elettricità utilizzata a fini del riscaldamento. Il nuovo sistema di scambio delle quote di emissione per gli edifici è incentrato sulla regolamentazione dell'attività di immissione in consumo di combustibili che sono utilizzati per la combustione nei settori dell'edilizia e se ne prevede l'istituzione come sistema autonomo separato a partire dal 2025. Nel corso del primo anno, i soggetti regolamentati devono detenere un'autorizzazione ad emettere gas a effetto serra e comunicare le loro emissioni per gli anni 2024 e 2025. Il rilascio di quote e gli obblighi di conformità per tali soggetti sono applicabili a partire dal 2026 consentendo al nuovo sistema di iniziare a funzionare in modo ordinato ed efficiente. La CE controlla l'applicazione delle regole del nuovo sistema di scambio delle quote di emissione e, se necessario, propone un riesame entro il primo gennaio 2028 per migliorarne l'efficacia, l'amministrazione e l'applicazione pratica [23].

Dal Climate Action Progress Report di ottobre 2021 [24] si evince che i gas fluorurati sono gas serra molto potenti. Dal 2019, l'UE deve rispettare i limiti di consumo per gli idrofluorocarburi (HFC) previsti dal protocollo di Montreal relativo a sostanze che riducono lo strato di ozono. Finora l'UE ha rispettato con successo gli obblighi derivanti dal protocollo di Montreal, tuttavia, risulta importante continuare ad applicare le politiche pertinenti [24].

In particolare, il primo gennaio 2019, è entrato in vigore, a livello internazionale, l'Emendamento di Kigali che costituisce la quinta modifica al Protocollo di Montreal. A Kigali si è preso atto che, dopo l'introduzione degli HFC come principali sostituti degli idroclofluorocarburi al fine di tutelare la fascia dell'ozono stratosferico, sussiste un elevato potenziale di riscaldamento globale di alcune categorie di HFC. La direttrice dell'Emendamento è, dunque, quella di privilegiare gli HFC con basso potenziale di riscaldamento globale o altre categorie di sostanze senza impatto sul clima. L'Emendamento suddivide i paesi in gruppi, in funzione delle date rispetto alle quali dovranno congelare la produzione e il consumo di HFC. Alla fine del processo al 2047, tutti gli Stati del mondo aderenti al Protocollo di Montreal e all'Emendamento di Kigali devono consumare e produrre non più del 20% delle rispettive quote base [25].

Nel 2009, uno studio ha calcolato che una rapida eliminazione degli HFC potrebbe potenzialmente impedire l'equivalente di 8,8 Gt di CO₂ rilasciate nell'atmosfera, ogni anno, entro il 2050; inoltre, secondo gli esperti, se completamente implementato, l'emendamento di Kigali potrebbe evitare fino a 0,4 °C di riscaldamento globale entro la fine del secolo [26].

Le pdc giocano un ruolo importante nell'applicazione dell'Emendamento di Kigali, in quanto gli HFC vengono utilizzati come refrigeranti ma dall'HFC denominato R 410A ad alto impatto in termini di

riscaldamento globale si sta passando alle alternative quali: R 32, R454B ed R452B che hanno buone proprietà termodinamiche comparate all'R410A e presentano minore impatto ambientale. Analogamente, il refrigerante R 134a sta cedendo il passo a: R 513A, R 1234ze e R 1234yf. In termini di potenziali di riscaldamento globale, il valore dell'R 513A è pari a circa la metà rispetto al dato dell'R 134a, mentre quelli dell'R 1234ze e dell'R 1234yf sono estremamente bassi [27].

La transizione verso l'energia pulita è la migliore assicurazione contro la crisi dei prezzi che l'UE si trova ad affrontare come viene riportato nell'Energy Prices Toolbox [28].

I prezzi dell'energia hanno oscillato fortemente quando l'economia si è contratta a causa della pandemia per poi riprendersi. Combustibili più economici, la flessione della domanda e la rapida espansione della produzione di energia da fonti rinnovabili hanno fatto crollare, nel 2019, i prezzi dell'energia all'ingrosso e reso frequenti, nel 2020, prezzi negativi dell'energia elettrica. Nel 2021, però, si è verificata una brusca inversione di tendenza con un incremento dei prezzi dell'energia all'ingrosso del 230% su base annua e ripercussioni più moderate sui prezzi al dettaglio fino a settembre 2021 (+11% media dell'UE). Questo dato varia tra gli Stati Membri e dipende dalla regolamentazione, dalla struttura dei prezzi al dettaglio e dal mix energetico. Tale incremento è, in gran parte, attribuibile al rincaro del gas, che ha inciso nove volte di più sul prezzo dell'energia elettrica rispetto all'effetto dell'aumento del prezzo del carbone osservato nello stesso periodo [14].

Come risposta all'aumento dei prezzi dell'energia, a ottobre 2021, l'UE, nell'ambito delle misure di intervento e sostegno, ha stabilito che le misure di efficienza energetica riducono il consumo e quindi i costi dell'energia ma richiedono investimenti, mentre, secondo l'opinione più diffusa tra gli esperti, se le altre condizioni restano immutate, l'aumento delle rinnovabili si traduce in una riduzione dei prezzi del mercato all'ingrosso. Indipendentemente dal mercato dell'energia elettrica, negli ultimi anni il costo complessivo di una serie di tecnologie rinnovabili si è ridotto. Ciò vale per l'industria e i servizi ma anche per le famiglie che possono investire in diverse tecnologie, tra cui le pdc, ai fini della riduzione delle bollette dell'energia elettrica e del riscaldamento [28].

Il progresso tecnologico nell'ambito del sistema energetico pulito è di fondamentale importanza per conseguire l'obiettivo dell'UE in materia di energia e clima entro il 2050 come si evince dal Progress Report on competitiveness of clean energy technologies di ottobre 2021 [29]. La competitività delle diverse tecnologie per l'energia pulita è un concetto complesso e sfaccettato che non può essere definito da un singolo indicatore, la CE, ad ottobre 2021, propone una serie di indicatori ampiamente accettati in grado di fotografare la situazione dell'intero sistema energetico (generazione, trasmissione e consumo) e che possono essere analizzati su tre livelli (tecnologia, catena del valore e mercato mondiale). Per quanto riguarda l'elettrificazione, alle pdc viene conferito valore elevato al fine di contribuire alla decarbonizzazione del settore edilizio [29].

Si mostrano in sintesi grafica (Figura 1), le tappe cronologiche del Green Deal che investono la tecnologia della pdc.

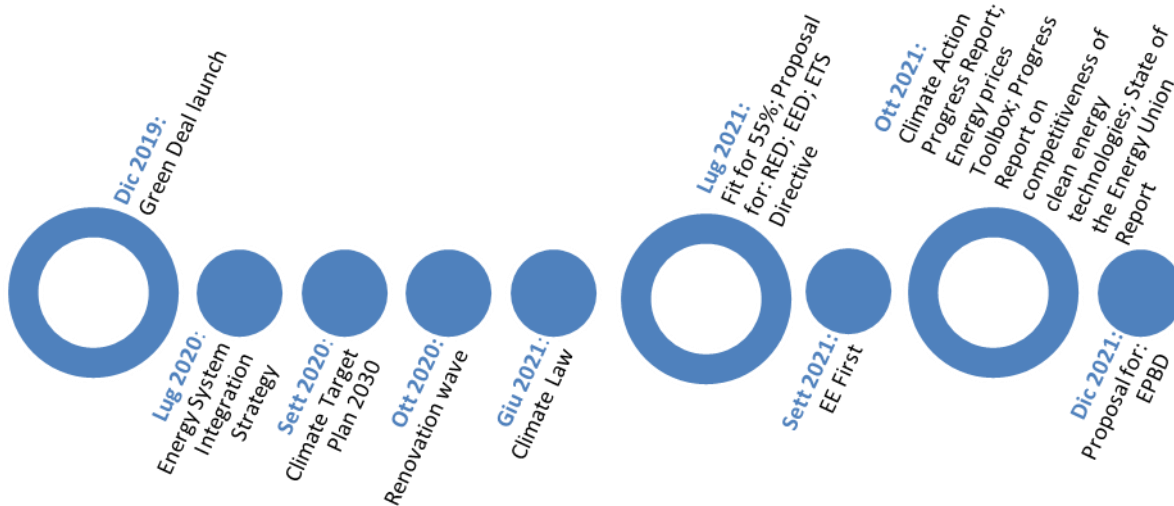
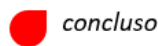


Figura 1. Cronologia del Green Deal con focus sulle pompe di calore

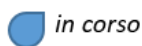
Guardando al futuro, con l'innalzamento dei traguardi in tema di clima ed energia sorgeranno nuove necessità di investimenti. Nei prossimi dieci anni, in media, saranno necessari investimenti aggiuntivi per un valore di 390 miliardi di euro all'anno rispetto agli importi medi annuali investiti negli ultimi dieci anni. Più specificamente, il raggiungimento dei più ambiziosi obiettivi in tema di clima ed energia per il 2030 rappresenta un aumento di circa 100 miliardi di euro all'anno rispetto alle necessità di investimenti previste per l'attuazione dei Piani Nazionali Integrati Energia e Clima (PNIEC) degli Stati Membri [14].

Ovviamente, gli impegni delle politiche e gli sforzi economici sono affiancati anche dalle sfide nel campo della ricerca che a livello comunitario sono state lanciate.

Nell'ambito delle attività dell'International Energy Agency (IEA), ad esempio, sono numerosi i gruppi di lavoro che si occupano di pompe di calore (Figura 2). Ai numerosi annex già avviati o conclusi, si affiancano anche nuove proposte che mirano a ridurre l'impatto ambientale delle pdc ed a promuovere il loro più ampio impiego in tutti i settori, dal residenziale all'industria [30].



concluso



in corso



Proposte e idee

TECNOLOGIE PER IL RISCALDAMENTO ECONOMICHE E COMPETITIVE

Annex 46: Domestic hot water heat pumps

Annex 50: Heat Pumps in Multi-Family Buildings for space heating and DHW

Annex 51: Acoustic Signature of Heat Pumps

Annex 52: Long term performance measurement of GSHP Systems serving commercial, institutional and multi-family buildings

Annex 55: Comfort and Climate Box – Mission Innovation

Retrofit Heat Pump Systems in larger non-residential Buildings

Heat Pumps in high-density cities

RAFFRESCAMENTO E CLIMATIZZAZIONE EFFICIENTI

Annex 53: Advanced cooling/refrigeration technologies

Comfort and climate box for warm and humid climates

SOLUZIONI FLESSIBILI, SOSTENIBILI E PULITE

Annex 47: Heat pumps in DHC systems

Annex 49: Design and integration of heat pumps for nZEB

Annex 57: Heat Pumps in multi vector energy systems

Heat pumps for positive energy districts

DIGITALIZZAZIONE E INTERNET OF THINGS

Annex 56: Internet of things for heat pumps

MERCATI NUOVI O SPECIALI ED APPLICAZIONI

Annex 48: Industrial heat pumps – second phase

High temperature heat pumps

Heat Pumps for drying

REFRIGERANTI NUOVI, ALTERNATIVI O NATURALI A PIÙ BASSO EFFETTO CLIMALTERANTE (GWP)

Annex 54: Heat pumps systems with low GWP refrigerants

Figura 2. Annex sulle pompe di calore nell'ambito dei lavori dell'IEA

2.2 La tabella di marcia al 2030 e al 2050 per le pompe di calore

La tecnologia della pdc è identificata come un elemento chiave ai fini della decarbonizzazione del riscaldamento degli ambienti e della produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS), nonché per il raffrescamento degli edifici. Il settore delle pdc risulta dare il maggiore contributo all'aumento della produzione di energia rinnovabile per il riscaldamento e il raffrescamento in tutta l'UE [31].

Secondo lo strumento SHARES di Eurostat, le pdc concorrono ad oltre la metà dell'aumento del riscaldamento e del raffrescamento da rinnovabili nell'UE tra il 2016 e il 2018, trattasi di un contributo pari a 1,4 Mtep a fronte dell'incremento complessivo di 2,5 Mtep [31]. Le pdc per le applicazioni edili vengono considerate come prodotti maturi. Negli ultimi anni la generazione di calore mediante pdc nell'UE è cresciuta dell'11,5% ogni anno, raggiungendo 250 TWh al 2020. Tale dato è destinato ad aumentare poiché l'elettrificazione del riscaldamento risulta un aspetto fondamentale nel percorso del settore edilizio verso la neutralità climatica [29].

Il settore delle pdc è caratterizzato da un panorama mondiale competitivo, dove l'innovazione è cruciale. Considerando il periodo 2011-2021, oltre il 37% delle pubblicazioni scientifiche più citate sulla tecnologia delle pdc proviene dall'UE, seguita dalla Cina (23%) e dagli USA (20%). L'UE è, inoltre, leader nelle invenzioni nel settore delle pdc usate, principalmente, per il riscaldamento nell'ambito delle applicazioni edili: nel periodo 2015÷2017, il 42% delle invenzioni di valore elevato è stato depositato nell'UE, seguita dal Giappone (20%), dagli Stati Uniti (8%), dalla Corea del Sud (7%) e dalla Cina (4%). Partendo da questa base di conoscenza, gli istituti di ricerca e l'industria dell'UE dispongono della capacità di proporre innovazioni. Nel periodo 2014÷2020 i progetti di pdc per le applicazioni edili hanno ricevuto un finanziamento totale di 146,8 milioni di euro nell'ambito del programma di Ricerca ed Innovazione dell'UE Horizon 2020. La quota maggiore è stata destinata all'integrazione di pdc con altre energie rinnovabili (60,9%) rispetto allo sviluppo di pdc per le applicazioni residenziali (6,5%) e per il teleriscaldamento (32,6%). Le industrie europee delle pdc si trovano in una posizione favorevole per beneficiare della domanda futura crescente basata

sull'espansione strategica dei mercati pertinenti. La loro posizione competitiva dipenderà dalla velocità di sviluppo, dalla mobilitazione degli investimenti pianificati e dalla preparazione dei mercati, nonché da un quadro giuridico favorevole e dagli sviluppi di altri settori [29].

Rispetto alla catena del valore secondo il barometro EurObserv'ER, nel 2018 il fatturato delle pdc nell'UE si è attestato a 26,6 miliardi di euro, in crescita del 18% rispetto al 2017. Parallelamente nel 2018, i posti di lavoro diretti e indiretti ammontano a 222.400, registrando un aumento del 17% rispetto al 2017. Questi dati comprendono tutti i tipi di pdc. Dal punto di vista delle competenze, il settore delle pdc comprende una forza lavoro formata nei settori della ricerca e sviluppo e nella fabbricazione dei componenti, come geologi, ingegneri termotecnici e installatori (compresi gli addetti alle perforazioni) e nel settore dell'assistenza e manutenzione [29].

Facendo un focus, in termini di competitività, sui segmenti della catena del valore delle pdc, ossia: progettazione, materiali, componenti, assemblaggio, conduzione/manutenzione e fine vita, emerge che la fase di progettazione della pdc contribuirà, principalmente, al miglioramento delle prestazioni e alla riduzione dell'impronta ambientale e dei costi in tutte le fasi del ciclo di vita della pdc. Mentre, i materiali giocheranno un ruolo importante in termini di fluido di lavoro a basso potenziale di riscaldamento globale ma anche come riduzione dei metalli. La catena industriale necessiterà di un accesso continuo alla componentistica pertinente. Le linee di assemblaggio del prodotto efficienti saranno fondamentali per ridurre il costo unitario delle pdc, così come il marketing e le vendite per garantire che i consumatori siano consapevoli delle prestazioni dei prodotti e possano acquistarli tramite le reti di distribuzione locali. I software di controllo e i servizi di ingegneria, nonché l'installazione e il monitoraggio post-vendita, l'ottimizzazione delle prestazioni e i servizi di riparazione saranno fattori cruciali per l'implementazione e il funzionamento efficiente delle pdc. La gestione del fine vita, ossia lo smantellamento e lo smaltimento o il riciclo adeguati della pdc risulteranno un aspetto determinante ai fini della valutazione dell'impronta ambientale [31].

Rispetto al mercato globale, un migliore sviluppo di reti di marketing e di distribuzione nell'UE e al di fuori dell'UE e una cooperazione maggiore con partner dotati di competenze pertinenti contribuirebbero ad aumentare la competitività delle imprese dell'UE. Ad ogni modo, in base alle proiezioni della strategia a lungo termine dell'UE, le vendite di pdc per l'elettificazione del settore del riscaldamento degli edifici dovrebbero aumentare, rapidamente, nell'UE fino al 2030 [29].

In termini generali di opportunità per le pdc, il mercato europeo è in costante crescita. L'attuale diffusione è molto al di sotto del potenziale, poiché la decarbonizzazione del settore del riscaldamento richiede una diffusione molto più rapida delle pdc nell'UE, al fine di contribuire efficacemente agli obiettivi climatici europei al 2030 e al 2050. Le economie di scala nella produzione e nell'installazione sono ancora in larga misura poco sfruttate. Le reti intelligenti offrono alle pdc la possibilità di configurazione come meccanismo di bilanciamento infragiornaliero della rete, per compensare la variabilità delle rinnovabili. Si prospettano nuovi modelli di business e di condivisione del valore di tale flessibilità con i proprietari delle pdc. Gli sviluppi nella digitalizzazione e nei sistemi di gestione degli edifici possono massimizzare l'autoconsumo di altre energie rinnovabili e ottimizzare l'utilizzo delle pdc insieme all'accumulo di energia termica o elettrochimica locale [31].

Come futuri sviluppi per le pdc, si prospettano:

- l'integrazione nel sistema più ampio per ottimizzare l'uso della generazione rinnovabile locale e lo stoccaggio, per contribuire alla flessibilità della rete elettrica, per gestire le prestazioni della pdc in base al prezzo dell'energia elettrica e alle previsioni meteorologiche o per l'ispezione in sito o da remoto degli impianti. Saranno necessari migliori interfacce e standard, oltre ad una maggiore digitalizzazione e intelligenza artificiale;
- l'impiego di unità molto compatte, fortemente integrate e silenziose;
- le soluzioni migliorative con temperature di mandata più elevate (55÷70°C) per la sostituzione diretta delle caldaie in edifici non completamente ristrutturati;
- l'avvento di unità multifunzionali, comprensive di recupero di calore e freddo, di modo da migliorare l'efficienza dei sistemi negli edifici commerciali o negli edifici ad occupazione mista;

- l'ottimizzazione della circolarità a partire dalla progettazione per migliorarne la durata, la riparabilità, la modificabilità e il riciclo. I dati dell'analisi del ciclo di vita completo per le pdc saranno necessari nel conteggio del carbonio di prossima generazione, al fine di fornire indicatori di facile utilizzo che esprimano il contenuto di carbonio dei sistemi di riscaldamento e raffreddamento in gCO₂/kWh di caldo/freddo erogato [31].

In riferimento all'analisi di scenario, l'IEA ad ottobre 2021, ha pubblicato uno studio [32] riferito all'implementazione dello "Net-Zero Emissions by 2050 Scenario" (NZE).

Trattasi della tabella di marcia per il sistema energetico mondiale, nella quale le pdc occupano una posizione strategica. L'NZE significa una completa trasformazione del comparto dell'energia globale che non ha eguali in termini di velocità e consistenza [32].

L'analisi viene definita come uno dei lavori più importanti e impegnativi nella storia dell'IEA e traccia la modalità con la quale il settore energetico può raggiungere le emissioni nette zero al 2050. La tabella di marcia dimostra che sono possibili più itinerari per raggiungere lo zero netto. Non esiste un unico approccio alla transizione verso l'energia pulita. Il percorso selezionato risulta di portata globale ma ogni paese del mondo deve progettare la propria strategia ad hoc, tenendo conto del contesto. Lo scenario scelto nello studio (NZE) si configura come quello più fattibile, conveniente e socialmente accettabile. La strada risulta impegnativa e richiede a tutte le parti interessate, ossia: governi, imprese, investitori e cittadini di agire, costantemente, anno dopo anno, di modo che l'obiettivo non scivoli fuori portata. Il percorso richiede ingenti investimenti, innovazione, politiche pertinenti, progettazione e implementazione, sviluppo tecnologico, costruzione di infrastrutture, cooperazione internazionale e sforzi nei settori correlati [32].

L'NZE stabilisce le pietre miliari (Figura 2) che coprono tutti i settori, in termini di politiche, infrastrutture e tecnologie sulla strada per l'azzeramento delle emissioni nette globali al 2050. Qualora un settore fosse in ritardo, potrebbe rivelarsi non possibile compensare la differenza altrove [32].

Tale scenario comporta un aumento significativo del fabbisogno di energia elettrica come risultato dell'incremento dell'attività economica, della rapida elettrificazione degli usi finali, dell'espansione della produzione di idrogeno a mezzo elettrolisi, e della radicale trasformazione nella generazione dell'elettricità. La domanda complessiva di energia elettrica, attestatasi a 23.230 TWh nel 2020 con un tasso di crescita medio annuo del 2,3% nel decennio precedente, sale a 60.000 TWh nel 2050 registrando un aumento medio annuo del 3,2%. I mercati emergenti e le economie in via di sviluppo rappresentano il 75% della proiezione globale di aumento della domanda di energia elettrica al 2050, la loro richiesta triplica entro il 2050 trainata dalla crescita della popolazione e dal miglioramento dei redditi e degli stili di vita, nonché da nuove fonti di domanda legate alla decarbonizzazione. Nelle economie avanzate, la domanda di elettricità torna a crescere dopo una pausa decennale, quasi raddoppiando tra il 2020 e il 2050 guidata, principalmente, dall'elettrificazione degli usi finali e dalla produzione di idrogeno [32].

La trasformazione del settore elettrico risulta fondamentale per raggiungere le emissioni zero al 2050. La produzione di elettricità risulta, oggi, la principale fonte di emissioni di CO₂ rappresentando il 36% delle emissioni totali legate all'energia. Le emissioni di CO₂ provenienti dalla generazione di elettricità hanno totalizzato oltre 12 Gt nel 2020 a livello mondiale di cui 9,1 Gt da generazione a carbone, 2,7 Gt da impianti a gas e 0,6 Gt da impianti a gasolio. Nell'NZE, nelle economie avanzate, le emissioni di CO₂ da produzione di energia elettrica scendono a zero negli anni 2030, mentre nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo, intorno al 2040.

Le rinnovabili contribuiscono maggiormente alla decarbonizzazione dell'elettricità nell'NZE. La generazione globale da rinnovabili quasi triplica entro il 2030 e cresce di otto volte entro il 2050, di modo che la quota di rinnovabili sulla produzione totale passa dal 29% nel 2020 a oltre il 60% nel 2030 e a quasi il 90% nel 2050. Dal 2030 al 2050, ogni anno, viene installata una potenza complessiva pari a 600 GW e 340 GW, rispettivamente, di fotovoltaico ed eolico. Gli investimenti nelle reti elettriche aumentano di tre volte dallo stato attuale al 2030 e restano elevati al 2050. Il settore elettrico è il primo a raggiungere le emissioni zero, principalmente, per effetto dei bassi costi, dell'ampio consenso politico e della maturità di una serie di tecnologie per le energie rinnovabili [32].

Per il comparto degli edifici, nell'NZE risulta prevista una crescita della superficie del 75% tra il 2020 e il 2050 in tutto il mondo, per l'80% nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo. Globalmente, significa che si aggiunge una superficie equivalente a quella della città di Parigi, ogni settimana, fino al 2050. Inoltre, gli edifici, in molte economie avanzate, hanno tempi di vita lunghi e circa la metà degli attuali risultano esistenti anche al 2050. I tassi di ristrutturazione, al 2030, si portano al 2,5% all'anno per le economie avanzate e al 2% all'anno per i mercati emergenti e le economie in via di sviluppo. Entro il 2030, circa il 20% del parco immobiliare mondiale esistente viene ristrutturato e tutti i nuovi edifici rispettano gli standard edilizi per configurarsi a zero emissioni al 2050 [32].

L'efficienza energetica e l'elettrificazione sono le due principali leve della decarbonizzazione del settore edilizio nell'NZE. La trasformazione si basa, principalmente, sulle tecnologie disponibili sul mercato, comprese quelle per il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro edilizio per gli edifici nuovi ed esistenti, le pdc, gli elettrodomestici efficienti dal punto di vista energetico e la progettazione dell'edificio secondo l'architettura bioclimatica e con materiali efficienti. La digitalizzazione e gli strumenti di controllo intelligenti consentono guadagni in termini di efficienza energetica e riducono le emissioni del settore edile di 350 MtCO₂ entro il 2050. Nell'NZE, anche i cambiamenti comportamentali sono importanti, ottenendo una riduzione di quasi 250 MtCO₂ nel 2030. Essi si riflettono sulla variazione dell'impostazione della temperatura ambiente per il riscaldamento o la riduzione della temperatura eccessiva dell'ACS [32].

Sebbene la domanda di elettricità risulti moderata per effetto della spinta al miglioramento dell'efficienza del raffrescamento, dell'illuminazione, degli involucri edilizi e degli elettrodomestici (di questi ultimi, oltre l'80% risultano modelli più efficienti disponibili entro il 2025 nelle economie avanzate, mentre a metà degli anni 2030, in tutto il mondo), l'incremento delle attività economiche insieme alla diffusa elettrificazione del riscaldamento, mediante l'utilizzo di pdc, implica che la quota di elettricità nel mix energetico cresca partendo dal 33% al 2020 e raggiungendo quasi il 50% nel 2030 e il 66% al 2050 [32].

Nell'NZE, il rapido passaggio a tecnologie a zero emissioni di carbonio nel settore degli edifici comporta la discesa della quota di combustibili fossili nella domanda di energia dal 30% al 2030 al 2% al 2050. Non sono necessari nuovi giacimenti di petrolio e gas naturale oltre a quelli già autorizzati. Non occorrono nuove miniere di carbone o ampliamenti di miniere. Le centrali a carbone meno efficienti vengono, gradualmente, dismesse entro il 2030 e tutto il carbone viene rimpiazzato entro il 2040. Nello NZE, dal 2025, non vengono più vendute caldaie a carbone e ad olio a livello globale. La vendita delle caldaie a gas, rispetto al livello attuale, scende di oltre il 40% al 2030 e del 90% al 2050. Nello NZE, entro il 2025, tutte le caldaie a gas vendute sono in grado di bruciare idrogeno al 100% e quindi sono candidate alle zero emissioni di carbonio al 2050. Biogas, idrogeno e combustibili a base di idrogeno rappresentano quasi il 20% dell'energia finale globale nel 2050, rispetto all'1% del 2020 [32].

In termini di emissioni totali di CO₂, il settore delle costruzioni passa da quasi 3 Gt al 2020 a circa 120 Mt nel 2050 registrando una diminuzione, dal 2020 al 2050, di più del 95% [32].

Nello NZE, tutti gli usi finali, attualmente, dominati dai combustibili fossili vengono, progressivamente, elettrificati con l'aumento della quota di elettricità nel riscaldamento degli ambienti, nella produzione di ACS e nella cottura dei cibi fino ad oltre il 40% nel 2050. La domanda di riscaldamento degli ambienti scende di due terzi tra il 2020 e il 2050 trainata dal miglioramento dell'efficienza energetica e dai cambiamenti comportamentali. Nell'NZE, il riscaldamento degli ambienti subisce una profonda trasformazione con le case riscaldate a gas naturale che scendono da quasi il 30% del totale attuale a meno dello 0,5% nel 2050, di conseguenza, il consumo di gas naturale per il riscaldamento diminuisce (-98%) al 2050. Mentre, le case che utilizzano l'elettricità per il riscaldamento salgono da quasi il 20% del totale attuale al 35% nel 2030 e a circa il 55% nel 2050 [32].

Le pdc sono la più grande opportunità di elettrificazione nel settore edilizio, rimpiazzando le caldaie a combustibili fossili per il riscaldamento [33]. Nell'NZE, infatti, le pdc elettriche ad alta efficienza diventano la prima scelta tecnologica per il riscaldamento degli ambienti con un numero di installazioni al mese in aumento da 1,5 milioni del 2021 a circa 5 milioni entro il 2030 e a 10 milioni entro il 2050. Le pdc ibride vengono utilizzate anche in climi freddi per soddisfare circa il 5% della domanda di riscaldamento nel 2050 [32].

Il raffrescamento degli ambienti rappresenta il 5% del consumo di energia totale degli edifici nel mondo al 2020 ma è probabile che la domanda di raffrescamento cresca fortemente nei prossimi decenni con l'aumento dei redditi e il clima più caldo. Nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo, si stima un incremento di 650 milioni di condizionatori entro il 2030 ed altri 2 miliardi entro il 2050. Nell'NZE, in generale, il 60% delle famiglie possiede un condizionatore d'aria nel 2050, rispetto al 35% del 2020. Gli involucri edilizi ad alte prestazioni compresa la progettazione bioclimatica e l'isolamento possono ridurre la domanda di raffrescamento degli ambienti del 30÷50% fornendo al contempo una maggiore resilienza durante gli eventi di caldo estremo. Nell'NZE, la domanda di elettricità per il raffrescamento degli ambienti cresce, ogni anno, dell'1% raggiungendo 2.500 TWh nel 2050. Senza il conteggio di 2.000 TWh di risparmio energetico grazie al miglioramento dell'involucro degli edifici residenziali e alla maggiore efficienza dei dispositivi, la domanda di raffrescamento degli ambienti sarebbe due volte maggiore [32].

Complessivamente, lo stock di pdc per i servizi energetici di riscaldamento e raffrescamento degli edifici passa da 180 al 2020 a 600 al 2030 e a 1.800 al 2050 (milioni di unità) con una quota di penetrazione per il riscaldamento pari a: 7%, 20% e 55%, rispettivamente, al 2020, 2030 e 2050 [32].

Nell'NZE, i costi di capitale (impiantistica, installazione e messa in esercizio) della tecnologia a pdc ad aria per gli edifici, si attestano a 520 USD/kW e 370 USD/kW, rispettivamente, al 2030 e al 2050 per le economie avanzate, mentre a 280 USD/kW e 200 USD/kW al 2030 e al 2050 per i mercati emergenti e le economie in via di sviluppo [33]. Trattandosi della quotazione del dollaro statunitense al 2020, il cambio di riferimento al 31 dicembre 2020 è tale che 1 USD è pari a 1,2271 € [34].

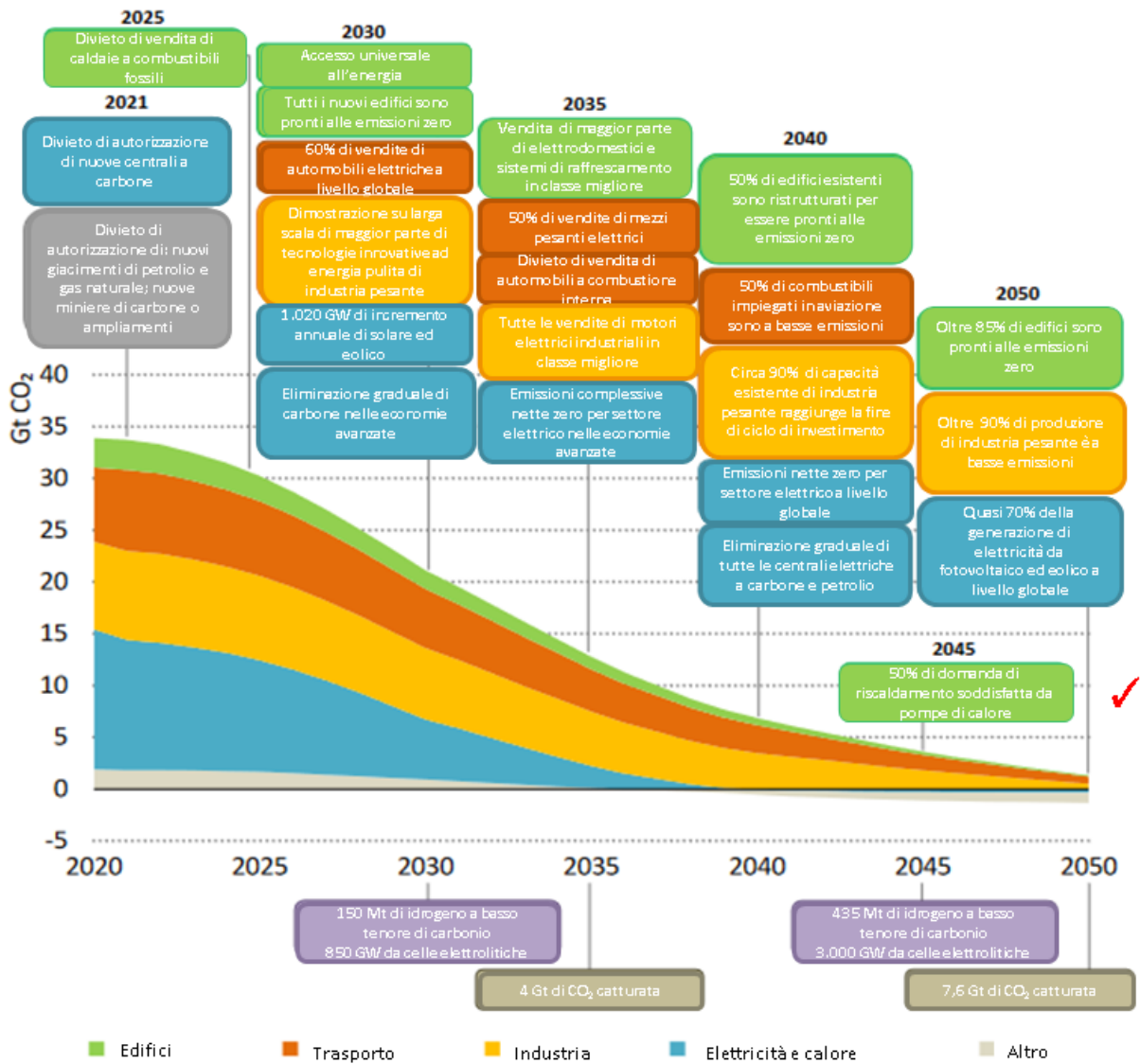


Figura 3. Pietre miliari settoriali nel cammino verso le emissioni zero al 2050 con focus sulle pompe di calore (Rielaborazione ENEA da [32])

3 Le tecnologie della pompa di calore e caldaia a confronto

La grandezza energia è associata ad un sistema fisico che ha in potenza la capacità di condurre un'attività, indipendentemente dallo svolgimento della stessa. Da tale definizione classica, si passa ad aspetti pratici per i quali l'idea di energia va a braccetto con lo svolgimento delle azioni quotidiane volte al soddisfacimento delle proprie esigenze. Un esempio è dato dal sistema di regolazione dell'impianto di climatizzazione invernale, di modo da mantenere la temperatura ambiente desiderata. Di conseguenza, il concetto di energia viene abbinato ad una condizione di comfort che non si raggiunge gratuitamente, nel senso che l'energia subisce una trasformazione in termini di servizi e comfort partendo da una risorsa energetica di forma diversa e presente in natura e risulta impossibile la trasformazione completa (valore del 100%), per cui si manifesta sempre una generazione di scarti [35].

L'attività di ricerca in tema di efficienza energetica ha lo scopo di ridurre le risorse utilizzate e gli scarti generati, promuovendo tecnologie di trasformazione a basso impatto ambientale parallelamente ad azioni di monitoraggio delle condizioni di esercizio, di modo da garantire un regime di funzionamento ottimale della tecnologia impiegata per l'espletamento del servizio energetico richiesto.

3.1 L'indagine comparativa: caldaia vs pompa di calore

La sostanziale differenza tra la caldaia e la pdc è che, nella prima, il calore fornito è limitato dalla quantità e qualità di combustibile utilizzato, mentre nella seconda non vi sono limiti di tale genere. Nella caldaia il rapporto tra energia immessa proveniente dal consumo di combustibile come il gas naturale e l'energia in uscita, ossia il calore prodotto è al massimo pari all'unità, nella pdc tale valore è, generalmente, superiore a 3. La pdc, dunque, rappresenta un'ottima soluzione efficiente per produrre calore a spese di un ciclo termodinamico efficace e consolidato [36].

La ragione per la quale il rendimento della caldaia ha un valore limite unitario risiede nelle perdite di processo per le quali l'energia termica prodotta è, senz'altro, inferiore a quella immessa. Di contro, lo SCOP della pdc assume sempre valori superiori all'unità e può essere incrementato attraverso il processo di sviluppo tecnologico dei componenti delle macchine e il maggiore ricorso in percentuale a fonti di energia rinnovabile per la produzione elettrica, in modo da accrescere la sostenibilità energetica ed ambientale della tecnologia. Per quanto riguarda l'integrazione con le rinnovabili, la pdc può essere, convenientemente, abbinata al solare termico o al fotovoltaico, nonché ai sistemi di accumulo termico [37]. In sintesi, la pdc si configura come una scelta eclettica per la potenzialità di dialogo con le altre tecnologie.

Stanti tali considerazioni, viene svolta un'analisi comparativa [38] delle prestazioni energetiche della caldaia e della pdc per l'espletamento del servizio energetico di climatizzazione invernale di un appartamento.

Lo studio mette in luce come le condizioni di lavoro influenzino fortemente gli output delle tecnologie.

Si assume che la caldaia abbia una resa del 100%, trattasi di una condizione irrealizzabile fisicamente, in quanto implica l'assenza di perdite energetiche ma che è funzionale al disegno di una situazione di partenza caratterizzata da prestazioni energetiche ottimali della caldaia nel confronto con la pdc e, quindi, all'adozione di un approccio cautelativo nella valutazione degli output della pdc per la quale viene assunto uno SCOP pari a 4,1 (risultato dalla media ponderale delle statistiche Assoclima/Anima; valore medio per tutte le tecnologie a pdc).

I parametri oggetto dell'analisi comparativa sono:

- ✓ risparmio di energia primaria;
- ✓ produzione di energia rinnovabile;
- ✓ emissioni di anidride carbonica (CO₂).

In Tabella 1, vengono riportate le caratteristiche dell'appartamento indagato, ossia quello per il quale si conduce il confronto fra la climatizzazione invernale a mezzo caldaia e quella con l'impiego di pdc. Tale approccio potrebbe seguirsi, tal quale, per un edificio appartenente al terziario. Trattasi di un appartamento da ristrutturare per il quale il fabbisogno energetico viene valutato in base al carico termico riferito al solo riscaldamento. Mentre, le assunzioni di base per la comparazione sono sintetizzate in Tabella 2. Infine, i risultati dell'analisi vengono mostrati in Tabella 3.

Tabella 1. Caratteristiche dell'appartamento target (fonte: [38])

Ubicazione	Milano
Superficie utile riscaldata (m ²)	100
Zona climatica	E
Gradi- giorno (GG)	2.404
Regime di funzionamento impianto di riscaldamento (gg/anno)	181
(h/g)	14
Potenza termica media (kW)	6

Tabella 2. Condizioni al contorno (fonte: [38])

Perdite di distribuzione nella rete elettrica al 2021 (%)	8
Frazione di rinnovabile nella produzione di energia elettrica in Italia nel 2019 - fonte: Terna (%)	35
Frazione di fossile nella produzione di energia elettrica in Italia nel 2019 - fonte: Terna (%)	65
Rapporto di trasformazione di energia elettrica fossile in energia primaria	2,1
Rapporto di trasformazione di energia elettrica rinnovabile in energia primaria	1
Rapporto di conversione fra kWh e MJ	3,6
Emissioni di CO ₂ del gas naturale (gr/MJ)	56
Emissioni di CO ₂ dell'energia elettrica fossile (gr/kWh)	460

Tabella 3. Risultati dell'analisi comparativa: caldaia vs pompa di calore (fonte: Rielaborazione ENEA da [38])

Fabbisogno termico dell'appartamento (kWh)	15.204
Rendimento della caldaia (%)	100
SCOP della pdc	4,1
Alimentazione elettrica della pdc (kWh)	3.708
Alimentazione elettrica della pdc maggiorata della perdite (kWh)	4.005
Aliquota di energia rinnovabile termica (kWh)	11.199
Frazione rinnovabile di energia elettrica (kWh)	1.402
Frazione fossile di energia elettrica (kWh)	2.603
<i>Focus energia primaria</i>	
Energia primaria rinnovabile (kWh)	1.402
Energia primaria fossile (kWh)	5.466
Energia primaria totale (kWh)	6.868
Aliquota di consumo di energia primaria totale rispetto al fabbisogno termico (%)	45
Risparmio di energia primaria della pdc rispetto alla caldaia (%)	55
<i>Focus energia rinnovabile</i>	
Aliquota di consumo di energia primaria fossile rispetto al fabbisogno termico (%)	36
Produzione di energia rinnovabile della pdc (%)	64
<i>Focus decarbonizzazione</i>	
Emissioni di CO ₂ della caldaia - valutazione rispetto al gas naturale (t/anno)	≈ 3
Emissioni di CO ₂ della pdc -valutazione rispetto all'energia elettrica fossile (t/anno)	1,2

In Figura 4si mostra una sintesi grafica dei risultati con focus pdc:

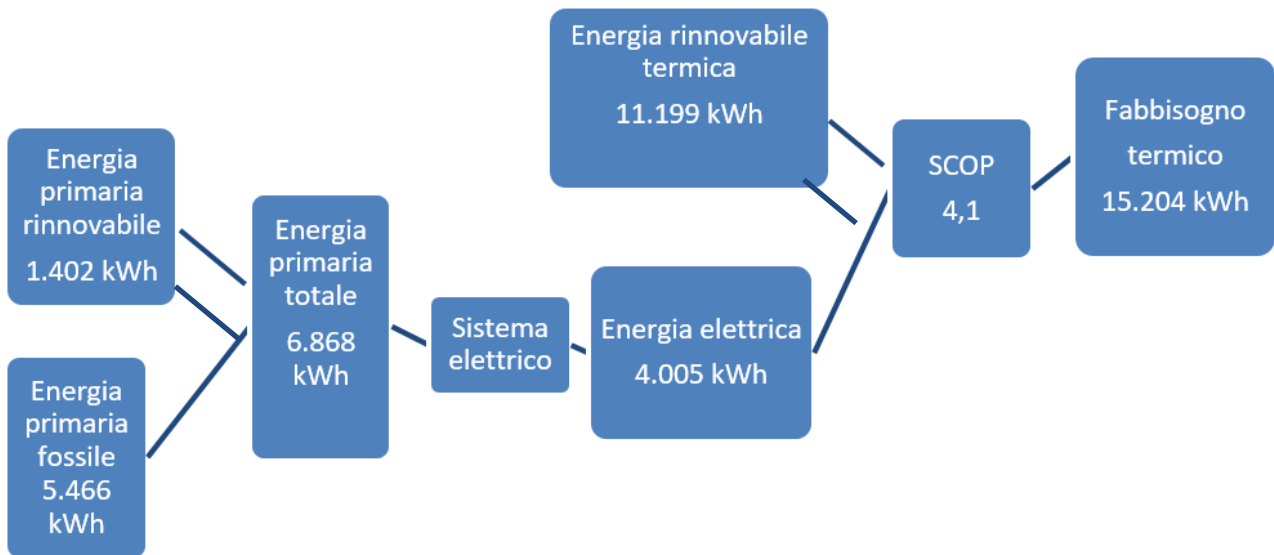


Figura 4. Schema a blocchi della generazione termica da pompa di calore (Rielaborazione ENEA da [38])

Dalla Tabella 3, si evince che per il soddisfacimento di un fabbisogno termico pari a 15.204 kWh, la pdc con SCOP pari a 4,1 consente un risparmio di energia primaria totale del 55% ed una produzione di energia rinnovabile del 64% rispetto alla caldaia con resa del 100%. Mentre, in relazione alla decarbonizzazione, l'impiego della pdc determina un'emissione di CO₂ di 1,2 t/anno a fronte di circa 3 t/anno della caldaia.

3.2 L'analisi di sensibilità per la pompa di calore

Risulta implementata un'estensione della comparazione soprastante, ossia viene condotta un'analisi di sensibilità al variare dello SCOP della pdc nella forchetta [2÷4]. I risultati vengono riportati a mezzo elaborazioni grafiche nelle quali si mostrano anche, nei box tratteggiati, gli output dell'analisi comparativa precedente caratterizzata da SCOP della pdc pari a 4,1.

La Figura 5 mostra il consumo totale di energia primaria della caldaia (resa 100%) e quello della pdc al variare dello SCOP. Ovviamente, più la pdc risulta performante (> SCOP), minore è il consumo di energia primaria della stessa.

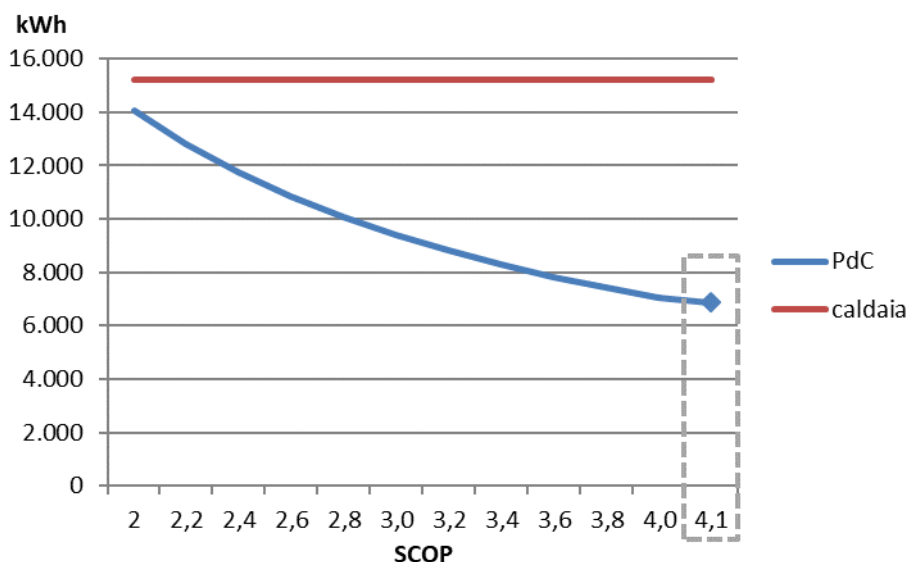


Figura 5. Consumo di energia primaria: caldaia vs pompa di calore

Dalla Figura 6 si evincono, in termini percentuali, il risparmio di energia primaria della pdc, al variare dello SCOP, rispetto alla caldaia e la produzione di energia rinnovabile della pdc in funzione dello SCOP. Chiaramente, all’aumentare dello SCOP, crescono sia il risparmio di energia primaria che la produzione rinnovabile ma, sebbene nella forchetta [2÷4], l’intervallo fra gli SCOP valutati sia analogo, gli incrementi degli output sono più accentuati nella parte sinistra del grafico, ossia per valori minori dello SCOP.

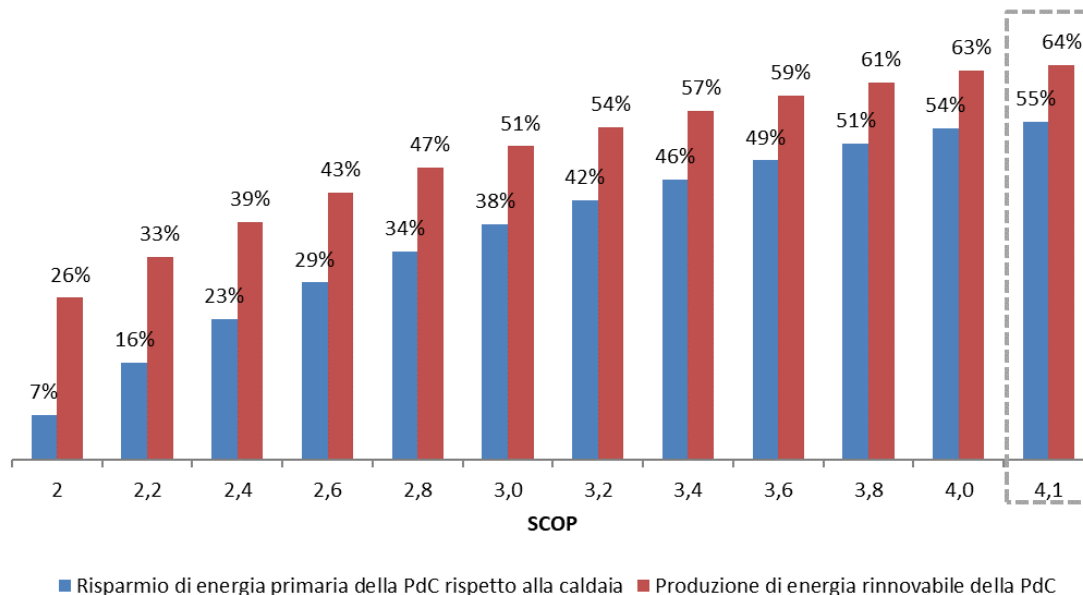


Figura 6. Risparmio di energia primaria e produzione rinnovabile: caldaia vs pompa di calore

Dalla Figura 7 si evidenzia il contributo alla decarbonizzazione della pdc che, rispetto alla caldaia (emissioni di CO₂ pari a circa 3 t/anno), presenta valori sempre minori delle emissioni, in particolare, trattasi di una forchetta pari a [2,5 ÷ 1,2] t/anno al variare dello SCOP. Come per la Figura 6, anche in tale caso, gli incrementi delle riduzioni delle emissioni sono maggiori per valori più bassi dello SCOP.

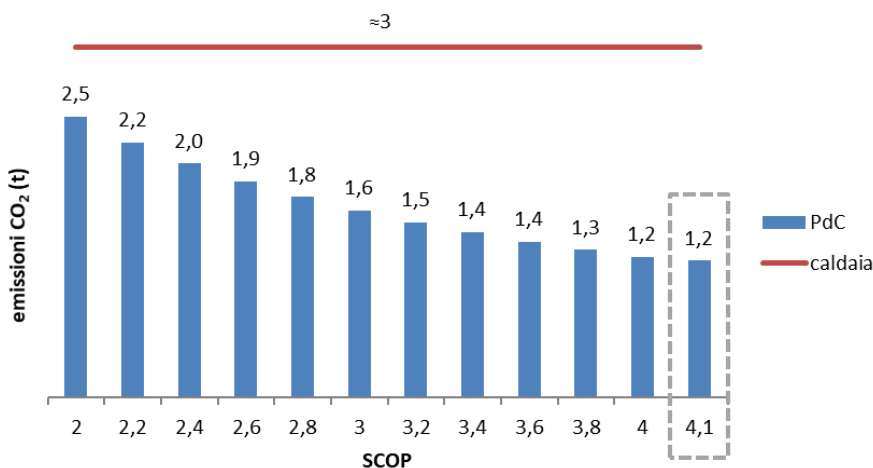


Figura 7. Emissioni di anidride carbonica: caldaia vs pompa di calore

In tema di impronta di carbonio, lasciando il concetto di mix tecnologico per le pdc e considerando, esclusivamente, la tecnologia della pdc ad aria, l’IEA [39] offre la possibilità di conoscere, a livello mondiale al 2020, il potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ della pdc ad aria rispetto alla caldaia a condensazione ad alta efficienza, ossia caratterizzata dal recupero del calore latente di condensazione a

differenza della caldaia tradizionale. Per quanto riguarda i rendimenti, per la caldaia a condensazione trattasi di 92÷95%, mentre lo SCOP della pdc ricade nella forchetta [4,5÷7] per clima mite ed è pari a 3 per clima rigido. Si mostra il risultato, in forma grafica, per l'Italia (Figura 8).

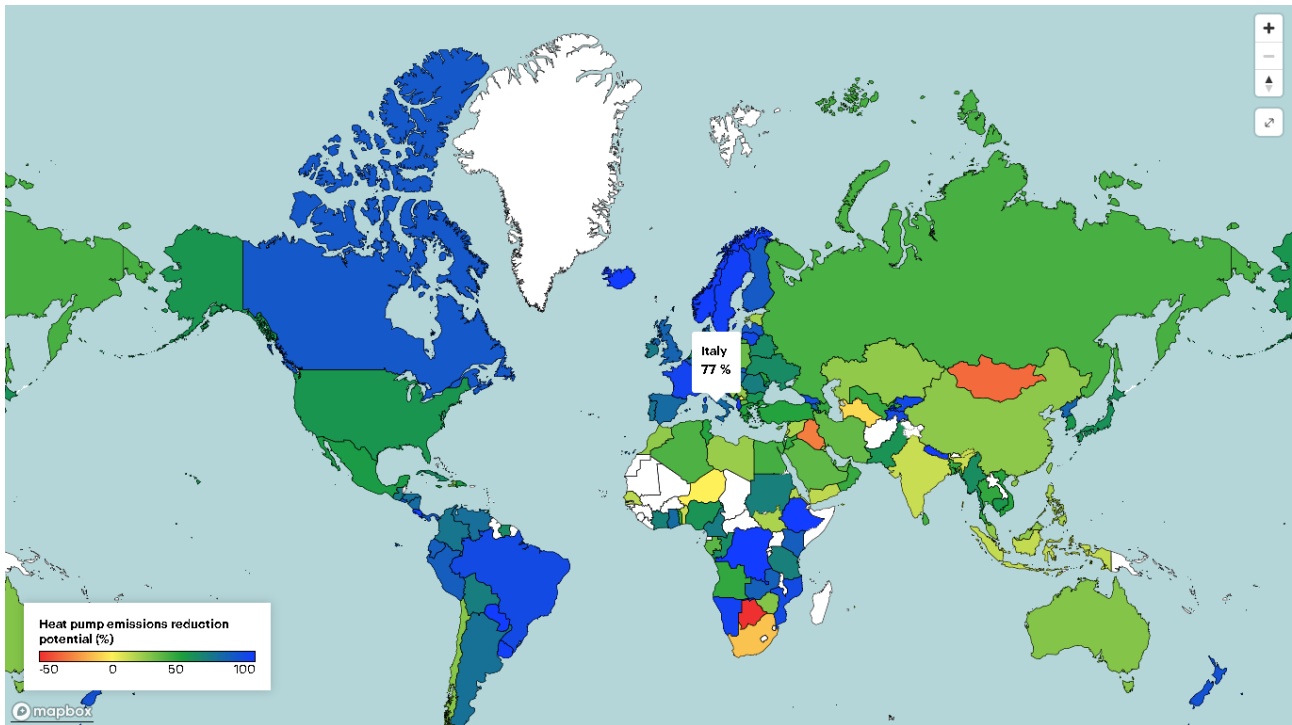


Figura 8. Potenziale di riduzione delle emissioni di anidride carbonica, al 2020, della pompa di calore ad aria rispetto alla caldaia a condensazione con focus Italia [39]

Riprendendo l'estensione dell'analisi comparativa ed, in particolare, il concetto per il quale non c'è linearità fra la variazione dello SCOP e l'andamento degli output, nel senso che i maggiori miglioramenti delle prestazioni energetiche ed ambientali si ottengono per valori dello SCOP nella forchetta [2 ÷3], emerge che risulta importante un'attenta analisi costi-benefici ai fini della scelta delle caratteristiche tecniche della tecnologia che devono rispondere al compromesso ottimale fra buone prestazioni ed esborsi abbinati accettabili. Oltre all'analisi dei costi di esercizio, per valutare il vantaggio economico della tecnologia, si devono considerare anche tutte le altre spese da sostenere per l'intero ciclo di vita utile della macchina, compreso l'investimento, la manutenzione ed eventuali incentivi. Come parametro di riferimento, si considera il massimo costo aggiuntivo che fornisce un'indicazione quantitativa della convenienza economica della tecnologia. Trattasi della spesa addizionale, rispetto ai costi di capitale, a cui può essere acquistata una tecnologia alternativa ad una di riferimento, a titolo esemplificativo la pdc rispetto alla caldaia, tale da garantire un risparmio alla fine della vita operativa della pdc. In altri termini, il risparmio sui costi annuali di esercizio conseguito con la tecnologia alternativa deve consentire di compensare e recuperare il maggiore investimento entro la vita utile della macchina, fissata, convenzionalmente, in 15 anni. Trattandosi per il massimo costo aggiuntivo di un elemento di confronto, se assume valore positivo significa che la tecnologia alternativa, rispetto a quella di riferimento, risulta economicamente vantaggiosa [37].

4 Il set di incentivi disponibili per la tecnologia a pompa di calore

Lo Stato Italiano conferisce impulso all'impiego della tecnologia a pdc ai fini del conseguimento degli obiettivi di efficienza energetica, adozione di fonti rinnovabili e decarbonizzazione mettendo a disposizione un cospicuo set di meccanismi incentivanti (Figura 9). Sostanzialmente, in relazione all'installazione di pdc negli edifici, trattasi di:

- ✓ Ecobonus;
- ✓ Superbonus 110%;
- ✓ Bonus casa;
- ✓ Conto termico.

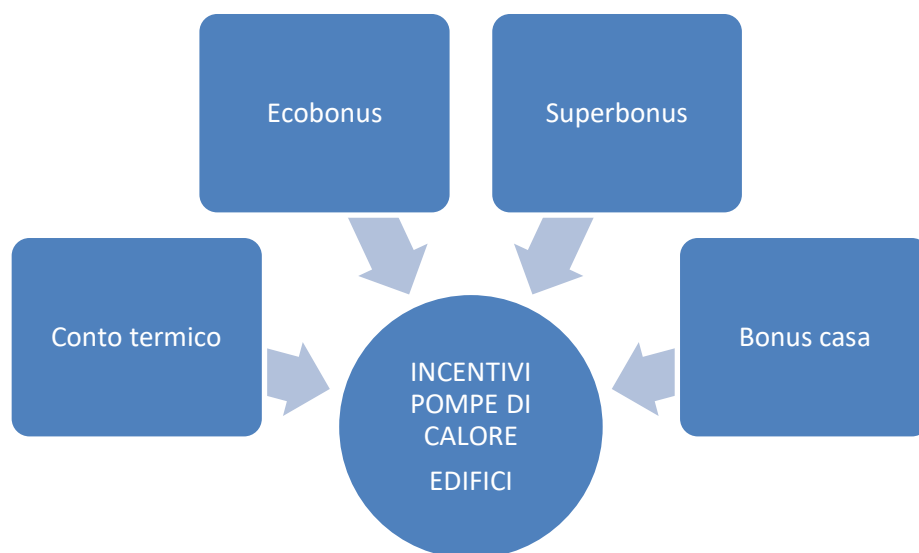
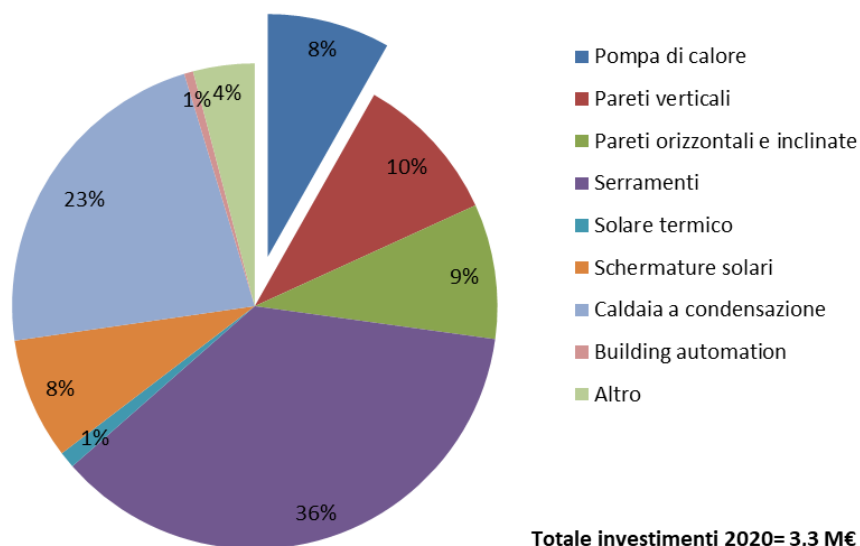


Figura 9. Set di incentivi per le pompe di calore

4.1 L'Ecobonus - focus: pompe di calore

Le detrazioni fiscali (Ecobonus) come misura incentivante per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente vengono introdotte con la Legge 296/2006 [40]. Di conseguenza a partire dal 2007, l'ENEA monitora la misura attraverso un portale dedicato nel quale risultano registrati: l'anagrafica degli utenti, i dati dell'immobile e le specifiche tecniche degli interventi realizzati. L'incentivo si configura nella detrazione fiscale di una percentuale delle spese sostenute e rimaste a carico del contribuente che viene ripartita in più quote annuali di pari importo [41].

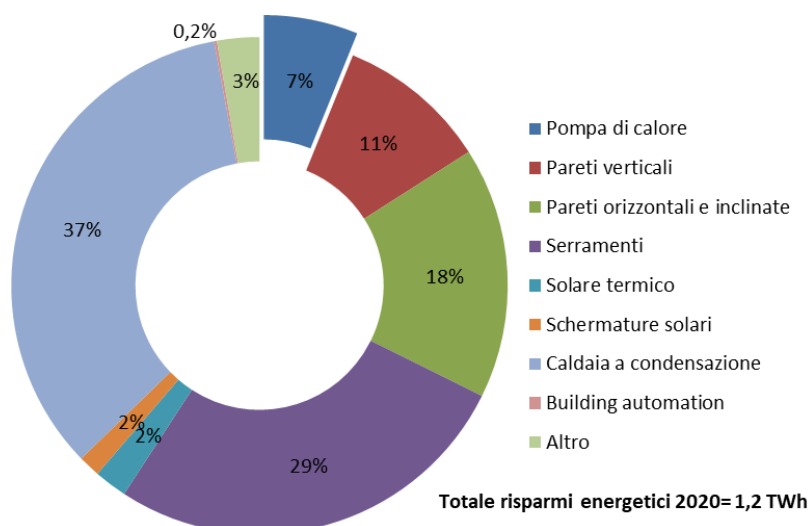
Per tutte le informazioni sull'Ecobonus, si può accedere al sito dell'Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica di ENEA [42].



Altro: Impianti geotermici, impianti a biomassa, scaldacqua a pdc per ACS, generatori di aria calda, micro-cogeneratori e sistemi ibridi

Figura 10. Ecobonus 2020 - Investimenti attivati in funzione della tecnologia (Rielaborazione da [41])

Per quanto riguarda i risultati conseguiti al 2020 dall'Ecobonus, si mostra la ripartizione percentuale degli investimenti attivati in funzione della tecnologia (Figura 10). In particolare, le pdc si attestano all'8% (0,26 milioni di euro) del totale investito pari a 3,3 milioni di euro (la quota-parte degli scaldacqua a pdc viene considerata trascurabile ad accorpata ad altre tecnologie alla voce "altro").



Altro: Impianti geotermici, impianti a biomassa, scaldacqua a pdc per ACS, generatori di aria calda, micro-cogeneratori e sistemi ibridi

Figura 11. Risparmi energetici conseguiti in funzione della tecnologia (Rielaborazione da [41])

In relazione ai risparmi energetici conseguiti a mezzo Ecobonus al 2020 (Figura 11) le pdc si attestano al 7% (84 MWh) del risparmio complessivo pari a 1,2 TWh (la quota-parte degli scaldacqua a pdc viene considerata trascurabile ad accorpata ad altre tecnologie alla voce "altro").

Gli interventi incentivabili con l’Ecobonus vengono classificati tramite i commi della [40]. In particolare, le pdc possono rientrare negli interventi anche multipli di riqualificazione globale, ossia che riguardano congiuntamente l’intero sistema edificio-impianto (comma 344) oppure negli interventi relativi all’impianto di climatizzazione invernale (comma 347).

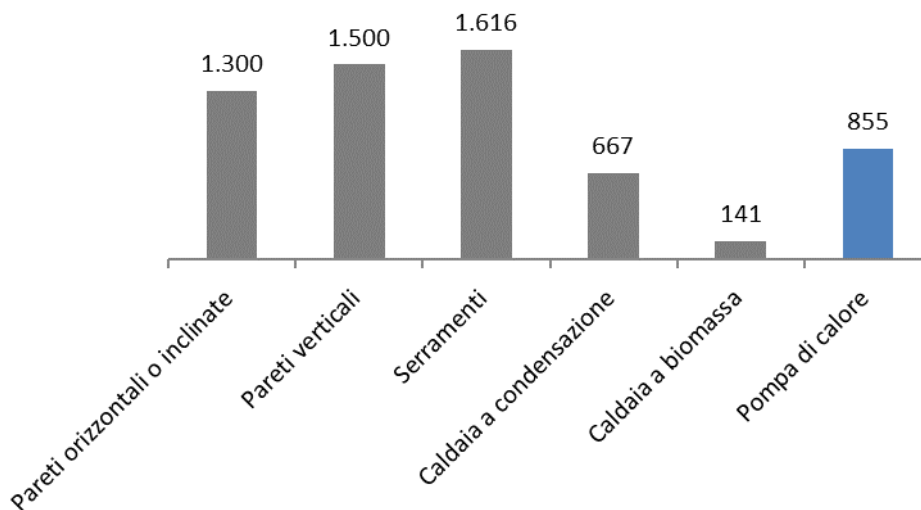


Figura 12. Ecobonus 2020 – Numerosità di interventi di riqualificazione globale in funzione di componenti di involucro/tecnologia (Rielaborazione da [41])

Si mostra la numerosità di interventi incentivati inerenti alla riqualificazione globale (comma 344) al 2020. In particolare, per le pdc, 855 interventi beneficiano dell’Ecobonus (Figura 12).

Mentre, per quanto riguarda gli interventi relativi all’impianto di climatizzazione invernale (comma 347) al 2020, per le pdc si evince un numero maggiore rispetto a quelli del comma 344. Trattasi, nello specifico, di un accesso all’Ecobonus per 49.606 interventi relativi all’installazione di pdc per espletare il servizio di riscaldamento e 3.053 interventi connessi all’impiego di pdc per la produzione di ACS (Figura 13).

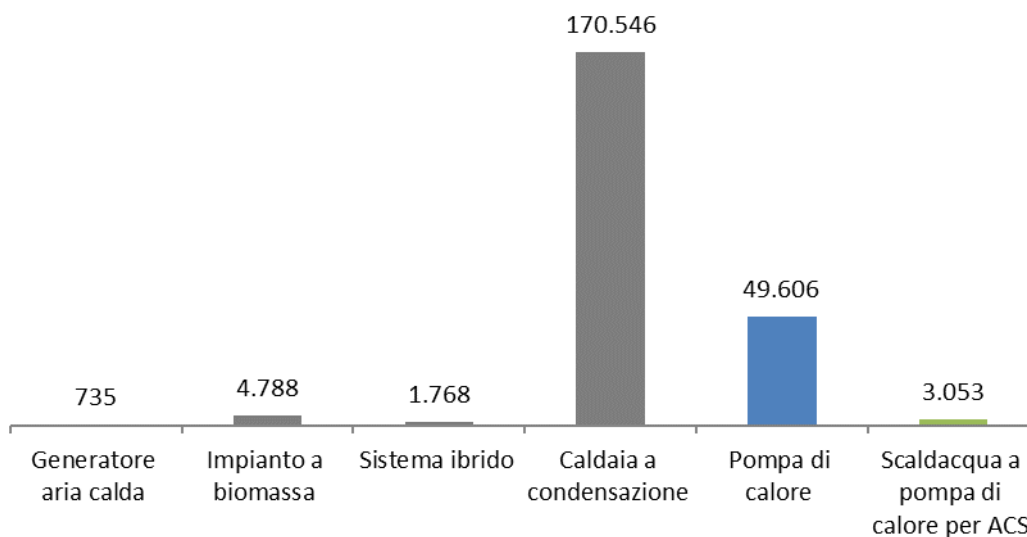


Figura 13. Ecobonus 2020 – Numerosità di interventi riferiti alla climatizzazione invernale in funzione della tecnologia (Rielaborazione da [41])

In ultimo, in relazione alla numerosità degli interventi con accesso all'Ecobonus al 2020 riferiti alle pdc (esclusi gli scaldacqua a pdc), la Figura 14 rappresenta la ripartizione regionale. Si evince la preponderanza di Lombardia (6.728), Sicilia (4.938) e Lazio (4.891).

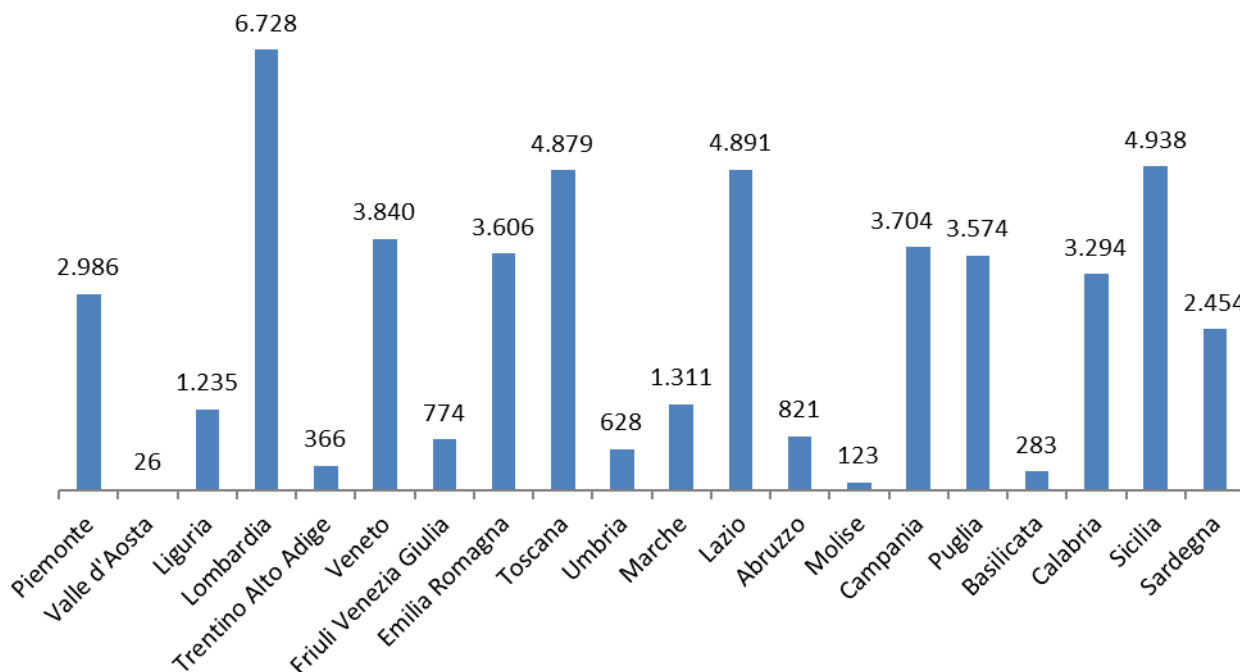


Figura 14. Ecobonus 2020 - Ripartizione regionale della numerosità di interventi riferiti alle pompe di calore esclusi scaldacqua (Rielaborazione da [41])

4.2 Il Superbonus 110% - focus: pompe di calore

La CE spinge gli Stati Membri ad incrementare la riqualificazione energetica degli edifici esistenti per contribuire all'attuazione del processo di decarbonizzazione e, contemporaneamente, fornire impulso all'economia colpita dalla pandemia. Il Governo italiano, tra le misure varate, ha emanato, nel maggio 2020, il provvedimento Superbonus per contribuire al raggiungimento dei target fissati per il settore edilizio in tema di efficienza energetica e risollevere l'economia italiana colpita dalla pandemia e, nello specifico, rilanciare il comparto edilizio. Il Superbonus nasce con il Decreto Legge 34/2020 (Decreto Rilancio) [43] e consiste nella detrazione fiscale del 110% delle spese sostenute e rimaste a carico del contribuente per gli interventi di efficienza energetica e/o miglioramento sismico. Gli interventi di efficienza energetica che accedono al Superbonus si inquadrano all'interno della normativa relativa all'Ecobonus con alcune specifiche contenute nell'art. 119 del [43]. Gli immobili interessati sono gli edifici condominiali, gli edifici unifamiliari e le unità immobiliari situate all'interno di edifici plurifamiliari che siano funzionalmente indipendenti e dispongano di uno o più accessi autonomi dall'esterno. Con la stessa logica dell'Ecobonus sono ammessi alle detrazioni fiscali del 110% gli interventi sull'involucro e sugli impianti e vengono distinti in interventi trainanti e trainati. Gli interventi trainanti sono di due tipi, il primo riguarda l'involucro e trattasi della coibentazione delle sole strutture opache racchiudenti il volume riscaldato, il secondo inerisce l'impianto di climatizzazione. L'art. 119 del [43] prevede che la percentuale di detrazione del 110% si applichi anche a tutti gli altri interventi di efficientamento energetico contemplati dall'Ecobonus, a condizione che siano eseguiti congiuntamente ad almeno uno degli interventi trainanti [41].

Per ogni delucidazione sul Superbonus, si può consultare il sito dell'Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica di ENEA [42].

In relazione ai risultati conseguiti dal Superbonus con focus pdc a settembre 2021, la Figura 15 mostra il numero di interventi trainanti incentivati in funzione della tipologia di immobile interessata e della specificità della tecnologia, ossia: pdc elettrica, pdc ad assorbimento e scaldacqua a pdc.

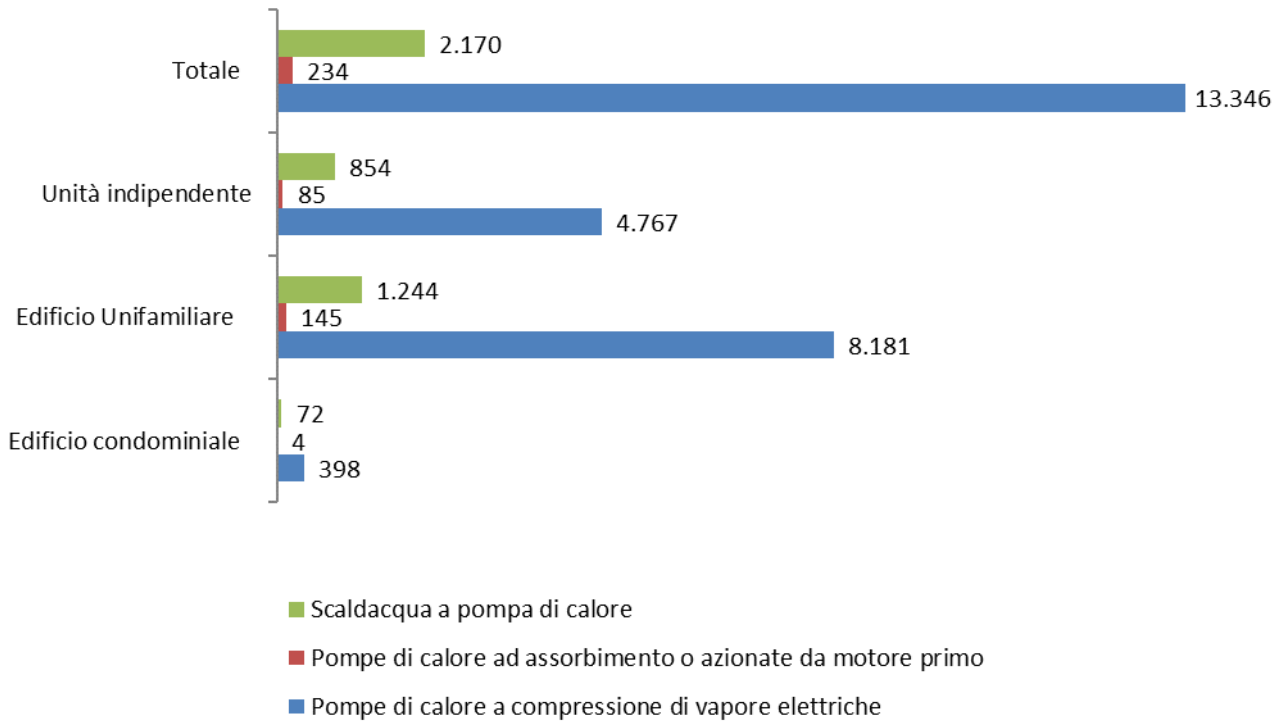


Figura 15. Superbonus 2021 – Numerosità di interventi trainanti in funzione delle tipologie di immobili e di pompa di calore (Rielaborazione da [41])

Si evidenzia che il numero maggiore di installazioni (8.181) coinvolge le pdc a compressione di vapore elettrica negli edifici unifamiliari. Il dato complessivo mostra una netta dominanza delle pdc elettriche (13.346 interventi).

Mappando tutte le tecnologie incentivate con il Superbonus, si sottolinea che i principali interventi trainanti relativi agli impianti riguardano i sistemi ibridi e le pdc elettriche.

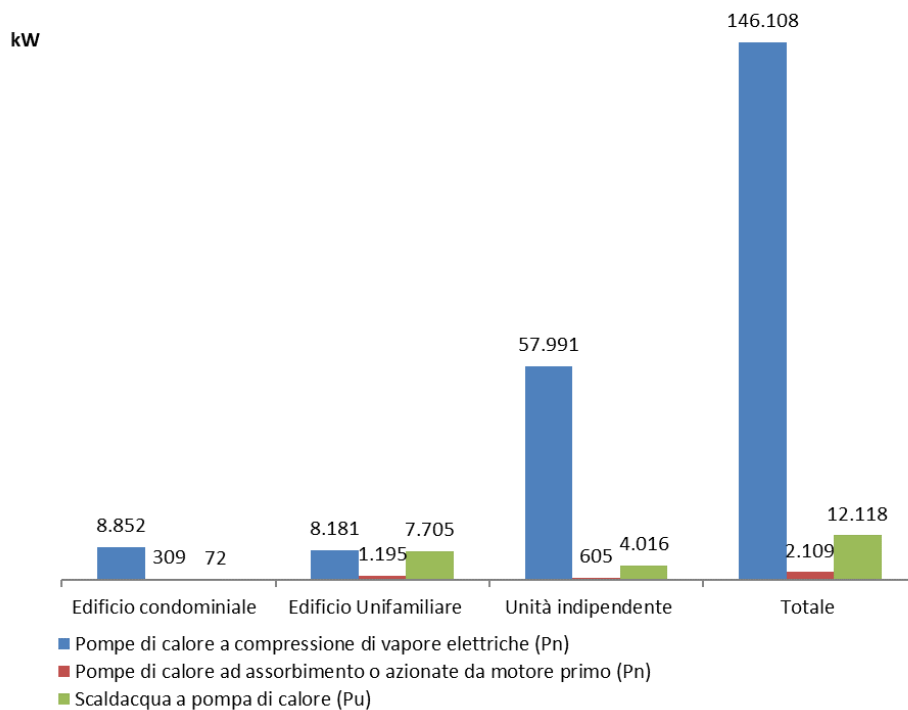


Figura 16. Superbonus 2021 – Potenza incentivata in funzione delle tipologie di immobili e di pompa di calore. Interventi trainanti (Rielaborazione da [41])

La Figura 16 mostra la potenza nominale complessiva per le pdc elettriche e quelle ad assorbimento e la potenza utile totale per gli scaldacqua a pdc delle installazioni con accesso al Superbonus come interventi trainanti. Complessivamente, in termini di potenza nominale, le pdc elettriche raggiungono 146 MW a fronte di circa 2 MW di quelle ad assorbimento, mentre come potenza utile totale, gli scaldacqua a pdc si attestano a 12 MW.

In relazione al numero di interventi trainati relativi alle parti comuni di edifici condominiali con focus pdc (Figura 17), si tratta di 10 installazioni riferite a pdc elettriche e 26 a scaldacqua a pdc, rispettivamente, per una potenza nominale totale pari a 409 kW ed una potenza utile complessiva uguale a 114 kW (Figura 18).

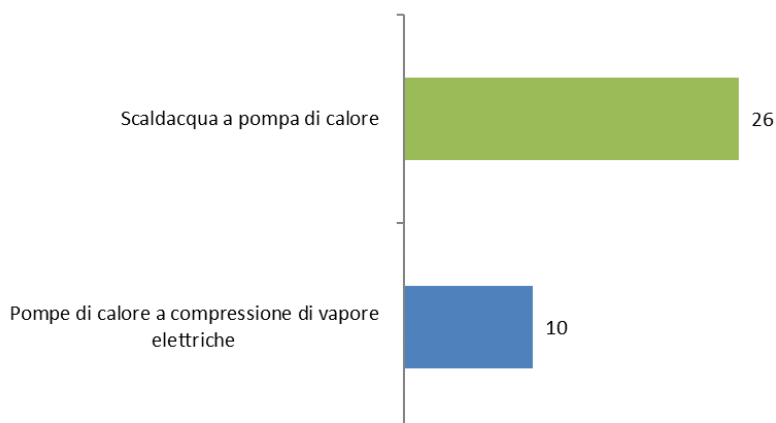


Figura 17. Superbonus 2021 – Numerosità di interventi trainati in funzione della tipologia di pompa di calore. Target: parti comuni di condomini (Rielaborazione da [41])

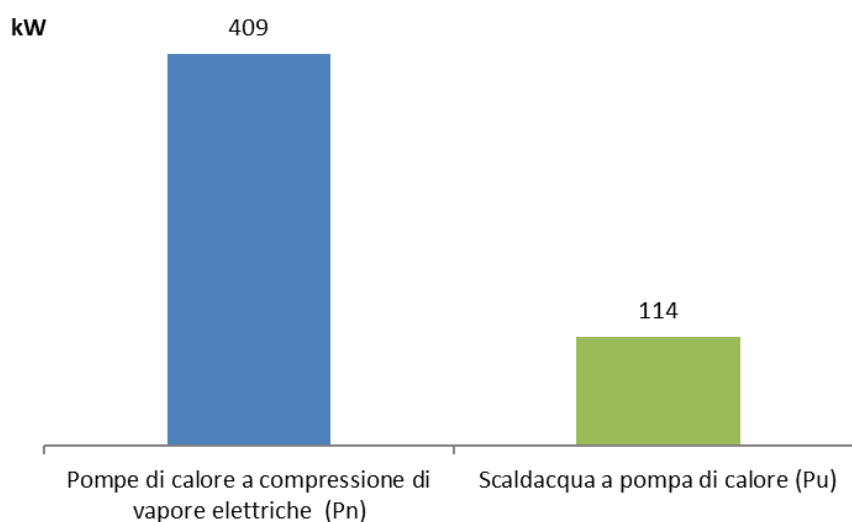


Figura 18. Superbonus 2021- Potenza incentivata in funzione della tipologia di pompa di calore. Interventi trainati, target: parti comuni di condomini (Rielaborazione da [41])

4.3 Il Bonus casa – focus: pompe di calore

A partire dal 2018, viene affidato ad ENEA anche il compito di monitorare, con apposito sito, gli interventi ammessi alle detrazioni fiscali previste per le ristrutturazioni edilizie quando essi comportano risparmio di energia primaria da fonte fossile e utilizzo delle fonti rinnovabili di energia (Bonus Casa). Il primo riferimento normativo sull’incentivo è dato dall’art. 16- bis (in vigore dal primo gennaio 2012) del Testo Unico delle Imposte sui Redditi [44].

Per avere un quadro completo sul Bonus casa, si può accedere al sito dell’Agenzia Nazionale per l’Efficienza Energetica di ENEA [42].

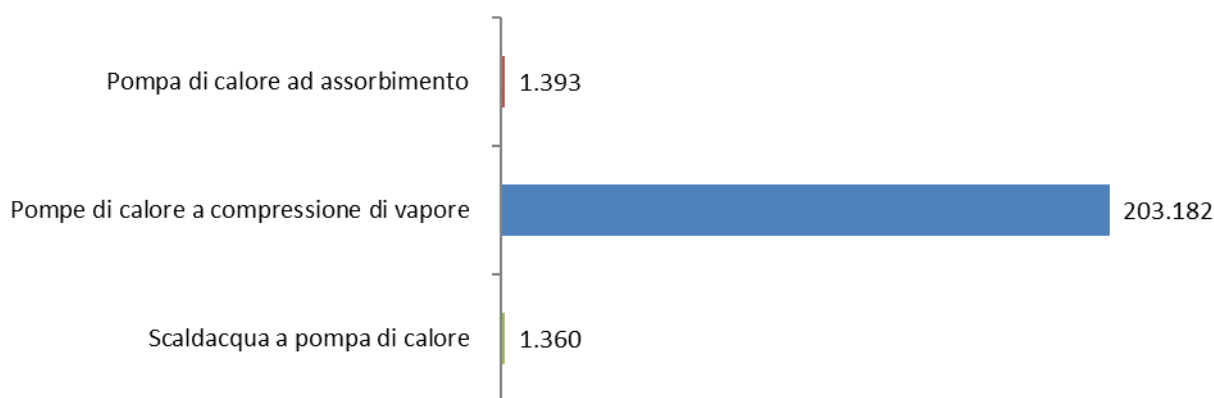


Figura 19. Bonus casa 2020 – Numerosità di interventi in funzione della tipologia di pompa di calore (Rielaborazione da [41])

La Figura 19 mostra il numero di interventi incentivati, a mezzo Bonus casa, al 2020, con focus pdc. Dominano le Pdc elettriche (203.182) per una potenza totale installata pari a 939 MW (Figura 20).

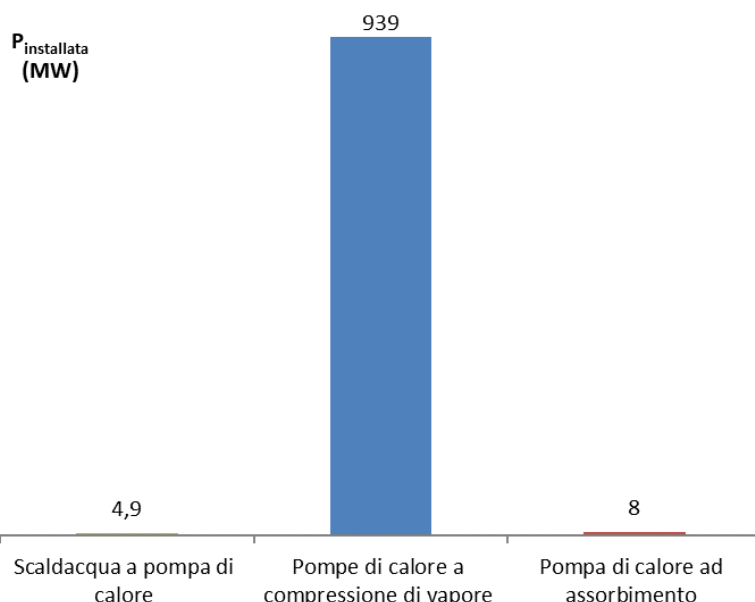


Figura 20. Bonus casa 2020 – Potenza installata in funzione della tipologia di pompa di calore (Rielaborazione da [41])

Per quanto riguarda il risparmio energetico conseguito, al 2020, dalla tecnologia a pdc (pdc elettriche, pdc ad assorbimento e scaldacqua a pdc) con accesso al Bonus casa, trattasi di oltre 274 GWh/anno (35%) a fronte di un risparmio complessivo riferito a tutte le tecnologie incentivate di circa 782 GWh/anno (Figura 21).

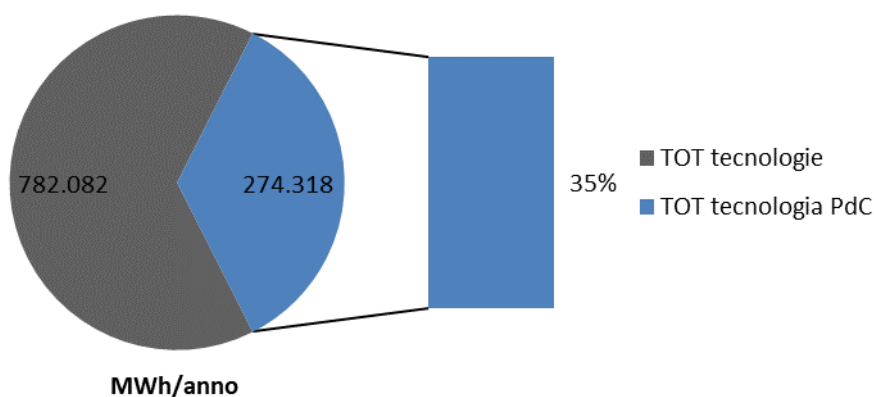


Figura 21. Bonus casa 2020 – Risparmio energetico conseguito dalle pompe di calore. (Rielaborazione da [41])

La Figura 22 mostra il numero di interventi con accesso al Bonus casa, al 2020, relativi all’installazione di pdc (esclusi gli scaldacqua a pdc) ripartiti per Regione. In analogia all’Ecobonus, prevale la Lombardia (60.188) ma la seconda e la terza posizione variano rispetto all’Ecobonus, infatti, la Sicilia e il Lazio cedono il posto all’Emilia Romagna (29.618) e al Veneto (28.636).

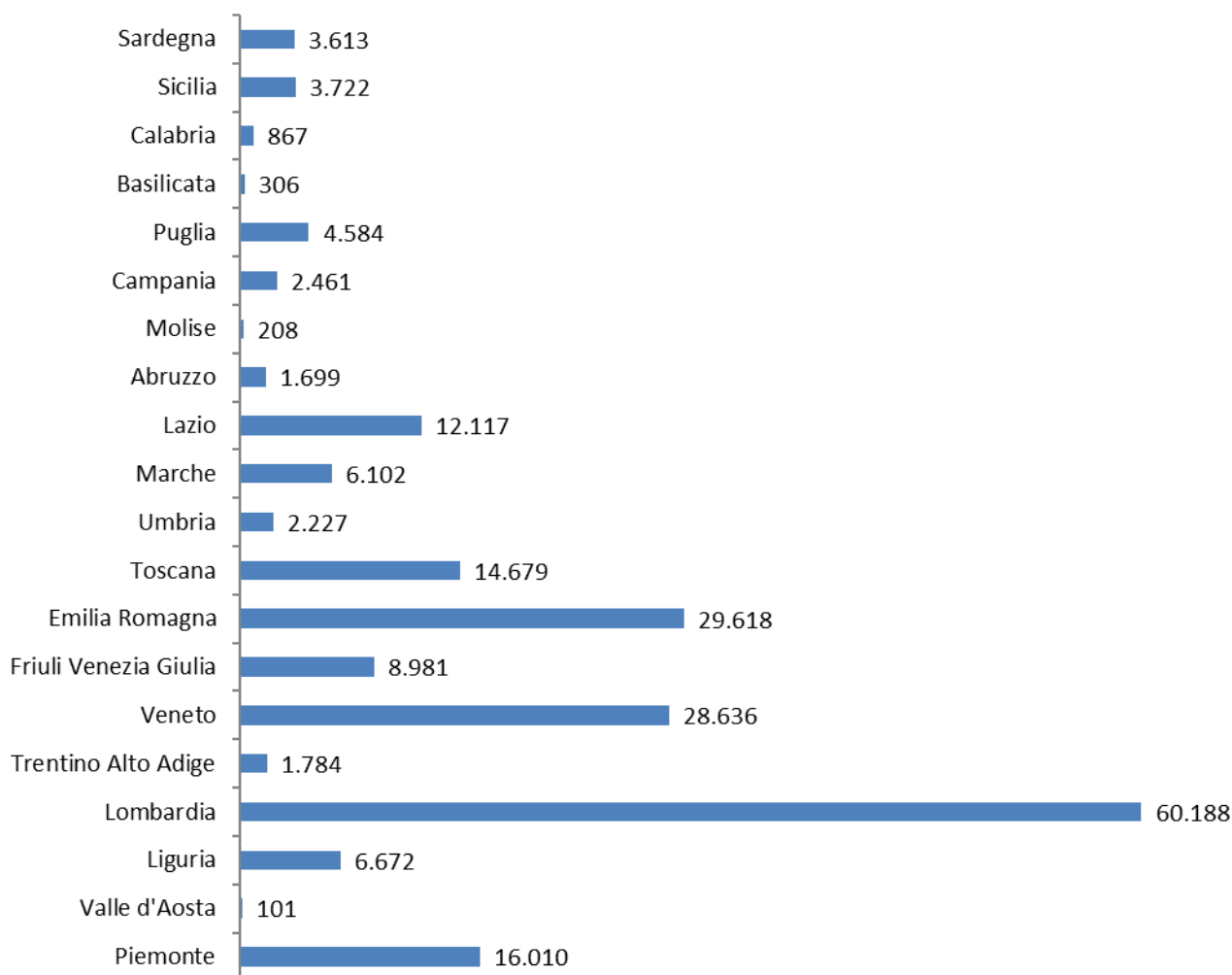
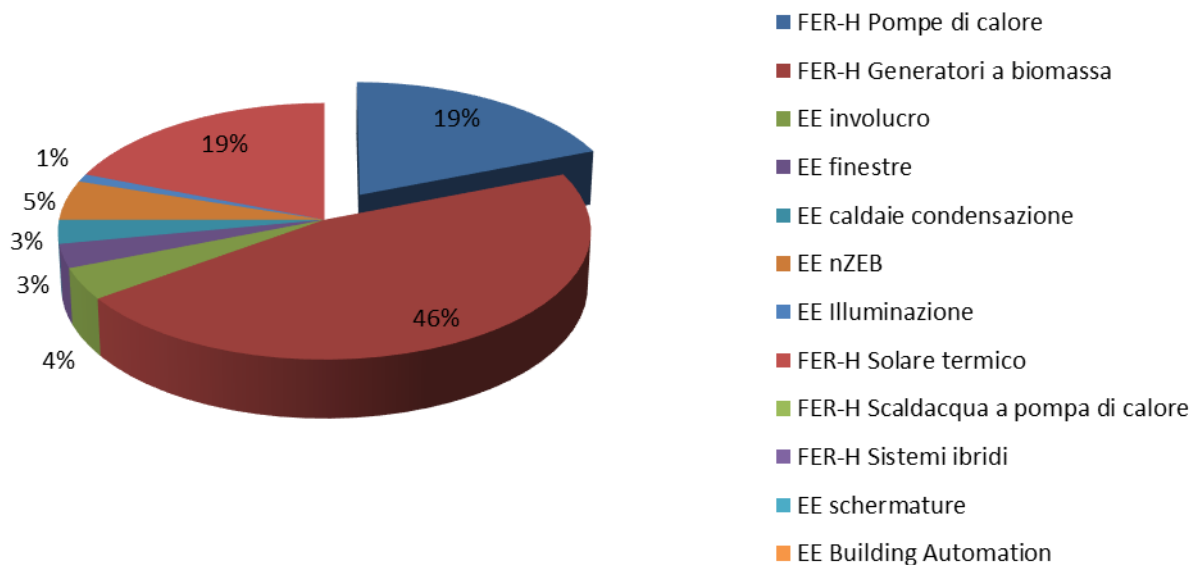


Figura 22. Bonus casa 2020 – Ripartizione regionale della numerosità di interventi riferiti alle pompe di calore esclusi scaldacqua (Rielaborazione da [41])

4.4 Il Conto termico-focus: pompe di calore

Il conto termico è lo strumento che lo Stato Italiano ha messo in campo per l’incentivazione di interventi di piccole dimensioni, per l’incremento dell’efficienza energetica e/o per la produzione di energia termica da fonti energetiche rinnovabili e con sistemi ad alta efficienza. Il quadro regolatorio del meccanismo incentivante è contenuto nel Decreto del Ministero dello Sviluppo Economico del 16 febbraio 2016 [45]. Per tutti gli approfondimenti, si può consultare il sito del Gestore dei Servizi Energetici [46].



Totale incentivo= 296,5 M€

Figura 23. Conto termico 2020 – Incentivo erogato in funzione della tecnologia (Rielaborazione da [47])

La Figura 23 mostra l'aliquota percentuale di incentivo erogato in funzione della tecnologia al 2020. A fronte di un supporto economico complessivo pari a 296,5 milioni di euro garantito dal Conto termico, le pdc attingono ad una fetta cospicua pari al 9%, ossia a circa 56 milioni di euro (la quota-parte degli scaldacqua a pdc viene considerata trascurabile insieme ai sistemi ibridi, alle schermature e alla Building Automation).

La Figura 24 rappresenta la ripartizione regionale, al 2020, del numero di interventi supportati dal Conto termico e riferiti alle pdc (esclusi gli scaldacqua a pdc) aventi come soggetto beneficiario dell'incentivo la Pubblica Amministrazione. Si evince un rilevante numero di installazioni incentivate in Sicilia (6.436), le altre Regioni non raggiungono neppure la metà del dato siciliano.

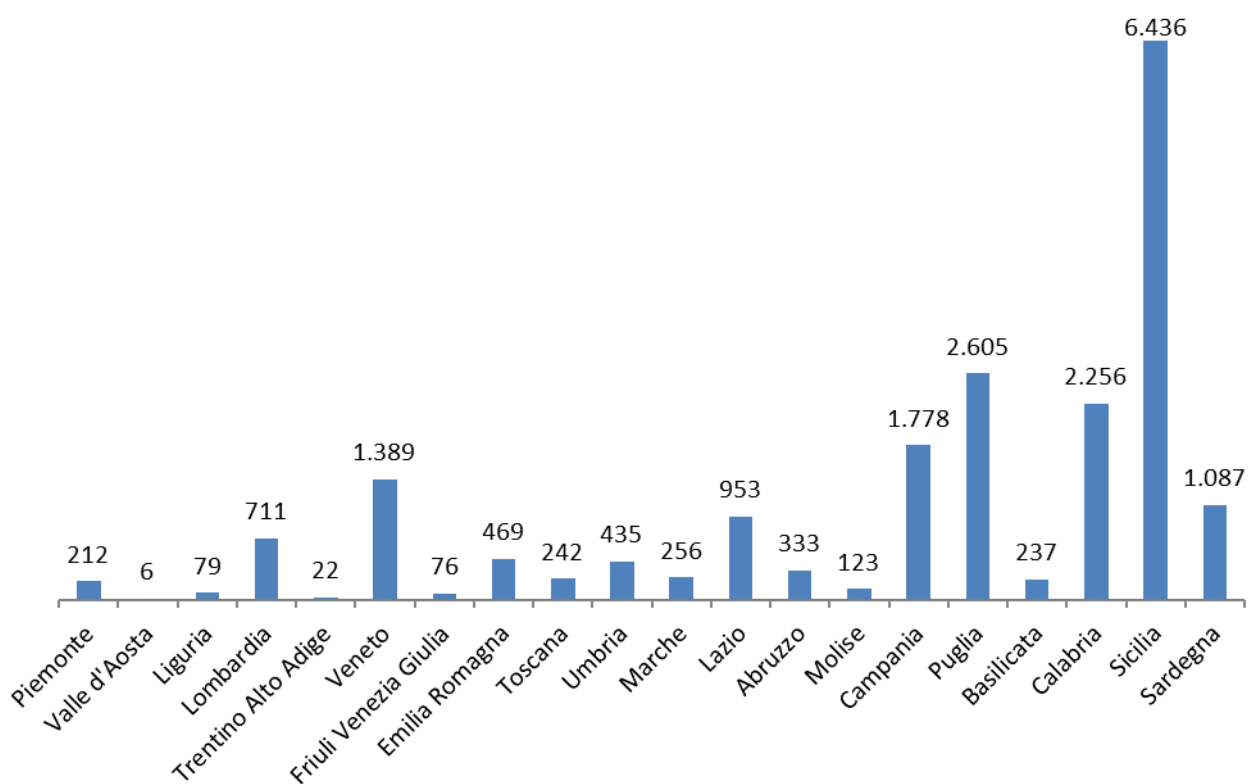


Figura 24. Conto termico 2020 – Ripartizione regionale della numerosità di interventi riferiti alle pompe di calore esclusi scaldacqua (Rielaborazione da [47])

Dalla panoramica tracciata, si evince che per la tecnologia a pdc risulta disponibile un ampio ventaglio di meccanismi incentivanti, di modo da poter catturare l'opzione adatta in funzione del contesto, delle esigenze e degli obiettivi.

5 I sistemi di monitoraggio come strumento tecnico per la misura della prestazione energetica delle pompe di calore

Come accade per ogni prodotto reperibile sul mercato, anche per le pompe di calore risulta necessario indicarne in maniera chiara ed univoca le prestazioni, non solo per orientare le scelte commerciali, ma anche per poter confrontare le macchine a beneficio dell'utente finale. Occorre dunque normare, su basi condivise, le modalità con cui misurare le prestazioni delle pdc.

Per questo motivo, numerosi sono gli standard e le norme che sono state emanate, a livello internazionale, per disciplinare il settore.

In Tabella 4 sono riportati gli standard europei. Si evince che ci sono norme relative alla terminologia da adottare sulle delle pompe di calore, di modo da garantire l'incontrovertibilità nel trasferimento delle informazioni ma anche norme che disciplinano le condizioni di prova attraverso cui effettuare i test per la misura delle loro prestazioni, sia a pieno carico che a carico parziale; ci sono norme relative all'etichetta energetica, o ai requisiti per l'applicazione della direttiva EPBD o, ancora, relative alla progettazione di un impianto servito da pdc.

Tali normative offrono un quadro piuttosto complesso ed articolato, a cui i Paesi Membri si rifanno per le disposizioni nazionali. Sempre in Tabella 4, ad esempio, sono anche indicate anche quali normative sono recepite in Italia.

A livello europeo, infatti, la necessità di un uso efficiente dell'energia e di riduzione delle emissioni inquinanti sta portando alla promulgazione di una serie di Direttive, alcune delle quali, come noto, hanno già subito emendamenti e rielaborazioni.

Ad esempio, la Direttiva EPDB fissa gli obiettivi di efficienza negli edifici e nei relativi impianti tecnici. Lo scopo è rendere ogni edificio fruibile con un livello di comfort standard impiegando la minor quantità possibile di energia primaria non rinnovabile e producendo basse quantità di gas climalteranti. Requisiti minimi e classi energetiche sono fondate sulla descrizione reale dell'edificio con un clima standard della reale localizzazione e su un uso standard. La direttiva EPBD include sia i requisiti minimi che la modalità di visualizzazione (il certificato energetico dell'edificio) affinché l'utente finale sia messo a conoscenza della performance energetica.


Le Direttive ErP (Energy Related Product) e di ecolabelling estendono i requisiti minimi di efficienza energetica ai prodotti immessi nel mercato europeo. Le regole Ecodesign definiscono i requisiti dei prodotti efficienti, mentre le regole Ecolabelling definiscono le caratteristiche di visualizzazione del livello di efficienza dei prodotti affinché i consumatori possano riconoscerne il valore aggiunto.

I requisiti minimi dei prodotti si basano sulle loro caratteristiche in condizioni di uso medie standardizzate. Sebbene tali Direttive abbiano scopi simili ed ambiziosi, il coordinamento e l'armonizzazione delle stesse non sono sempre agevoli. Sussistono sovrapposizioni, e gli stakeholder cambiano, evidenziando criticità di coordinamento. Pertanto, vi è un grande sforzo a livello europeo per garantire la coerenza e coprire, in maniera razionale, l'intero tema dell'uso di energia in Europa.

Ad esempio, l'EPDB e l'ErP condividono lo stesso punto di partenza (ovvero, il prodotto), e in entrambe è richiesto un calcolo o una valutazione basata sulle proprietà del prodotto; tuttavia, l'approccio è piuttosto differente.

Tabella 4. Quadro sinottico degli standard europei sulle pompe di calore

Àmbito di applicazione	Numero	Titolo	Validità in Italia
Basic product standard	EN 14511	Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors Part 1: terms and definitions Part 2: test conditions Part 3: test methods Part 4: requirements	
	EN 16147	Heat pumps with electrically driven compressors – testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water unit	
	EN 15879	Testing and rating of direct exchange ground coupled heat pumps with electrically driven compressors for space heating and/or cooling Part 1: direct exchange-to-water heat pumps Part 2: Water(brine)-to-direct exchange and direct exchange-to-direct exchange heat pumps (draft)	
	EN 12309	Gas-fired sorption appliances for heating and/or cooling with a net heat input not exceeding 70 kW Part 1: terms and definitions (under review) Part 2: safety Part 3: test conditions Part 4: test methods Part 5: requirements Part 7: specific provisions for hybrid appliances	
	EN 16905	Gas-fired endothermic engine driven heat pumps Part 1: Terms and definitions Part 2: safety (under review) Part 3: Test conditions Part 4: test methods (under review)	
EPBD application	EN 15316-4-2	Energy performance of buildings – Methods for calculation of system energy requirements and system efficiencies Part 4-2: Space heating generation systems, heat pump systems. Module M3-8-2, M8-8-2	
ErP (Ecodesign and Ecolabeling)	EN 14825	Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling, commercial and process cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance	
	EN 16147	Heat pumps with electrically driven compressors – Testing, performance rating and requirements for marking of domestic hot water units	
	EN 12309	Gas-fired sorption appliances for heating and/or cooling with a net heat input not exceeding 70 kW Part 6: Calculation of seasonal performances	
	EN 16905	Gas-fired endothermic engine driven heat pumps Part 5: calculation of seasonal performances in heating and cooling mode	

System design	EN 15450	Heating systems in buildings – design of heat pump heating systems	
----------------------	----------	--	---

È evidente come l’impianto normativo, che mira a fare chiarezza nel settore, disciplinandolo, è il risultato di contesti, esigenze ed obiettivi differenti la cui conciliazione può essere ostica.

Per quanto concerne le caratteristiche prestazionali delle pdc, è piuttosto complesso fornire informazioni univoche all’utente finale, ma anche al progettista ed all’installatore.

E’ inoltre da segnalare che è emersa, a livello internazionale, la necessità di disporre di una sorta di database delle prestazioni dei sistemi di Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration (HVAC&R), che possa facilitare la condivisione delle caratteristiche e delle performance, definendo modelli di dati ma anche formati di serializzazione dei dati. Per questo scopo, ad esempio, è nato l’ASHRAE Standard 205P(Representation of Performance data for HVAC&R and Other Facility Equipment) [48] che mira a realizzare, attraverso formati preimpostati, tale database focalizzando l’attenzione sulle simulazioni energetiche (Figura 25).

Il formato concepito permette lo scambio automatico di dati provenienti direttamente dai produttori delle pompe di calore, dai modelli di simulazione, e da altre applicazioni dell’ingegneria, raccogliendo dunque le competenze, esperienze e professionalità di quanti operano e gravitano intorno al mondo delle pdc.

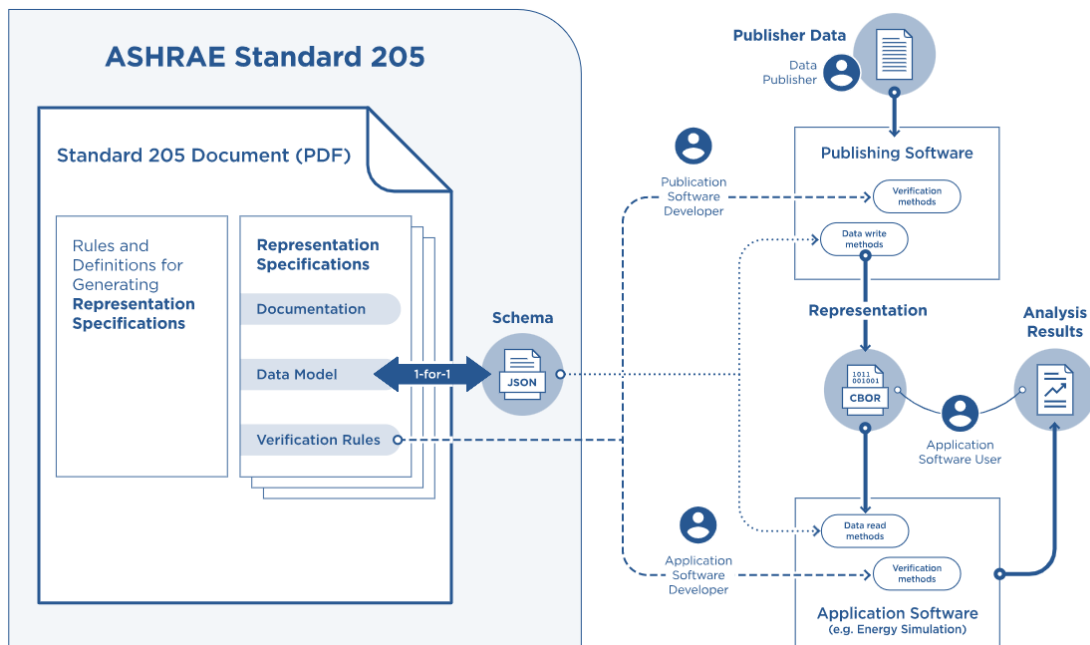


Figura 25. Flow chart di implementazione dei requisiti dell’ASHRAE Standard 205 (immagine tratta da [48])

Del resto, come noto, le prestazioni di una pompa di calore sono influenzate da numerosi fattori quali: le condizioni di esercizio, ovvero le temperature delle sorgenti termiche di scambio, il fattore di carico, e le modalità di utilizzo e regolazione (on-off, modulante), come pure l’eventuale necessità di defrosting.

Tener conto, soprattutto nelle simulazioni, dell’effetto combinato dei vari fattori coinvolti è estremamente difficile. Per questo motivo, risultano fondamentali i monitoraggi in campo delle prestazioni operative.

Come già richiamato nella precedente annualità, occorre strumentazione adeguata, un follow-up in fase di installazione e di monitoraggio, ma anche saper “leggere” i dati acquisiti attraverso la più opportuna scala temporale, in base alle informazioni e caratteristiche che si intendono ottenere (Figura 26).

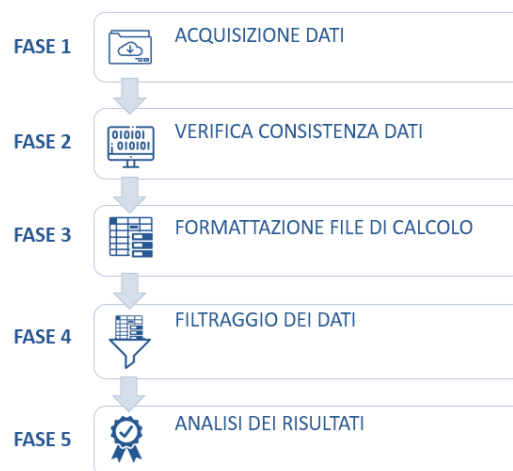


Figura 26. Flow chart del monitoraggio di una pompa di calore

I monitoraggi degli impianti, e nello specifico delle pompe di calore, sono dunque uno strumento tecnico imprescindibile per la misura delle prestazioni operative.

Infatti, in laboratorio non è possibile riprodurre le condizioni operative che invece si manifestano sul campo, in ragione proprio dell'esercizio dell'impianto.

6 Mappe di brinamento: aspetti tecnici e metodologici

Le mappe di brinamento sono grafici che rappresentano, al variare della temperatura e dell'umidità dell'aria che lambisce la sezione dello scambiatore di una pompa di calore, le condizioni in cui si verifica la formazione di brina e ghiaccio sulla superficie dello scambiatore stesso. Tale fenomeno, dettagliato nel seguito, prende il nome di frosting (brinamento) ed è particolarmente impattante per le pdc causandone un cattivo funzionamento e una riduzione dell'efficienza.

6.1 Frosting e defrosting nelle pompe di calore

Quando una pompa di calore aerotermica (quindi aria-aria o aria-acqua) opera in regime invernale, fornendo riscaldamento all'ambiente interno, il calore latente di evaporazione - necessario al passaggio di fase del liquido frigorifero - è sottratto dall'ambiente esterno (in cui si trova l'evaporatore stesso), comportando l'abbassamento della temperatura dell'aria che lambisce la batteria di scambio dell'evaporatore.

L'aria, tuttavia, presenta un contenuto di acqua in fase vapore, misurato attraverso l'umidità specifica (x), che esprime quanti grammi di vapore d'acqua sono contenuti in 1 kg di aria secca. Questa è calcolabile nota la pressione del vapore p_v e la pressione ambiente p mediante l'equazione 1:

$$x = 0,622 * \frac{p_v}{p - p_v} \quad (1)$$

Il contenuto di vapore d'acqua può essere messo in relazione con il contenuto massimo che l'aria può contenere (corrispondente alla pressione di saturazione); il rapporto tra la pressione del vapore e la pressione di saturazione p_{sat} esprime, in percentuale, l'umidità relativa.

$$UR [\%] = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (2)$$

Nel momento in cui si riduce la temperatura dell'aria che lambisce lo scambiatore, cresce l'umidità relativa senza che vi sia variazione della quantità di vapore d'acqua (ovvero, a parità di umidità specifica), fino a raggiungere il valore del 100% (condensazione), cui corrisponde la temperatura di rugiada (dew point). Quando la temperatura della superficie dello scambiatore è inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria, dunque, il vapore acqueo presente nell'aria tende a condensare sulla superficie stessa e, in seguito, quando la temperatura della superficie della batteria di scambio diviene inferiore a 0 °C, l'acqua che precedentemente si era condensata tende a solidificare, formando brina e ghiaccio. Si parla in questi casi di *brinamento* o *frosting*, un fenomeno piuttosto complesso dal momento che riguarda scambi di calore, che a loro volta risultano influenzati dallo spessore del ghiaccio (e dalle sue caratteristiche fisiche, come la densità, la porosità, ...), dalle caratteristiche dello scambiatore (numero, densità e sagoma delle alette, moto convettivo che le lambisce, rugosità, grado di bagnabilità - wettability), ma anche dalla qualità dell'aria (es. ricca di particolato e smog, o pulita) [49].

In Figura 27 è possibile seguire, sul diagramma psicrometrico, il cambiamento di condizioni termigrometriche di una massa d'aria avente una condizione iniziale di 7 °C e 80% di umidità relativa: al diminuire della temperatura, cresce l'umidità relativa fino ad intercettare la curva del 100%, cui corrisponde una temperatura di rugiada di 4 °C. Se, invece, come riportato in Figura 28, la massa d'aria avesse avuto condizione iniziale di 7 °C e 50% di umidità relativa, una diminuzione di temperatura avrebbe portato alla saturazione (intercettazione curva di umidità relativa 100%) in corrispondenza di una temperatura di rugiada di -2 °C. Analoga lettura è possibile osservando le curve di Figura 29.

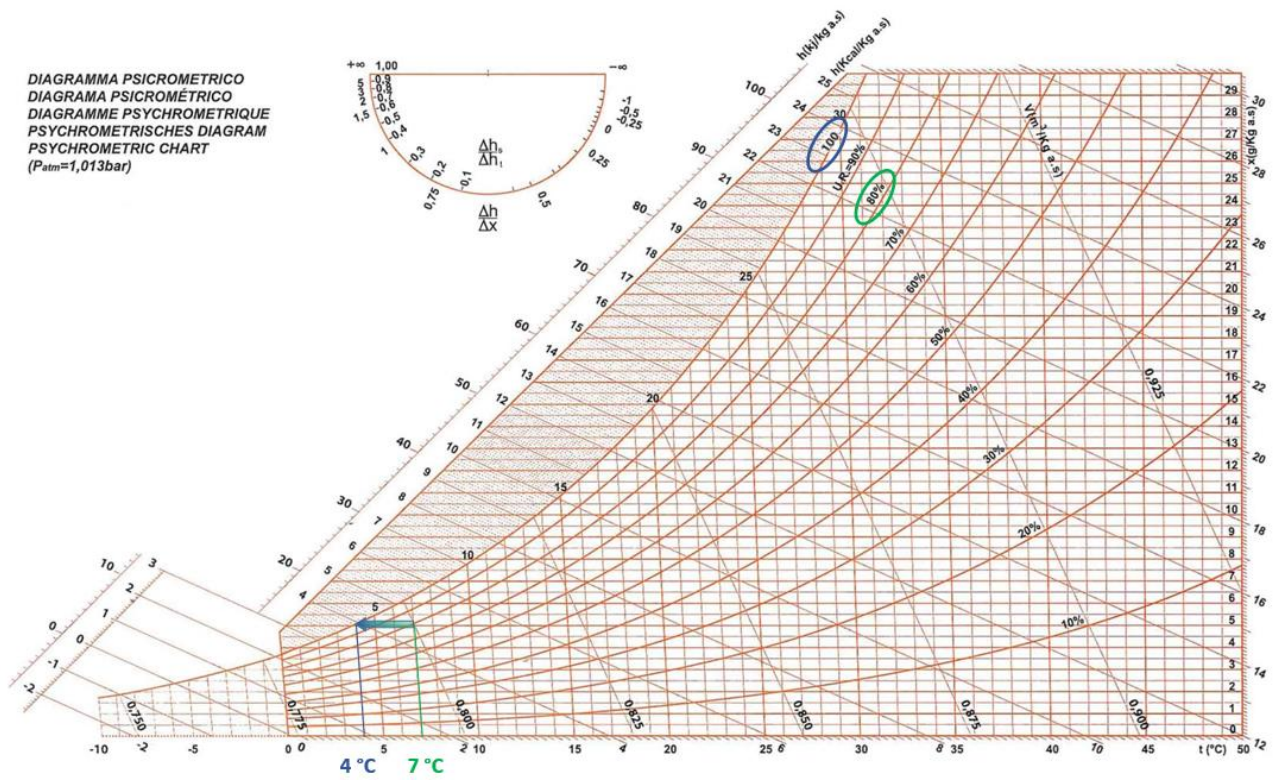


Figura 27. Diagramma psicrometrico con temperatura di rugiada superiore a 0 °C

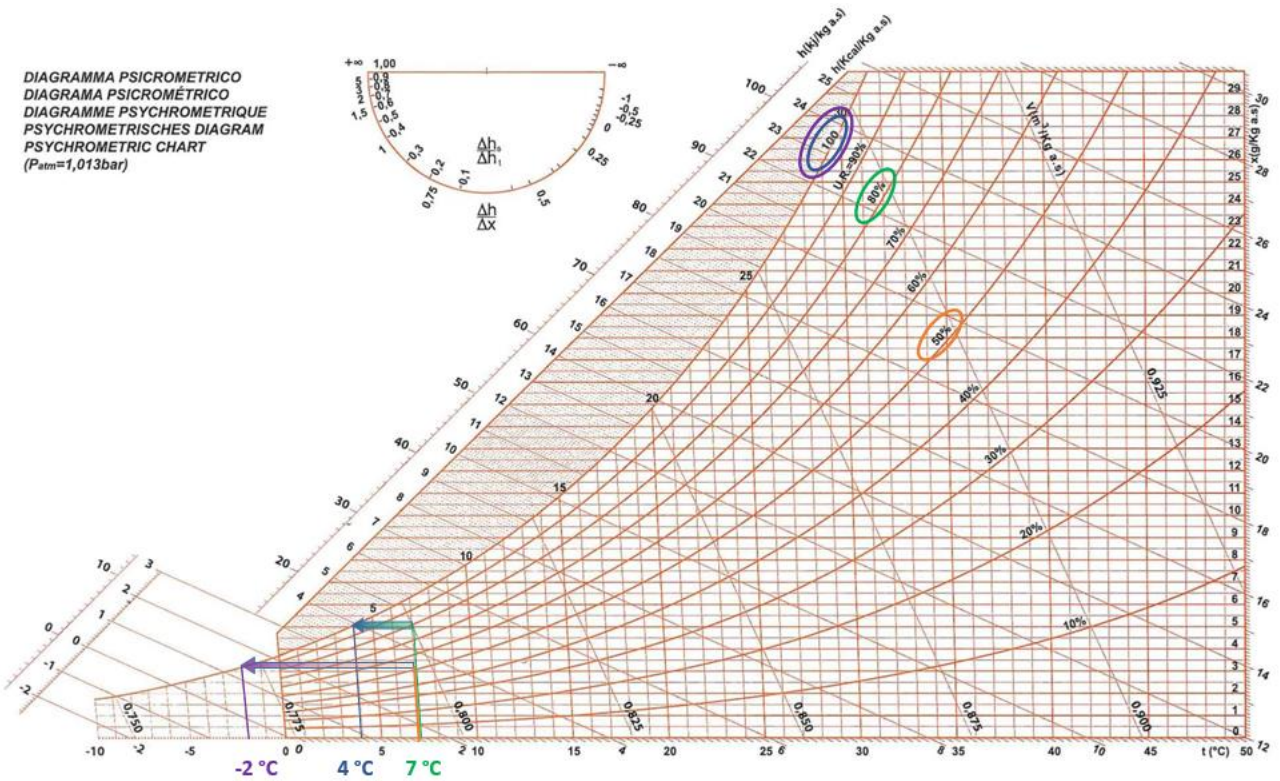


Figura 28. Diagramma psicrometrico con temperatura di rugiada inferiore a 0°C

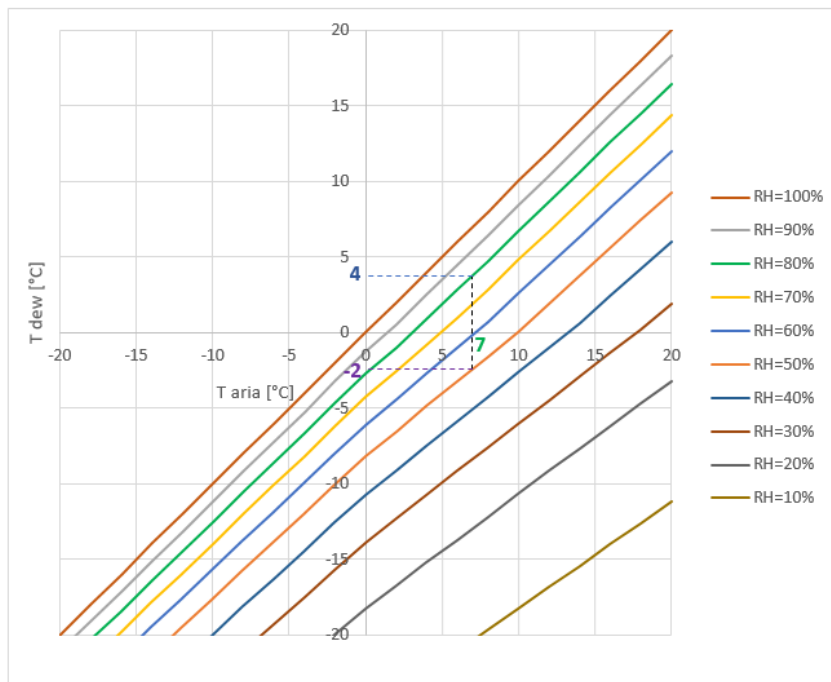


Figura 29. Variazione del dew point a parità di umidità relativa

La lettura di Figura 27 e di Figura 28 porta anche ad un'altra considerazione: spostandosi verso le temperature dell'aria più basse (porzione sinistra dei grafici) per ogni grado di diminuzione della temperatura, la variazione di umidità specifica (a parità di umidità relativa) è gradualmente minore. Ciò implica che la quantità di vapore d'acqua, che è presente nell'aria e che può brinare sull'evaporatore, è più rilevante per valori di temperatura superiori a 0 °C rispetto a dati inferiori [50].

Ciò significa che, in condizioni di temperatura esterna molto bassa (clima rigido), la quantità di vapore che condensa sulla superficie dell'evaporatore è minore rispetto a quanto accadrebbe con una temperatura più alta (clima mite), sempre a parità di umidità relativa. Questo implica che è più gravoso un clima mite di uno rigido, ai fini della formazione di brina sullo scambiatore.

L'entità del brinamento, dunque, non è influenzata soltanto dal diminuire della temperatura esterna, ma dalla quantità di vapore d'acqua contenuto nell'aria quando la batteria di scambio si trova al di sotto di 0 °C. Pertanto, se si considera la differenza tra temperatura dell'aria e temperatura della batteria, e la diminuzione dell'umidità specifica dell'aria saturata al diminuire della temperatura, si intuisce che il problema del brinamento è particolarmente sentito quando la temperatura esterna è compresa tra 0 °C e 5 °C [50].

Per quanto detto, la formazione di ghiaccio è più difficile col diminuire della umidità dell'aria e l'incremento della sua temperatura; al contrario, è favorita dall'incremento di umidità quando le temperature diminuiscono.

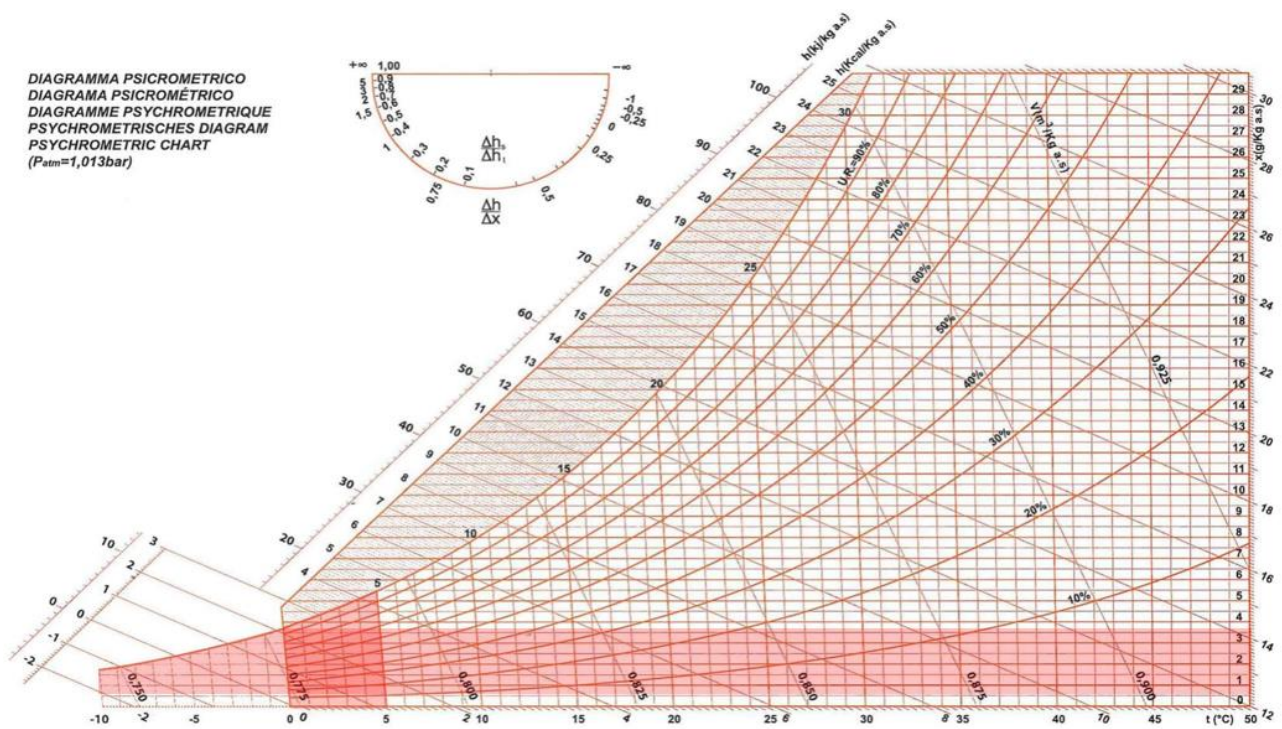


Figura 30. Condizioni più gravose per la formazione di brina sulla batteria evidenziate sul diagramma psicrometrico

In Figura 30 e Figura 31 sono evidenziate in rosso le condizioni in cui è probabile la formazione di ghiaccio.

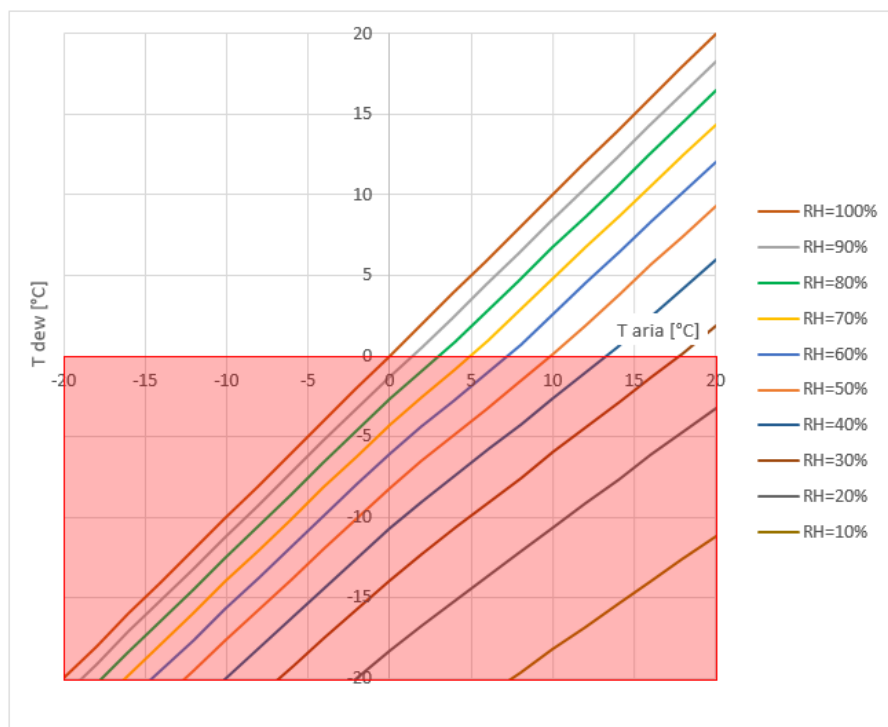


Figura 31. Condizioni più gravose per la formazione di brina sulla batteria evidenziate nel piano Tdew-T

Diverse sono le soluzioni operative che risultano efficaci nel ritardare la formazione del ghiaccio, ad esempio ridurre l'umidità dell'aria in ingresso allo scambiatore oppure preriscaldarla. Addirittura, nello

studio [51], si dimostra che la formazione di brina può essere totalmente inibita integrando nella pompa di calore un deumidificatore ad essiccante solido posizionato prima dell'evaporatore [52].

La formazione di ghiaccio va ad ostruire le alette di scambio riducendone la funzionalità e compromettendo, dunque, il rendimento di scambio, per due motivi:

1. La presenza di ghiaccio tra le alette riduce la portata d'aria che transita tra le stesse, determinando un aumento delle perdite di carico;
2. La presenza di ghiaccio determina un effetto isolante sulla batteria di scambio, riducendo pertanto il coefficiente di scambio termico complessivo.

Perciò, il brinamento provoca la diminuzione del rendimento della pompa di calore (Figura 32), ed è per questo che è un fenomeno da evitare o prevenire [53]. L'insorgenza del brinamento è ad esempio rintracciabile nel "ginocchio" presentato dal COP in funzione della temperatura, in corrispondenza di differenti umidità relative.

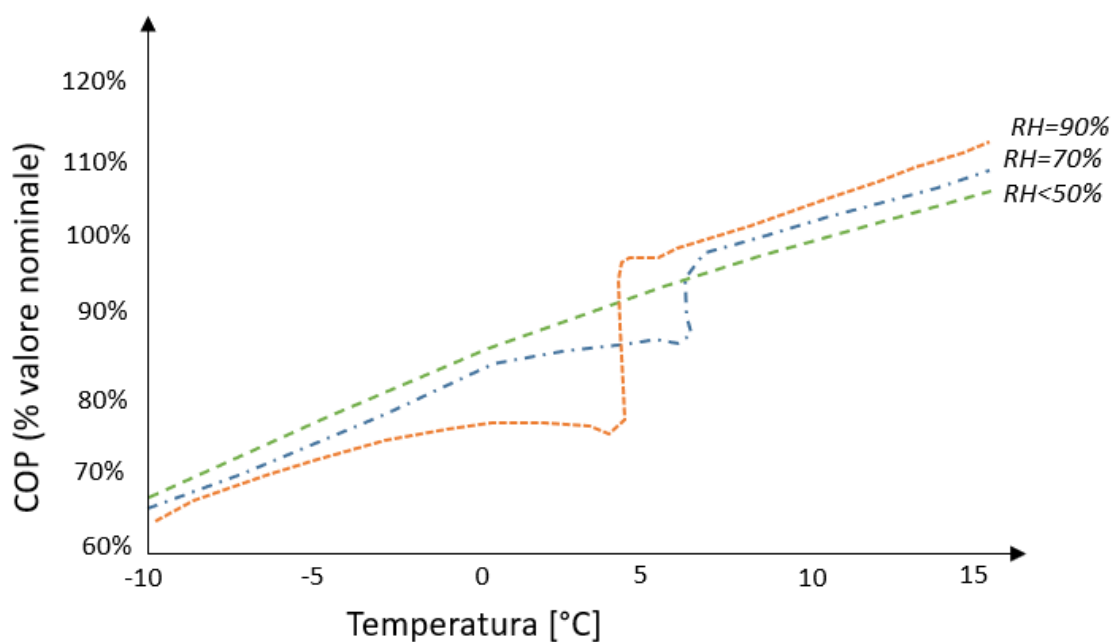


Figura 32. COP di una pompa di calore ad aria al variare della temperatura esterna. per tre diverse umidità relative [54]

Il brinamento comporta la necessità di sciogliere lo strato di brina o ghiaccio formati, operando il cosiddetto *defrosting*.

L'efficacia del defrosting dipende da:

- Durata dello sbrinamento: deve essere tale da permettere il totale scioglimento della brina, onde evitare la più rapida formazione del ghiaccio;
- Frequenza di defrosting: infatti, tanto più sono diradati i cicli nel tempo, tanto maggiore è lo strato di ghiaccio che rischia di formarsi (anche in ragione, ad esempio, di un non completo scioglimento della brina, che, come detto, è da evitare), compromettendo il rendimento della macchina; d'altro canto, cicli troppo frequenti rischiano di compromettere la temperatura del fluido vettore all'interno dell'ambiente da climatizzare, penalizzando, di fatto, il comfort interno dei locali stessi (ad es. improvvisi getti di aria fredda all'interno degli ambienti, detti cold blow).

Esistono diverse metodologie di defrosting (richiamate in Figura 33), che si distinguono per efficienza generale e per implicazioni impiantistiche, o ancora in virtù del richiedere accorgimenti all'interno o all'esterno del sistema (Figura 34).

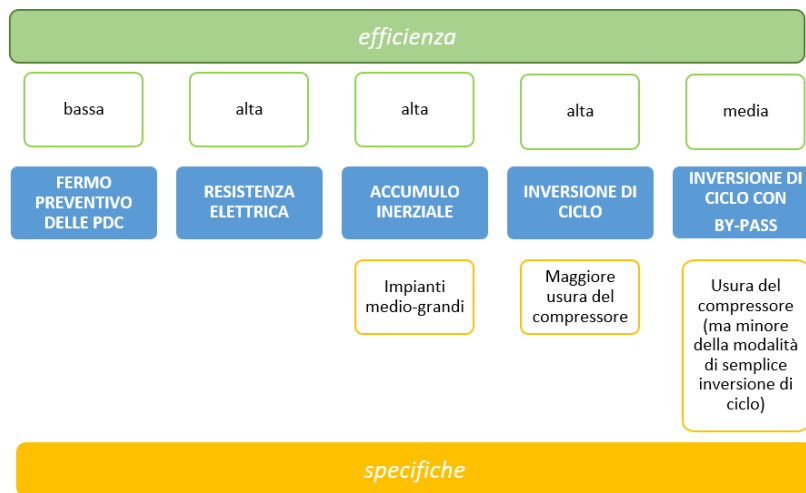


Figura 33. Metodi per operare il defrosting (Rielaborazione ENEA da [55])

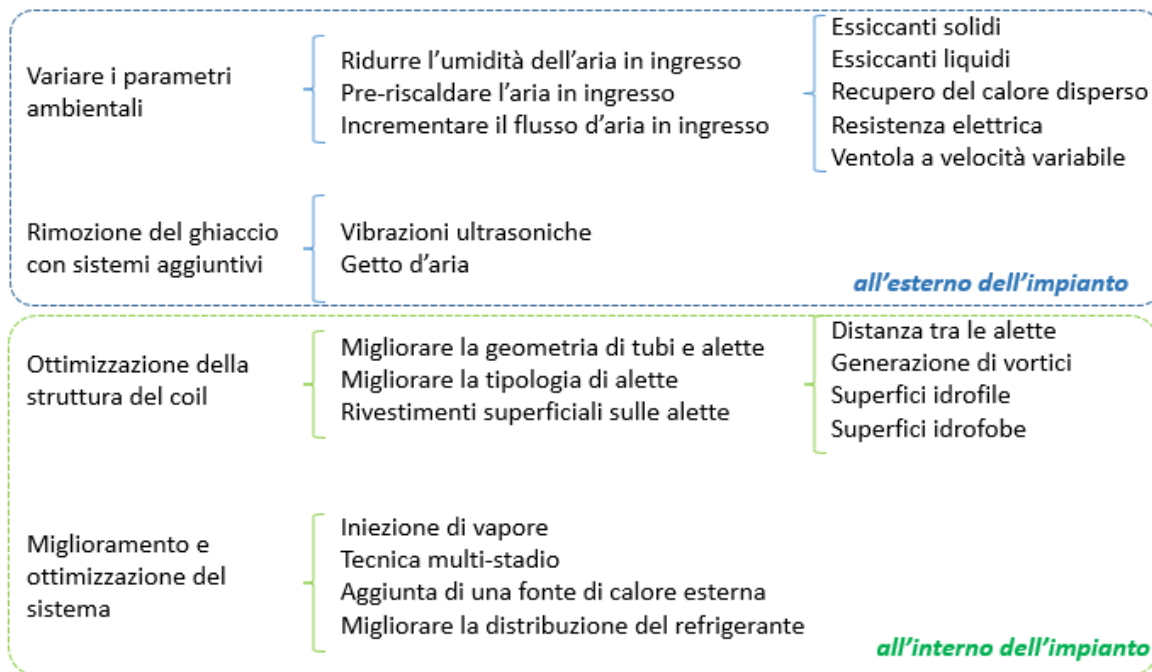


Figura 34. Distinzione delle metodologie di defrosting (Rielaborazione ENEA da [56])

Ad esempio, il fermo preventivo della macchina fa sì che, per determinate temperature esterne, si interrompa il funzionamento della pompa di calore (spegnimento) per un prefissato periodo aprioristicamente ritenuto sufficiente per far sì che l'evaporatore scongeli; trascorso tale periodo, la pdc torna ad operare.

Altra soluzione, che non richiede grandi accorgimenti per la componentistica del circuito frigorifero, prevede il fermo macchina con la contestuale accensione di una o più resistenze elettriche poste a contatto con l'evaporatore fino al suo sbrinamento. Per effetto Joule, il calore è prodotto dalla corrente che attraversa le resistenze ed è in grado di sciogliere la brina.

Nelle pdc acqua-aria, è possibile sfruttare la presenza (quando prevista, in genere in impianti medio-grandi) di un accumulo inerziale per realizzare lo sbrinamento.

Molto più frequentemente, si opera una inversione di ciclo (Figura 35), ovvero la pompa di calore inizia a lavorare come se fosse in funzionamento estivo, e il compressore rimane in funzione. Pertanto, lo

scambiatore esterno invece che operare come evaporatore diviene condensatore, e lo scambiatore interno opera al contrario. Così facendo, il calore necessario allo sbrinamento della batteria collocata all'esterno viene prelevato dall'ambiente (interno) climatizzato (con il conseguente possibile discomfort), e il compressore viene sfruttato maggiormente e con repentini cambi di pressione (con la conseguente maggiore usura).

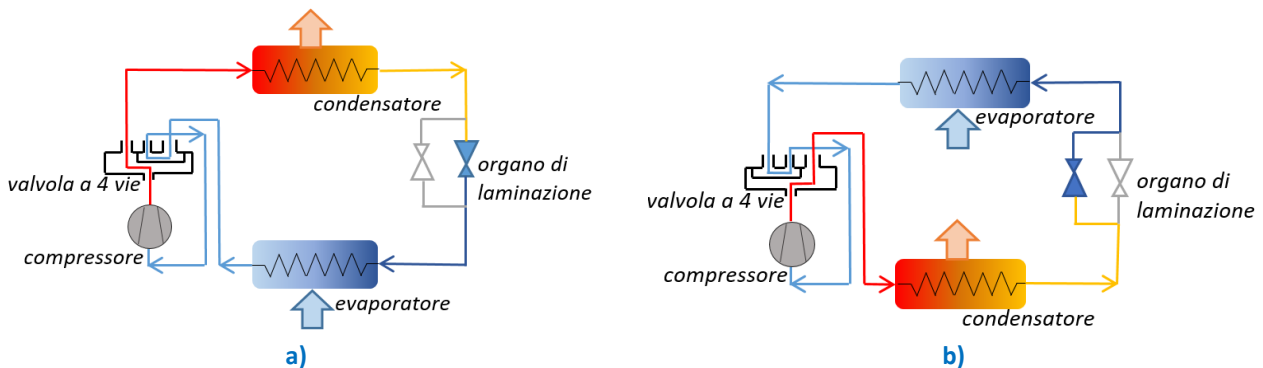


Figura 35. Funzionamento in climatizzazione invernale (a) e in climatizzazione estiva (b) di una pdc reversibile con valvola a 4 vie

Questa modalità di sbrinamento è più rapida rispetto a quella con le resistenze elettriche, in quanto la fonte di calore si trova all'interno del tubo (e non sulla sua superficie esterna, come per le resistenze elettriche). Pertanto, il ghiaccio viene sciolto a partire dallo strato più interno dello spessore e, perdendo aderenza con i tubi dell'evaporatore, si distacca più facilmente [57].

Per ridurre l'usura del compressore, è possibile effettuare l'inversione di ciclo con un sistema di by-pass (Figura 36), ovvero lo sbrinamento ha inizio quando il temporizzatore aziona una valvola solenoide che permette il fluire del gas caldo di mandata direttamente all'interno dell'evaporatore (nel caso di semplice inversione di ciclo, si usa, comunemente, una valvola a 4 vie) [57].

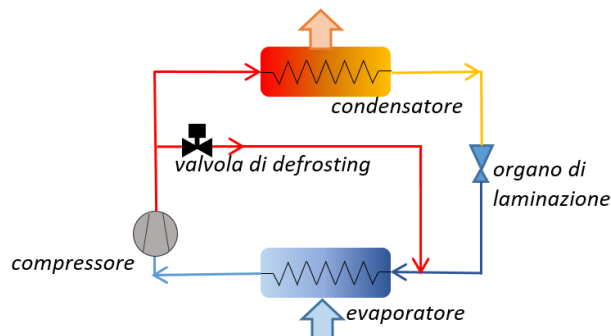


Figura 36. Defrosting di una pompa di calore con valvola di by-pass

Questo sistema si applica bene a sistemi che hanno più circuiti evaporatori, in modo che possano essere sbrinati in maniera alternativa senza compromettere il funzionamento del condensatore, che continua a ricevere il gas caldo dal compressore.

Rispetto alla semplice inversione di ciclo, questo sistema richiede maggior tempo e, dunque, maggiori penalizzazioni energetiche [58].

Nelle pompe di calore ad assorbimento a gas, è possibile avviare, per mezzo di una valvola a due vie detta valvola di defrosting, il fluido caldo in uscita al generatore direttamente all'evaporatore invece che al condensatore. Il condensatore, tuttavia, continua a funzionare senza interruzione, benché ad una potenza termica ridotta, senza dunque necessità di invertire il ciclo o di causare aumenti di consumi di energia [Pompe di calore: tipologie, progettazione e benefici nell'utilizzo [58].

Anche nel campo del defrosting, la ricerca scientifica sta cercando nuove ed efficienti metodologie, come ad esempio l'uso di getti d'aria ad elevatissima pressione in grado di eliminare la brina, oppure sistemi che sfruttino gli ultrasuoni [59].

Inoltre, si stanno studiando soluzioni in grado di favorire l'accrescimento della brina in maniera uniforme sulla batteria di scambio [60] attraverso dei sistemi in grado di invertire la direzione del flusso d'aria sul coil ad intervalli di tempo prefissati, migliorando così le performance della pdc. Nel sistema sperimentale studiato [60], infatti, i lati controvento e sottovento si rendono intercambiabili per ottenere un brinamento più uniforme su entrambi i lati.

Ancora, la ricerca applicata sta anche direzionando i suoi sforzi sulle Frost Free Air-Source Heat Pump (FFASHP), che operano mediante la sovralimentazione della batteria di scambio mediante resistori elettrici, aumentandone la pressione di evaporazione e la corrispondente pressione di saturazione [5].

6.2 Il piano Temperatura-Umidità relativa dell'aria per la costruzione della frosting map

Come si è detto, le condizioni di brinamento sono dettate principalmente dalle condizioni di temperatura ed umidità dell'aria, e dalla temperatura della batteria di scambio dell'evaporatore (coil), e in via secondaria (ma non meno rilevante) dalla velocità dell'aria, dal suo grado di purezza, dalla forma e dalla geometria e dalle caratteristiche della batteria di scambio.

Rimanendo sui fattori principali, è stato possibile, nel corso degli anni e degli studi, definire una mappa di brinamento o frosting map, ovvero il piano Temperatura - Umidità relativa dell'aria (piano T-RH) in cui si sviluppa il fenomeno, utile anche ad evitare uno scorretto defrosting (denominato mal-defrosting) e per migliorare l'efficienza di defrosting [61].

Una review sull'argomento, e sulla genesi delle frosting map è offerta in [49], in cui si evince anche che il tema è stato affrontato ancora in maniera marginale; pertanto, la letteratura sull'argomento risulta ancora esigua.

Già dagli anni '70 [8] è in uso una mappa di brinamento (frosting map) [62] che individua, sul piano T-RH, una zona (non uniforme) di possibile brinamento, ovvero nel range di temperature compreso tra -5 °C e 7 °C e di umidità 60%-100%.

Come è facile intuire e, in analogia a quanto accade comunemente sul parabrezza di una macchina in inverno quando gela, il congelamento può essere di tipo lieve (quindi un film sottile di ghiaccio) o piuttosto severo (strato spesso). Per questo motivo, alcuni autori hanno introdotto degli indici che tengano conto di questo stesso fenomeno sulle pdc [49].

Proprio per poter in qualche modo classificare il grado di severità del frosting, nel 1997 è stato presentato uno studio [63] in cui, fissata la velocità dell'aria a 2 m/s, il piano T-RH è diviso in 3 regioni: una corrispondente alla zona di non-frosting, un'altra di condensazione, e la terza di frosting, a sua volta ulteriormente divisa dagli autori in 5 sotto-regioni in funzione del tasso di accrescimento della brina. Tuttavia, secondo quanto asserito in [49], tali mappe non possono essere adoperate per specificare il livello di frosting come riferimento per il sistema di controllo della FFASHP, in quanto non verificate da test sul campo.

Ulteriore tentativo di affinamento della frosting map è stato operato nel 2015 [8], dove si individuano, ancora una volta, le 3 consuete zone (frosting, non-frosting, condensing region), dividendo ulteriormente la regione di brinamento in 3 sotto-regioni (zone di frosting lieve, moderato e severo).

Gli stessi autori, a partire proprio dall'analisi delle frosting map, propongono in un ulteriore lavoro [64] un nuovo metodo di controllo del defrosting, basato su temperatura, umidità e tempo (T-H-T method), che permette di evitare il mal-defrosting tipico del sistema temperatura-tempo (quello che prevede il fermo preventivo della macchina ad intervalli regolari di tempo).

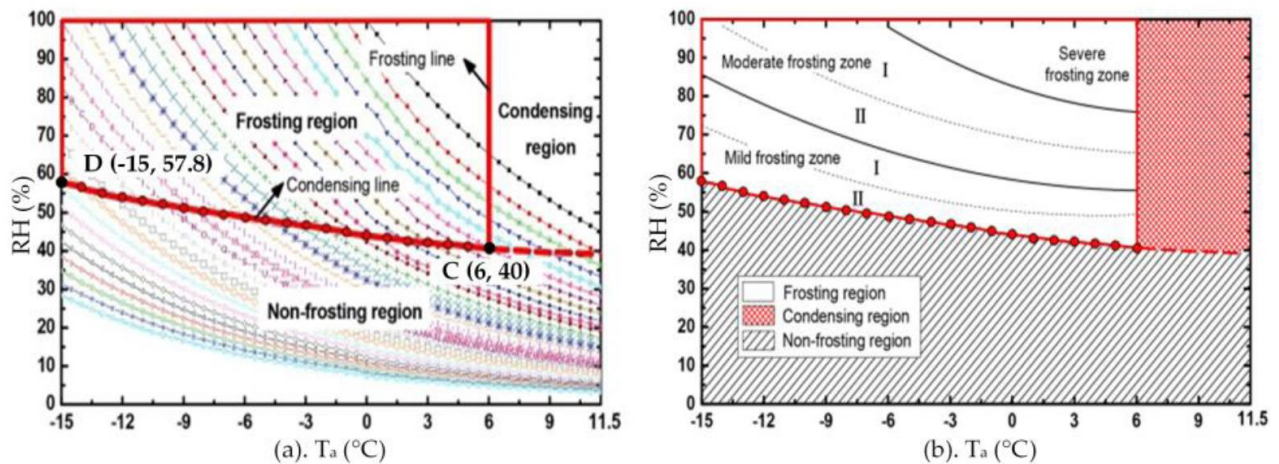


Figura 37. Frosting map proposta da Zhu et al., direttamente estratta dall'articolo [49]

In un lavoro del 2020 a cura di Wei et al. [6] viene proposto di modificare la frosting map elaborata da Zhu et al. [8] in ragione di una correlazione empirica tra la temperatura del coil e la temperatura dell'aria esterna.

Più recentemente, nel lavoro del 2021 di Tang et al. [65] sono stati elaborati dei veri e propri modelli di frosting, validati in differenti città in Cina. Tale studio, unitamente a quanto verrà esposto nel paragrafo dedicato agli sviluppi futuri, costituisce una base per l'ulteriore ampliamento della ricerca sul tema delle frosting map, applicata a livello di distretto, città, provincia e regione.

Per poter comprendere gli affinamenti e le elaborazioni che nel corso degli ultimi anni hanno interessato le frosting map, è necessario descrivere nello specifico come è possibile crearle in un comune foglio di lavoro Excel.

Di fatto, le frosting map servono per verificare se le condizioni dell'aria, rispetto alla temperatura della batteria (coil) sono tali da dare luogo a condensazione o a congelamento.

Per questo motivo, si inizia con il considerare che la condensazione ha luogo dove si raggiunge il dew point dell'aria.

Pertanto, il primo passo da compiere è quello di tracciare, nel piano T-RH, curve che abbiano lo stesso dew point per fare tale operazione ci si è avvalsi di una ricostruzione per punti mediante gli output forniti dal tool gratuito di calcolo CATT3 (Computer Aided Thermodynamic Table 3) [66], i cui diritti di Copyright sono espressi in Figura 38.

Si specifica, tuttavia, che questo tool è solo uno dei modi per poter ottenere tali informazioni. Ovviamente, è possibile ricavare, anche mediante fogli di calcolo, macro o componenti aggiuntivi disponibili on line, le stesse informazioni.

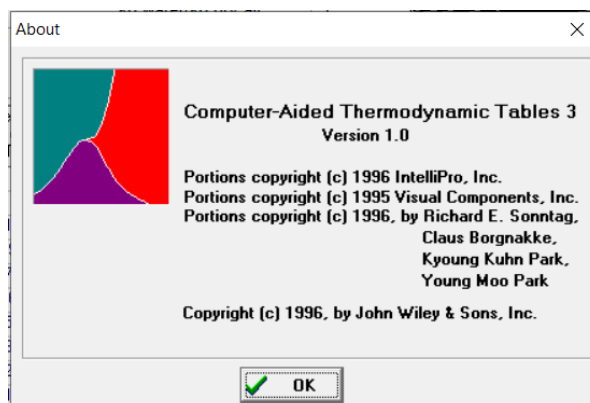


Figura 38. Computer-Aided Thermodynamics Tables 3 (CATT3): copyright

Quindi, per tracciare le curve iso-dew point, si è operata una ricostruzione per punti: fissata la temperatura di dew point (T_{dew}), si è fornita, in input al programma, la temperatura dell'aria (T) come da screenshot esemplificativo di Figura 39.

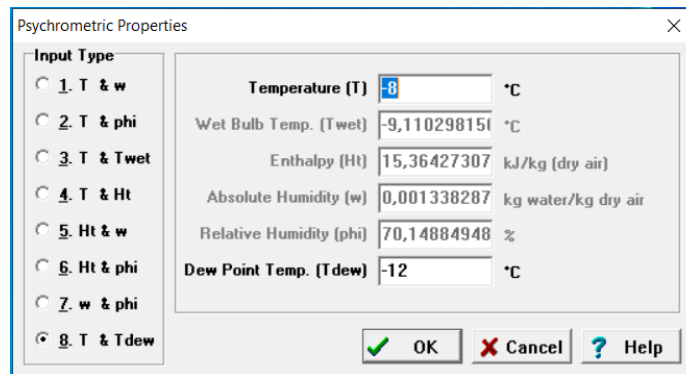


Figura 39. Schermata di input di CATT3, per lo studio psicrometrico

Avendo fissato $T_{dew} = -12$ °C, al variare della temperatura esterna si è ottenuta, come output, l'umidità relativa dell'aria: in Figura 40 è riportata, a titolo di esempio, la schermata di output restituita da CATT3.

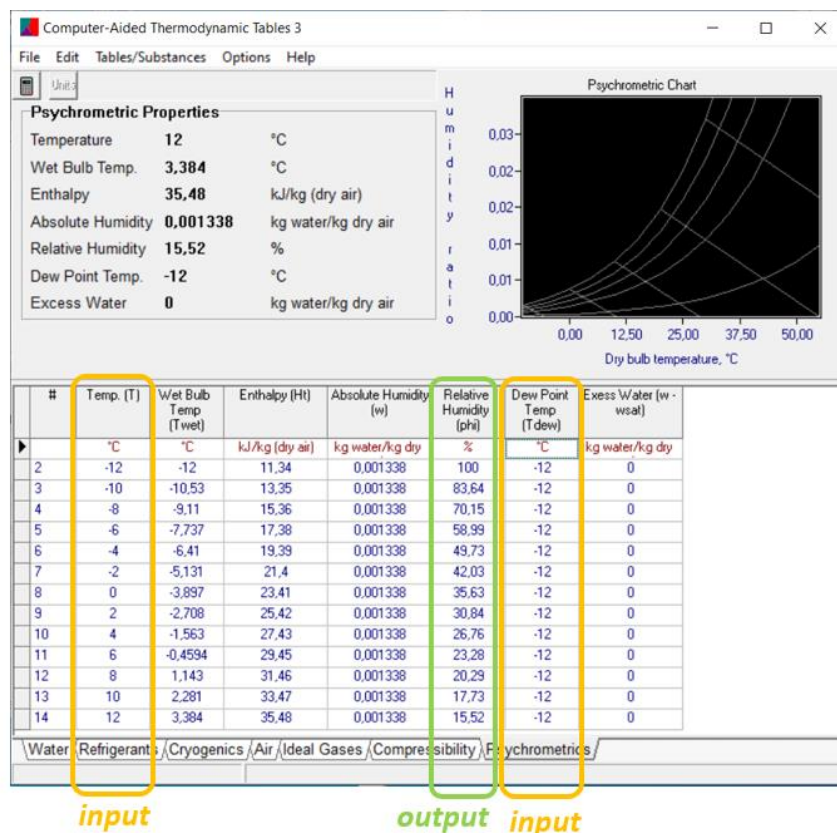


Figura 40. Schermata di output di CATT3, per lo studio psicrometrico

Si è scelto di far variare la temperatura di dew point nel range -26 °C / 0 °C, mentre la temperatura dell'aria tra -26 °C e 12 °C. Il valore minimo della temperatura dell'aria è stato scelto sia sulla base della letteratura a disposizione, sia ritenendo che, in Italia, raramente le pompe di calore si trovano ad operare in condizioni così estreme da raggiungere valori inferiori a -26 °C. Anche il limite superiore, ovvero i 12 °C, è stato scelto considerando la letteratura [8].

Per semplicità e, soprattutto per poter procedere (nella fase successiva) all'elaborazione dei dati sperimentali a partire dalle frosting map, si è scelto di lavorare mediante fogli di calcolo. Pertanto, i valori di

umidità relativa ottenuti mediante CATT3 sono stati riportati, al variare della temperatura dell'aria e del dew point, in un foglio di lavoro (Figura 41).

		T DEW POINT												
T outdoor	T dew = 0 °C	T dew = -2 °C	T dew = -4 °C	T dew = -6 °C	T dew = -8 °C	T dew = -10 °C	T dew = -12 °C	T dew = -14 °C	T dew = -16 °C	T dew = -18 °C	T dew = -20 °C	T dew = -22 °C	T dew = -24 °C	T dew = -26 °C
-26 °C														100
-24 °C														81,87
-22 °C													100	67,26
-20 °C													100	55,44
-18 °C													100	45,84
-16 °C													100	38,02
-14 °C													100	31,63
-12 °C													100	26,38
-10 °C													100	22,07
-8 °C													100	18,51
-6 °C													100	15,56
-4 °C													100	13,12
-2 °C													100	11,09
0 °C													100	9,399
2 °C													100	8,136
4 °C													100	7,06
6 °C													100	6,141
8 °C													100	5,353
10 °C													100	4,676
12 °C													100	4,094

Figura 41. Foglio di lavoro contenente gli output necessari al plot delle frosting map

Gli intervalli di lavoro sono stati scelti piuttosto ampi, e tali da consentire una buona rappresentazione grafica, resa dalle curve iso-dew point riportata nel grafico in Figura 42.

Si fa osservare che nella Figura 42 l'asse delle ascisse ha come valore massimo 11,5 °C, in coerenza con quanto espresso nel lavoro di Zhu et al.. [8]

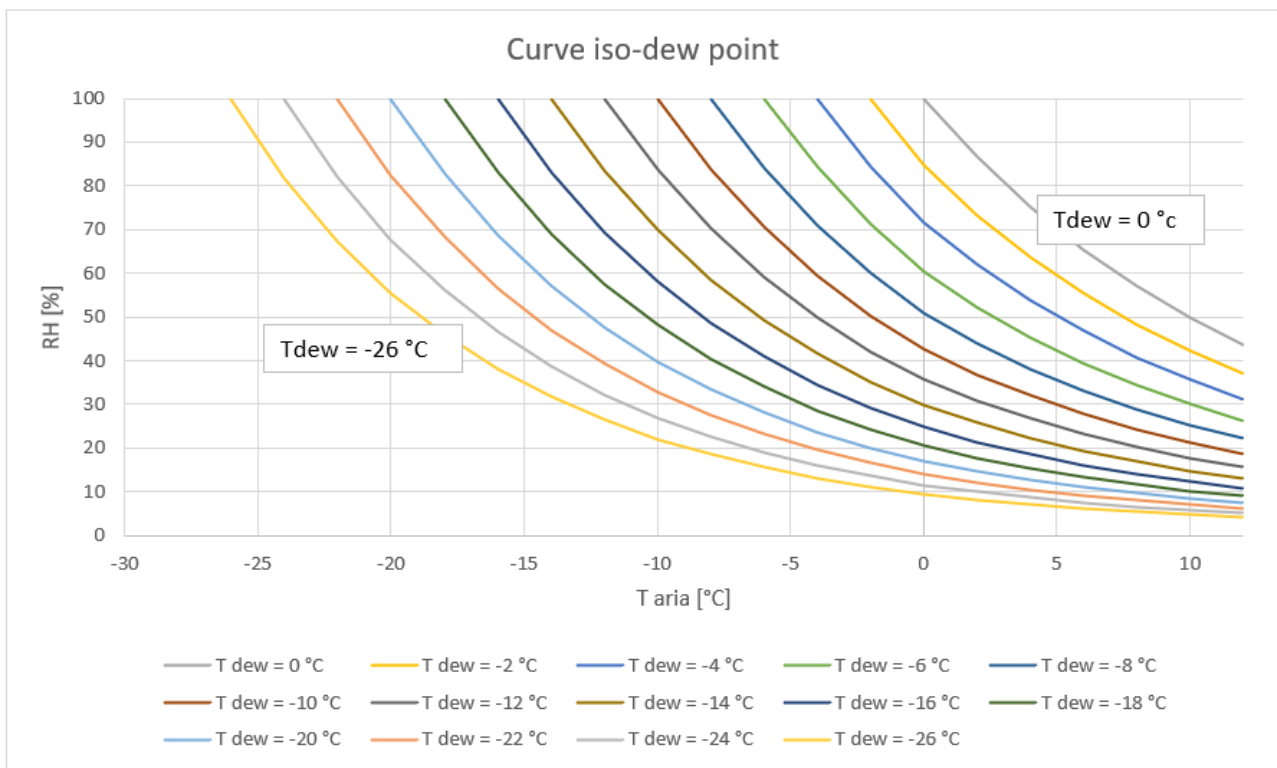


Figura 42. Fascio di curve iso-dew point

A questo punto è necessario individuare, sempre nel grafico in Figura 42, la curva di congelamento (frosting line) e la curva di condensazione (condensing line), che rispecchiano cosa accade sulla superficie della batteria di scambio in virtù della sua temperatura.

La curva di congelamento è il luogo dei punti in cui la temperatura di dew point uguaglia il punto di congelamento. Secondo le evidenze sperimentali riportate in Zhu et al.. [8], ciò si verifica quando la temperatura dell'aria raggiunge i 6 °C.

La condensing line, invece, è il luogo dei punti per i quali la temperatura della batteria uguaglia la temperatura di dew point dell'aria. Al di sotto della curva di condensazione, la temperatura del coil è superiore alla temperatura di dew point e non si verifica condensazione; al contrario, al di sopra della curva di condensazione, la temperatura del coil è inferiore alla temperatura di dew point e si ha condensazione sulla superficie del coil della batteria stessa (se la temperatura del coil è anche inferiore alla temperatura di congelamento, si verifica il frosting come già detto).

Pertanto, occorre conoscere la correlazione matematica che unisce la temperatura del coil alla temperatura dell'aria, e procedere secondo i seguenti step:

1. Entrare nelle tabelle psicrometriche (o, equivalentemente, in CATT3) fornendo in input la temperatura dell'aria e la temperatura del coil (dipendente dalla temperatura dell'aria e coincidente, per quanto appena detto, con la temperatura di dew-point);
2. Ricavare in output, come mostrato in Figura 40, la corrispondente umidità relativa;
3. Tracciare per punti, nel grafico in Figura 42, la curva temperatura aria-umidità aria.

Il tracciamento delle condensing e frosting line è importante, appunto, per poter correttamente definire le zone di congelamento o di condensazione o di funzionamento a regime della pdc.

A questo aspetto, così delicato, è dedicato il prossimo paragrafo.

6.3 La correlazione tra temperatura del coil e temperatura esterna

L'analisi di letteratura esposta in precedenza mostra da un lato che le frosting map sono ancora poco conosciute ed impiegate, dall'altro che le attività ad esse correlate sono di tipo sperimentale e, proprio per questo motivo, poco numerose.

Del resto, risulta piuttosto oneroso dotare una pompa di calore di un sistema di misura che rilevi le grandezze necessarie al monitoraggio.

Ciò che occorre conoscere per descrivere il fenomeno del frosting è la correlazione che lega la temperatura della batteria di scambio con la temperatura dell'aria esterna. Tale correlazione non può che essere empirica, dal momento che dipende, come già richiamato, anche da una serie di fattori che difficilmente possono essere previsti preliminarmente per via della complessità della loro valutazione (ma che ovviamente possono essere oggetto di studio e di approfondimento), che vanno ad alterare o influenzare i processi di scambio termico, come ad esempio:

- *Qualità dell'aria*, intesa come quantità di particolato in essa disperso. In regioni come la Cina, in cui sono stati sviluppati i primi studi sulle frosting map, questo fattore viene annoverato e, in alcuni casi, per semplicità operativa, viene trascurato;
- *Bagnabilità della batteria di scambio*: ovviamente l'insorgenza del ghiaccio è determinata dalla quantità di acqua che si ferma sulla superficie stessa. Per questo motivo, superfici aventi trattamenti particolari, oppure rivestimenti con film altamente idrofobici, come anche espresso in [59], consentono di limitare o ritardare la formazione del ghiaccio;
- *Velocità dell'aria in prossimità dello scambiatore*: ovviamente, i processi convettivi coinvolti nello scambio termico fanno sì che esso possa essere favorito dall'incremento della velocità dell'aria. Nelle applicazioni pratiche, secondo la letteratura [63], la velocità dell'aria è tra 1.5 m/s e 3.5 m/s. nello studio che costituisce lo spunto di partenza della presente attività di ricerca, ad esempio, in cui le frosting map sono suddivise in ulteriori sotto-regioni, la velocità dell'aria viene considerata costante e pari a 2 m/s. Si ricorda inoltre che velocità elevate dell'aria inibiscono la formazione del ghiaccio (infatti il sistema air jet viene usato appunto come metodo di defrosting).
- *Uniformità dello strato di brina o ghiaccio sulla batteria*. Per quanto già esposto, l'insorgenza della brina non è uniforme, ma ha avvio da punti di nucleazione in cui si verificano,

contemporaneamente, ristagno di acqua e basse temperature. L'asimmetria nello sviluppo della brina fa sì che, quando in un punto lo strato di brina inizia a farsi più consistente, in altri il fenomeno non sia ancora occorso. Appunto per evitare questo accadimento, sono allo studio sistemi che rendano uniforme la distribuzione del ghiaccio sul coil stesso. Tale aspetto è importante in quanto, se il sensore di temperatura superficiale viene posizionato in prossimità dei punti maggiormente soggetti a brinamento, la pdc può effettuare cicli di sbrinamento non necessari, ovvero può realizzarne in numero maggiore di quelli effettivamente necessari per il corretto funzionamento. Questo aspetto è piuttosto dannoso, dal momento che il defrosting implica perdite energetiche notevoli.

Indubbiamente, una indagine di tipo visivo sul fenomeno del frosting è quanto di più utile si possa condurre. Questo approccio prevede, ad esempio, di acquisire videoriprese della batteria di scambio per accertare momento, incidenza e caratteristiche del frosting quando si verifica.

Ciò significa, ancora una volta, investire delle risorse economiche nel monitoraggio. In tale direzione, tuttavia, sono anche concentrati i lavori di alcuni gruppi di studio, come esposto anche in una recente pubblicazione [67] in cui è stato sviluppato un sistema di rilievo automatico del frosting, impiegando differenti pdc e differenti modalità di ripresa.

Tale studio evidenzia, nelle conclusioni, la necessità di avere una buona illuminazione in fase di ripresa ma anche la necessità di ulteriori affinamenti del metodo in funzione del contesto ambientale considerato (come ad esempio in ambienti polverosi o in cui l'aria può essere inquinata o ricca di particolato sospeso).

Ad ogni modo, ferme restando tutte le premesse, occorre poter esprimere la relazione matematica di correlazione tra la temperatura del coil e la temperatura esterna.

Nel lavoro di Zhu et al. [8], la correlazione viene determinata sperimentalmente ed è tale che:

$$T_{coil} = 0.828 \cdot T_{aria} - 10,26 \quad (3)$$

In Wei et al. [6], invece, la correlazione è espressa come:

$$T_{coil} = 1.0667 \cdot T_{aria} - 2,7879 \quad (4)$$

In altri contributi, invece, la temperatura del coil risulta, semplicemente, inferiore a quella dell'aria di 11 °C-13 °C.

Perciò, è possibile scrivere, secondo un approccio denominato *basic*:

$$T_{coil} = T_{aria} - 13 \quad (5)$$

Queste correlazioni sono frutto delle evidenze sperimentali e, in quanto tali, hanno loro validità in relazione all'impiego della pompa di calore, alla tipologia, alle condizioni operative, e a tutti i parametri sopraesposti. Tuttavia, può essere utile confrontare tali correlazioni al variare della temperatura dell'aria, come fatto in Figura 43. Per temperature dell'aria molto basse (-26°C) le correlazioni di Zhu et al. e di Wei et al. sono piuttosto prossime tra di loro, e distanti dalla terza, mentre per elevate temperature (24 °C, ben al di fuori del range di brinamento) la correlazione di Zhu si avvicina alla correlazione basic distanziandosi dalla curva che esprime la correlazione di Wei et al.

Il range di temperature generalmente considerato dalla letteratura per il fenomeno di brinamento è tra -15 °C e 6 °C, intervallo nel quale le correlazioni presentate mostrano una doppia forbice, avendo le curve differente pendenza.

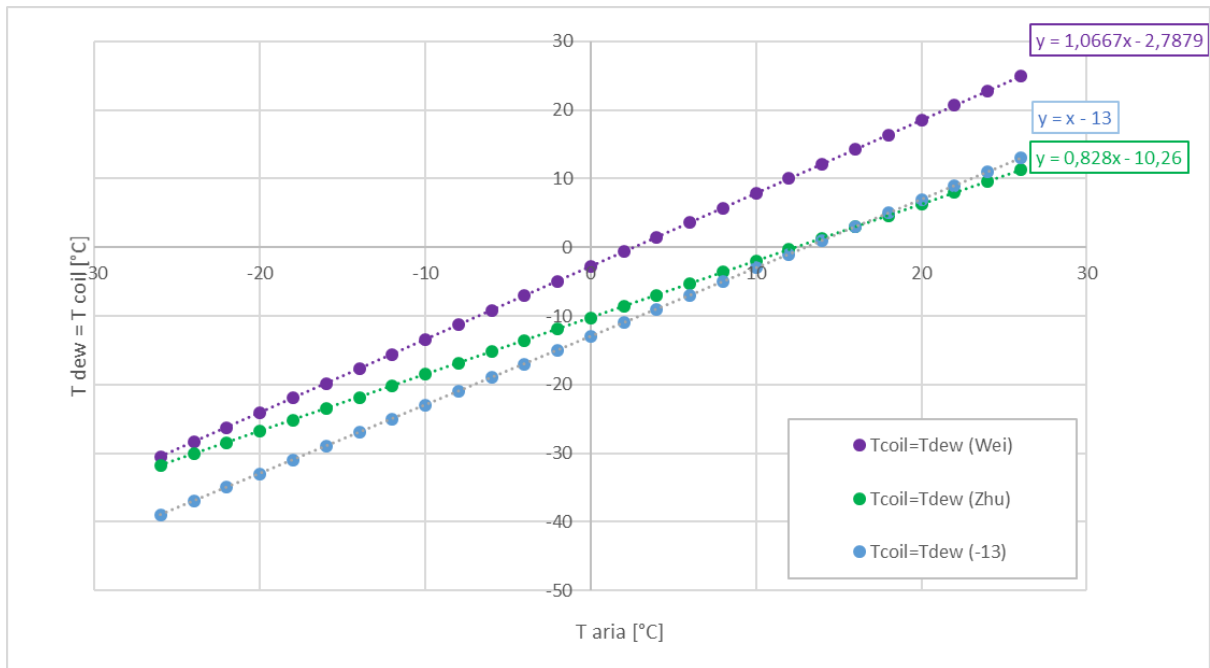


Figura 43. Confronto tra le correlazioni di letteratura: temperatura della batteria al variare della temperatura dell'aria

Analogamente, può essere utile valutare la variazione del salto termico tra aria e batteria, in relazione proprio alla temperatura dell'aria.

Con la correlazione proposta da Wei et al., all'aumentare della temperatura esterna diminuisce il salto termico, quindi la temperatura della batteria di scambio tende ad uniformarsi a quella dell'ambiente.

Al contrario, con la correlazione empirica ricavata da Zhu et al., al crescere della temperatura esterna cresce anche la sua differenza con la temperatura del coil; ciò implica che la temperatura della batteria aumenta più rapidamente di quanto faccia la temperatura esterna

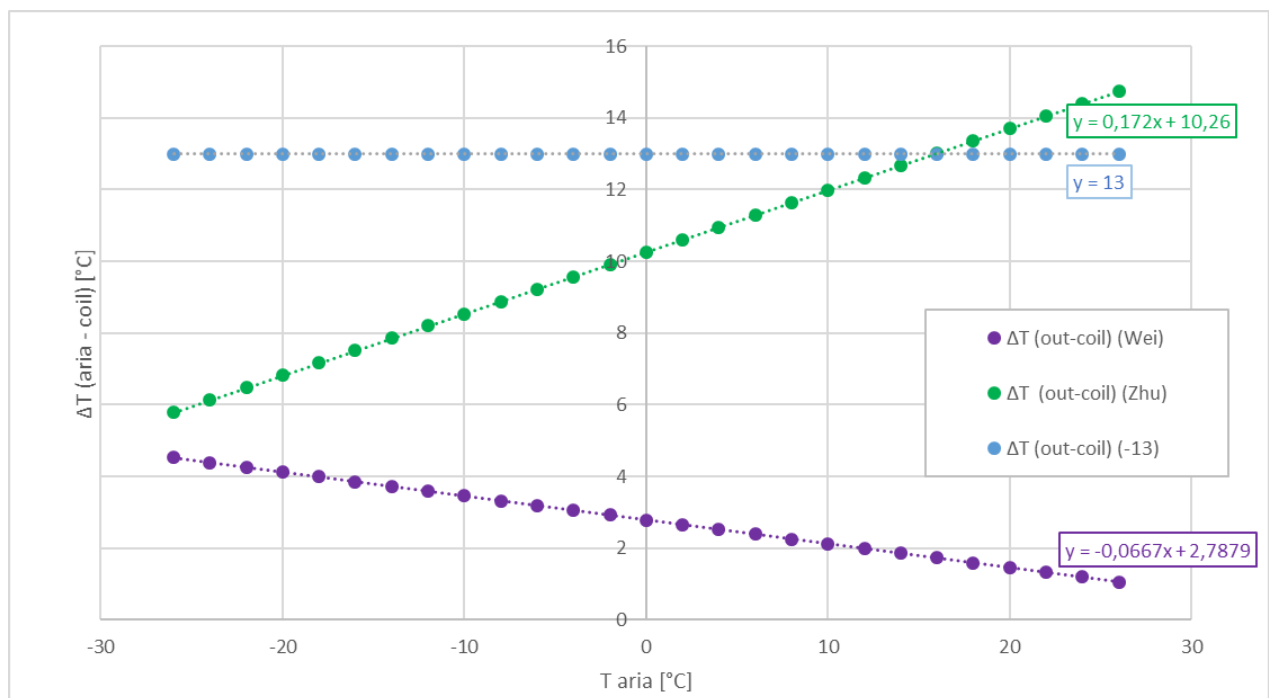


Figura 44. Confronto tra le correlazioni di letteratura: salto termico aria-batteria al variare della temperatura dell'aria

L'analisi di Figura 43 e di Figura 44 non è tesa ad indicare quale correlazione sia la migliore ma a confrontare la letteratura a disposizione, stanti le ipotesi di lavoro e le assunzioni che ciascun paper esprime.

6.4 La costruzione della frosting map

A partire dalla Figura 42, che è un'invariante nella definizione delle frosting map, i recenti contributi della letteratura scientifica sono volti a definire le 3 regioni di interesse (all'interno del grafico stesso – cioè la frosting region, la non-frosting region e la condensing region), ovvero, nello specifico, a caratterizzare la frosting line e la condensing line.

Per quanto riguarda la frosting line, in Wei et al. si ricava sperimentalmente che il frosting si verifica quando la temperatura dell'aria è pari a 1 °C, sebbene, nello studio teorico, esso si sarebbe dovuto verificare a 2,6 °C. Nel lavoro di Zhu et al., invece, la frosting line è tracciata in corrispondenza di una temperatura dell'aria pari a 6 °C.

Per quanto riguarda la condensing line, essa è tracciata per tutte le RH ricavate imponendo che si verifichi la condizione di condensazione, ovvero che la temperatura del coil uguali la temperatura di dew point. Pertanto, a partire dalla temperatura dell'aria, si ricava mediante le equazioni (3), (4) e (5) la temperatura del coil, che in condizioni di saturazione corrisponde anche alla temperatura di condensazione; quindi, si interroga il tool CATT3 fornendo in input la temperatura dell'aria e la temperatura di dew point, ottenendo la corrispondente RH, come illustrato in Figura 45.

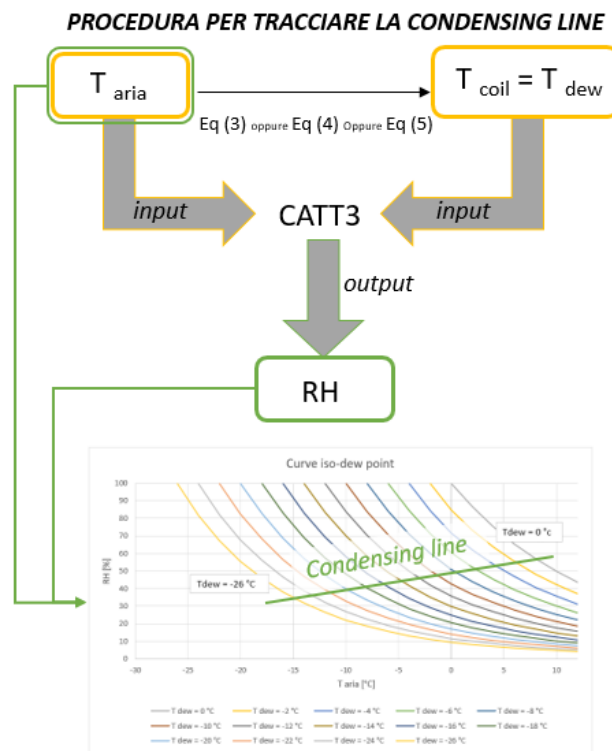


Figura 45. Procedura per il tracciamento della condensing line

A questo punto, considerando le differenti correlazioni introdotte dalla letteratura per la stima della temperatura della batteria di scambio, è possibile tracciare le relative frosting map stanti le corrispondenti condensing line.

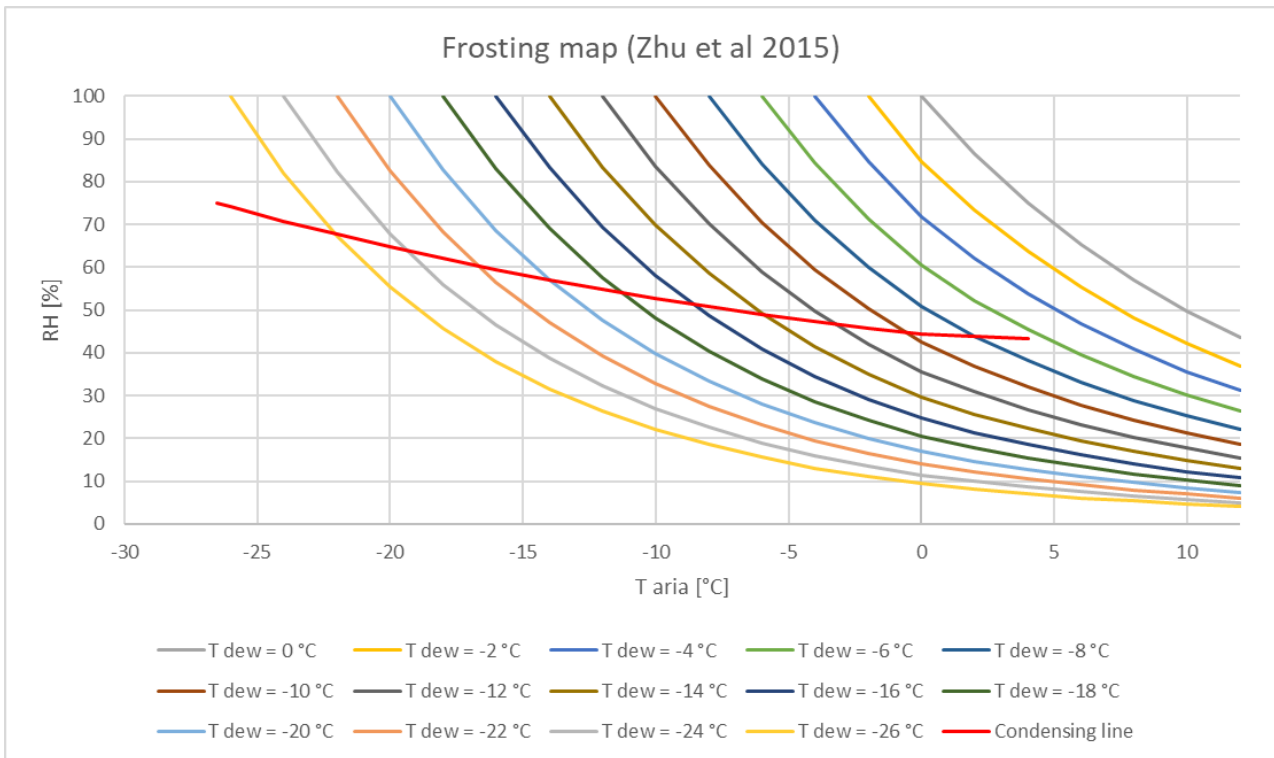


Figura 46. Frosting map relativa all'approccio di Zhu et al. (ovvero, usando l'equazione 3)

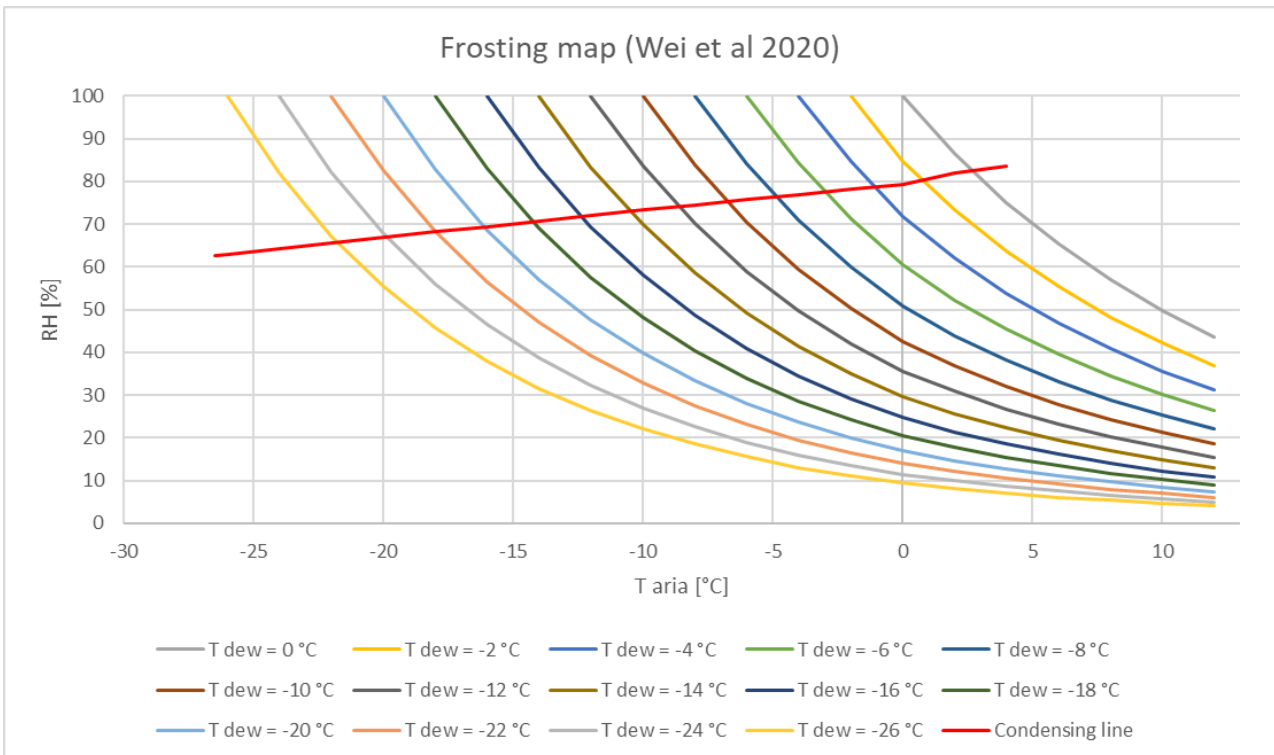


Figura 47. Frosting map relativa all'approccio di Wei et al. (ovvero, usando l'equazione 4)

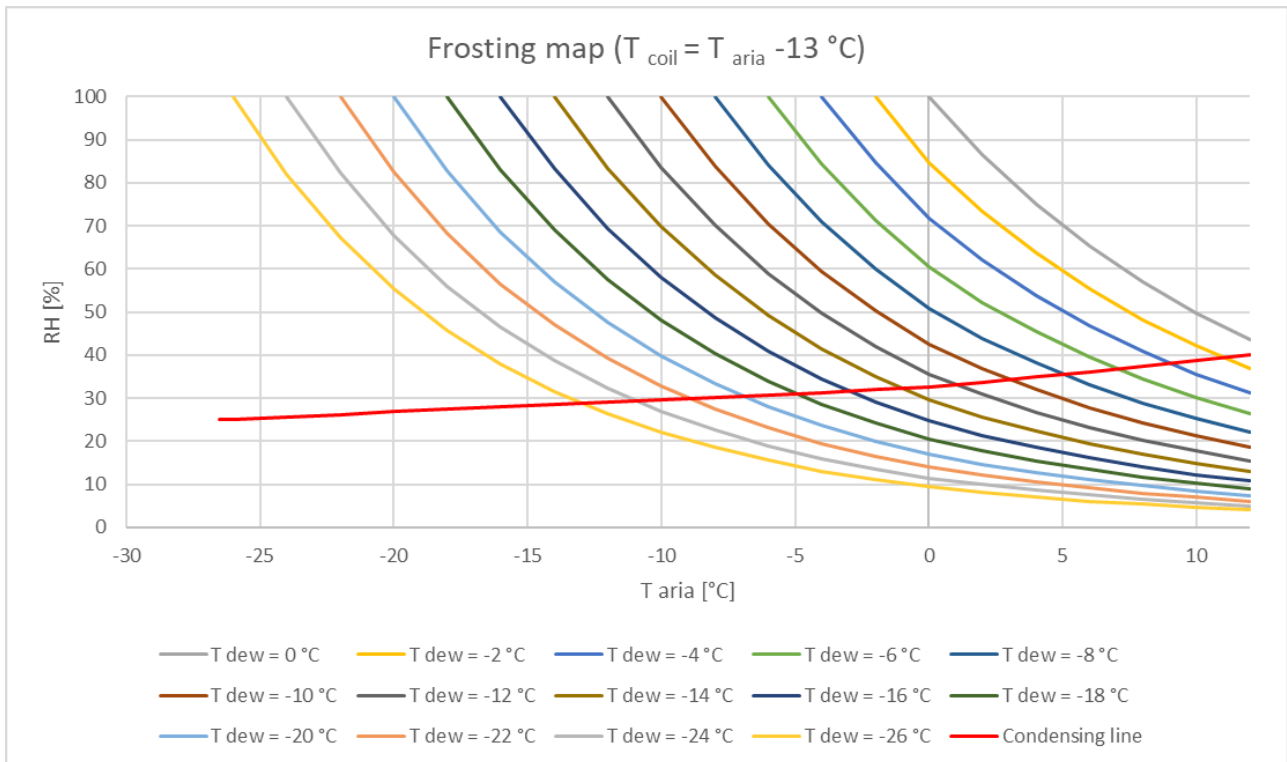


Figura 48. Frosting map relativa all'approccio basic (ovvero, usando l'equazione 5)

Ad un primo impatto, i grafici in Figura 46, Figura 47 e Figura 48 risultano piuttosto simili. Tuttavia, le condensing line sono differenti e, pertanto, dividono in maniera non analoga il grafico nelle frosting e non frosting region.

Per facilitare l'intercettazione delle differenze, si mostra la Figura 49, in cui sono riportate in un unico grafico le condensing line analizzate. I colori delle curve corrispondono a quelli di Figura 43 e Figura 44.

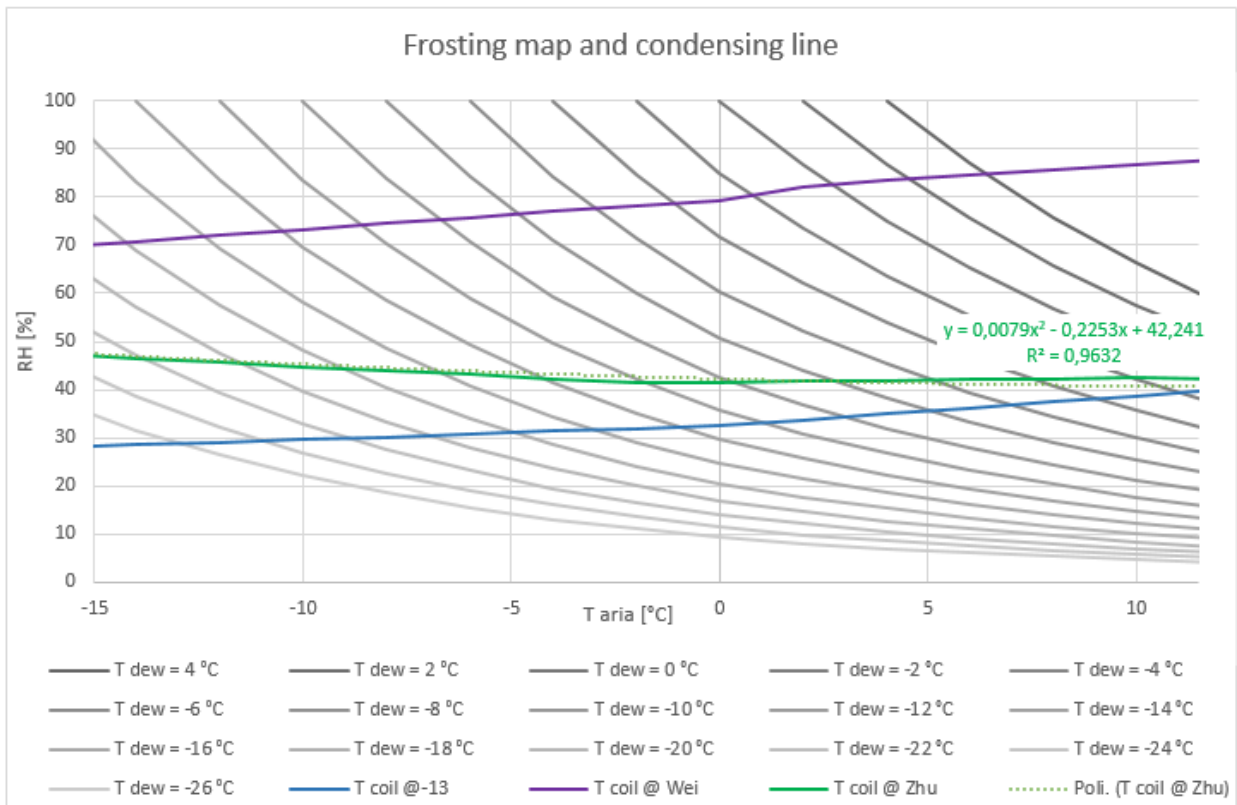


Figura 49. Confronto tra le diverse condensing line

Osservando la Figura 49, emerge che impiegando la correlazione di Wei et al. (curva viola) la frosting region (ovvero la porzione di grafico compresa tra la curva stessa e l'RH=100%) è più piccola rispetto all'analogia regione determinata mediante la correlazione di Zhu et al. (in verde) o con approccio basic (in blu). Ciò implica che la porzione del piano T-RH interessata dalla frosting region è più ridotta rispetto agli altri approcci.

La correlazione di Zhu et al., invece, si colloca in una posizione intermedia rispetto a quella di Wei et al. ed alla basic e, per questo motivo, viene scelta per le successive analisi configurandosi come il miglior compromessorispetto alla trattazione delle posizioni estreme. Resta inteso che tale approccio viene selezionato in mancanza di dati sperimentali che permettano di ricostruire la correlazione tra la temperatura del coil e la temperatura esterna.

Ad ogni modo, indipendentemente dalla effettiva curva di condensazione che dovrebbe essere ricavata in via sperimentale, risulta importante la focalizzazione sulla metodologia di approccio ai dati che risulta valida indipendentemente dalle caratteristiche della curva di condensazione.

Infatti, l'obiettivo della presente attività di ricerca è quello della rielaborazione dei dati di monitoraggio ex-post. Il processo di valutazione dei dati è invariante rispetto alle valutazioni della Tcoil.

7 Metodologia applicata al caso studio

Come detto in precedenza, la presente annualità intende mostrare un esempio applicativo di utilizzo delle frosting map ai dati reali di monitoraggio.

Per questo motivo, dopo aver percorso nei capitoli precedenti la genesi delle frosting map, viene di seguito riportato l'esempio di un caso studio già esaminato nella precedente annualità.

Infatti, la base delle valutazioni che seguono riguarda i dati di monitoraggio di una filiale bancaria del gruppo BPM localizzata in Emilia-Romagna e, precisamente, a Fiorenzuola D'Arda. Si farà riferimento ad una delle stagioni di riscaldamento presentate e discusse nella precedente annualità, dal momento che la metodologia e l'approccio si possono riproporre, nelle stesse modalità, per qualsivoglia caso studio a disposizione.

La peculiarità dell'approccio risiede nella possibilità di raccogliere valutazioni sulla pdc a valle del monitoraggio delle sue prestazioni, al fine di comprendere se ha incontrato condizioni di frosting e, in caso affermativo, per quanto tempo, a partire dai dati disponibili grazie alla campagna di monitoraggio condotta.

7.1 La metodologia

Come precisato, l'approccio metodologico rigoroso delineato dalla letteratura scientifica di riferimento (Figura 50), prevede che al monitoraggio delle condizioni micro-climatiche in prossimità della pompa di calore (umidità specifica e relativa e temperatura dell'aria) si unisca anche la valutazione della temperatura della batteria, da correlare (in via sperimentale) alla temperatura esterna, sotto le più opportune ipotesi di lavoro (ad es. grado di purezza dell'aria, o velocità del flusso d'aria che investe la batteria).

Tale correlazione occorre per poter tracciare la curva di condensazione, mentre il monitoraggio (anche a mezzo di riprese video) consente di poter tracciare la frosting line, ovvero di ricavare in corrispondenza di quale temperatura dell'aria si verifica il brinamento sulle alette della batteria.

A questo punto, note le due curve, è possibile muoversi sul piano T-RH, tracciare le frosting map e verificare se i punti di lavoro della macchina cadono all'interno delle regioni individuate dalla mappa stessa.

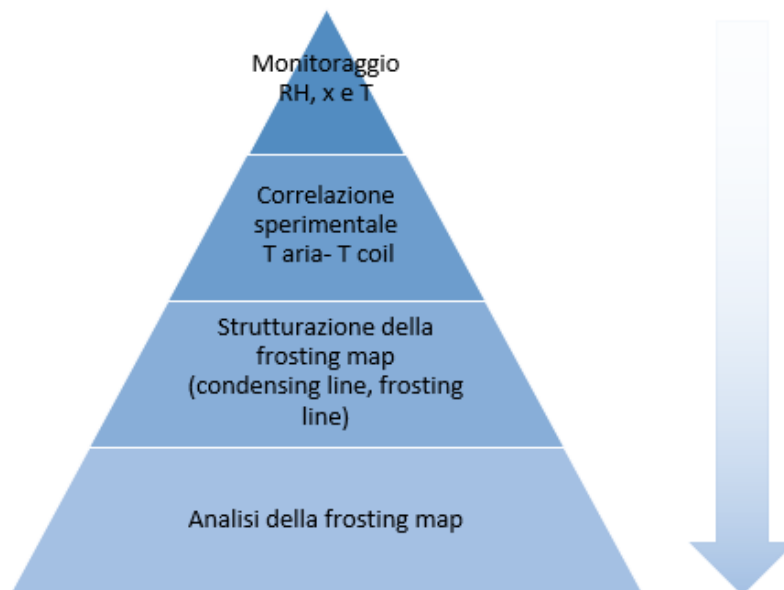


Figura 50. Metodologia di valutazione dei dati. Approccio ex-ante

L'approccio seguito per il caso studio di BPM presentato, invece, è "a posteriori", ovvero a partire da dati di monitoraggio energetici della pdc (assorbimenti elettrici e resa termica) si risale alle condizioni di funzionamento e si analizzano, alla luce delle ipotesi di lavoro introdotte, le condizioni di funzionamento della pompa di calore (Figura 51).

Tale metodologia, pertanto, è utile per risalire ex-post alle condizioni di lavoro, e analizzare attraverso esse le prestazioni operative.

La metodologia, per come concepita, si applica a dati di monitoraggio acquisiti precedentemente, ovvero già in possesso di un soggetto interessato alla loro analisi, come ad esempio manutentori, ESCO o energy supplier.

Infatti, l'analisi del brinamento e il suo impatto sui consumi di una pompa di calore possono permettere di adottare opportune strategie di mitigazione o prevenzione del frosting, con ricadute positive in termini energetici ed ambientali.

Sebbene i risparmi conseguibili su una singola macchina possano apparire esigui, si deve anche tener conto del trend crescente di installazione delle pdc nella climatizzazione domestica e terziaria, in Italia ed in Europa. Pertanto, i benefici derivanti dallo studio (anche predittivo) del frosting e della sua più efficace soluzione possono essere notevoli su larga scala.

Per questo motivo, le frosting map possono essere impiegate anche ex-ante ovvero per uno studio predittivo, utile per valutare anche quale pompa di calore, e quale modalità di defrosting, siano raccomandabili per lo specifico sito in relazione alle sue condizioni meteorologiche tipo.

La metodologia (Figura 51) ricorre al monitoraggio dei parametri meteorologici del sito dove è ubicata la pdc (o in siti di prossimità) quindi avvalendosi di stazioni meteorologiche nelle vicinanze. Si ricostruisce la frosting map e, in mancanza di un monitoraggio della temperatura della batteria, occorre introdurre ipotesi o rifarsi ai dati di letteratura.

Nel presente lavoro, a titolo esemplificativo, sono state scelte le correlazioni adottate da Zhu et al. [8], dal momento che si collocano nel mezzo rispetto alle ulteriori proposte ugualmente offerte dalla letteratura. A questo punto, le informazioni derivanti dal monitoraggio delle condizioni meteorologiche occorse vengono unite alle informazioni sulla condensazione e sul frosting (frutto di ipotesi di lavoro), per ricavarne la frosting map, ovvero la divisione del piano T-RH nelle 3 regioni (condensazione, non condensazione e frosting).

Infine, ai punti T-RH, divisi per le 3 regioni vengono fatti corrispondere i relativi consumi energetici occorsi durante il monitoraggio della pdc. Pertanto, anche i consumi, ovvero i punti di lavoro della pompa di calore, possono essere classificati (nelle 3 regioni di lavoro appunto) ed analizzati, state la divisione dettata dalle condizioni meteorologiche, ovvero dai parametri ambientali.

Di fatto, quindi, l'approccio metodologico proposto ed adottato parte dalle condizioni specifiche del sito (temperatura, umidità relativa e specifica) per valutare il funzionamento della pompa di calore, in mancanza di un monitoraggio della stessa che includa anche parametri come la temperatura della batteria di scambio, o la valutazione dei cicli di frosting.

La peculiarità e il vantaggio di questo metodo risiedono nel fatto che la frosting map può essere ricavata per ogni sito, indipendentemente dal funzionamento della pdc, dal momento che dipende da T ed RH.

Per quanto riguarda la frosting e la condensing line, esse possono essere ricavate sperimentalmente oppure tratte dalla letteratura scientifica. In mancanza di maggiori dettagli, è possibile (come fatto nel seguito) adottare un approccio cautelativo e procedere alla loro definizione.

Solo a questo punto, una volta individuate le 3 regioni di funzionamento, si passa al monitoraggio della macchina, ovvero alle prestazioni operative.

L'analisi della mappa di brinamento presenta, dunque, diversi vantaggi:

- dipende esclusivamente dal sito, ovvero dalle condizioni micro-climatiche locali;
- prescinde dalla macchina installata;
- richiede una strumentazione di facile impiego e a basso costo (un termo-igrometro da esterno);
- Consente una analisi ex-ante del sito di installazione della pompa di calore, permettendo di scegliere la macchina (ed il relativo sistema di defrosting) in funzione della frequenza di accadimento del brinamento, o di adottare più opportuni set point o regolazioni (cut off, o temperatura di bivalenza in caso di impianto ibrido) tali da garantire un risparmio energetico ed economico.

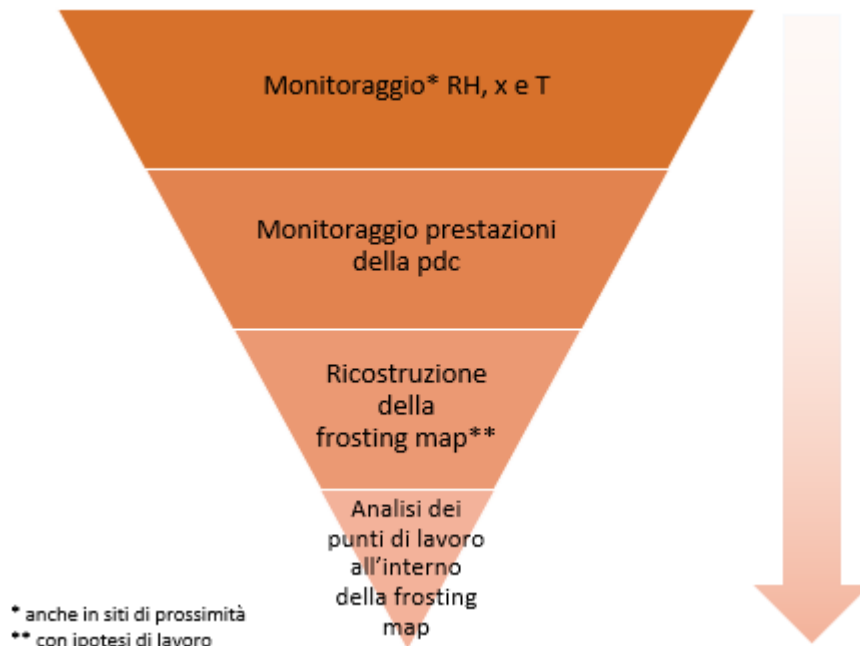


Figura 51. Metodologia di valutazione dei dati. Approccio ex-post

Dunque, per poter applicare le frosting map al caso studio, è stato necessario procedere per step successivi che sono di seguito descritti:

1. Acquisizione dei dati di temperatura e umidità del sito. In mancanza di un dato di monitoraggio nella località di ubicazione della pdc analizzata, si è fatto ricorso alle stazioni meteorologiche prossime sul territorio;
2. Analisi della consistenza dei dati termo-igrometrici, per qualità e quantità, al fine di poterli comparare con i dati di monitoraggio della pompa di calore;
3. Analisi dei dati di monitoraggio della pdc. Nello specifico, è stato necessario riportare i dati di monitoraggio alla stessa scala temporale di acquisizione dei dati della stazione climatica. In questa fase, pertanto, sono risultate particolarmente utili le considerazioni sulla scala temporale di aggregazione delle misure espresse nell'attività di ricerca della precedente annualità e, soprattutto, la opportuna formattazione del foglio di calcolo ed elaborazione dei dati come espresso nella precedente annualità, e nel lavoro [68]);
4. Ricostruzione della frosting map, tracciando le regioni di lavoro;
5. Analisi dei consumi reali e delle prestazioni operative alla luce dei punti di lavoro.

7.2 I dati della stazione meteorologica

Non disponendo di dati acquisiti relativi alle condizioni termo-igrometriche esterne durante il monitoraggio della pdc, si è fatto riferimento ad un database pubblico.

Nello specifico, è disponibile sul sito dell'Agenzia Prevenzione Ambiente Energia dell'Emilia Romagna (ARPAE) [69] lo storico di differenti stazioni meteorologiche dislocate sul territorio romagnolo. Pertanto, si è scelta la stazione meteorologica più vicina alla filiale esaminata: trattasi di un sensore appartenente alla rete di misura agrmet e situato a Castellazzo Villanova d'Arda (coord: 45.00253, 10.00494, altitudine di 41 m s.l.m), come localizzato in Figura 52.

Benché la filiale di Fiorenzuola d'Arda disti dalla stazione meteorologica circa 11 km, si è ritenuto che i dati acquisiti e disponibili potessero essere riferibili a quelli occorsi presso la filiale stessa.

Del resto, occorre considerare che molto spesso, per elaborazioni di tipo scientifico, i dati provengono da stazioni meteorologiche di aeroporti e basi di volo, non necessariamente ubicate nel sito di interesse.

Pertanto, in questo caso, la disponibilità di dati da fonte attendibile, quale l'ARPAE ha reso possibile le valutazioni.

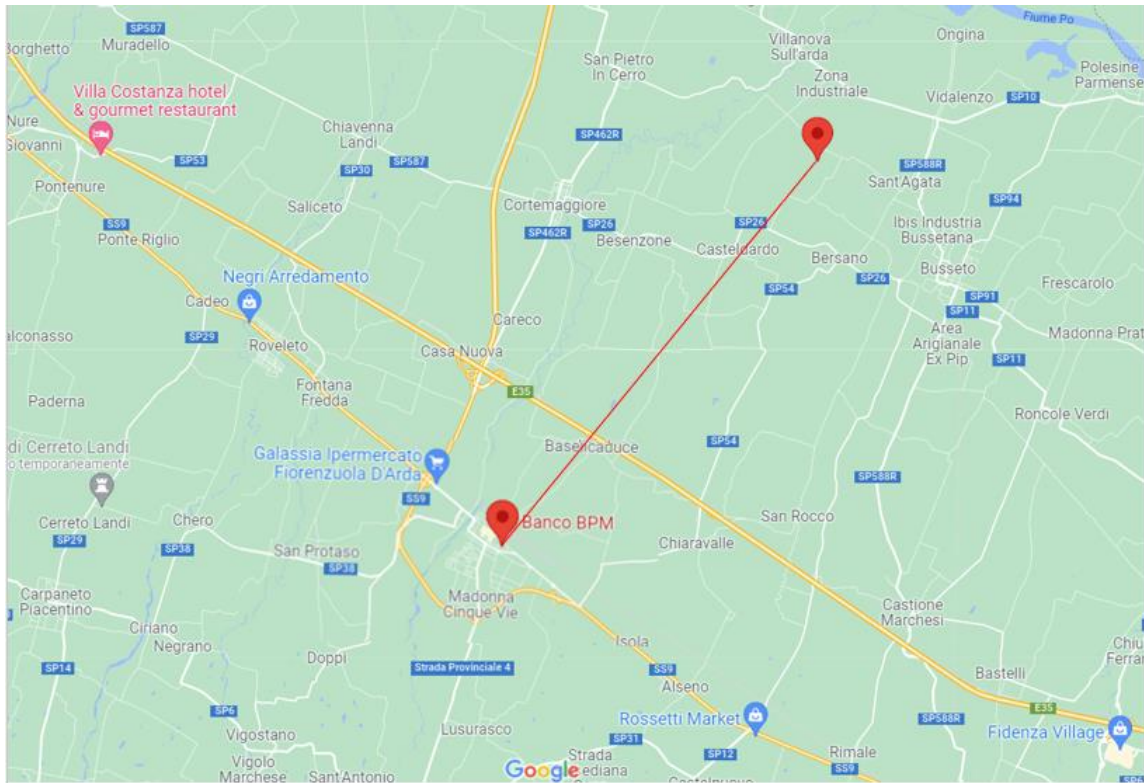


Figura 52. Localizzazione della filiale bancaria e della stazione meteorologica di acquisizione dei dati termigrometrici

Il portale messo a disposizione da ARPAE, di cui si riporta una schermata in Figura 53 [70], consente di selezionare il periodo di riferimento, le variabili di cui estrarre lo storico (temperatura e umidità per le finalità fino a qui esposte) e la stazione meteorologica o di acquisizione da interrogare.

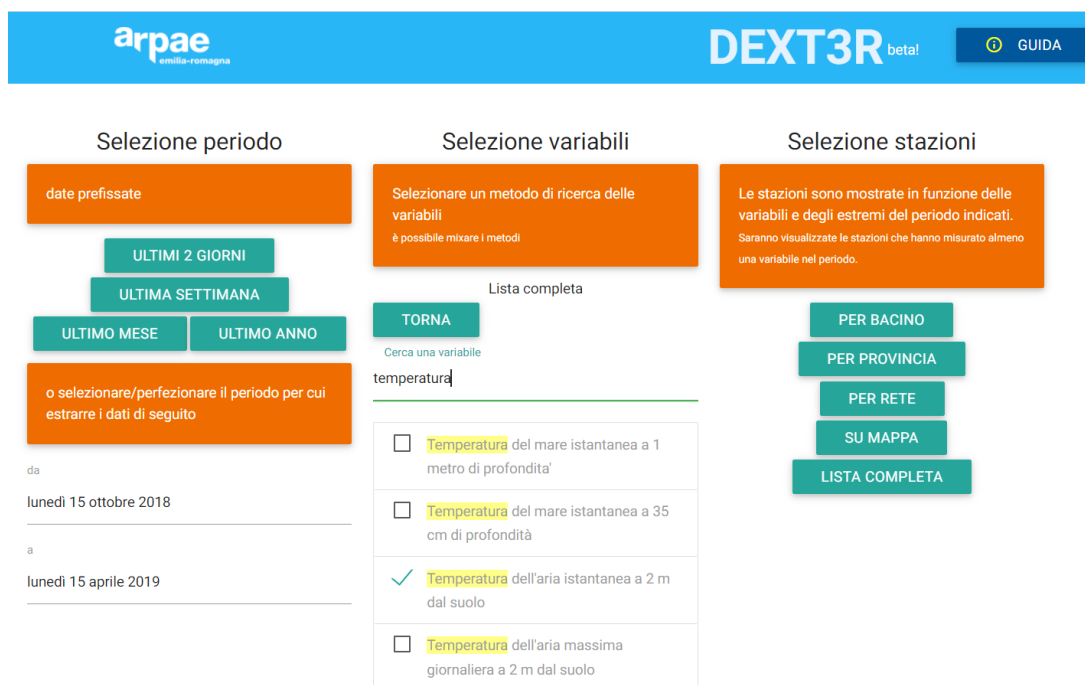


Figura 53. Schermata di interrogazione del portale di ARPAE

I dati ottenuti, di tipo orario, sono stati esportati in un file *.csv e, infine, sistematizzati in un foglio di calcolo per l'integrazione con i dati del monitoraggio della pompa di calore.

L'analisi temporale dei dati acquisiti dal portale ARPAE ha condotto all'elaborazione dei grafici in Figura 54 e Figura 55.

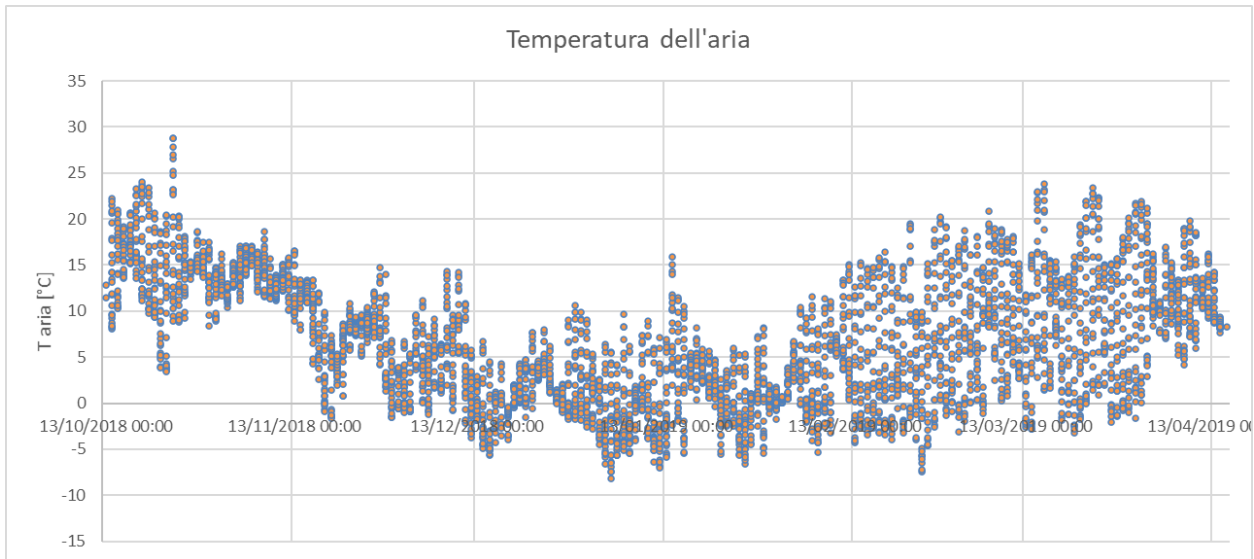


Figura 54. Trend di temperatura dell'aria acquisito dalla stazione meteorologica di ARPAE

La temperatura dell'aria (rilevata a 2 m dal suolo) mostra un trend tipico per il periodo considerato, che comprende la stagione di riscaldamento, ovvero dal 15/10/2018 al 15/04/2019.

Per quanto riguarda l'umidità relativa, invece, non è possibile stabilire un trend generale.

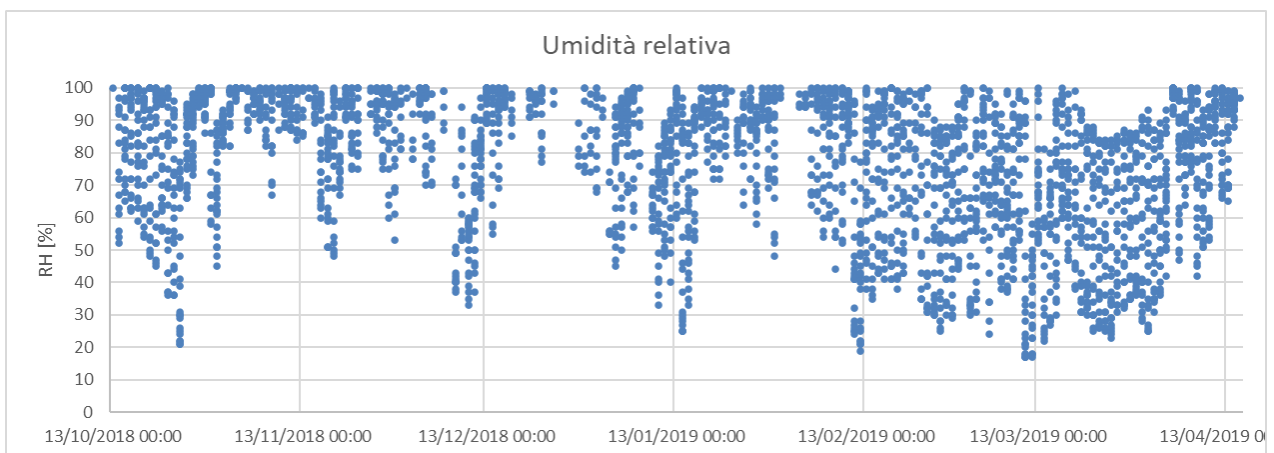


Figura 55. Trend di umidità relativa dell'aria acquisito dalla stazione meteorologica di ARPAE

7.3 L'integrazione dei dati meteorologici con i dati di monitoraggio

I dati meteorologici sono stati riportati nel consueto piano T-RH, ottenendo il grafico in Figura 56.

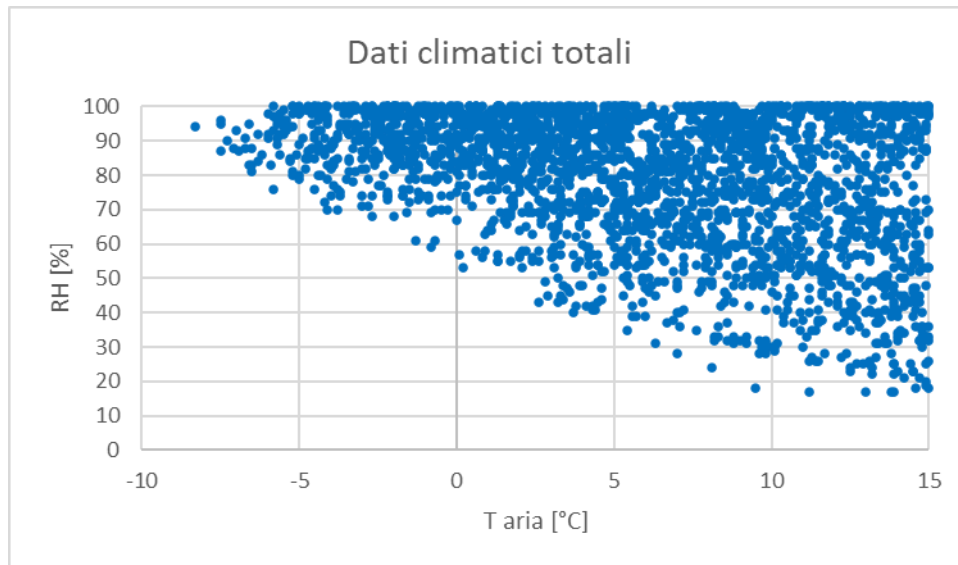


Figura 56. Dati meteorologici della stazione meteo di Fiorenzuola D’Arda, nel periodo di climatizzazione

I punti acquisiti, e graficati in Figura 56, non permettono di comprendere l’aspetto “quantitativo” dei dati, ovvero la numerosità (o frequenza) per fasce di temperatura o di umidità, ovvero di poter delineare che tipo di clima si sia verificato nel periodo considerato, e soprattutto la frequenza dei punti all’interno delle zone più gravose per il brinamento, già richiamate in Figura 30 e Figura 31.

Per permettere ciò, è stata realizzata la Tabella 5 che mostra la numerosità di punti (ovvero, di acquisizioni orarie) nelle diverse fasce di temperatura e umidità relativa, illustrando come sia più frequente il verificarsi di temperature comprese tra 0 °C e 5 °C, ed umidità relative elevate (tra 90% e 100%).

Quindi, un’analisi condotta attraverso tale tabella permette di constatare se nella località considerata si verificano molto frequentemente le condizioni meteorologiche più gravose per la formazione della brina sulla batteria di scambio. Pertanto, l’analisi risulta particolarmente utile ai fini predittivi del fenomeno del brinamento.

Tabella 5. Analisi dei dati meteorologici

	0 %<RH≤10 %	10 %<RH≤20 %	20 %<RH≤30 %	30 %<RH≤40 %	40 %<RH≤50 %	50 %<RH≤60 %	60 %<RH≤70 %	70 %<RH≤80 %	80 %<RH≤90 %	90 %<RH≤100 %
-10 °C<T≤-5 °C	0	0	0	0	0	0	0	4	19	34
-5 °C<T≤0 °C	0	0	0	0	0	1	12	47	116	202
0 °C<T≤5 °C	0	0	0	1	20	46	62	108	181	284
5 °C<T≤10 °C	0	1	7	25	42	86	113	137	149	243
10 °C<T≤15 °C	0	8	32	63	70	92	104	78	75	218
15 °C<T≤20 °C	0	1	25	63	64	45	37	32	53	80
20 °C<T≤25 °C	0	0	25	18	10	11	13	0	0	0
25 °C<T≤30 °C	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0

7.4 L’analisi dei dati

A questo punto, occorre unire le informazioni derivanti dall’analisi dei dati meteorologici con il fascio di curve iso-dew point già ricostruite. Questa operazione viene riportata in Figura 57 unitamente alle curve di condensazione proposte dalla letteratura. Ciò permette di verificare come le differenti condensing line dividono il grafico in maniera diversa, individuando zone di frosting più o meno ampie in funzione dell’altezza della condensing line stessa.

Per facilitare l'individuazione della scelta effettuata, si riporta in Figura 58 il medesimo grafico della Figura 57 ma con una differente scala cromatica nella quale vengono evidenziate la curva di condensing adottata (approccio di Zhu et al.) e la frosting line.

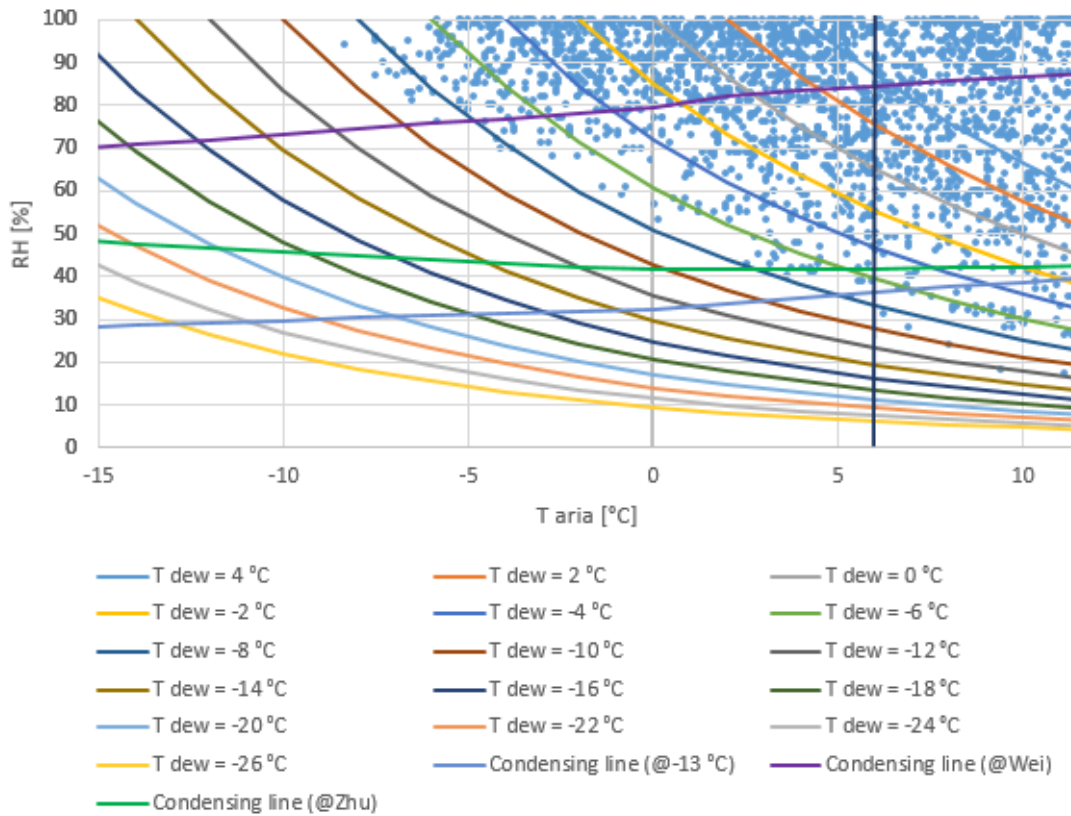


Figura 57. Frosting map del sito di Fiorenzuola D'Arda, nella stagione di climatizzazione 2018-2019

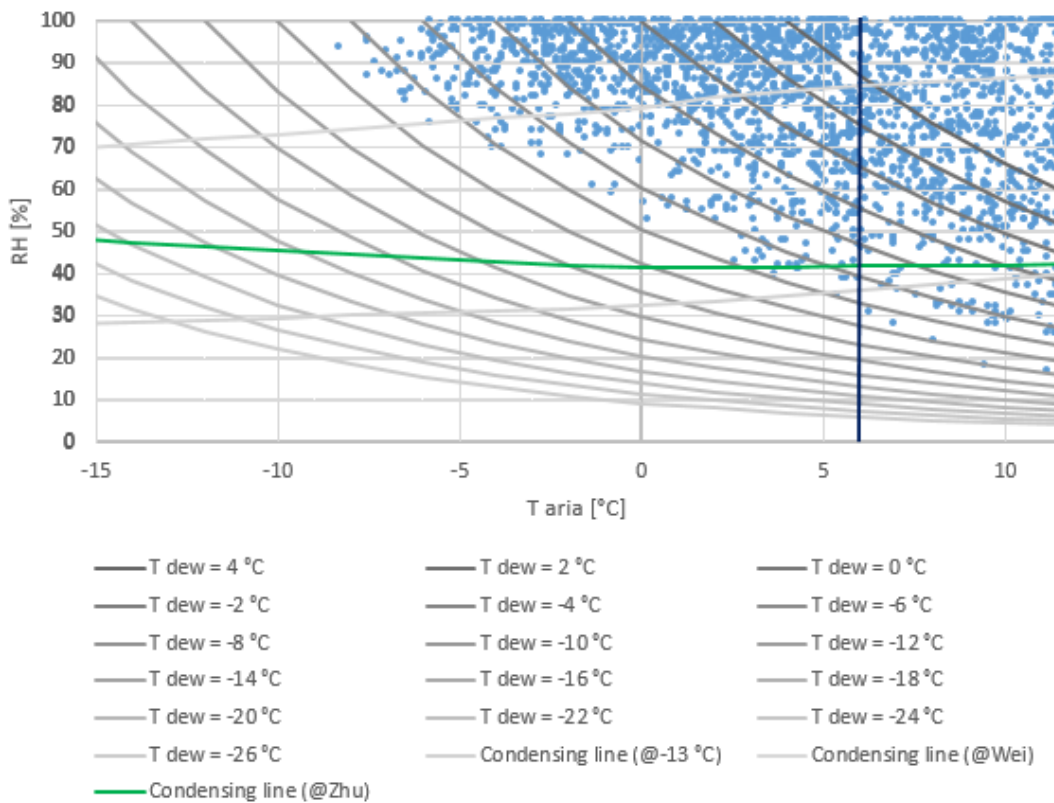


Figura 58. Frosting map del sito di Fiorenzuola D'Arda, nella stagione di climatizzazione 2018-2019, con la condensing e frosting line adottate per le valutazioni successive

Stante la disponibilità della frosting map tracciata, è possibile distinguere e classificare i punti di lavoro all'interno delle regioni di funzionamento. Per fare ciò, è stata impostato, direttamente sul foglio di calcolo realizzato, un criterio di selezione sulla base dei valori di RH, nota l'equazione del polinomio di interpolazione della condensing line adottata, espressa in Figura 49 e sotto riportata.

$$RH = 0,0079T_{aria}^2 - 0,2253T_{aria} + 42,241 \quad (6)$$

Pertanto, la casella di controllo adotta le selezioni di seguito, per ciascun punto di lavoro riportato in Figura 58:

- **SE** $RH > 0,0079T_{aria}^2 - 0,2253T_{aria} + 42,241$ **E** $T > 6 \text{ °C}$ \rightarrow condensing point;
- **SE** $RH > 0,0079T_{aria}^2 - 0,2253T_{aria} + 42,241$ **E** $T < 6 \text{ °C}$ \rightarrow frosting point;
- **SE** $RH < 0,0079T_{aria}^2 - 0,2253T_{aria} + 42,241$ \rightarrow non-frosting point.

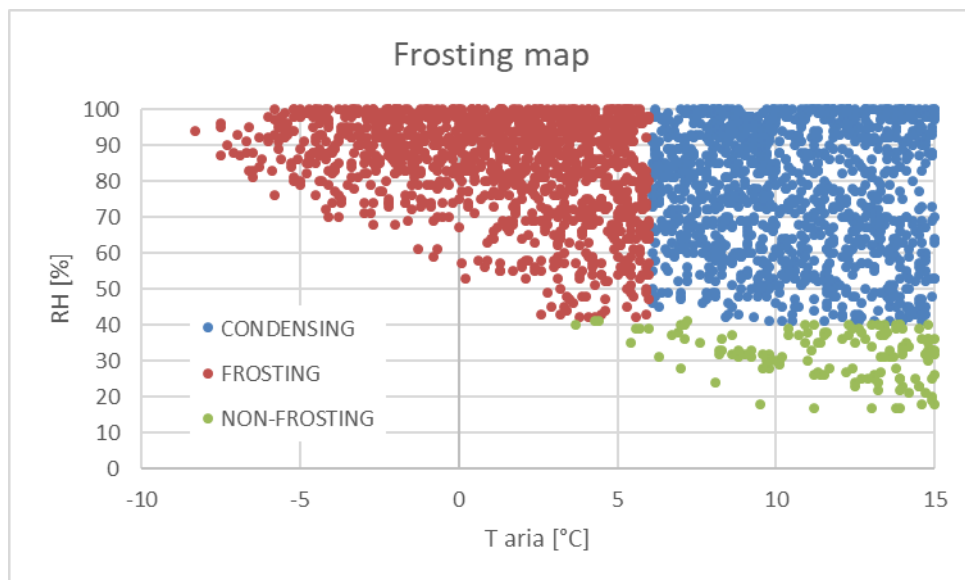


Figura 59. Ripartizione dei dati nelle differenti zone della frosting region

Con questa classificazione che è frutto di ipotesi di lavoro, ad esempio, sulla condensing line, è possibile analizzare le prestazioni delle pompe di calore, ad esempio analizzando il COP nelle 3 regioni di funzionamento.

Premesso che le frosting map possono avere molteplici impieghi (come la possibilità di verifica delle condizioni reali di formazione della brina), uno di essi è quello esplicitato e legato all'analisi dei dati di monitoraggio, quando disponibili, del funzionamento di una pdc.

In questo la frosting map diventa uno strumento di verifica per individuare in quali periodi il COP della macchina monitorata è stato influenzato dalla presenza di brina.

A titolo esemplificativo, viene riportata in Figura 60 l'analisi dei COP nell'intervallo 2-4, lo stesso adottato per le valutazioni dell'attività di ricerca della scorsa annualità. Le mediane, nei 3 casi, hanno valori simili, però cambia la loro distribuzione, evidenziando come nella condizione di non-frosting i quartili siano più ravvicinati.

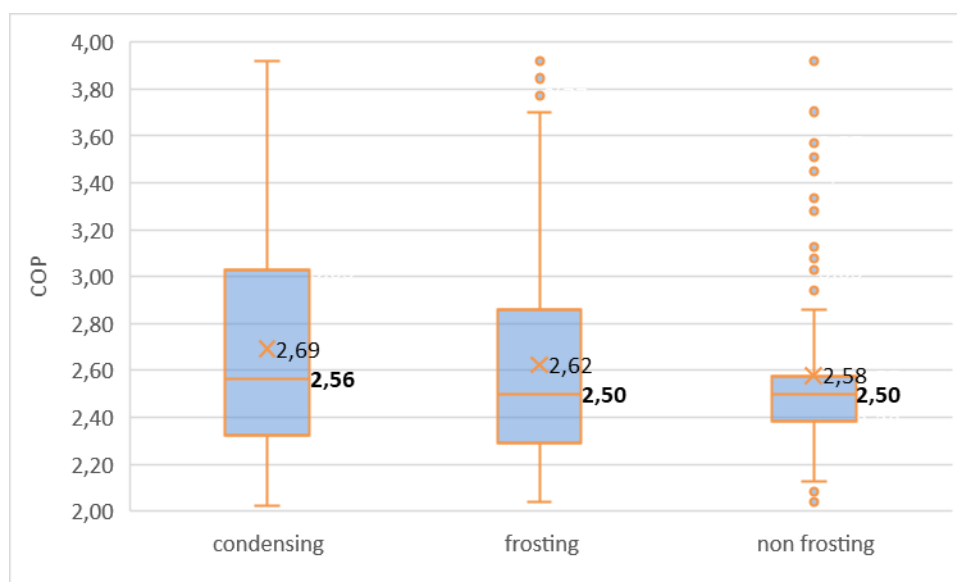


Figura 60. Box plot dei COP nelle 3 regioni di interesse, per il caso studio analizzato

La Figura 60 vuol mostrare una possibile analisi del COP alla luce delle 3 regioni di funzionamento, mostrando la situazione in condizioni potenzialmente a rischio frosting.

Occorre precisare che i valori mostrati nelle precedenti e nelle successive figure e, in generale, riferibili al monitoraggio della filiale bancaria si riferiscono alla totalità dei dati acquisiti nell'arco temporale della stagione di climatizzazione, senza escludere ad esempio le acquisizioni notturne o nei periodi di non utilizzo della pompa di calore (es. giorni festivi, oppure orari di chiusura della banca).

Questo approccio consente di descrivere il fenomeno del frosting nella sua interezza, e, di conseguenza, di mostrare la frosting map nella sua totalità. Risulta possibile, chiaramente, un ulteriore affinamento dei dati e della loro valutazione, effettuabile in relazione agli scopi o alla disponibilità di informazioni di dettaglio sulle modalità di conduzione dell'impianto.

Ad esempio, è possibile adottare dei criteri di filtraggio dei dati, a valle della divisione nelle tre zone di funzionamento, ottenendo una differente distribuzione dei valori. In questo caso, ad esempio, se si considerassero solo i valori di COP ottenuti nella fascia oraria giornaliera 8-18 (estremi inclusi) nel range 2-4, si otterrebbe il box plot di Figura 61.

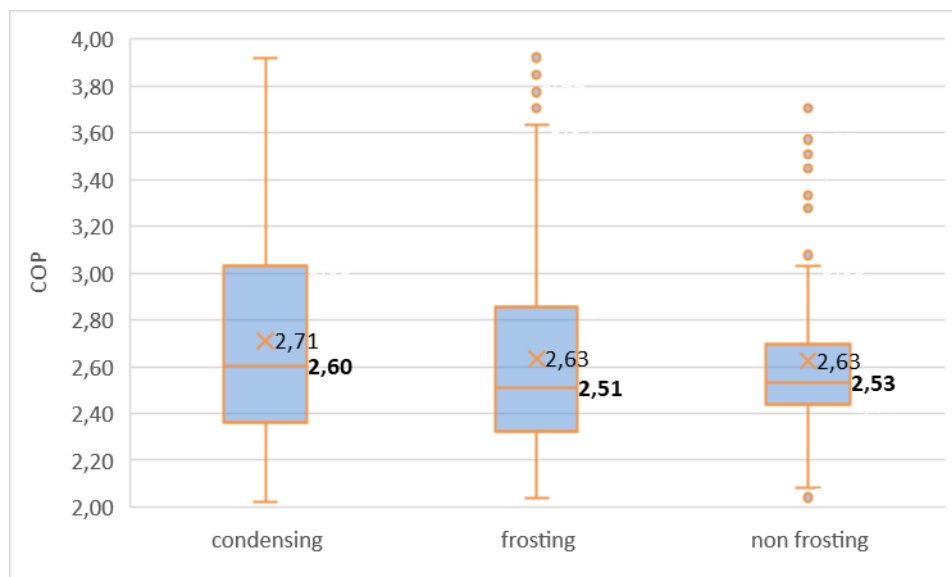


Figura 61. Box plot dei COP nelle 3 regioni di interesse, per il caso studio analizzato, considerando solo la fascia oraria di funzionamento 8-18

E' interessante osservare il confronto dei COP nelle tre regioni a valle del filtraggio dei dati operato. Infatti, in questo caso, i valori mediani crescono per le regioni di condensing e non-frosting. Inoltre, il valore medio e il valore mediano in condizioni di ipotetica condensazione sono più alti dei corrispondenti in condizioni di non-frosting. Ciò conferma quanto già discusso nei paragrafi precedenti, ovvero che l'efficienza di scambio della batteria (migliorCOP) è favorita in caso di superficie bagnata (regione di condensing), benchè si possa andare incontro alla condizione di frosting.

Anche il monitoraggio delle grandezze elettriche e termiche può essere analizzato alla luce della tripartizione operata.

Un esempio è mostrato in Figura 62, in cui i parametri energetici sono mostrati divisi nei 3 contributi.

L'analisi degli indicatori mostra, ad esempio, i maggiori assorbimenti elettrici occorsi nelle condizioni di frosting.

Analogamente, è possibile analizzare la ripartizione percentuale dei consumi (elettrici e termici) nell'intero periodo considerato, in relazione alle regioni individuate. A tale scopo, è possibile condurre un'analisi come

quella in Figura 63. Nel caso studio analizzato, ad esempio, e in relazione alla divisione effettuata, si evidenzia che il 58% dei consumi elettrici sono imputabili al funzionamento, nel periodo considerato, in condizioni di frosting, e il rimanente in condizioni di funzionamento a regime di cui circa il 26% in condizioni di condensazione.

Questi dati mettono in luce che il verificarsi del fenomeno del brinamento implica maggiori consumi elettrici in condizioni di funzionamento della pdc, di conseguenza, evitare il frosting significa conseguire risparmi in termini di energia elettrica assorbita dalla pdc.

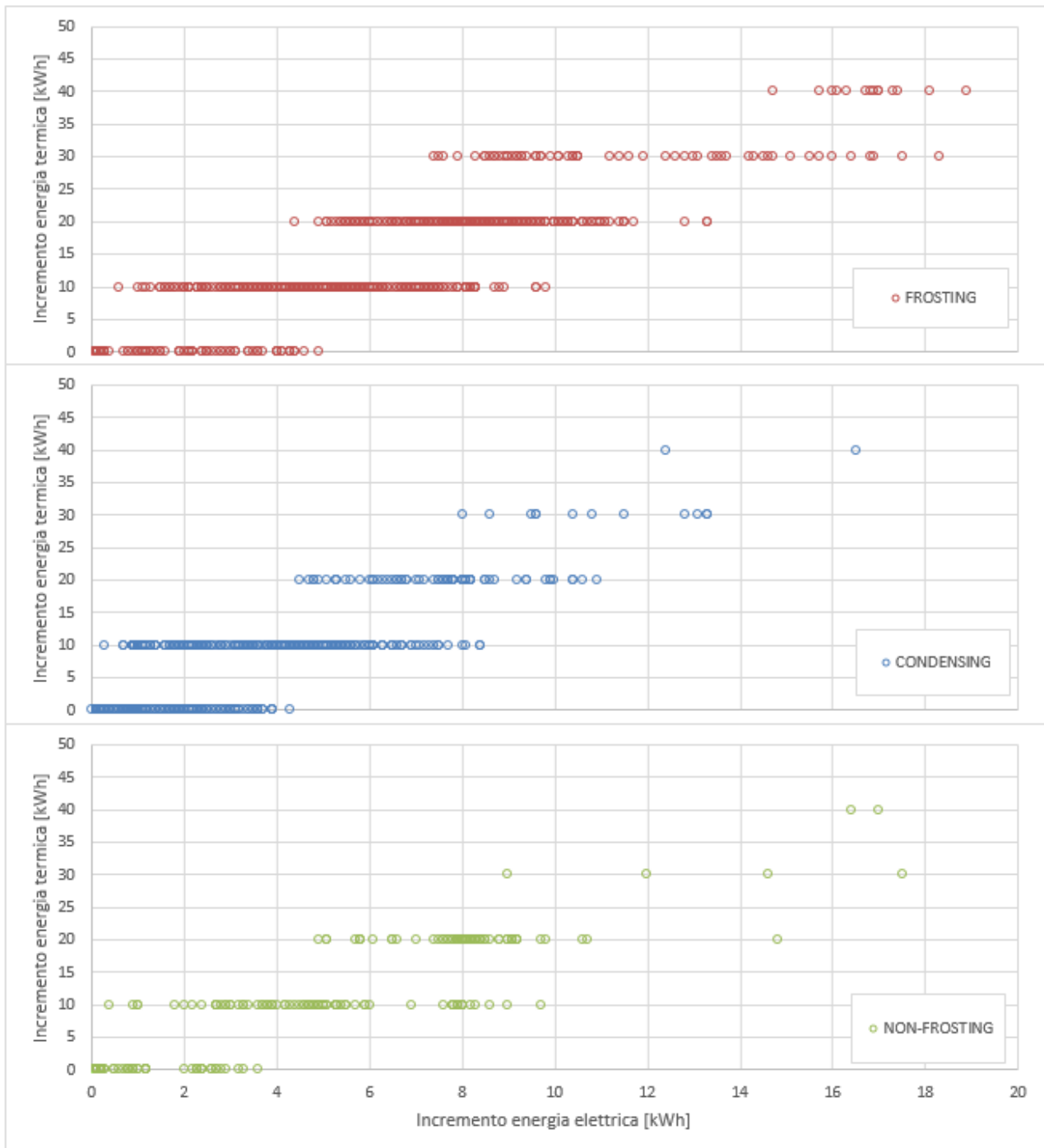


Figura 62. Analisi degli assorbimenti elettrici e della resa termica nelle 3 regioni di interesse per il caso studio analizzato

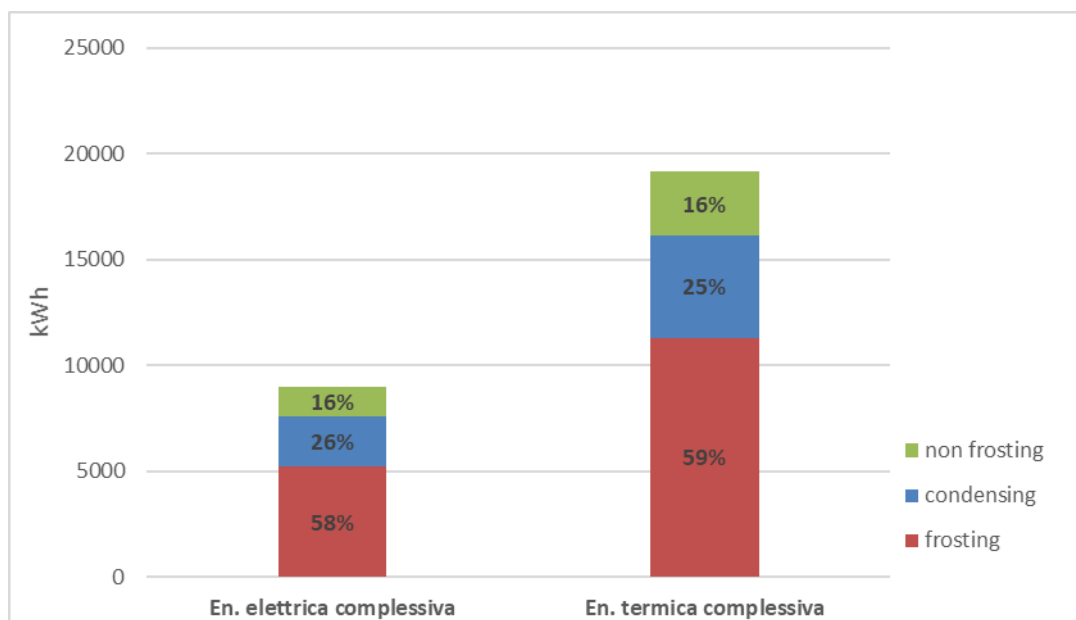


Figura 63. Analisi dei consumi complessivi nella stagione di monitoraggio, per le diverse regioni di interesse

7.5 Un confronto tra località mediante l'impiego delle frosting map

A titolo di confronto, si riportano considerazioni sulle frosting map di un'altra località.

Nello specifico, si vogliono sottolineare versatilità, portata e valenza dell'approccio impiegato.

Come località di confronto, viene scelta Roma, prendendo a riferimento i dati di temperatura e umidità rilevati presso il Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA da una stazione meteorologica ivi ubicata.

Dal momento che Roma si trova in zona climatica D, la stagione di riscaldamento è compresa tra il 01/11 e il 15/04. I dati a disposizione si riferiscono all'interno anno 2018, perciò sono state considerate, insieme, le seguenti frazioni dell'anno:

- Dal 01/01/2018 al 15/04/2018;
- Dal 01/11/2018 al 31/12/2018.

anche se appartenenti a due stagioni di riscaldamento distinte.

Tale scelta è stata operata per andare incontro alla disponibilità dei dati, e comunque far emergere la possibilità, ad esempio, di avvalersi di anni-tipo, peraltro già ampiamente utilizzati nella normativa di settore.

I dati climatici totali rilevati a Roma nel periodo considerato sono riportati in Figura 64: la nuvola di punti, nel range di temperature considerato, è meno ampia, e i dati sono più concentrati verso le temperature più alte.

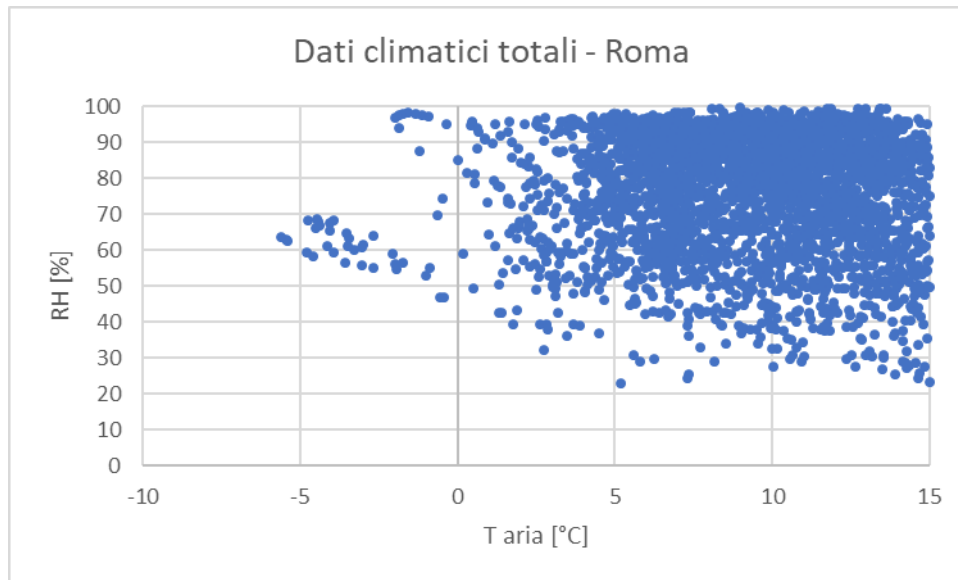


Figura 64. Dati della stazione meteorologica di Roma

Ancora una volta, risulta opportuna l'analisi per fasce di temperature ed umidità relativa, come riportata in Tabella 6: si evidenzia come siano stati più frequenti acquisizioni orarie comprese nel range di temperatura tra 5 °C e 10 °C e per il range di umidità relativa tra 90% e 100% (quindi, al di fuori della zona critica individuata sul diagramma psicrometrico di Figura 30 e di Figura 31).

In sintesi, una pdc installata a Roma (nel punto di acquisizione della stazione meteorologica) ha minore probabilità di lavorare in condizioni di brinamento, rispetto ad una ubicata a Fiorenzuola D'Arda sulla base dei dati climatici.

Tabella 6. Analisi dei dati meteorologici - Roma

	0%<RH≤10%	10%<RH≤20%	20%<RH≤30%	30%<RH≤40%	40%<RH≤50%	50%<RH≤60%	60%<RH≤70%	70%<RH≤80%	80%<RH≤90%	90%<RH≤100%
-10 °C<T≤-5 °C	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
-5 °C<T≤0 °C	0	0	0	0	2	12	17	1	1	9
0 °C<T≤5 °C	0	0	0	9	14	46	51	69	53	77
5 °C<T≤10 °C	0	0	6	18	56	123	188	220	425	501
10 °C<T≤15 °C	0	0	16	36	81	134	199	253	394	339
15 °C<T≤20 °C	0	1	18	24	83	148	94	98	47	21
20 °C<T≤25 °C	0	1	1	15	28	20	4	0	0	0
25 °C<T≤30 °C	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0

A conferma di quanto asserito, si può vedere in Figura 65 la frosting map elaborata per Roma, adottando ancora una volta i criteri di controllo su RH e T formulati in precedenza.

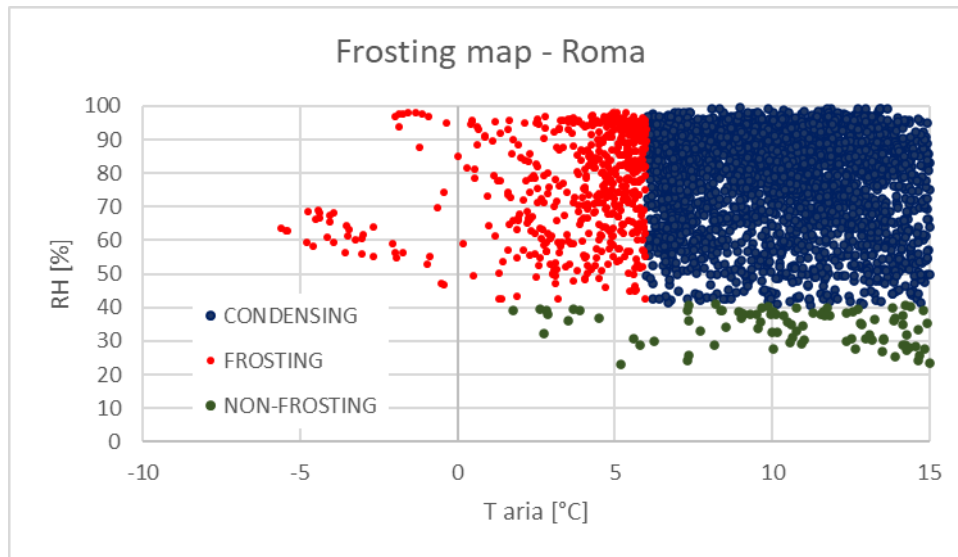


Figura 65. Frosting map di Roma

La frosting map mostra una zona di frosting (in rosso) decisamente meno ampia (in termini di temperature minime) ma soprattutto meno densa rispetto all'omologa elaborata per Fiorenzuola D'Arda. Al contrario, la zona di condensazione (in blu) risulta molto più popolata di punti di lavoro (3236 punti, contro i 563 della frosting region). Infine, la regione di non-frosting è quella meno densa di punti di lavoro.

Le frosting map, dunque, consentono di confrontare diverse località di installazione di generatori a pompa di calore in maniera rapida, individuando, in via speditiva, il rischio di funzionamento in condizioni potenziali di frosting.

Le frosting map offrono, come visto, un ventaglio di possibilità di applicazione.

In particolare, è possibile effettuare l'analisi predittiva dell'insorgenza del frosting utilizzando i dati meteorologici del sito in esame.

Tali analisi consente di valutare le ore di potenziale funzionamento in condizioni di brinamento, permettendo di effettuare delle valutazioni di confronto tra differenti località.

Ad esempio, le analisi eseguite per Fiorenzuola D'Arda e Roma mettono in luce le differenze climatiche delle due località, mostrando mappe di brinamento differenti, che possono orientare le scelte della tipologia di macchina da installare, la sua regolazione o le metodologie di defrosting.

8 Conclusioni

La pompa di calore costituisce uno strumento di accelerazione della transizione ecologica, coniugando efficienza energetica e utilizzo di fonti rinnovabili.

Nel contesto europeo, la Commissione disegna un profilo di ampio respiro per le pdc, che rappresentano, perciò, una tecnologia cruciale per gli obiettivi Europei, e in questa annualità si è voluto delineare, anche attraverso delle vere e proprie tappe cronologiche, il percorso tracciato dal Green Deal per le pompe di calore, unitamente ai prossimi milestones al 2030 e 2050.

A livello italiano, la pdc fa riferimento ad un comparto produttivo e ad una filiera industriale di eccellenza e fortemente radicata sul territorio che coinvolge numerosi soggetti: produttori, installatori elettrici e termoidraulici, progettisti nell'ottica della riqualificazione degli edifici, distributori di energia elettrica per l'azione di potenziamento della rete per accompagnare il processo di progressiva elettrificazione dei consumi.

Tuttavia, le sfide e strategie di decarbonizzazione passano attraverso la sempre maggiore consapevolezza, da parte anche dell'utente finale, delle caratteristiche della pompa di calore e delle sue naturali differenze con i comuni sistemi di climatizzazione. Per questo motivo, è stata proposta un'indagine comparativa tra caldaia e pompa di calore, evidenziando anche un'analisi di sensibilità in relazione alle prestazioni stagionali.

Le opportunità di installazione delle pompe di calore sono favorite, in Italia, dai meccanismi di incentivazione: questi sono stati analizzati in termini di investimenti e risparmi energetici conseguiti.

Tali strumenti, che sono di tipo economico, vanno ad affiancarsi agli strumenti tecnici, costituiti ad esempio dalle diagnosi obbligatorie per alcuni soggetti, che a loro volta implicano i monitoraggi dei risparmi energetici conseguiti, ma anche il monitoraggio in campo delle prestazioni operative.

Infatti, come accade per ogni prodotto reperibile sul mercato, anche per le pompe di calore risulta necessario indicarne in maniera chiara ed univoca le prestazioni, e numerosi sono gli standard e le norme (richiamate in questa annualità) che sono state emanate, a livello internazionale, per disciplinare il settore e i test per le prove in laboratorio.

Tuttavia, le prestazioni sul campo differiscono, a volte anche in maniera notevole, dai valori di targa, per via delle condizioni di utilizzo della pdc.

Tra i fenomeni che possono ridurre l'efficienza di una pdc nell'utilizzo invernale, vi è sicuramente il brinamento (frosting), che dipende da numerosi fattori (temperatura, umidità specifica, qualità dell'aria, velocità dell'aria, geometria e caratteristiche delle alette di scambio).

Questo fenomeno, di carattere transitorio nel funzionamento di una pompa di calore, è stato descritto, evidenziando le condizioni igrometriche che ne provocano la formazione, ma anche le metodologie e implicazioni impiantistiche atte alla sua eliminazione.

Studiare la formazione del frosting risulta perciò essenziale, in modo da poter:

- adottare gli accorgimenti tecnologici atti ad impedirne la formazione;
- individuare la più opportuna tecnologia di defrosting;
- scegliere la pdc più adatta (per taglia e sistema di defrosting) in relazione alla frequenza di accadimento del brinamento.

Per questo motivo, risulta essenziale disporre di un metodo che consenta di conoscere non solo quali sono le condizioni di brinamento, ma anche la predisposizione del sito a tale fenomeno.

Le frosting map, che consistono in curve sul piano T-RH e che sono state recentemente proposte nel panorama della letteratura di settore, in questo senso possono essere un utile strumento, utilizzabile sia per la verifica del fenomeno (ex post), sia nell'ottica di strumento di previsione (ex ante).

In questa attività di ricerca si è cercato di evidenziare entrambi gli aspetti di utilizzo:

- uso delle frosting map come verifica post monitoraggio (applicandole alla filiale bancaria di Fiorenzuola d'Arda, oggetto di studio anche nella precedente annualità)
- uso delle frosting map come strumenti di previsione (applicandole alla località di Roma).

L'approccio seguito consente di identificare, sulla base dei dati meteorologici del sito di installazione, le condizioni di potenziale brinamento sulla batteria di scambio di una pompa di calore, sia essa installata o da installare.

Nel caso di impiego ex-post (verifica), l'approccio proposto consente, note le condizioni termo-igrometriche del sito di installazione della pompa di calore, di tracciare le frosting map, mediante l'introduzione di ipotesi di lavoro necessarie alla completa definizione delle curve della mappa stessa.

Tali mappe consentono di capire la frequenza con cui, nella stagione di riscaldamento considerata e nel sito analizzato, le condizioni climatiche sono state tali da portare alla potenziale formazione di brina sullo scambiatore.

In relazione a tale frequenza è possibile scegliere in maniera più opportuna sia la pdc (nel caso di sostituzione) che il relativo sistema di defrosting, e, in ogni caso, procedere all'analisi delle prestazioni in relazione alle zone di lavoro (zona di non-brinamento, di condensazione o di brinamento)

Pertanto, incrociando a posteriori i dati derivanti dal monitoraggio della pdc con le frosting map costruite negli stessi istanti, è possibile determinare se si sono verificate le condizioni di brinamento, e anche riscontrare, per le stesse, le effettive prestazioni operative della pdc.

Ciò risulta particolarmente utile in mancanza di un rilievo a mezzo foto o video che consenta di intercettare in maniera univoca il momento di inizio del brinamento e, di conseguenza, le relative condizioni microclimatiche. Del resto, questo genere di rilievo (foto o video) non è usuale negli impianti a pompa di calore monitorati (in cui l'interesse è generalmente focalizzato sull'aspetto energetico), ma invece è caratteristico di studi e ricerche specifiche.

Le frosting map, quindi, permettono di individuare le regioni di funzionamento della pdc e dunque anche di analizzare i dati di monitoraggio già a disposizione di quanti sono deputati alla raccolta di tali informazioni, come ad esempio manutentori, ESCo o energy supplier.

Gli aspetti descritti sono emersi dal caso studio trattato, ovvero applicando il metodo ai dati monitorati di una filiale bancaria, oggetto di analisi anche nella precedente annualità. La frosting map della località ha permesso di individuare le possibili zone di lavoro, e poi di analizzare i dati di monitoraggio alla luce di tale suddivisione, fermo restando che è occorso introdurre delle ipotesi (es. sulla correlazione tra temperatura esterna e temperatura dello scambiatore esterno) per poter individuare tali zone.

Nel caso di impiego ex-ante (previsione), le frosting map permettono, sulla base di dati meteorologici affidabili e sempre mediante ipotesi sulla correlazione tra temperatura esterna e temperatura dello scambiatore esterno, di determinare l'entità locale del fenomeno di brinamento e, dunque, di valutare anche quale pompa di calore, e quale modalità di defrosting, siano raccomandabili per lo specifico sito in relazione alle sue condizioni meteorologiche tipo. Fare una tale operazione di intercettazione della macchina e della tecnica di defrosting ad hoc concorre al perseguimento degli obiettivi di efficienza energetica, ossia si ottiene un risparmio energetico a parità o miglioramento del servizio reso. In particolare, la diminuzione del consumo è riferita ad un vettore energetico (l'energia elettrica), di pregio in termini di flessibilità di impiego e di trasporto, e inoltre si conseguono benefici ambientali.

A dimostrazione del possibile impiego come strumento previsionale, si è fatto riferimento ai dati di temperatura e umidità acquisiti a Roma, permettendo di confrontare questa località con Fiorenzuola d'Arda nello stesso periodo. Si è mostrato che, a parità di altre condizioni e di ipotesi di lavoro, una stessa pdc ubicata a Roma avrebbe avuto minore frequenza di lavoro in condizioni di frosting, rispetto ad una omologa pdc installata a Fiorenzuola D'Arda.

Stanti tali considerazioni, la frosting map si configura come un mezzo a doppia modalità di impiego, e per questo motivo risulta uno strumento di grande valenza.

Si sottolinea che le frosting map incrociano il loro percorso con 3 ampi temi di particolare rilievo, ovvero:

- energia;
- ambiente;

- clima.

Dal punto di vista energetico, le frosting map si configurano come un mezzo di facile impiego per l'individuazione della migliore pompa di calore in relazione al sito di installazione. Ciò si può riflettere in scelte sul dimensionamento della pdc, o sulle logiche di controllo della stessa, anche, ad esempio, in caso di impianto ibrido. Inoltre, alla luce della frosting map della località di interesse, è possibile individuare la migliore tecnologia di sbrinamento in relazione al sito.

Occorre sottolineare che tutti i sistemi di sbrinamento comportano delle penalizzazioni, siano esse di tipo energetico o di comfort e, in generale, si può asserire che l'energia da fornire alla batteria per realizzare il defrosting può provenire o dal ciclo stesso realizzato dalla pdc (es. inversione di ciclo o by-pass), o da un apporto esterno (es. resistenza elettrica), con conseguente riduzione della potenza termica resa o con assorbimenti elettrici aggiuntivi. Questo comporta un dispendio energetico, a parità di servizio reso, quindi una riduzione dell'efficienza energetica che si va ad aggiungere agli effetti negativi derivanti dalla riduzione dello scambio termico della batteria per effetto del ghiaccio stesso.

Dal momento che i diversi sistemi di defrosting comportano delle complessità impiantistiche differenti, ma anche delle efficienze variabili, individuare il miglior sistema di sbrinamento significa eseguire una valutazione di tipo tecnico ed economico che si fonda anche sulla probabilità o severità di frosting che la località di installazione presenta.

Gli aspetti ambientali sono connessi, ovviamente, agli aspetti di miglioramento dell'efficienza energetica. Inoltre, nello sviluppo delle frosting map viene sottolineata l'ipotesi che la batteria di scambio sia lambita da aria pulita. Questo aspetto viene evidenziato, sia perché gli sviluppatori delle frosting map hanno esperienza di città in cui l'inquinamento dell'aria è rilevante, sia perché il particolato aero-sospeso che si deposita sulla batteria costituisce un punto di nucleazione per la brina. Dunque, quanto più la batteria è pulita, tanto meno sarà luogo di frosting.

Di conseguenza, l'aspetto di qualità dell'aria è rilevante e può essere oggetto di ulteriore investigazione. Infatti, in zone climaticamente simili ma con tassi di inquinamento dell'aria differenti, il frosting potrebbe verificarsi in corrispondenza di parametri meteorologici diversi. Per lo stesso motivo, la correlazione tra la temperatura del coil e la temperatura esterna (che è fondamentale, per poter tracciare la frosting map) può essere alterata dalla presenza del particolato inquinante aero sospeso. Ciò implicherebbe una differente curva di frosting e, di conseguenza, una diversa ripartizione del piano T-RH nelle tre regioni di funzionamento.

Pertanto, il parametro di qualità dell'aria potrà essere oggetto di ulteriore investigazione.

Infine, le frosting map coinvolgono l'aspetto climatico, dal momento che permettono di confrontare in maniera rapida più località in relazione alle condizioni meteorologiche che si registrano, eventualmente, facendo riferimento agli "anni tipo climatici". Questo concetto risulta strategico anche per tener conto delle variazioni (anche locali) delle condizioni climatiche, che negli ultimi anni stanno causando un peggioramento della situazione idrometeorologica, rendendo il territorio nazionale sempre più vulnerabile all'irregolarità delle precipitazioni, alla siccità ed all'inaridimento.

8.1 *Sviluppi futuri*

Le frosting map e la metodologia di approccio ed analisi dei dati elaborate in questa attività di ricerca, offrono possibili sviluppi futuri:

- scalabilità e generalizzabilità del metodo: l'approccio proposto, infatti, dipende esclusivamente dalle condizioni climatiche dei siti, e non dalla pompa di calore. Pertanto, potendo prescindere dalla macchina, è possibile utilizzare la frosting map per scegliere la macchina migliore in relazione al sito, e anche in virtù del sistema di defrosting che essa impiega;
- costruzione di frosting map italiane, ovvero per i siti di cui si dispone di file meteorologici. In caso di mancanza di dati climatici, è possibile effettuare un monitoraggio che richiede una strumentazione

di facile impiego e a basso costo (ad es. un termo-igrometro da esterno). Questo aspetto rende di fatto capillare la possibilità di tracciare frosting map su tutto il territorio. Di conseguenza, si può pervenire all'obiettivo ulteriore di grande caratura che consiste nella costruzione di una vera e propria mappatura nazionale;

- estensione delle frosting map ad uso predittivo calcolandole sulla base dei Temperature Reference Years (TRY) disponibili dei dati climatici italiani (UNI 10349 [71])
- Affinamento del modello di temperatura del coil in relazione alla temperatura esterna, in modo da avere delle frosting map più accurate. Tale correlazione si avvale di misure sperimentali e consente di dividere in maniera più opportuna le mappe ovvero i dati meteorologici; infatti, all'utilità di una mappatura del frosting a livello italiano, si potrebbe aggiungere la potenzialità che si avrebbe nel costruire un database che raccolga le correlazioni tra temperatura della batteria di scambio e temperatura dell'aria, in funzione, ad esempio, della taglia della pompa di calore, del fattore di carico e di altri parametri operativi. Un sistema che potrebbe, di fatto, integrare quanto già avviato con lo standard ASHRAE 205P sarebbe una preziosa risorsa per la più accurata definizione della condensing line e, di conseguenza, delle frosting map stesse.
- Implementazione di un tool informatico: sulla base della numerosità delle stazioni meteorologiche, della possibilità di monitoraggio delle condizioni climatiche locali, e della disponibilità degli anni climatici tipo, è possibile sviluppare un tool, a disposizione dei tecnici e degli installatori, finalizzato alla valutazione della possibilità di insorgenza del frosting;
- Adozione di criteri basati sulle frosting map per la scelta della pdc e del relativo sistema di defrosting in relazione alle condizioni meteorologiche del sito di installazione. In una località che, per via delle condizioni meteorologiche tipiche nel corso della stagione di riscaldamento, si determinano frequenti punti di lavoro della pdc in condizioni di frosting, o ancor peggio in condizioni di frosting severo (come definito dalla letteratura), potrebbe essere preferibile installare una pdc con inversione di ciclo; se, invece, la frosting map evidenzia che i fenomeni di frosting possono essere sporadici nel corso dell'anno, si potrebbe preferire un sistema che si avvale del fermo preventivo della macchina. La selezione della più opportuna pdc può, di riflesso, avere risvolti economici rilevanti, non solo per quanto riguarda il costo di acquisto della macchina (che varia in ragione anche della presenza e tipologia di sistema di defrosting) ma anche per i costi di esercizio e di manutenzione. Si consideri, a titolo di esempio, l'importanza della stabilità delle temperature in alcuni settori del terziario (es. supermercati e attività legati alla catena del freddo, settore ospedaliero e farmaceutico...); in questo genere di attività, poter predire, controllare, e mitigare il frosting implica poter gestire o evitare eventuali fermi-macchina o anomalie termiche nei locali climatizzati.
- Adozione dei criteri di scelta della pompa di calore che uniscano le informazioni derivanti dalla frosting map alle informazioni sull'effettivo uso (reale o presunto) della pdc stessa che potrebbe essere saltuario. Un esempio semplice, nel settore residenziale, è dato dalla fruizione di una casa di villeggiatura: il carattere stagionale di utilizzo, unito alle informazioni sulla località di ubicazione, potrebbe guidare la selezione della pdc a servizio dell'unità stessa. Nel settore terziario, un analogo ragionamento potrebbe essere condotto per gli spazi occupati dagli enti del terzo settore (es. organizzazioni di volontariato).

In sintesi, nella presente attività di ricerca, si è fatto riferimento alla letteratura scientifica pertinente, dopo aver confrontato le diversità di approccio e anche le implicazioni nella divisione e costruzione della frosting map; tuttavia, la disponibilità di una banca dati sulle correlazioni tra temperatura della batteria di scambio e temperatura dell'aria avrebbe potuto permettere una più accurata definizione della frosting line. Ciò implica che le considerazioni esposte e i grafici presentati derivano da ipotesi di lavoro che possono cambiare o essere rimosse ma, ad ogni modo, la metodologia implementata non viene invalidata e si contraddistingue per i suoi tratti di innovatività non solo nell'individuazione degli aspetti cruciali del brinamento ma anche delle prestazioni energetiche della pdc ad esso connesse con le possibilità di intercettazione e riduzione degli assorbimenti energetici, in riferimento al vettore energia elettrica.

9 Riferimenti bibliografici

1. RSE, “La pompa di calore. Una soluzione efficiente e sostenibile”, RSEView Riflessioni sull’Energia (2018), Alkes, Rodano Millepini (MI). ISBN 978-88-943145-1-9 https://www.rse-web.it/applications/webwork/site_rse/local/doc-rse/Pompe_calore_2018/index.html
2. European Copper Institute, “Heat Pumps: Integrating technologies to decarbonise heating and cooling”, (2018) https://www.ehpa.org/fileadmin/red/03_Media/Publications/ehpa-white-paper-111018.pdf
3. S. Bellò, “Le proposte della filiera delle pompe di calore per il Recovery Plan e gli obiettivi 2030 e 2050 dello European Green Deal”, Roma 29 aprile 2021, Amici della Terra https://www.amicidellaterra.it/images/efficienzaitalia/pompadicalore/2021/Stefano_Bello.pdf
4. S. Grassi, in Comunicato stampa “Pompe di calore essenziali per i nuovi obiettivi UE di decarbonizzazione. Presentate le proposte della filiera per l’European Green Deal in Italia”, Roma 29 aprile 2021, Amici della Terra e Assoclimate https://www.amicidellaterra.it/images/efficienzaitalia/pompadicalore/2021/2021-04-29_CS_AdT_Assoclimate.pdf
5. R. Lazzarin, F. Busato, D. Nardotto, M. Noro, “Studio del brinamento delle batterie su pompe di calore a compressione”, Ricerca di Sistema Elettrico, Report RSE/2009/31 (2008) https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/tecnologie-elettriche/rse31.pdf
6. W. Wei, L. Ni, S. Li, W. Wang, Y. Yao, L. Xu, Y. Yang, “New frosting map of variable-frequency air source heat pump in severe cold region considering the variation of heating load”, Renewable Energy, 161 (2020), 184-199
7. I. Bettetti, “Analisi di una pompa di calore aria-acqua: miglioramento delle prestazioni in fase di defrosting mediante accumulo in sottoraffreddamento”, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 2015/2016 http://tesi.cab.unipd.it/52120/1/Bettetti_Ivan_tesi.pdf
8. 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 airsource heat pump units”, Applied Thermal Engineering, 90 (2015), 782-791
9. COM(2019) 640 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN> (last access: 28/02/2022)
10. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_it (last access: 31/01/2022)
11. https://italy.representation.ec.europa.eu/notizie-ed-eventi/notizie/indagine-eurobarometro-gli-europei-considerano-i-cambiamenti-climatici-il_it (last access: 31/01/2022)
12. COM(2020) 562 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:562:FIN> (last access: 31/01/2022)

13. Regolamento (UE) 2021/1119
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32021R1119> (last access: 31/01/2022)
14. COM(2021) 950
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:950:FIN> (last access: 31/01/2022)
15. COM(2020) 299
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:299:FIN> (last access: 31/01/2022)
16. COM(2020) 662
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2020:662:FIN> (last access: 31/01/2022)
17. COM(2021) 550
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:550:FIN> (last access: 31/01/2022)
18. COM(2021) 557
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:557:FIN> (last access: 31/01/2022)
19. Direttiva (UE) 2018/2001
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32018L2001> (last access: 31/01/2022)
20. COM(2021) 558
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:558:FIN> (last access: 31/01/2022)
21. Raccomandazione (UE) 2021/1749
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32021H1749> (last access: 31/01/2022)
22. COM(2021) 802
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:802:FIN> (last access: 31/01/2022)
23. COM(2021) 551
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:551:FIN> (last access: 31/01/2022)
24. COM(2021) 960
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:960:FIN> (last access: 31/01/2022)
25. Camera dei Deputati, Servizio Studi, XVIII Legislatura, “Emendamento al Protocollo di Montreal sulle sostanze che riducono lo strato di ozono, adottato a Kigali il 15 ottobre 2016. A.C. 2655”, Dossier n. 373 del 29 ottobre 2020
<https://documenti.camera.it/leg18/dossier/pdf/ES0261.pdf> (last access: 31/01/2022)
26. <https://www.rinnovabili.it/ambiente/emendamento-kigali-hfc-gas-serra/> (last access: 31/01/2022)
27. G. Parisi, “L’impiego delle Pompe di Calore tra obbligo, convenienza e opportunità”, XII Conferenza Nazionale per l’efficienza energetica di Amici della Terra (web edition), 23 novembre 2020
<https://www.amicidellaterra.it/index.php/le-conferenze/conferenze-sull-efficienza-energetica/xii-conferenza-efficienza> (last access: 31/01/2022)
28. COM(2021) 660
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:660:FIN> (last access: 31/01/2022)

29. COM(2021) 952
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2021:952:FIN> (last access: 31/01/2022)
30. <https://heatpumpingtechnologies.org/annexes/ideas-and-proposals>
31. SWD (2021) 307 –part 3/5
https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:bdd70525-3658-11ec-8daf-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_3&format=PDF (last access: 01/02/2022)
32. IEA, “Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector”, October 2021. All rights reserved
https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroby2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf (last access: 01/02/2022)
33. IEA, “World Energy Outlook 2021”, December 2021. All rights reserved
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/4ed140c1-c3f3-4fd9-acae-789a4e14a23c/WorldEnergyOutlook2021.pdf> (last access: 01/02/2022)
34. https://www.bancaditalia.it/compiti/operazioni-cambi/cambio/cambi_rif_20201231/ (last access: 01/02/2022)
35. D. Di Gregorio, “Analisi di un sistema multi energia a pompa di calore applicato ad un complesso residenziale”, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2017/2018
<https://webthesis.biblio.polito.it/7411/1/tesi.pdf> (last access: 14/02/2022)
36. <https://fire-italia.org/le-pompe-di-calore/> (last access: 14/02/2022)
37. R. Trinchieri, M. Pieve, “Le pompe di calore per una climatizzazione sostenibile”, Energia, Ambiente e Innovazione, 2 (2020), 137-140. DOI 10.12910/EAI2020-051
<https://www.eai.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=175&catid=6&Itemid=101> (last access: 14/02/2022)
38. Assoclimate – Costruttori sistemi di climatizzazione, “Libro Bianco sulle pompe di calore”, (2020)
https://www.assoclimate.it/media/files/1699_assoclimate_libroBIANCO_11_2020.pdf (last access: 14/02/2022)
39. <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (last access: 14/02/2022)
40. Legge 296/2006
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2007/01/11/07A00183/sg> (last access: 26/02/2022)
41. Agenzia Nazionale per l’Efficienza Energetica di ENEA, “Rapporto Annuale 2021. Le detrazioni fiscali per l’efficienza energetica e l’utilizzo delle fonti rinnovabili di energia negli edifici esistenti”
<https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/rapporto-annuale-detrazioni-fiscali/rapporto-annuale-detrazioni-fiscali-2021.html> (last access: 26/02/2022)
42. <https://www.energiaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali.html> (last access: 26/02/2022)
43. Decreto –Legge 34/2020
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/05/19/20G00052/sg> (last access: 26/02/2022)

44. Art. 16-bis del Testo Unico delle Imposte sui Redditi
<https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/386473/Articolo+16bis+Testo+unico+917+1986+art+16bis+Tuir.pdf/efe518a2-aa18-aa34-bf01-98ea845c1140> (last access: 26/02/2022)
45. Decreto 16 febbraio 2016
<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2016/03/02/16A01548/sg> (last access: 26/02/2022)
46. <https://www.gse.it/servizi-per-te/efficienza-energetica/conto-termico> (last access: 26/02/2022)
47. Agenzia Nazionale per l'Efficienza Energetica di ENEA, "Rapporto Annuale Efficienza Energetica 2021"
<https://www.energiaenergetica.enea.it/pubblicazioni/raee-rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica/rapporto-annuale-sull-efficienza-energetica-2022.html> (last access: 26/02/2022)
48. <http://data.ashrae.org/standard205/>
49. Y. Zhang, G. Zhang, A. Zhang, Y. Jin, R. Ru, M. Tian "Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: an analysis and review" *Energies*, 11 (2018), 2642
50. R. Lazzarin, F. Busato, F. Minchio, M. Noro, "Sorgenti termiche delle pompe di calore – Aspetti tecnici, economici e normativi", (2012), 90-92, Collana AICARR, Editoriale Delfino srl, Milano.
51. S.W. Wang, Z.Y. Liu "A new method for preventing HP from frosting" *Renewable Energy* 30 (2005) 753–761
52. P. Vivekh, M. Kumja, D.T. Bui, K.J. Chua "Recent developments in solid desiccant coated heat exchangers" *Applied Energy*, 229 (2018) 778-803
53. D. Huang, Q. Li, X. Y. "Comparison between hot-gas bypass defrosting and reverse-cycle defrosting methods on an air-to-water heat pump", *Applied Energy*, 86 (2009), 1697-1703
54. R. Lazzarin, "Pompe di calore parte teorica, parte applicativa", Ferroli
<https://www.ferroli.com/media/1483459710.pdf> (last access: 07/02/2020)
55. M. Franco "Modello semplificato per la valutazione dello sbrinamento all'evaporatore di pompe di calore", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 2013/2014
http://tesi.cab.unipd.it/45535/1/MAICOL_FRANCO_-_TESI_MAGISTRALE.pdf
56. M. Song, S. Deng, C. Dang, M. Ning, W. Zhihua "Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting" *Applied Energy* 211 (2018) 1150-1170
57. https://www.centrogalileo.it/nuovaPA/Articoli%20tecnici/Fantoni/circuiteria_elettrica_140.htm
58. E. Casali "Pompe di calore: tipologie, progettazione e benefici nell'utilizzo" (2015) Flaccovio Editore. E-book ISBN 9788857904924
59. M. Amer, C.-C. Wang, "Review of defrosting methods", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73 (2017) 53-74
60. X. Bai, S. Liu, L. Zhang, M. Wei "An experimental study on achieving even-frosting for an air source heat pump using a novel dual-fan outdoor coil", *Energy and Buildings*, 255 (2022), 111695

61. E. Rossi di Schio, V. Ballerini, M. Dongellini, P. Valdiserri, "Defrosting of air-source heat pumps: effects of real temperature data on seasonal energy performance for different locations in Italy" *Applied Sciences* 11 (2021) 8003
62. M. Adachi, S. Inoue, T. Aizawa, "On the refrigeration cycle property of heat pump air conditioners operating with frost formation", *Refrigeration* 50 (576) (1975) 818-820 (in giapponese).
63. J.F.Wang, G.M. Chen, "Study of frosting characteristics of air source heat pumps during winter heating", *Refrigeration* 1 (1997) 8-11 (in cinese)
64. J. Zhu, Y. Sun, W. Wang, Y. Ge, L. Li, J. Liu "A novel temperature-humidity-time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps" *International Journal of Refrigeration* 54 (2015) 45-54
65. R. Tang, F. Wang, Z. Wang, W. Yang, "Division of frosting type and frosting degree of the air source heat pump for heating in China", *Frontiers in Energy Research* 9 (2021) 708478
66. <https://bcs.wiley.com/he-bcs/Books?action=resource&bcsId=10611&itemId=111932145X&resourceId=42102>
67. Z. Li, W. Wang, Y. Sun, S. Wang, S. Deng, Y. Lin, "Applying image recognition to frost built-up detection in air source heat pumps", *Energy* 233 (2021) 121004
68. I. Nardi, C. Lavinia, D. Iatauro, N. Calabrese, "Field study on heat pump monitoring: challenges and opportunities", *E3S Web Conf.* 312 (2021) 04002
69. <https://www.arpae.it/it/dati-e-report/dati-e-report>
70. <https://simc.arpae.it/dext3r/>
71. UNI 10349-1:2016 Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici

10 Abbreviazioni ed acronimi

pdc	Pompa di calore
CE	Comunità Europea
UE	Unione Europea
BPM	Banco Popolare di Milano
RED	Direttiva sulle fonti rinnovabili
EED	Direttiva sull'efficienza energetica
ETS	Sistema per lo scambio di quote di emissioni dei gas a effetto serra
EPBD	Energy Performance of Building Directive - Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia
ErP	Energy Related Product
SPF	Fattore di rendimento medio stagionale
EE	Energy Efficiency
HFC	Idrofluorocarburi
PNIEC	Piani Nazionali Integrati Energia e Clima
ACS	Acqua Calda Sanitaria
IEA	International Energy Agency
NZE	Net-Zero Emissions by 2050 Scenario
SCOP	Coefficiente di prestazione stagionale
HVAC&R	Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration
FFASHP	Frost Free Air Source Heat Pump
CATT3	Computer-Aided Thermodynamic Table 3
T coil	Temperatura del coil (ovvero, della batteria di scambio)
T aria	Temperatura dell'aria esterna
T dew	Temperatura di dew point
p_v	Pressione del vapore d'acqua
p	Pressione ambiente
p_{sat}	Pressione di saturazione
ARPAE	Agenzia Prevenzione Ambiente Energia dell'Emilia Romagna
TRY	Temperature Reference Year

11 Elenco delle figure

Figura 1. Cronologia del Green Deal con focus sulle pompe di calore	14
Figura 2. Annex sulle pompe di calore nell'ambito dei lavori dell'IEA	15
Figura 3. Pietre miliari settoriali nel cammino verso le emissioni zero al 2050 con focus sulle pompe di calore (Rielaborazione ENEA da [32])	20
Figura 4. Schema a blocchi della generazione termica da pompa di calore (Rielaborazione ENEA da [38]) ...	23
Figura 5. Consumo di energia primaria: caldaia vs pompa di calore.....	23
Figura 6. Risparmio di energia primaria e produzione rinnovabile: caldaia vs pompa di calore	24
Figura 7. Emissioni di anidride carbonica: caldaia vs pompa di calore	24
Figura 8. Potenziale di riduzione delle emissioni di anidride carbonica, al 2020, della pompa di calore ad aria rispetto alla caldaia a condensazione con focus Italia [39].....	25
Figura 9. Set di incentivi per le pompe di calore.....	26
Figura 10. Ecobonus 2020 - Investimenti attivati in funzione della tecnologia.....	27
Figura 11. Risparmi energetici conseguiti in funzione della tecnologia	27
Figura 12. Ecobonus 2020 – Numerosità di interventi di riqualificazione globale	28
Figura 13. Ecobonus 2020 – Numerosità di interventi riferiti alla climatizzazione invernale in funzione della tecnologia (Rielaborazione da [41]).....	28
Figura 14. Ecobonus 2020 - Ripartizione regionale della numerosità di interventi riferiti alle pompe di calore esclusi scaldacqua (Rielaborazione da [41])	29
Figura 15. Superbonus 2021 – Numerosità di interventi trainanti in funzione delle tipologie di immobili e di pompa di calore (Rielaborazione da [41])	30
Figura 16. Superbonus 2021 – Potenza incentivata in funzione delle tipologie di immobili e di pompa di calore. Interventi trainanti (Rielaborazione da [41])	31
Figura 17. Superbonus 2021 – Numerosità di interventi trainati in funzione della tipologia di pompa di calore. Target: parti comuni di condomini (Rielaborazione da [41])	31
Figura 18. Superbonus 2021- Potenza incentivata in funzione della tipologia di pompa di calore. Interventi trainati, target: parti comuni di condomini (Rielaborazione da [41])	32
Figura 19. Bonus casa 2020 – Numerosità di interventi in funzione della tipologia di pompa di calore (Rielaborazione da [41])	32
Figura 20. Bonus casa 2020 – Potenza installata in funzione della tipologia di pompa di calore (Rielaborazione da [41])	33
Figura 21. Bonus casa 2020 – Risparmio energetico conseguito dalle pompe di calore. (Rielaborazione da [41]).....	33
Figura 22. Bonus casa 2020 – Ripartizione regionale della numerosità di interventi	34
Figura 23. Conto termico 2020 – Incentivo erogato in funzione della tecnologia	35
Figura 24. Conto termico 2020 – Ripartizione regionale della numerosità di interventi	36
Figura 25. Flow chart di implementazione dei requisiti dell'ASHRAE Standard 205 (immagine tratta da [48])	39
Figura 26. Flow chart del monitoraggio di una pompa di calore	40
Figura 27. Diagramma psicrometrico con temperatura di rugiada superiore a 0 °C.....	42
Figura 28. Diagramma psicrometrico con temperatura di rugiada inferiore a 0°C.....	42
Figura 29. Variazione del dew point a parità di umidità relativa	43
Figura 30. Condizioni più gravose per la formazione di brina sulla batteria evidenziate sul diagramma psicrometrico	44
Figura 31. Condizioni più gravose per la formazione di brina sulla batteria evidenziate nel piano Tdew-T ...	44
Figura 32. COP di una pompa di calore ad aria al variare della temperatura esterna. per tre diverse umidità relative [54]	45
Figura 33. Metodi per operare il defrosting (Rielaborazione ENEA da [55]).....	46
Figura 34. Distinzione delle metodologie di defrosting (Rielaborazione ENEA da [56])	46

Figura 35. Funzionamento in climatizzazione invernale (a) e in climatizzazione estiva (b) di una pdc reversibile con valvola a 4 vie.....	47
Figura 36. Defrosting di una pompa di calore con valvola di by-pass.....	47
Figura 37. Frosting map proposta da Zhu et al., direttamente estratta dall'articolo [49]	49
Figura 38. Computer-Aided Thermodynamics Tables 3 (CATT3): copyright	49
Figura 39. Schermata di input di CATT3, per lo studio psicrometrico.....	50
Figura 40. Schermata di output di CATT3, per lo studio psicrometrico	50
Figura 41. Foglio di lavoro contenente gli output necessari al plot delle frosting map	51
Figura 42. Fascio di curve iso-dew point.....	51
Figura 43. Confronto tra le correlazioni di letteratura: temperatura della batteria al variare della temperatura dell'aria	54
Figura 44. Confronto tra le correlazioni di letteratura: salto termico aria-batteria al variare della temperatura dell'aria	54
Figura 45. Procedura per il tracciamento della condensing line.....	55
Figura 46. Frosting map relativa all'approccio di Zhu et al. (ovvero, usando l'equazione 3)	56
Figura 47. Frosting map relativa all'approccio di Wei et al. (ovvero, usando l'equazione 4)	56
Figura 48. Frosting map relativa all'approccio basic (ovvero, usando l'equazione 5)	57
Figura 49. Confronto tra le diverse condensing line	58
Figura 50. Metodologia di valutazione dei dati. Approccio ex-ante	59
Figura 51. Metodologia di valutazione dei dati. Approccio ex-post.....	61
Figura 52. Localizzazione della filiale bancaria e della stazione meteorologica di acquisizione dei dati termogrametrici.....	62
Figura 53. Schermata di interrogazione del portale di ARPAE	62
Figura 54. Trend di temperatura dell'aria acquisito dalla stazione meteorologica di ARPAE	63
Figura 55. Trend di umidità relativa dell'aria acquisito dalla stazione meteorologica di ARPAE	63
Figura 56. Dati meteorologici della stazione meteo di Fiorenzuola D'Arda, nel periodo di climatizzazione...64	64
Figura 57. Frosting map del sito di Fiorenzuola D'Arda, nella stagione di climatizzazione 2018-2019	65
Figura 58. Frosting map del sito di Fiorenzuola D'Arda, nella stagione di climatizzazione 2018-2019, con la condensing e frosting line adottate per le valutazioni successive	66
Figura 59. Ripartizione dei dati nelle differenti zone della frosting region	67
Figura 60. Box plot dei COP nelle 3 regioni di interesse, per il caso studio analizzato.....	67
Figura 61. Box plot dei COP nelle 3 regioni di interesse, per il caso studio analizzato, considerando solo la fascia oraria di funzionamento 8-18.....	68
Figura 62. Analisi degli assorbimenti elettrici e della resa termica nelle 3 regioni di interesse per il caso studio analizzato	69
Figura 63. Analisi dei consumi complessivi nella stagione di monitoraggio, per le diverse regioni di interesse	70
Figura 64. Dati della stazione meteorologica di Roma	71
Figura 65. Frosting map di Roma	72

12 Elenco delle tabelle

Tabella 1. Caratteristiche dell'appartamento target (fonte: [38])	22
Tabella 2. Condizioni al contorno (fonte: [38])	22
Tabella 3. Risultati dell'analisi comparativa: caldaia vs pompa di calore (fonte: Rielaborazione ENEA da [38])	22
Tabella 4. Quadro sinottico degli standard europei sulle pompe di calore	38
Tabella 5. Analisi dei dati meteorologici.....	64
Tabella 6. Analisi dei dati meteorologici - Roma.....	71