



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore terziario: stato dell’arte e analisi preliminari

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

MONITORAGGI DI IMPIANTI ASSERVITI AD EDIFICI REALI “ALL-ELECTRIC” NEL SETTORE TERZIARIO: STATO DELL’ARTE E ANALISI PRELIMINARI

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

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

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

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

Linea di attività: *LA3.23 - Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore terziario: stato dell’arte*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra

Si ringraziano l’ing. Massimo Cantoro (Banco BPM) e la Dott.ssa Sandra Cantù (tech4eff) per la collaborazione nell’identificazione dei possibili casi studio e per aver fornito le informazioni ad essi inerenti.

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY.....	5
1 INTRODUZIONE	6
1.1 GLI OBIETTIVI NAZIONALI PER L'EFFICIENZA ENERGETICA NEL CIVILE	6
1.2 IL RUOLO DELLE POMPE DI CALORE NEGLI EDIFICI NZEB E ZEB	7
1.3 OBIETTIVI DEL LAVORO	10
2 LA TECNOLOGIA DELLE POMPE DI CALORE.....	13
2.1 LE POMPE DI CALORE: CENNI GENERALI	14
2.1.1 <i>La sorgente aria</i>	16
2.1.2 <i>La sorgente acqua</i>	17
2.1.3 <i>La sorgente suolo</i>	19
2.1.4 <i>La sorgente energia solare</i>	20
2.1.5 <i>Tipologie di pompe di calore</i>	21
2.2 I SISTEMI VRV E VRF	23
2.3 RENDIMENTI DELLE POMPE DI CALORE	24
2.3.1 <i>I cicli di sbrinamento</i>	33
3 LA DIFFUSIONE DELLE POMPE DI CALORE	34
3.1 LA DIFFUSIONE DELLE POMPE DI CALORE NEL CONTESTO EUROPEO.....	34
3.2 LA DIFFUSIONE DELLE POMPE DI CALORE NEL CONTESTO ITALIANO	42
4 MONITORAGGI DI IMPIANTI A POMPA DI CALORE.....	48
4.1 I POSSIBILI CASI STUDIO.....	49
5 CONCLUSIONI.....	52
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	55
ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	57
NORMATIVA DI RIFERIMENTO	57
ALLEGATO 1 SCHEDE DI SINTESI DEI CASI STUDIO INDIVIDUATI	58

Sommario

I consumi energetici del settore edilizio, sia esso residenziale o terziario, costituiscono una porzione rilevante dei consumi mondiali totali, ed il loro trend è in crescita. Molto si è fatto, negli ultimi anni, per contrastare tale tendenza: da un lato, favorendo la riduzione dei fabbisogni attraverso l'incremento delle prestazioni termiche degli elementi dell'involucro degli edifici; dall'altro lato, incoraggiando l'adozione e l'installazione di impianti e soluzioni tecnologiche maggiormente efficienti.

Nell'ottica di una progressiva decarbonizzazione del parco immobiliare, come previsto dalle strategie a lungo termine per l'efficienza energetica, delineate a livello europeo (Direttiva EU 848/2018) e nazionale (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima – PNIEC 2019), crescente rilevanza assumeranno i sistemi all-electric, ovvero i generatori a pompa di calore (pdc), anche in ragione della possibilità di integrazione con altre fonti rinnovabili.

La loro diffusione in Italia aumenta e i costi sempre più contenuti di questo tipo di tecnologia ormai matura ne favoriscono la penetrazione nel mercato dei generatori di calore. L'efficienza di una pdc dipende dalle sue componenti tecnologiche e dalle modalità di gestione ed uso (che implicano lo scostamento tra le prestazioni in laboratorio e quelle in situ). In particolare, queste ultime dipendono dalla modalità di distribuzione del calore, dalla temperatura di esercizio, dal salto termico tra sorgente fredda e pozzo caldo, dalle condizioni climatiche....

La sfida del miglioramento continuo delle componenti tecnologiche ha reso possibile realizzare pdc con prestazioni elevate e sempre più prossime a quelle ideali; obiettivo ulteriore è far sì che le condizioni operative al contorno non riducano in maniera significativa tali prestazioni.

Per questo motivo è importante monitorare le prestazioni delle pdc durante il loro esercizio, tenuto anche conto dei gradi giorni che caratterizzano il clima del luogo di installazione, sia durante la stagione di riscaldamento che di raffrescamento.

Si segnala che altre esperienze simili sono state condotte in altri Paesi europei; tuttavia, uno studio del genere per il contesto italiano ancora non è stato condotto. Questo genere di monitoraggi è importante affinché installatori e progettisti prendano consapevolezza delle differenze di performance tra condizioni di laboratorio e condizioni reali, al fine di guidare consapevolmente l'utente finale e/o il committente verso la scelta della soluzione impiantistica più opportuna.

Prima di affrontare le tematiche correlate al monitoraggio delle pdc, si ritiene opportuno delineare un quadro di sintesi sulla tecnologia, sulle più comuni tipologie di pdc in commercio e sulla numerosità delle stesse in Europa ed in Italia.

Summary

Energy consumption in buildings, whether residential or service sector, represents a significant part of the total world consumption, and follows a growing trend. A lot has been done in recent years to counteract this trend: on the one hand, by favouring the reduction of needs by increasing the thermal performance of the building envelope; on the other hand, by encouraging the adoption and implementation of more efficient systems and technological solutions.

In order to achieve a progressive decarbonisation of the building stock, as envisaged by the long-term strategies for energy efficiency, outlined in the European (EU Directive 848/2018) and national laws (Integrated National Plan for Energy and Climate - PNIEC2019) the all-electric systems, that is the heat pump generators, will become increasingly important, also due to the possibility of integration with other renewable sources.

The spread of all-electric systems in Italy is growing more and more and the progressively lower prices of this type of technology, nowadays mature, favour its penetration in the market of heat generators. The efficiency of a heat pump depends on its technological components and on the methods of management and use (which imply the difference between laboratory and in situ performance). In particular, the latter depends basically on the method of heat distribution, the operating temperature, the temperature drop between the cold and the hot source, the climatic conditions....

The challenge of continuous improvement of technological components made possible the creation of heat pumps with higher performance, ever closer to the ideal ones; further objective is now to ensure that the operating conditions at the boundary do not significantly reduce these performances. For this reason, it is important to monitor the performance of the heat pumps during the operating phase, also taking into account the degree days that characterize the climatic conditions of the installation site, both during the heating and cooling seasons.

It should be noted that other similar studies have been conducted in other European countries; however, such a study for the Italian context has not yet been conducted. This kind of monitoring is important to make installers and designers aware of the performance differences between laboratory conditions and real conditions, in order to consciously guide the end user, and / or the client, towards the choice of the most appropriate solution.

Before addressing the issues related to the monitoring of heat pump, it is considered appropriate to outline a summary framework on technology, on the most common types of heat pumps on the market and on the number of them in Europe and in Italy.

1 Introduzione

1.1 Gli obiettivi nazionali per l'efficienza energetica nel civile

Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima PNIEC [1], delinea gli obiettivi per il miglioramento in termini di efficienza e sicurezza del sistema energetico nazionale e di produzione da Fonti Energetiche Rinnovabili (FER). In esso infatti, partendo dall'analisi del bilancio energetico nazionale, sono evidenziati non solo i target energetici ed ambientali potenzialmente conseguibili nei prossimi decenni, ma anche gli strumenti tecnologici ed economici per l'ottenimento di tali obiettivi.

Dai dati analizzati, i consumi finali lordi di energia in Italia sono risultati circa 120 Mtep dei quali il 18,3% da FER. Nel settore termico, di grande rilevanza nel bilancio complessivo nazionale, la copertura da FER si è attestata intorno al 20% dei consumi energetici (11,2 Mtep) di cui: *“circa 10,3 Mtep in modo diretto (attraverso caldaie individuali, stufe, camini, pannelli solari, pompe di calore, impianti di sfruttamento del calore geotermico) e circa 0,9 Mtep sotto forma di consumi di calore derivato (ad esempio: attraverso sistemi di teleriscaldamento alimentati da biomasse). La FER più utilizzata nel 2017 per i consumi termici è la biomassa solida (circa 7,9 Mtep), utilizzata soprattutto nel settore domestico in forma di legna da ardere e pellet”*. (Dati 2017 Fonte PNIEC). Rilevante inoltre l'apporto delle pdc (2,65 Mtep), mentre risulta ancora piuttosto modesto quello dei biocarburanti liquidi, del biogas, della geotermia e del solare.

Da quanto descritto, è evidente l'importanza del processo di riqualificazione energetica del parco immobiliare nazionale, che potrà avere grande incidenza nel raggiungimento degli obiettivi programmati per il futuro. Nel settore civile, infatti, la riduzione delle emissioni al 2030 rispetto al 2005, nello scenario del PNIEC è pari a circa 35 MtCO₂eq, prevedendo un incremento dell'efficienza energetica del parco edifici esistenti, soprattutto attraverso interventi estesi di riqualificazione profonda (deep renovation) e applicazione di tecnologie particolarmente performanti negli impianti di climatizzazione.

Tali obiettivi sono in linea con quanto ribadito nella nuova Direttiva Europea 2018/844 EPBD, sulla prestazione energetica nell'edilizia, in cui si invitano gli Stati membri a dotarsi, entro il 2050, di misure tese a raggiungere l'obiettivo di lungo termine relativo alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra (-40% entro il 2030), e a decarbonizzare il parco immobiliare, cui è riconducibile circa il 36 % di tutte le emissioni di CO₂ nell'Unione Europea.

I grandi margini di efficienza del settore edilizio potranno, inoltre, essere integrati con misure che perseguano, oltre alla riqualificazione energetica, la ristrutturazione edilizia, sismica, impiantistica ed architettonica degli edifici più vetusti, come previsto dalla strategia di riqualificazione del parco immobiliare al 2050.

Tra gli obiettivi generali programmati dall'Italia, particolare rilevanza assumono alcuni punti che nei prossimi anni influiranno sulle strategie di riqualificazione energetica del parco immobiliare nazionale [1], ossia:

- *accelerare il percorso di decarbonizzazione, considerando il 2030 come una tappa intermedia verso una decarbonizzazione profonda del settore energetico entro il 2050;*
- *favorire l'evoluzione del sistema energetico, in particolare nel settore elettrico, da un assetto centralizzato a uno distribuito basato prevalentemente sulle FER, adottando misure che migliorino la capacità delle stesse di contribuire alla sicurezza e, nel contempo, favorire assetti, infrastrutture e regole di mercato che, a loro volta contribuiscano all'integrazione delle FER;*
- *promuovere l'efficienza energetica in tutti i settori, come strumento per la tutela dell'ambiente, il miglioramento della sicurezza energetica e la riduzione della spesa energetica per famiglie e imprese;*

- *promuovere l'elettificazione dei consumi, in particolare nel settore civile e nei trasporti, come strumento per migliorare anche la qualità dell'aria e dell'ambiente.*

Le strategie di decarbonizzazione, previste dal PNIEC ridurranno le emissioni di gas climalteranti, c'è da attendersi che oltre il 50% di tale diminuzione sarà dovuto alla penetrazione delle pompe di calore come sistema per la climatizzazione [2].

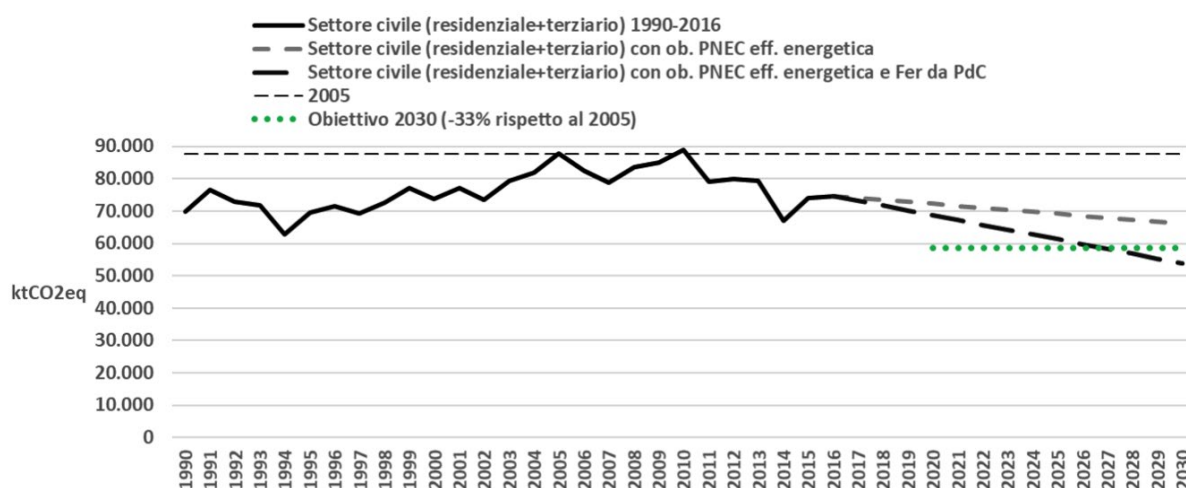


Figura 1. Impatto degli obiettivi del PNIEC sulle emissioni di gas climalteranti [2]

1.2 Il ruolo delle pompe di calore negli edifici nZEB e ZEB

Gli obiettivi di efficienza previsti nel PNIEC dovranno guidare nei prossimi anni le scelte tecniche e progettuali negli interventi di riqualificazione energetica degli edifici.

D'altro canto, le normative nazionali approvate negli ultimi anni, in conformità alle Direttive Europee EPBD, avevano già spinto in direzione analoga. La Direttiva 2010/31/UE [3] aveva, infatti, introdotto il concetto di "edificio a energia quasi zero" (nZEB: nearly Zero-Energy Building), definito come "quell'edificio che ha prestazioni energetiche molto elevate e che richiede quindi un piccolo fabbisogno di energia, la maggior parte della quale deve essere fornita da fonti rinnovabili".

In Italia il DM 26/6/2015 (DM Requisiti minimi) [4], ha fissato i nuovi standard prestazionali degli edifici (involucro, impianti e FER), al fine di raggiungere gli obiettivi fissati, a livello europeo, in materia di edifici a energia quasi zero. Gli standard nZEB previsti dal DM 26/6/2015, richiedono che le nuove costruzioni, a partire dal 2021, rispondano a requisiti di elevata prestazione energetica sia per l'involucro edilizio sia per gli impianti di climatizzazione installati e che almeno il 50% del consumo energetico dell'edificio derivi da FER. I requisiti minimi prestazionali per l'edilizia sono stati chiaramente definiti in funzione delle differenti zone climatiche del territorio italiano, per tener conto delle diverse esigenze di riscaldamento e condizionamento estivo.

In questo contesto, la crescente applicazione di sistemi basati su energie rinnovabili contribuirà ad una progressiva riduzione dell'utilizzo di fonti fossili per la climatizzazione degli edifici ed un conseguente incremento dell'uso del vettore elettrico (All-electric buildings).

Ulteriori sforzi in tal senso saranno richiesti per il raggiungimento in futuro degli standard dei Zero Energy Buildings (ZEB), ossia di edifici con un fabbisogno energetico molto basso interamente coperto, nell'arco di un anno, dall'energia prodotta in sito da FER.

Tali tipologie di edifici richiederanno l'impiego di tecnologie altamente efficienti che siano in grado di assicurare sempre più bassi fabbisogni per gli usi finali con totale integrazione di FER.

Tra le tecnologie di generazione fondamentale sarà, nei prossimi anni, il ruolo delle pdc che, supportate dal progresso tecnologico del settore, hanno raggiunto elevati rendimenti e ampie possibilità di integrazione con le FER.

Queste, infatti, tra le diverse soluzioni disponibili, giocano un ruolo determinante, in quanto possono consentire il riscaldamento, il condizionamento estivo e la produzione di Acqua Calda Sanitaria (ACS) con un solo apparecchio, eliminando, laddove possibile, la necessità di impianti tradizionali a combustione. In altri casi, seppur abbinate a generatori a combustione (impianti ibridi o bivalenti), possono, comunque, garantire, in determinate condizioni, rendimenti più elevati rispetto ai soli impianti tradizionali.

Sebbene il risparmio effettivo di energia primaria, in caso di utilizzo del solo vettore elettrico sia chiaramente legato ai rendimenti del mix di produzione nazionale, le riforme previste per le tariffe elettriche, nonché gli incentivi attualmente già in vigore per l'utilizzo di tecnologie ad alta efficienza contribuiranno a favorire la convenienza tecnica ed economica di impianti come le pdc basate esclusivamente sul consumo elettrico.

Per questi motivi, esse avranno certamente un crescente peso nel mix termico rinnovabile nazionale, contribuendo in maniera essenziale all'elettrificazione dei consumi finali, e favorendo le diverse forme di autoconsumo, generazione e accumuli distribuiti.

La figura seguente (Figura 2) mostra le traiettorie di crescita delle diverse FER nel settore termico, previste dagli scenari riportati nel PNIEC al 2030.

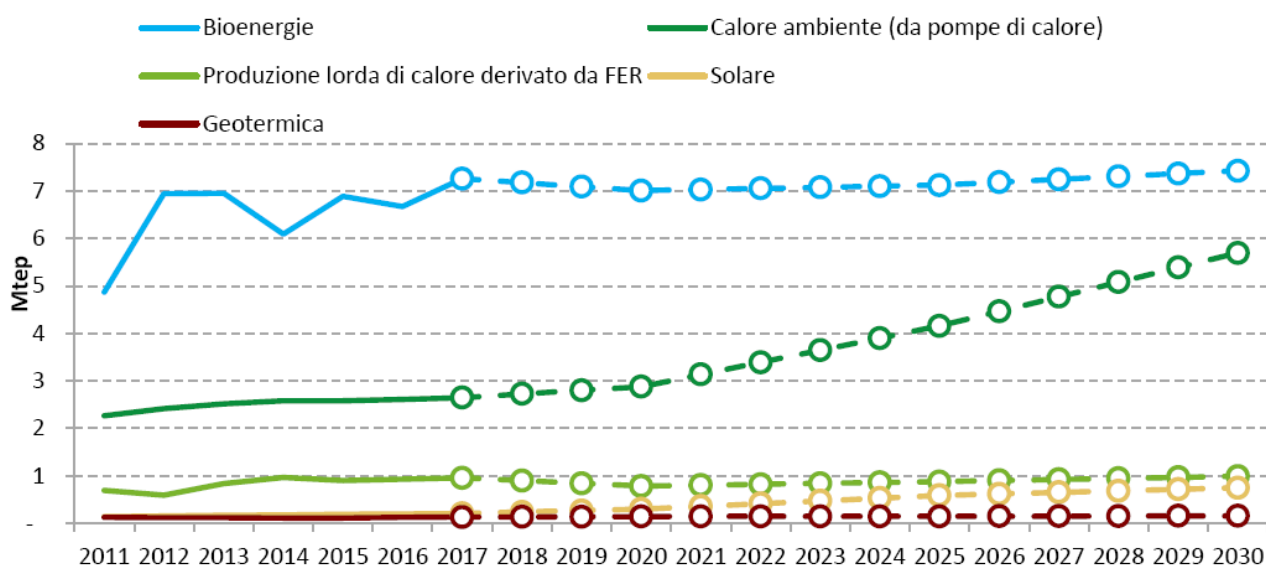


Figura 2. Previsione di crescita delle FER nel settore termico [1]

In Figura 3 sono graficati i trend attesi di produzione di energia (in Mtep) da biomasse, geotermia, solare termico e FER da pompe di calore secondo gli obiettivi del PNIEC.

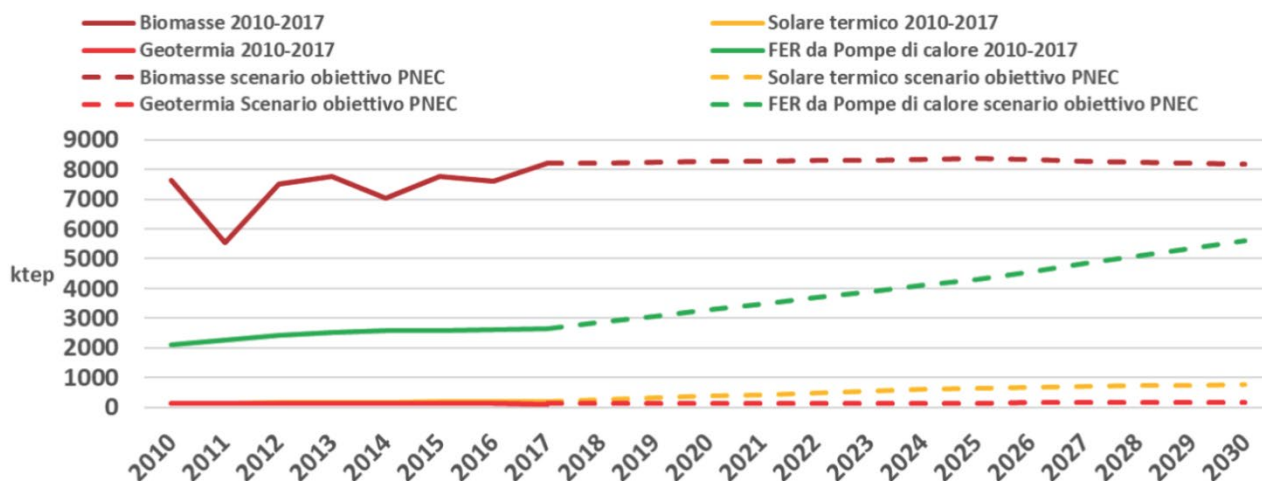


Figura 3. Obiettivi al 2030 per le fonti rinnovabili termiche [2]

Le pompe di calore, come evidente, rappresentano la tipologia con maggior prospettiva di crescita nei prossimi anni. Le diverse tipologie presenti ad oggi sul mercato, ne fanno infatti una delle soluzioni impiantistiche più versatili e adatta alle esigenze di climatizzazione di differenti tipologie edilizie. La possibile evoluzione dei sistemi di riscaldamento è sintetizzata anche nella Figura 4, in cui sono confrontati diversi scenari (BAU: Business As Usual; CEN: centralizzato; DEC: decentrato).

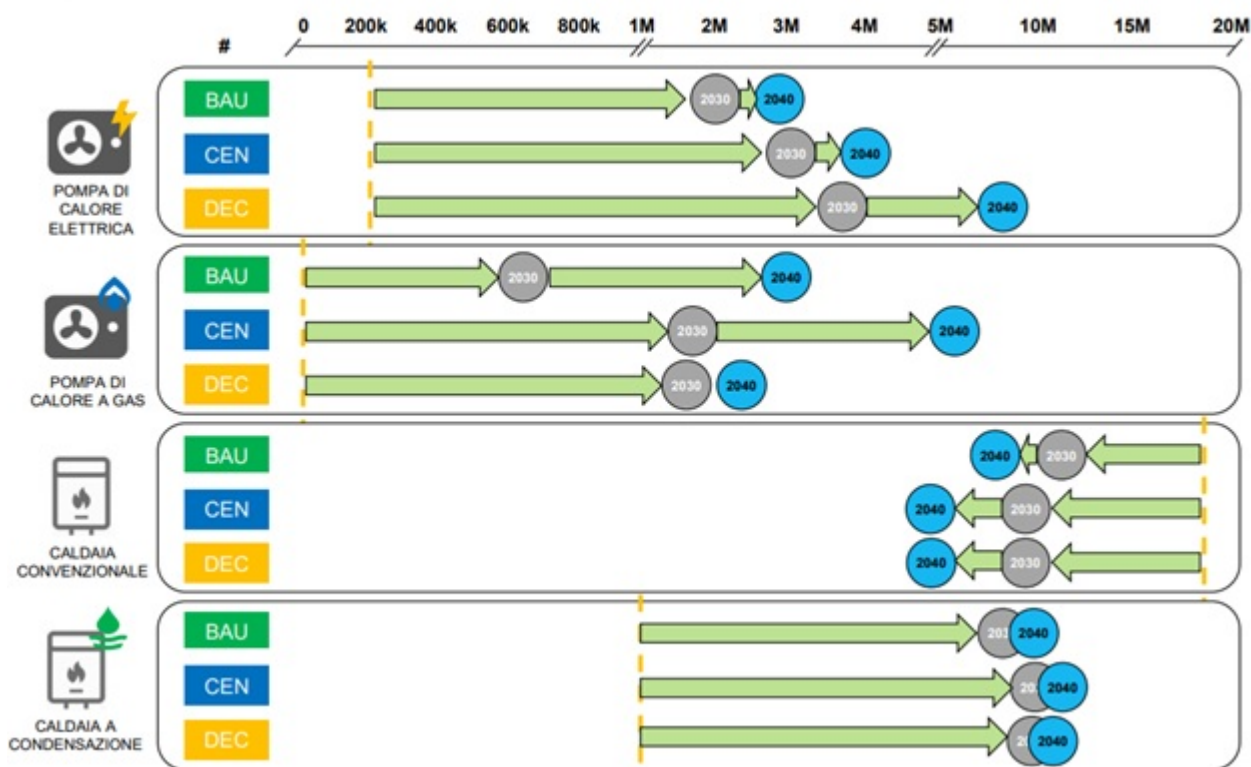


Figura 4. Evoluzione dei sistemi di riscaldamento (in unità) [5]

Inoltre, è importante sottolineare che alcune possibili fonti alternative, quali le biomasse solide, risultano spesso non utilizzabili in molte aree urbane del territorio nazionale, in quanto non compatibili con i vincoli sulle emissioni di inquinanti atmosferici previsti dalle normative regionali per la tutela della qualità dell'aria. Nel precedente Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico (Piano Triennale RdS), per il progetto D.2: Edifici a energia quasi zero (nZEB), "Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)." sono

state effettuate analisi sull'effettiva possibilità di raggiungimento dello standard nZEB sia dal punto di vista tecnico che economico per edifici pubblici esistenti da riqualificare.

Le diagnosi energetiche, effettuate su differenti tipologie di edifici, hanno evidenziato che i generatori a pdc sono, di gran lunga, la soluzione impiantistica più comune per ottenere edifici nZEB senza il ricorso all'integrazione di impianti a combustione.

È importante a riguardo sottolineare che la riqualificazione o la sostituzione degli impianti termici installati e dei sistemi di regolazione e controllo, risulta spesso l'unica soluzione possibile, in tutti quegli edifici che presentano vincoli di carattere storico o architettonico, per cui gli interventi sull'involucro edilizio risultino di difficile attuazione.

Le analisi delle possibilità di utilizzo dei sistemi a pdc negli interventi di riqualificazione in genere ed, in particolare, verso gli standard nZEB, obbligatori per tutte le nuove costruzioni a partire dal prossimo anno, saranno fondamentali per supportare la diffusione e il mercato di tali tipologie impiantistiche nei prossimi anni.

Si studieranno le implicazioni tecniche ed economiche di tutte le soluzioni che consentano di far fronte ai fabbisogni energetici delle diverse tipologie edilizie, coniugando l'efficienza energetica con misure preventive adeguate al raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'aria e del benessere termo-igrometrico degli utenti.

Tra le diverse tipologie di generatori, l'analisi sarà focalizzata sulle pdc, che, integrate all'installazione di moduli fotovoltaici, consentiranno un maggior impiego del vettore elettrico nella climatizzazione degli edifici, nel rispetto delle quote di FER obbligatorie per le nuove costruzioni.

È importante sottolineare che l'impiego e il rendimento degli impianti di generazione, basati sull'utilizzo di FER, risultano strettamente legati alle caratteristiche climatiche (temperatura, umidità, radiazione solare) del sito in esame, oltre che alla richiesta energetica dell'edificio. Tale aspetto implica un'accurata valutazione dell'efficienza degli impianti, in funzione del contesto climatico in cui sono installati. Nel caso delle pdc ad aria (aria-acqua, aria-aria), le fluttuazioni delle variabili climatiche nel corso della stagione di climatizzazione possono influenzare, in maniera sostanziale, il rendimento della macchina, che, in alcuni casi può ridursi drasticamente fino a raggiungere condizioni tali da comprometterne la convenienza energetica, e quindi l'applicabilità.

Diventa quindi interessante monitorare in opera la potenza erogata e l'efficienza effettiva di una pdc al servizio di un edificio del terziario, in cui è richiesta climatizzazione sia invernale che estiva. L'analisi della performance della macchina, al variare delle condizioni climatiche stagionali, consentirà di confrontare il rendimento effettivo, non soltanto con quello nominale fornito dalla casa costruttrice in condizioni standard, ma anche con quanto valutato mediante gli algoritmi di calcolo più comuni, utilizzati nelle diagnosi energetiche.

1.3 Obiettivi del lavoro

L'attività di ricerca prevista nel triennio 2019-2021 della Ricerca di Sistema Elettrico avrà come obiettivo, quello di valutare, attraverso l'analisi di alcuni casi studio oggetto di monitoraggi sperimentali, il comportamento in opera di generatori a pompa di calore, installati in edifici del terziario, in differenti condizioni climatiche e operative.

I benchmark prestazionali di riferimento per gli impianti all-electric a servizio di edifici del settore terziario consentiranno di poter confrontare le configurazioni impiantistiche e verificare durante il reale funzionamento (i.e. condizioni climatiche esterne e profili di carico reali) la corrispondenza dei parametri in campo con i valori prestazionali di targa.

Verranno, inoltre, individuati benefici e criticità per l'adozione dell'energia elettrica come singolo vettore energetico per la climatizzazione di edifici del settore terziario, con indicazione di Key Performance Indicators (KPI) e consumi tipici, tecnologie e buone pratiche da adottare.

Lo studio costituisce il naturale ampliamento e sviluppo di quanto iniziato nel precedente triennio descritto anche in Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico, progetto D.2: Edifici a energia quasi zero (nZEB), *“Studi sulla riqualificazione energetica del parco esistente di edifici pubblici mirata a conseguire il raggiungimento della definizione di edifici a energia quasi zero (nZEB)”* Obiettivo: *Misura delle prestazioni in campo di una pompa di calore di grande taglia - Report RdS/PAR2017/148* ed è finalizzato a estendere i monitoraggi effettuati, in modo da poter esaminare casi studio significativi delle tipologie impiantistiche a pdc maggiormente comuni nel panorama nazionale.



Figura 5. Struttura triennale del progetto di ricerca

Le misure previste dovranno, infatti, consentire di monitorare il comportamento del generatore durante il suo utilizzo effettivo dettato dalla richiesta termica dell'edificio e dalle esigenze dell'utenza, senza limitazioni agli orari di accensione, né alla regolazione delle temperature nei diversi locali climatizzati.

Molti sono i fattori che influenzano il rendimento di una pompa di calore, oltre alle condizioni climatiche del sito in esame, tra i quali: tipologia del compressore, fluido refrigerante utilizzato, rapporto di compressione, il carico termico richiesto dall'edificio, caratteristiche dei componenti costruttivi (inverter, valvole di espansione,...)

L'analisi di tali aspetti, relativi alle caratteristiche costruttive della macchina o alle modalità di funzionamento, prescinde dagli obiettivi di questo lavoro: stante le caratteristiche dei generatori a pdc installati, selezionati tra quelli ritenuti più comuni per applicazioni in edifici del terziario, i monitoraggi saranno finalizzati ad evidenziare l'effettivo grado di efficienza del generatore, nei diversi periodi di climatizzazione, al fine di valutarne l'influenza sul fabbisogno energetico dell'edificio e consentire un confronto con i valori di rendimento implementati nei modelli di calcolo utilizzati comunemente per le diagnosi energetiche.

Gli impianti che saranno oggetto di studio verranno selezionati tra i diversi edifici attualmente sottoposti a monitoraggi strumentali, in modo da estrarre i casi più significativi, che consentono di ottenere confronti in differenti contesti climatici e benchmark di riferimento.

Per misurare l'efficienza della macchina, sia in condizioni estive che invernali, è necessario, misurare, simultaneamente, sia la potenza termica erogata, utile alla refrigerazione o al riscaldamento dell'acqua circolante nell'impianto, sia quella elettrica assorbita dalla macchina per il funzionamento dei compressori. Il rapporto di tali grandezze è indicativo del rendimento della pdc definito come Coefficient of Performance (COP) per il riscaldamento e come Energy Efficiency Ratio (EER) per il raffrescamento.

Tuttavia, l'approccio che adotta, esclusivamente, COP ed EER non è sufficiente per poter caratterizzare il funzionamento e le prestazioni della macchina nell'intera stagione di funzionamento. Per tale motivo,

vengono introdotti ulteriori indicatori della prestazione, ovvero il Seasonal Coefficient Of Performance (SCOP) per il funzionamento invernale e il Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) per il funzionamento estivo.

Diverse sono le problematiche da considerare ai fini di un corretto monitoraggio: il posizionamento dei sensori, il settaggio iniziale dei parametri di misura, la verifica dei sistemi di controllo della macchina, la scala temporale delle misure, l'analisi dei transitori....

In particolare, le misure della potenza termica erogata, sono basate sulla misurazione delle portate nel circuito di distribuzione e della differenza di temperatura dell'acqua sui collettori di mandata e di ritorno dell'impianto. Tali misure richiedono particolare attenzione, in quanto i sensori (ad ultrasuoni o meccanici) utilizzati per rilevare le portate transitorie possono essere alterati dalla presenza di bolle d'aria nel circuito o zone di turbolenza.

Altro aspetto rilevante è costituito dall'analisi dei transitori temporali, quali le fasi di avvio o spegnimento della macchina, o delle rapide variazioni delle portate in transito dovute alla contemporanea chiusura di molti terminali di emissione. In queste fasi, infatti, gli effetti di inerzia del sistema che influiscono sulle misure rilevate dagli strumenti, possono dar luogo a incongruenze. Effetti analoghi possono esserci, altresì, nella fase di interruzione del servizio, in cui valori minimi di potenza termica ed elettrica possono essere comunque registrati dagli strumenti di misura.

Nello studio previsto, l'ENEA intende collaborare con partner pubblici o privati, o con società di real estate management, al fine di disporre di casi studio significativi che possano rendere disponibili le misure in situ relative ai monitoraggi strumentali di diversi impianti a pdc installati in differenti località italiane.

In particolare, l'attività prevista per la prima annualità (Figura 6), è focalizzata su:

- Analisi dello stato dell'arte sull'uso del vettore elettrico per la climatizzazione degli edifici del settore terziario in Italia e sui parametri di maggior interesse ai fini dei monitoraggi in campo;
- Individuazione dei consumi tipici e dei KPI per la definizione delle prestazioni delle tipologie impiantistiche, con particolare riferimento alle soluzioni all-electric nel terziario, nonché identificazione delle più frequenti soluzioni "ibride" e disamina del quadro normativo in materia;
- Analisi preliminare delle misure relative a diversi edifici monitorati per l'individuazione di casi studio significativi dai quali selezionare edifici da analizzare in maggior dettaglio nelle prossime annualità.



Figura 6. Struttura del primo anno di ricerca

L'analisi preliminare dei dati di misura disponibili, ottenuti mediante i monitoraggi già in corso, è fondamentale ai fini delle verifiche di consistenza dei dati sperimentali. L'eventuale presenza di numerosi

outliers o errori sistematici potrebbe richiedere eventuali correzioni nei settaggi o la reinstallazione degli strumenti di misura.

In seguito, saranno individuati i casi studio che saranno oggetto di approfondimento nelle annualità successive.

L'obiettivo del lavoro, sarà quello di poter disporre di benchmark da confrontare con i valori di rendimento medio stagionale della macchina ottenuti con i diversi metodi di calcolo del fabbisogno energetico disponibili: quello semi-stazionario, implementato nelle attuali normative (UNI TS 11300), quello dinamico, più complesso dal punto di vista del calcolo ma più efficace perché maggiormente rappresentativo degli scambi termici, soprattutto nel caso estivo.

Ad esempio, sarà possibile effettuare simulazioni attraverso modelli semplificati di alcuni degli edifici monitorati e selezionati, analizzandone sia la prestazione teorica che reale dell'impianto, per ottenere confronti tra le due condizioni in termini di consumi energetici. Questo risultato porterà a quantificare, sia in termini tecnici che economici, lo scostamento tra condizione teorica e condizione reale. Ciò può essere di grande utilità al gestore dell'impianto per definire coefficienti di maggiorazione (o riduzione) delle prestazioni dei sistemi all-electric all'interno degli edifici a carattere terziario. Tali considerazioni saranno utili per fornire indicazioni sui parametri descrittivi dell'impianto (quali, ad esempio, il fattore di carico) in condizioni reali che potrebbero diventare il riferimento per le attività connesse ai monitoraggi e alle valutazioni energetiche degli edifici, quali le diagnosi energetiche.

Quanto descritto si rende opportuno per effetto del continuo aggiornamento delle metodologie di calcolo, nonché dell'evoluzione verso l'uso di metodi dinamici di valutazione delle prestazioni energetiche che richiedono la conoscenza dell'effettivo comportamento termodinamico dell'edificio, delle reali prestazioni dell'impianto e delle condizioni termo-igrometriche indoor degli ambienti climatizzati, anche in connessione con il profilo di utilizzo di tali ambienti.

Soltanto disponendo di benchmark reali è possibile validare e calibrare le analisi energetiche degli edifici, anche adottando i metodi di calcolo più evoluti che sono destinati, progressivamente, a sostituire i metodi semi-stazionari, alla base delle attuali normative.

Inoltre, tale aspetto risulta importante nella conduzione delle diagnosi energetiche degli edifici, in particolare, quelle del settore terziario, per le quali una più accurata valutazione del rendimento stagionale dei generatori installati, al variare delle condizioni climatiche del sito in esame, consente valutazioni migliori del fabbisogno energetico effettivo dell'edificio e quindi una più corretta analisi costi-benefici degli interventi di riqualificazione individuati.

2 La tecnologia delle pompe di calore

La crescente diffusione delle pdc come soluzione per il condizionamento degli edifici è dovuta ad una serie di fattori premianti rispetto alle altre tecnologie, come ad esempio l'affidabilità, la produzione di energia da fonte rinnovabile e la possibilità di garantire stabilità alla rete elettrica [6; 7].

C'è inoltre da considerare che sono molteplici le possibilità di incremento delle prestazioni delle pompe di calore, come anche le loro possibilità di impiego [8].

Una sintesi dei principali vantaggi nell'impiego delle pompe di calore è illustrata in Figura 7.

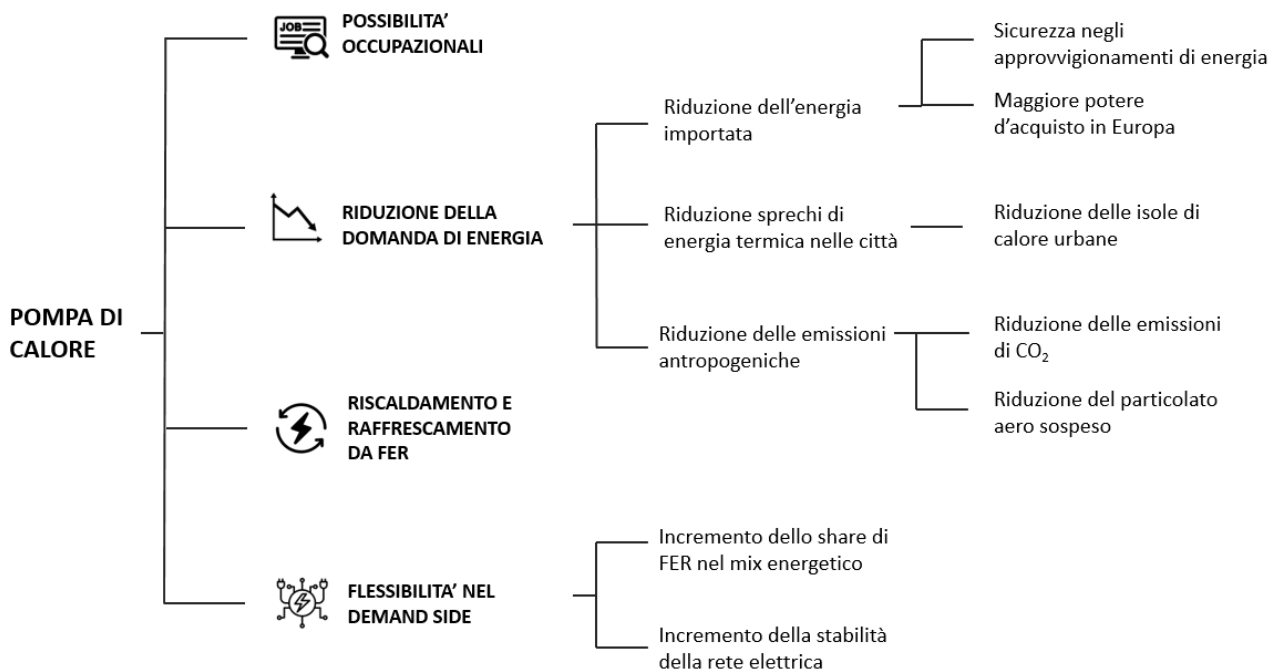


Figura 7. Vantaggi dell'impiego di pompe di calore

2.1 Le pompe di calore: cenni generali

La pompa di calore è una macchina generalmente utilizzata per la climatizzazione degli ambienti e, in alcuni casi, per la produzione di acqua calda sanitaria.

Per il suo funzionamento, la pdc trasferisce il calore da una fonte (sorgente fredda) ad un'altra a temperatura maggiore (sorgente calda) - mediante un apporto energetico fornito da energia elettrica, da combustibile o da calore ad alta temperatura.

Le di pompe di calore possono essere classificate in base:

- al principio di funzionamento, ovvero:
 - a compressione di vapore elettriche, in cui il compressore è azionato da un motore elettrico, oppure a gas in cui il compressore è azionato da un motore a gas;
 - ad assorbimento, quando si sfrutta la solubilità e l'elevata affinità chimica tra due sostanze (una funge da refrigerante e l'altra da assorbente) per realizzare un ciclo dove l'energia immessa è prevalentemente termica;
 - ad adsorbimento, quando per il funzionamento si sfrutta la capacità di alcuni solidi porosi (come zeoliti, gel di silice... di assorbire in maniera reversibile vapori non dannosi per l'ambiente (es. acqua).
- alla sorgente da cui prelevano l'energia a bassa temperatura, ovvero (Figura 8 e Tabella 1):
 - aria ambiente;
 - acque superficiali (fiumi, laghi, mare);
 - sottosuolo (terreno, rocce e acque di falda);
 - energia solare.

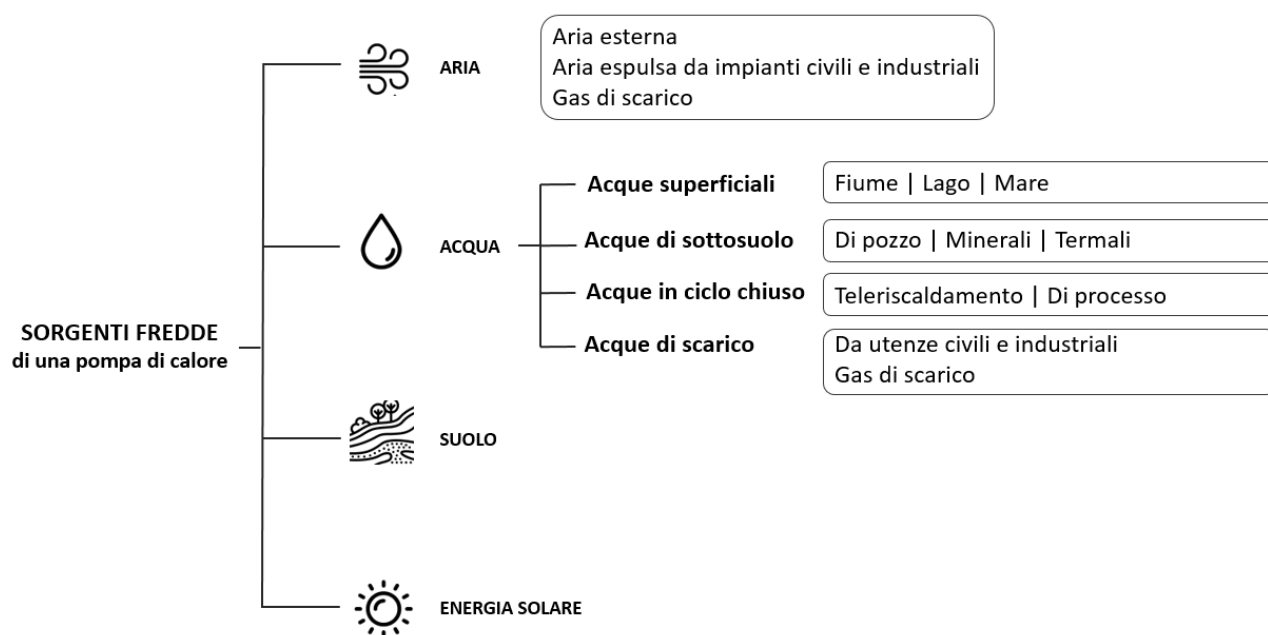


Figura 8. Possibili sorgenti fredde per impianti a pompe di calore

Tabella 1. Confronto qualitativo delle sorgenti fredde

SORGENTE	ACCESSIBILITA'	DISPONIBILITA' NEL TEMPO	COSTO INIZIALE	COSTO OPERATIVO	LIVELLO TERMICO	VARIAZIONI DELLA TEMPERATURA	GRADO DI STANDARDIZZABILITA'
Aria	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ●
Acque sotterranee	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ●	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●
Acque superficiali	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ○
Terreno	● ● ● ● ○	● ● ● ● ●	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○
Solare	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	● ● ● ● ○	● ● ● ● ○	● ○ ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○
Recupero	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	● ● ● ● ●	● ● ● ● ○	● ● ○ ○ ○

La cessione del calore all'interno dell'ambiente da climatizzare si può realizzare nelle seguenti modalità:

- ad espansione diretta, ovvero il fluido di lavoro scambia calore direttamente con l'aria del locale;
- con sistema idronico, ovvero il fluido di lavoro scambia calore con acqua, che viene poi avviata ai terminali di riscaldamento.

Le tipologie fondamentali di pdc sono espresse mediante una dicitura che deriva dalla combinazione dei due fluidi che scambiano calore con il refrigerante; infatti, il primo termine sta ad indicare la sorgente fredda, ed il secondo la sorgente calda, ovvero il fluido termovettore all'interno degli ambienti. Pertanto, le tipologie di pdc vengono generalmente indicate come:

- aria/aria;
- aria/acqua;
- acqua/aria;
- acqua/acqua;

Interessanti risvolti sono quelli derivanti dall'impiego di sistemi integrati, intendendo le soluzioni impiantistiche che prevedono l'impiego congiunto di una o più tecnologie basate su FER, o la combinazione

di fonti tradizionali e FER. Ciò, al fine di superare l'inconveniente tipico delle FER, ovvero la non programmabilità e la discontinuità.

Tipici sistemi integrati prevedono l'impiego combinato di pdc, impianti solari termici fotovoltaico e caldaie a biomassa. Ad esempio, ci sono sistemi che prevedono l'impiego di pdc elettriche a compressione in abbinamento a un impianto fotovoltaico; i risparmi sono incrementati se, sempre a titolo di esempio, la produzione di ACS è supportata da un sistema solare termico.

Le pompe di calore, inoltre, possono essere distinte in:

- sistemi monovalenti;
- sistemi bivalenti
 - mono-energetici;
 - bi-energetici.

Le pdc monovalenti soddisfano, in un anno, il carico richiesto per il riscaldamento e raffrescamento; le pdc bivalenti, invece, riescono a coprire interamente il fabbisogno per il raffrescamento, ma non quello per il riscaldamento, per cui sono accoppiate ad altri sistemi impiantistici (come caldaie a gas), in modo da poter coprire anche il fabbisogno invernale.

Il sistema bivalente mono-energetico prevede che il deficit di fabbisogno termico stagionale (non coperto dalla pdc) sia colmato da un generatore ausiliario che utilizza lo stesso vettore energetico; il bivalente bi-energetico ha un generatore ausiliario che utilizza un vettore energetico diverso rispetto alla pdc [9].

Nel seguito verranno fornite indicazioni generali e descrittive delle diverse tipologie di pdc, al fine di offrire una panoramica delle diverse possibilità che la tecnologia offre, unitamente a limiti e vantaggi. Date le finalità del presente report, molti dettagli tecnici sono stati omessi: per approfondimenti sui temi trattati nei paragrafi che seguono, si rimanda alla letteratura di riferimento.

2.1.1 La sorgente aria

L'aria è una fonte energetica illimitata e sempre disponibile. Tuttavia, la sua temperatura è variabile, per effetto delle escursioni termiche giornaliere e, sul lungo periodo, delle variazioni di tipo stagionale. In fase di progettazione di un impianto a pompa di calore, è quindi importante considerare tali variazioni, facendo riferimento ai valori di temperatura normalizzati per ogni località geografica.

Gli impianti che sfruttano l'aria come sorgente trovano le condizioni più favorevoli per il loro impiego nelle zone a clima temperato tipiche della maggior parte delle regioni italiane; essi presentano inoltre il vantaggio di non richiedere elevati costi di investimento.

Le pompe di calore aria/aria scambiano calore direttamente con l'aria da immettere degli ambienti da climatizzare. Pertanto, in climatizzazione invernale nel condensatore si verifica la cessione del calore dall'aria esterna al flusso d'aria da riscaldare; in climatizzazione estiva, nell'evaporatore si ha il prelievo di energia dal flusso d'aria interna all'ambiente, con conseguente cessione all'aria esterna (come illustrato schematicamente in Figura 9).

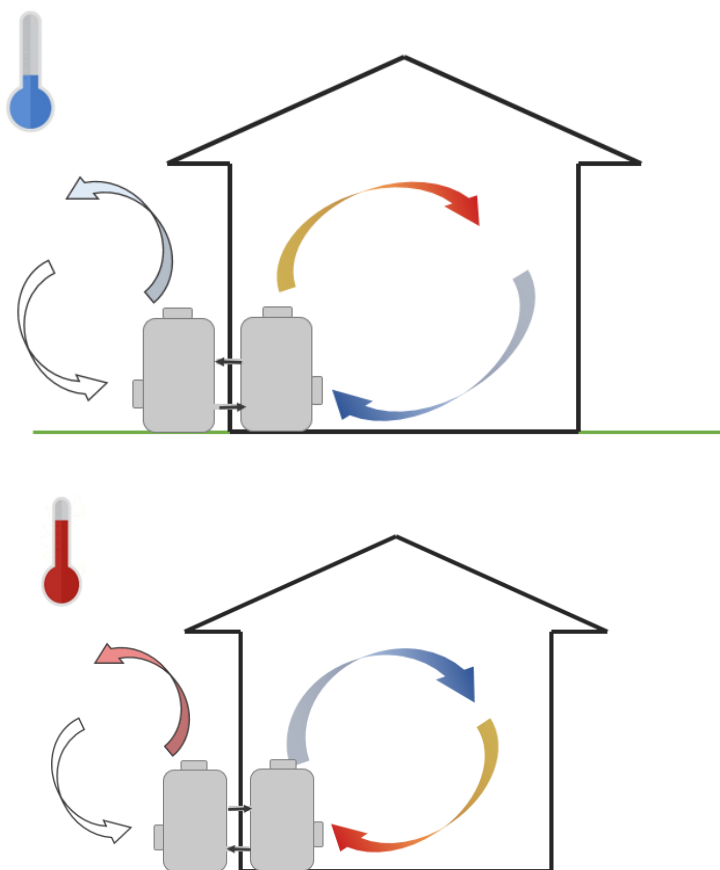


Figura 9. Pompa di calore aria/aria

Le pompe di calore aria/acqua (Figura 10) operano con lo stesso principio di funzionamento, ma riscaldano o raffreddano (in funzione della stagione) l'acqua contenuta in un circuito che la distribuisce negli ambienti da climatizzare, ovvero ai terminali di erogazione, tipicamente ventilconvettori o pannelli radianti.

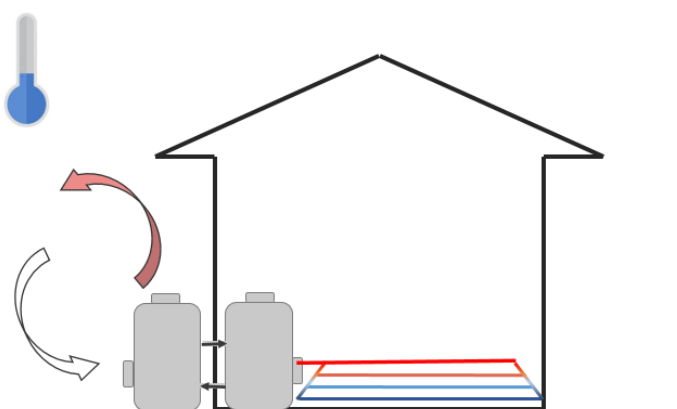


Figura 10. Pompe di calore aria/acqua

2.1.2 La sorgente acqua

Le pompe di calore acqua/acqua (Figura 11) e acqua/aria sfruttano, come sorgente di calore esterna a bassa temperatura, l'acqua di falda oppure l'acqua superficiale (mare, lago, fiume).

Le acque sotterranee presentano temperature pressoché costanti durante l'arco dell'anno, che si attestano a 10÷15°C in condizioni normali, e a 15÷25°C in zone adiacenti a località termali. In generale, la

temperatura dell'acqua di falda è simile alla temperatura media dell'aria esterna in prossimità della superficie terrestre, e cresce con l'aumentare della profondità: pertanto, se il punto di prelievo dell'acqua per utilizzo nella pdc è ad una profondità adeguata, le variazioni termiche annuali sono trascurabili.

I costi di investimento per lo sfruttamento dell'acqua come sorgente sono superiori rispetto alla soluzione ad aria, per via della maggiore complessità dell'impianto (per il quale sono necessari le pompe e le valvole per la circolazione dell'acqua, l'eventuale realizzazione di un pozzo artesiano e un sistema di smaltimento dell'acqua esausta).

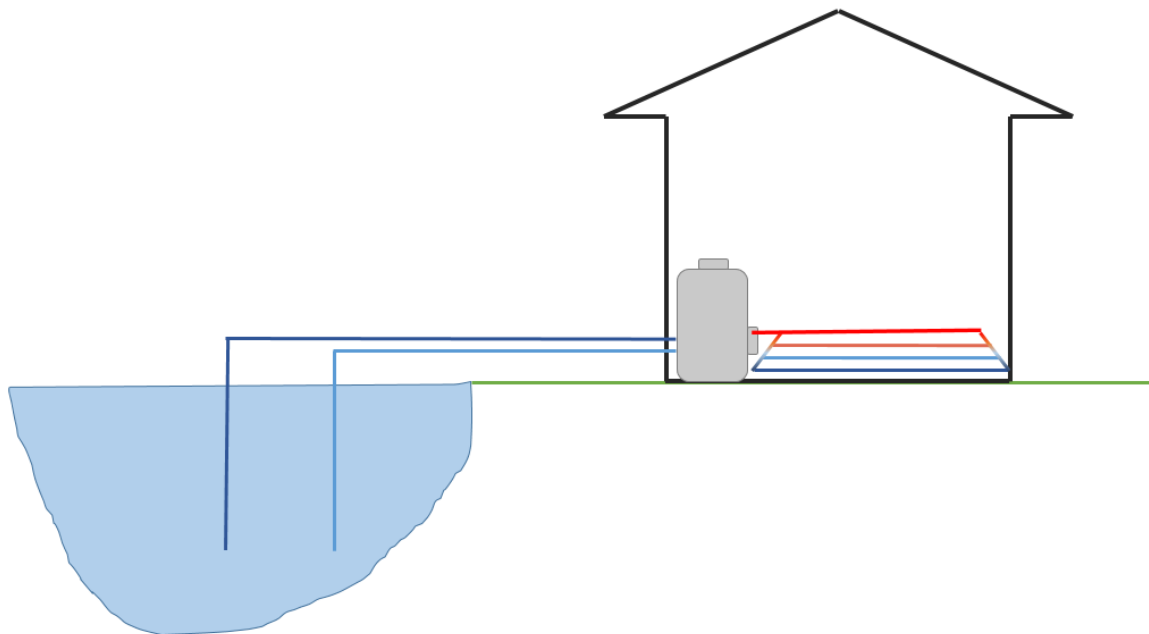


Figura 11. Pompe di calore acqua/acqua con acqua di falda

Le acque superficiali presentano una maggiore instabilità termica rispetto alle acque di falda, ma l'inerzia termica ad esse associate (legata alle notevoli masse dei bacini), le rende ottime sorgenti per pompe di calore.

Il mare costituisce la sorgente termica più sfruttata, ma lo sfruttamento di acque salate comporta l'adozione di misure atte a contenere i fenomeni di corrosione.

Fiumi e laghi soffrono una variabilità di temperatura maggiore rispetto al mare e sebbene diminuiscano i problemi di corrosione, aumentano quelli di filtraggio, per via del materiale in sospensione che deve essere eliminato prima di immettere l'acqua nella pompa di calore.

Lo sfruttamento delle acque può essere diretto, facendo passare l'acqua della sorgente attraverso uno scambiatore di calore, oppure indiretto, sfruttando un circuito chiuso intermedio in cui circola un fluido termovettore glicolato che consente all'impianto di lavorare in condizioni limite anche a temperature inferiori a 0°C.

Sovente uno scambiatore di calore a piastre viene installato direttamente nella pdc e viene alimentato con acqua di sorgente a perdere (in caso di sfruttamento diretto), oppure dal fluido termovettore del circuito chiuso intermedio (in caso di sfruttamento indiretto).

Tabella 2. Temperature tipiche per le sorgenti fredde delle pdc	
SORGENTE DI CALORE	CAMPO DI TEMPERATURA [°C]
Aria esterna	-10 / +15
Aria espulsa da ambienti riscaldati	+15 / +25
Acqua di falda	+2 / +10
Acqua di lago	0 / +10
Acqua di fiume	0 / +10
Acqua di mare	+3 / +8
Acque reflue ed effluenti	>10
Terreno	0 / +10

2.1.3 La sorgente suolo

Questo tipo di pdc sfrutta il calore del suolo o delle rocce (calore geotermico a bassa entalpia) attraverso sonde di scambio termico. All'interno di queste ultime, che possono essere di tipo orizzontale o verticale e che sono immerse nel terreno, circola acqua addizionata di glicole etilenico (al fine di evitare possibili danni per gelo delle tubazioni dei circuiti).

L'energia geotermica è la somma di due componenti principali: il calore proveniente dall'ambiente esterno (e dovuto all'influenza del Sole) e il calore proveniente dagli strati più profondi della Terra.

La componente di calore determinata dal Sole influenza solo lo strato più superficiale della crosta terrestre, e i suoi effetti smettono di essere rilevanti già oltre i 20 m di profondità, oltre i quali la temperatura del terreno si attesta, generalmente, tra 13–15°C fino a circa 100 m. Superata questa profondità, diventa significativa la componente di calore degli strati profondi che si manifesta attraverso un gradiente geotermico pari a 30 °C ogni 1000 m.

Risulta evidente che, per poter valutare la convenienza economica di un impianto a pdc geotermica, il parametro di riferimento principale è la temperatura del sottosuolo, tenendo conto che la temperatura del suolo che è più costante di quella dell'aria.

In merito alle tipologie di sonde per l'estrazione di calore in questa soluzione impiantistica, è possibile distinguere:

- Sonde orizzontali (Figura 12): sono costituite da tratti di tubo disposti orizzontalmente a poca profondità nel terreno lungo un percorso "a serpentina". La circolazione forzata di acqua glicolata al loro interno permette di prelevare calore dal terreno circostante, per cederlo poi alla pompa di calore. Più i tubi sono interrati, minore è la variazione di temperatura (dovuta all'aria esterna) cui la macchina è soggetta. Questi impianti presentano elevati costi di installazione, dovuti alla realizzazione dello scavo, e all'estensione del terreno utilizzato.

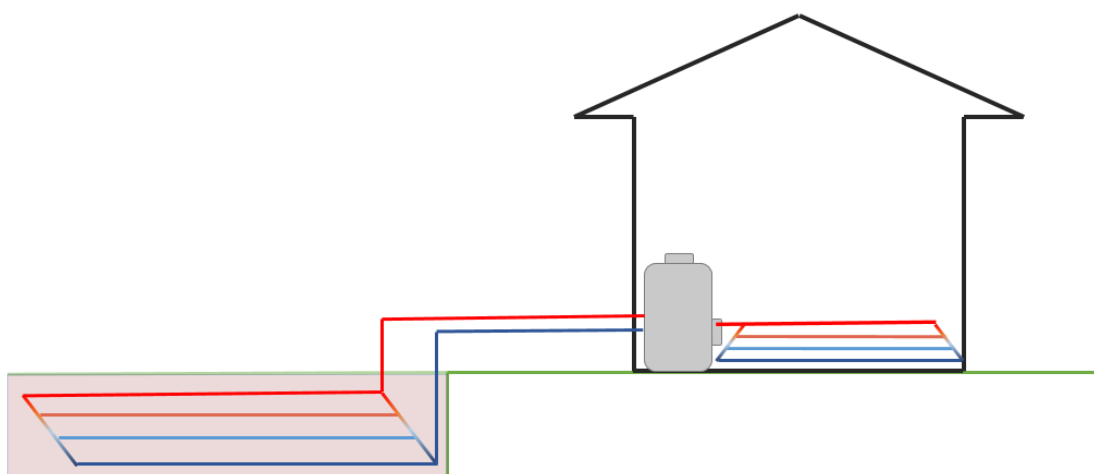


Figura 12. Pompa di calore geotermica con sonde orizzontali

- Sonde verticali (Figura 13): sono costituite da tratti di tubo disposti verticalmente nel terreno, e in genere sono necessari uno o più pozzi per poter scambiare calore con gli strati più profondi del terreno. Maggiore è la profondità di interrimento dei tubi, maggiore è la temperatura del terreno e minore il cambiamento dovuto alle variazioni climatiche, maggiori sono i costi.

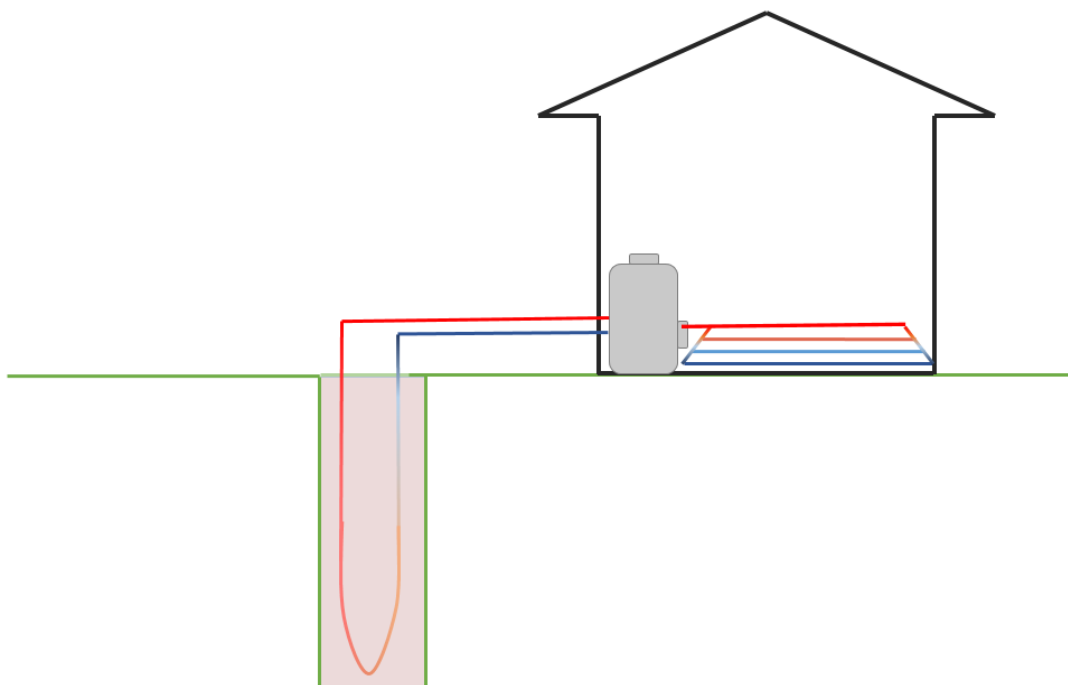


Figura 13. Pompa di calore geotermica con sonde verticali

2.1.4 La sorgente energia solare

Le pompe di calore che sfruttano, come sorgente fredda, l'energia solare (pdc elioassistite) offrono interessantissime prospettive di impiego. Nel dettaglio, si sfrutta il calore a bassa temperatura captato da collettori solari, ovvero si produce acqua calda che diviene sorgente della pompa di calore (acqua-acqua). Il sistema di captazione dell'energia solare è collegato alla pompa di calore acqua-acqua per la produzione di acqua calda da inviare all'edificio da climatizzare. Ci sono diverse possibili configurazioni (es. serie, parallelo).

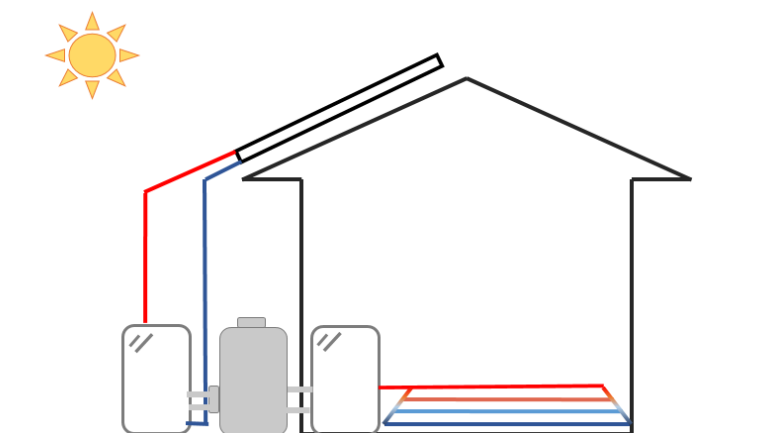


Figura 14. Pompa di calore elioassistita

Una possibile configurazione "in serie" è schematizzata in Figura 14, in cui l'energia solare, accumulata sotto forma di acqua calda stoccata in un serbatoio, è trasferita all'evaporatore della pompa di calore dal fluido che realizza il ciclo frigorifero.

Le pompe di calore elioassistite presentano minori costi complessivi di impianto rispetto alle pompe geotermiche [10].

2.1.5 Tipologie di pompe di calore

La tipologia di pompe di calore maggiormente diffusa (e che sarà oggetto dei monitoraggi nel corso dell'attività di ricerca) è quella a compressione, in cui il fluido frigorifero o refrigerante realizza un ciclo chiuso mediante le trasformazioni termodinamiche realizzate in quattro componenti principali: un compressore, una valvola di espansione e due scambiatori di calore (il condensatore e l'evaporatore) (Figura 15).

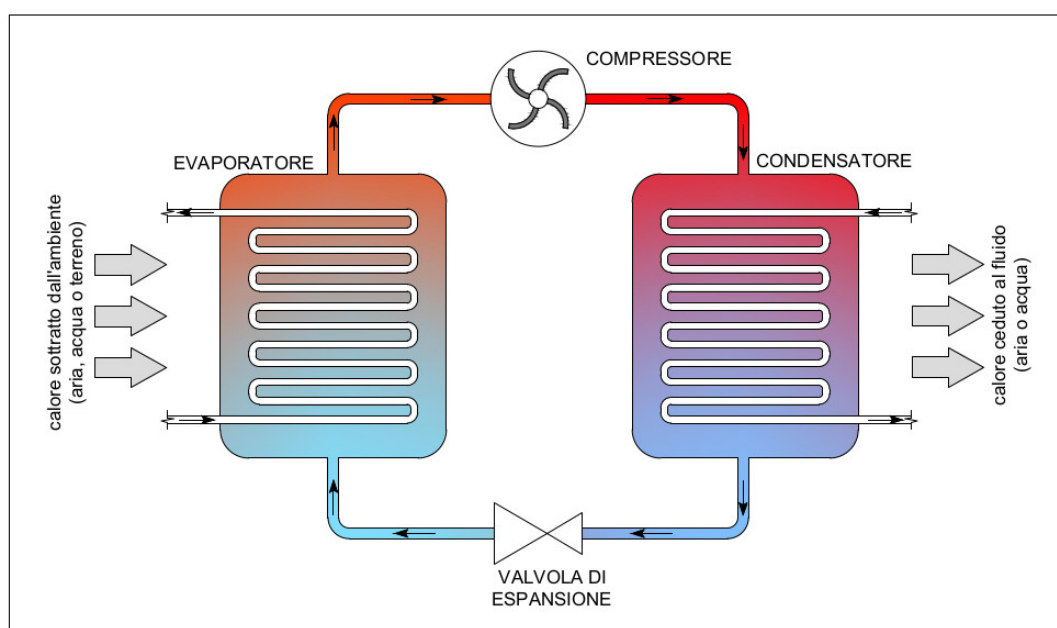


Figura 15. Schema di funzionamento di una pompa di calore a compressione

Nelle pdc a compressione, il ciclo frigorifero che si realizza può essere schematizzato in 4 fasi principali, rappresentate qualitativamente in Figura 16:

- Compressione (segmento 3-4): il fluido allo stato vapore viene compresso e si riscalda assorbendo calore, innalzando la propria temperatura e pressione;
- Condensazione (segmento 4-1): il fluido refrigerante, proveniente dal compressore, passa dallo stato di vapore surriscaldato allo stato liquido attraverso la cessione di calore all'esterno;
- Espansione (segmento 1-2): il fluido attraversa la valvola di laminazione, e diminuisce la propria temperatura trasformandosi parzialmente in vapore;
- Evaporazione (segmento 2-3): il fluido refrigerante assorbe calore dall'ambiente esterno ed evapora completamente.

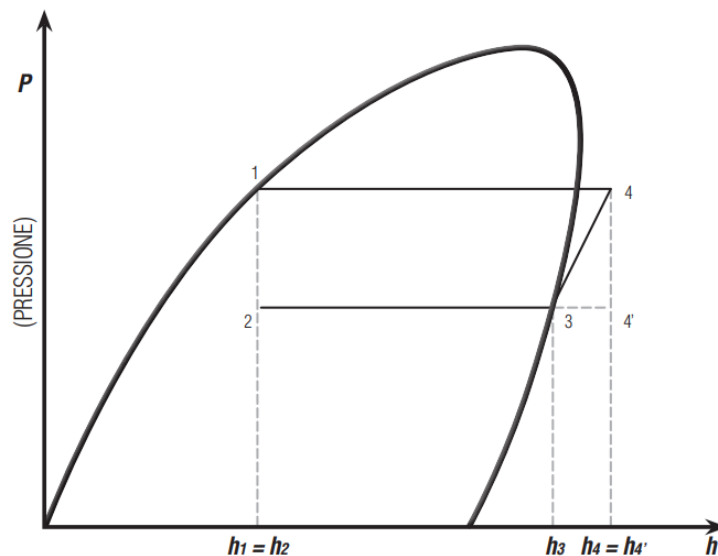


Figura 16. Ciclo frigorifero ideale nel piano pressione-entalpia [11]

Le diverse tipologie di componenti del ciclo termodinamico (Figura 17) determinano differenti dissipazioni e irreversibilità che influenzano, a loro volta, le prestazioni energetiche delle pompe di calore.

Compressore: provvede ad aspirare il vapore di refrigerante a bassa pressione e a portarlo alla pressione più elevata necessaria alla condensazione a più alta temperatura.

- Alternativo
- A vite
- Scroll
- Centrifugo a palette

Condensatore: in tale componente il refrigerante, ad alta pressione, condensa cedendo calore alla sorgente calda o pozzo caldo.

- Batterie alettate: la sorgente è l'aria;
- Scambiatori a fascio tubiero: la sorgente è l'acqua;
- Scambiatori di calore a piastre saldo brasate, per piccole potenze: la sorgente è un liquido (tipicamente acqua).

Evaporatore: in tale componente il refrigerante evapora sottraendo calore dalla sorgente fredda.

Organo di laminazione: attraverso l'organo di laminazione il refrigerante si raffredda e diminuisce di pressione.

- Valvola termostatica;
- Valvola elettronica.

Figura 17. Componenti di una pompa elettrica a compressione

Nelle pompe di calore ad assorbimento, il ciclo risulta più articolato, poiché sono coinvolti due fluidi (il fluido refrigerante e il liquido assorbente) che complessivamente realizzano sei fasi. Con riferimento alla Figura 18, all'uscita dall'evaporatore, il refrigerante viene assorbito nel fluido assorbente, cedendo energia termica con conseguente passaggio allo stato liquido. La miscela così costituita è inviata ad un generatore mediante una pompa che ne innalza la pressione. Nel generatore di calore, alla miscela viene fornito calore ad alta temperatura, proveniente dalla combustione di un combustibile o dal recupero di calore da un ulteriore impianto (recupero di cascame termico industriale). La miscela è composta da un soluto (in grado di evaporare con facilità) e da un solvente (sovente si impiegano acqua e ammoniaca o acqua e bromuro di litio).

Quindi, si può eseguire una schematizzazione a due cicli: uno tra generatore e assorbitore, e l'altro che realizza la refrigerazione all'evaporatore.

La miscela allora si separa nelle sue componenti: il refrigerante evapora e viene avviato al condensatore, mentre il fluido assorbente viene laminato e convogliato all'assorbitore. Nel condensatore, il refrigerante cede calore all'esterno e torna allo stato liquido: a questo punto, passa attraverso una valvola di laminazione che, determinando una diminuzione di temperatura e di pressione, lo trasforma parzialmente

in vapore. Da ultimo, nell'evaporatore il fluido frigorifero evapora completamente assorbendo calore, e ricomincia il ciclo.

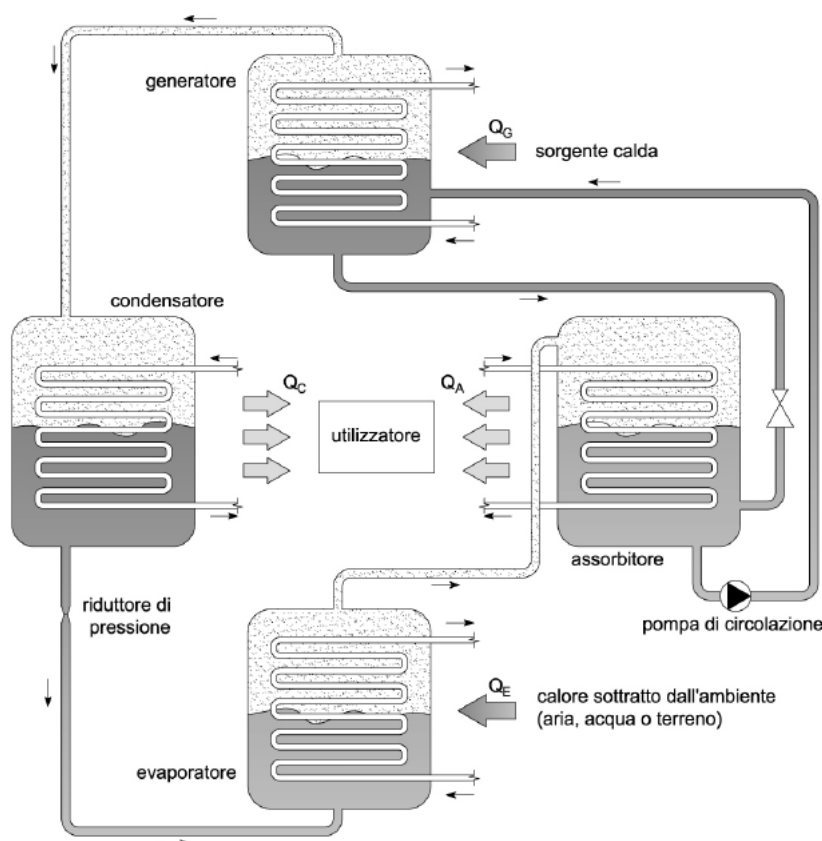


Figura 18. Schema di funzionamento di una pompa di calore ad assorbimento [12]

2.2 I sistemi VRV e VRF

I sistemi Variable Refrigerant Volume (VRV) e Variable Refrigerant Flow (VRF) si configurano come particolari pompe di calore in cui si realizza l'espansione diretta a volume variabile di refrigerante.

Ciò implica che l'evaporatore (in inverno) e il condensatore (d'estate) sono presenti direttamente nell'ambiente da climatizzare, perciò l'effetto utile (rispettivamente riscaldamento e raffreddamento) si realizza direttamente nei locali interni attraverso lo scambio termico tra il refrigerante e l'aria. Ciò comporta la presenza, nel sistema, di un unico scambiatore di calore tra pompa di calore e ambiente, ovvero nei VRF i terminali di impianto assolvono alla funzione di evaporatore (in inverno) e condensatore (in estate).

Per questo motivo, contrariamente a quanto avviene negli impianti idronici, nella rete di distribuzione fluisce il gas refrigerante proveniente dall'unità frigorifera.

La flessibilità di tali sistemi li rende particolarmente adatti:

- per la produzione di acqua calda ad alta temperatura (ovvero idonea per usi sanitari e per essere avviata a terminali di emissione come i radiatori tradizionali);
- per la produzione di acqua calda per l'alimentazione di terminali a media-bassa temperatura;
- per la produzione di acqua refrigerata, utile per la climatizzazione radiante estiva;
- per la climatizzazione estiva ad espansione diretta (mediante terminali ad aria);
- per la climatizzazione ad espansione diretta abbinata ad una unità di trattamento dell'aria di rinnovo.

Le prestazioni dei sistemi VRF sono influenzate anche dalla lunghezza e configurazione dei tratti di tubazione del refrigerante, e dai dislivelli tra VRF e terminali.

Si segnala che, considerato che le unità terminali di questo impianto possono essere regolate in maniera indipendente le une dalle altre, può accadere che non tutte operino contemporaneamente, o che alcune lavorino in raffreddamento ed altre in riscaldamento nello stesso momento (si pensi ad edifici con locali aventi differenti esposizioni e dunque differenti necessità di climatizzazione, specialmente nelle stagioni intermedie).

La peculiarità di questa tipologia di sistemi risiede nella modalità con cui è gestita la regolazione: ogni unità terminale dispone di valvole che consentono di regolare pressione e temperatura di evaporazione e condensazione del fluido frigorifero, mentre l'unità esterna fa variare la portata di refrigerante mediante un compressore dotato di inverter.

2.3 Rendimenti delle pompe di calore

Per analizzare termodinamicamente un sistema a pompa di calore, occorre riprendere il concetto di macchina termica (ciclo diretto), di macchina frigorifera (ciclo inverso) e dei cicli che essi realizzano.

Una macchina termica trasforma energia termica in lavoro. Tipici esempi sono il motore a scoppio di un veicolo, oppure una turbina a gas.

Il ciclo realizzato da una macchina termica (Figura 19) prevede l'ingresso, nel sistema termodinamico, di calore Q_1 ad una determinata temperatura T_1 , che in parte viene trasformato in lavoro utile L_m , e in parte (pari a Q_2) viene ceduto all'ambiente esterno o in generale ad un serbatoio freddo ad una temperatura inferiore T_2 .

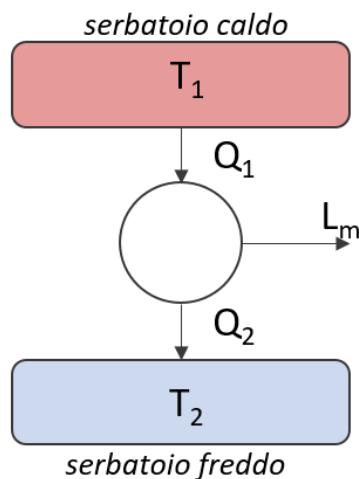


Figura 19. Rappresentazione simbolica di una macchina termica a ciclo diretto

Invertendo il ciclo di una macchina termica, si ottiene una macchina frigorifera, nella quale il calore Q_2 assorbito da una sorgente fredda a temperatura T_2 viene ceduto ad un serbatoio caldo a spese di un apporto di lavoro motore L_m . È quanto si realizza, ad esempio, nel frigorifero domestico e nelle pompe di calore oggetto del presente studio (Figura 20).

Pertanto, una macchina frigorifera trasferisce calore da un serbatoio (o sorgente) freddo ad uno caldo, ovvero caratterizzato da una temperatura superiore, grazie al lavoro esterno

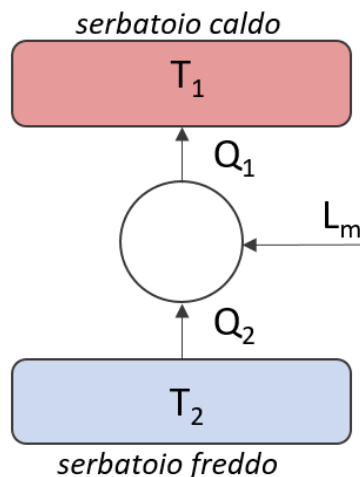


Figura 20. Rappresentazione simbolica di una macchina termica a ciclo inverso (caso pdc)

Come noto, il concetto di macchina di Carnot permette di definire il limite superiore (rendimento massimo) di una macchina termica ideale reversibile che lavori indifferentemente a ciclo diretto o inverso. Le trasformazioni che si realizzano nella macchina ideale di Carnot sono due adiabatiche e due isoterme reversibili.

Note le temperature delle sorgenti calda e fredda, è possibile stabilire il rendimento della macchina ideale, sia essa a ciclo diretto che inverso.

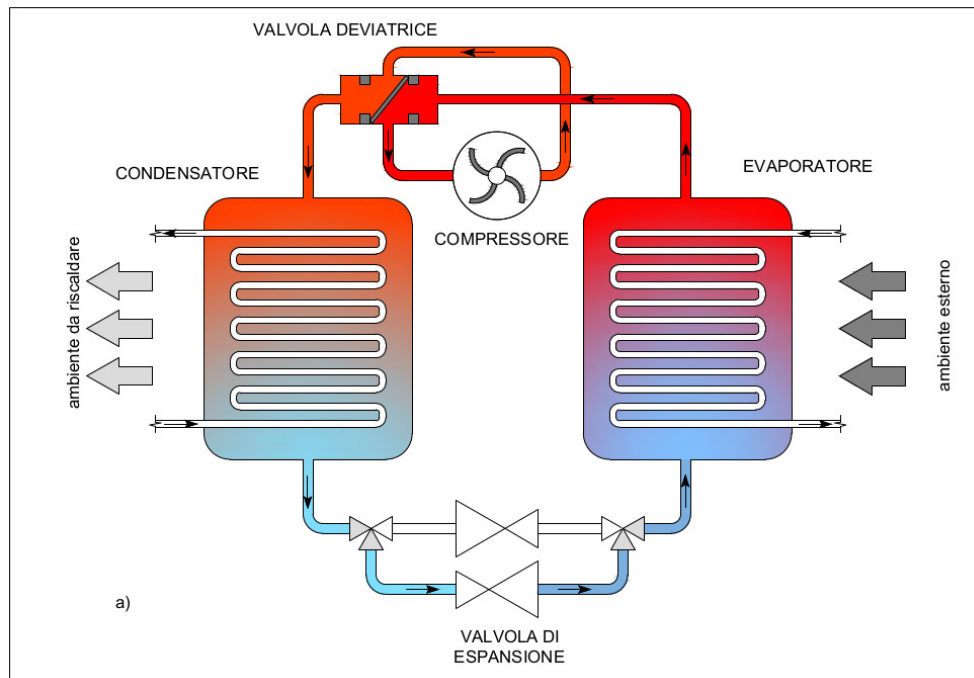
In generale, il rendimento di una macchina è definito come il rapporto tra l'effetto utile e l'energia spesa per conseguirlo. Pertanto, per una macchina di Carnot diretta esso sarà pari al rapporto tra L_m , pari a $Q_1 - Q_2$, e Q_1 .

Per una macchina di Carnot inversa, ossia nel caso delle pdc, quando esse sono impiegate per la climatizzazione invernale, l'effetto utile è l'energia termica fornita all'ambiente ($Q_1 = L_m + Q_2$), a spese di un lavoro esterno L_m compiuto dal compressore, pertanto la prestazione della macchina è espressa attraverso il COP.

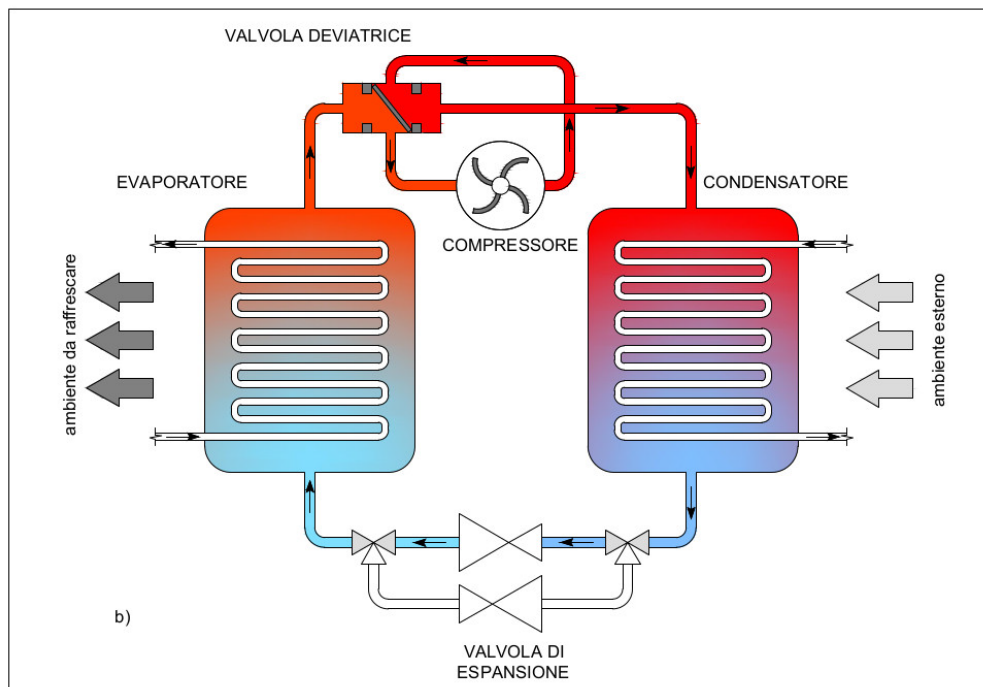
Tale rendimento può essere semplificato ed espresso mediante rapporto di temperature in Kelvin (Eq. 1):

$$COP = \frac{Q_1}{L_m} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad \text{Eq. 1}$$

Per una macchina di Carnot inversa, ossia nel caso delle pdc, quando esse sono impiegate per la climatizzazione estiva, viene deviato il flusso del refrigerante per mezzo di specifiche valvole e scambiando evaporatore e condensatore rispetto al regime di climatizzazione invernale (come mostrato in Figura 21).



a)



b)

Figura 21. Pompa di calore reversibile: a) funzionamento invernale; b) funzionamento estivo

In quest'ultima configurazione, l'effetto utile è l'energia termica (Q_2) che viene sottratta all'ambiente da climatizzare a spese di un lavoro esterno L_m compiuto dal compressore pertanto la prestazione della macchina è espressa attraverso l'EER. Tale rendimento può essere semplificato ed espresso mediante rapporto di temperature in Kelvin (Eq. 1):

$$EER = \frac{Q_2}{L_m} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad \text{Eq. 2}$$

L'efficienza della macchina a ciclo inverso è inversamente proporzionale al salto termico compiuto dal fluido frigorifero, ovvero $T_1 - T_2$. Ciò ha una doppia implicazione:

- In climatizzazione invernale, il COP diminuisce al diminuire della temperatura T_2 della sorgente esterna;
- In climatizzazione estiva, l'EER diminuisce all'aumentare della temperatura T_2 della sorgente esterna.

Ovvero, più bassa è la temperatura cui il calore è ceduto, e più alta è la temperatura della sorgente da cui viene prelevato, maggiore è il COP.

Questo aspetto può essere analizzato anche sotto il profilo dei consumi della macchina stessa.

La quantità di calore trasferita è proporzionale alla massa di gas che viene fatta evaporare, compressa e fatta condensare. All'aumentare del salto di temperatura, aumenta il salto di pressione, ed il lavoro di compressione aumenta, perciò il COP diminuisce.

Bisogna inoltre sempre ricordare che il compressore è una macchina volumetrica: al diminuire della temperatura di evaporazione diminuisce la densità del gas, perciò diminuisce la massa di gas trasferito, e di conseguenza diminuisce anche la potenza utile.

Sempre per il fatto che il compressore è una macchina volumetrica, si ha che all'aumentare della temperatura di condensazione aumenta la pressione finale, perciò aumenta il lavoro di compressione sull'unità di massa di gas trasferito, e di conseguenza cresce anche la potenza assorbita dal compressore.

Ulteriore causa di riduzione del COP di una macchina frigorifera è la necessità di salto termico tra sorgenti e scambiatori. Infatti, dal momento che si ha trasmissione di calore solo quando c'è una differenza di temperatura tra i due sistemi, affinché la sorgente fredda possa trasferire calore all'evaporatore, la sorgente fredda stessa deve trovarsi a temperatura superiore a quella dell'evaporatore (Figura 22). Ugualmente, la sorgente calda deve trovarsi a temperatura inferiore a quella del condensatore per ricevere calore da quest'ultimo. Ciò determina un maggior lavoro del compressore ed una minore quantità di calore sottratta alla sorgente fredda.

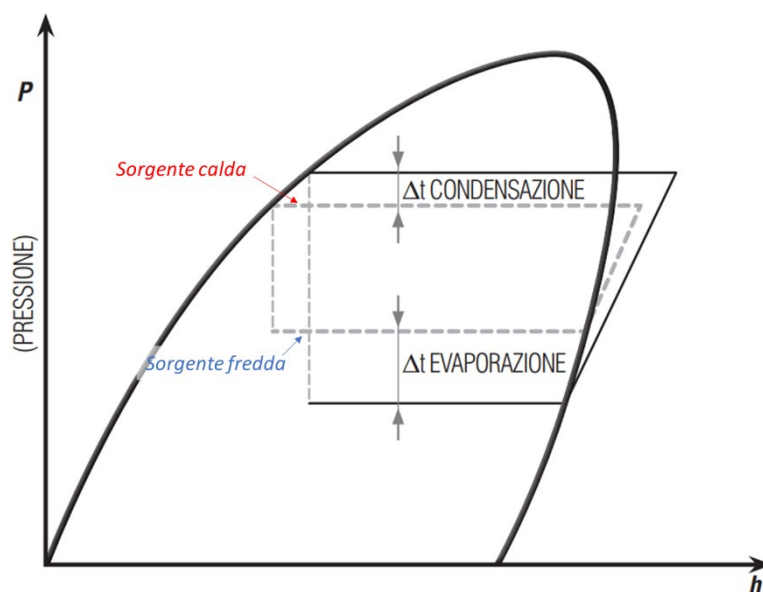


Figura 22. Relazione tra le temperature delle sorgenti e le temperature degli scambiatori [11]

Perciò, il COP di una pompa di calore risulta legato e dipendente dalle temperature della sorgente fredda e della sorgente calda (Figura 23 e Figura 24), dal momento che esse definiscono gli stati termodinamici del refrigerante all'interno del ciclo frigorifero e, quindi, la potenza scambiata all'evaporatore, al condensatore e la potenza assorbita dal compressore.

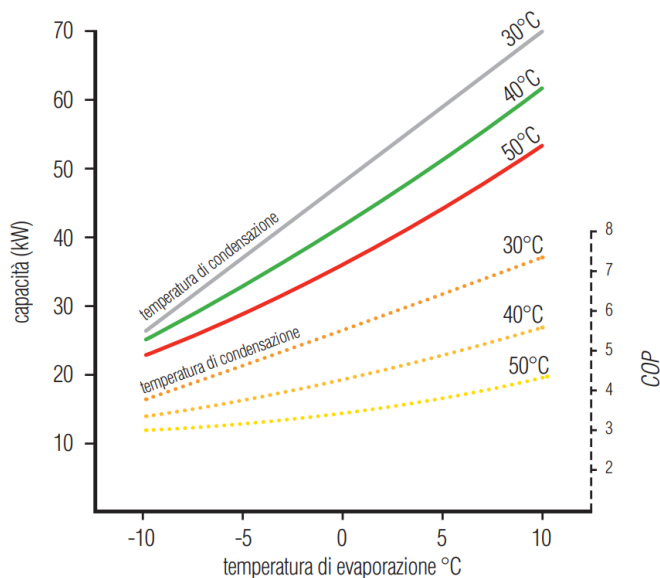


Figura 23. Prestazioni di una pompa di calore al variare della temperatura di evaporazione e di condensazione [11]

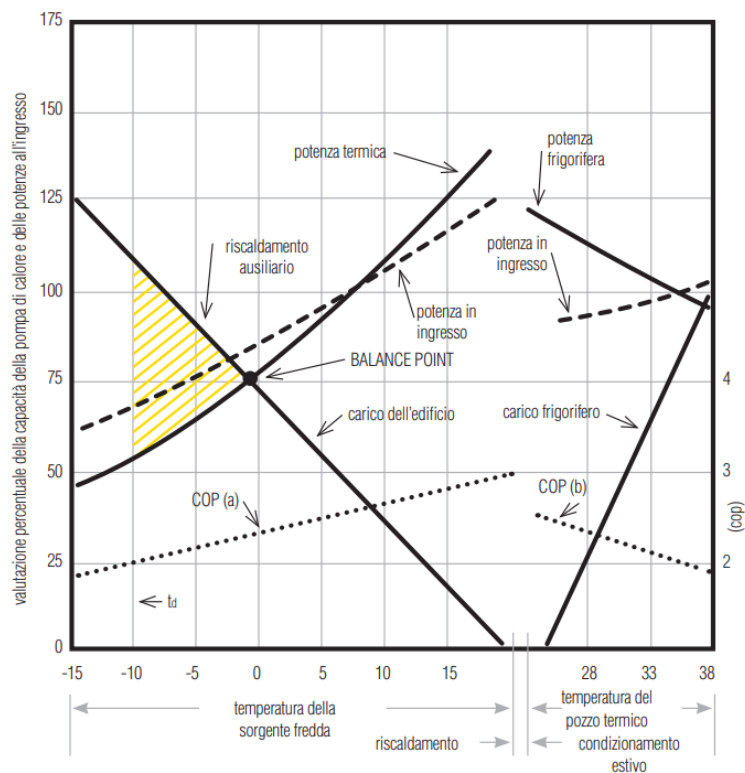


Figura 24. Curve di potenza termica, frigorifera ed assorbita, di COP estivo ed invernale e di fabbisogno in funzione della temperatura dell'aria esterna [11]

Proprio per questi motivi, in fase di progettazione e dimensionamento di un impianto a pdc, è necessario tener conto delle temperature delle sorgenti di scambio, in modo che la potenza termica e/o frigorifera che la pompa di calore è in grado di erogare all'intero degli ambienti possa coprire il fabbisogno dell'edificio stesso (Figura 23).

Come premesso, definire le prestazioni di una pdc basandosi esclusivamente su COP ed EER e sulle temperature espresse in Eq. 1 ed Eq. 2 non è sufficiente per poter caratterizzare le prestazioni della macchina nell'intera stagione di funzionamento.

Per tale motivo, vengono introdotti gli indici SCOP e SEER. Tali indici sono definiti come il rapporto tra l'energia termica (SCOP) o frigorifera (SEER) fornita all'utenza e l'energia assorbita dalla macchina per produrre tale effetto. La peculiarità di questi indici è che sono determinati in condizioni operative fissate e attraverso metodologie di calcolo stabilite da specifiche normative

Per il calcolo dell'energia da fonte rinnovabile ottenuta con una pdc, il D.Lgs. 28/11 [13] prescrive l'uso dell'equazione Eq. 3 riportata nella Direttiva Europea:

$$E_{RES} = E_{pdc} \left(1 - \frac{1}{SPF_{pdc}} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

$$SPF_{pdc} = \frac{E_{pdc}}{E_{ass}} \quad \text{Eq. 4}$$

E_{pdc} è l'energia termica stagionale prodotta mediante la pompa di calore e SPF_{pdc} (Eq. 4) è il Coefficiente di Prestazione Stagionale della pompa di calore, E_{ass} è in generale l'energia spesa per il funzionamento della pompa di calore, compresi gli ausiliari; ovviamente, nel caso di pompe di calore elettriche, è l'energia elettrica.

Il D.Lgs. 28/11 [13] prescrive anche il valore minimo limite al di sotto del quale non si produce più energia sfruttando una fonte rinnovabile, da calcolare con la relazione espressa in Eq. 5:

$$SPF_{min} > \frac{1,15}{\eta} \quad \text{Eq. 5}$$

In cui η è il rendimento di trasformazione da energia primaria a energia elettrica, calcolato sul potere calorifico inferiore, che tiene conto anche della distribuzione attraverso la rete, e 1,15 è un coefficiente di maggiorazione fissato dalla Direttiva. Convenzionalmente il rendimento è considerato uguale a 0,4 in tutta Europa, per cui $SPF_{Min} = 2,875$. Per le pompe di calore ad assorbimento e a motore endotermico η è fissato pari a 1 [14].

L'utilizzo delle pompe di calore risulta vantaggioso dal momento che, pur considerando le perdite, riescono a fornire più energia (sotto forma di calore) di quanta sia consumata per il funzionamento stesso, dal momento che parte del calore che forniscono è estratto da una sorgente esterna (ovvero aria, acqua o terreno).

Inoltre, la quota di energia che le pompe di calore prelevano dall'ambiente è assimilabile a energia da FER per l'edificio in cui sono installate, e quindi è incentivata ai sensi del DLgs 28/11 [13]. Se anche l'energia necessaria per il funzionamento della pdc fosse prodotta interamente da fonte rinnovabile (come il solare fotovoltaico), le pompe di calore si configurerebbero come impianti totalmente ad energia rinnovabile.

Perciò, lo sviluppo delle pompe di calore mira a far sì che possano integrare in maniera sempre più significativa la produzione da fonte rinnovabile di energia per alimentare il compressore e gli organi di funzionamento della pdc stessa. Ciò, ovviamente, non può prescindere dal considerare come necessaria anche la possibilità di accumulo termico ed elettrico (Figura 25).

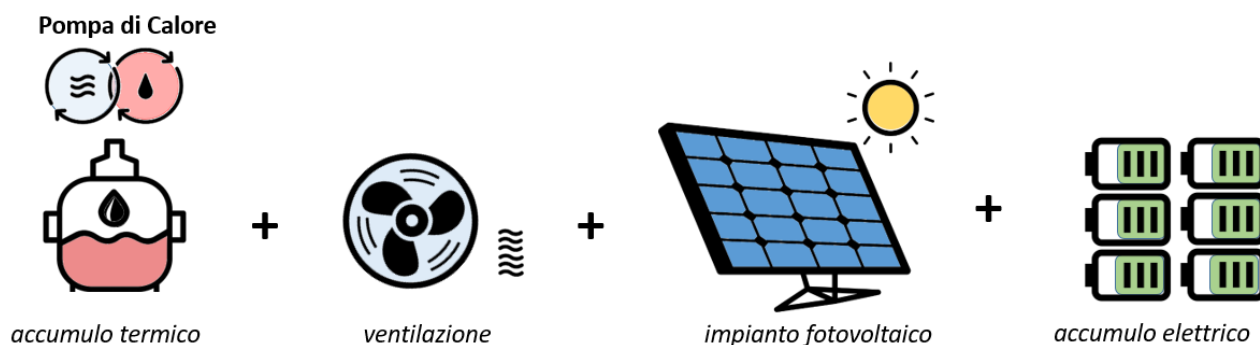


Figura 25. Possibile futura configurazione della pompa di calore

In condizioni reali (ovvero con macchine reali) il COP operativo è inferiore rispetto al valore espresso in Eq. 1, per via delle irreversibilità del sistema, come ad esempio:

- cadute di pressione nell'evaporatore o nel condensatore;
- compressione non isoentropica;
- rendimento volumetrico del compressore non unitario;
- necessità di differenze di temperatura tra sorgente fredda e refrigerante (nell'evaporatore) e tra pozzo caldo e refrigerante (al condensatore) per realizzare i processi di scambio termico;
- irreversibilità nella valvola di laminazione (che causa una piccola produzione di vapore che determina una diminuzione dell'effetto frigorifero all'evaporatore);

Tra l'altro, in fase di utilizzo, ci sono ulteriori aspetti di tipo tecnico-pratico di cui tener conto che riducono l'efficienza delle pompe di calore. Un tipico esempio è la formazione di brina sull'evaporatore di una pompa di calore che ha come sorgente fredda l'aria a causa della condensazione del vapore acqueo contenuto nell'aria sulla superficie di scambio termico dell'evaporatore. Tale condensa, a causa delle basse temperature, si trasforma in brina che, a sua volta, diminuisce la superficie utile dello scambiatore, e pertanto aumentano le perdite di carico ed il salto termico tra aria e refrigerante.

Per le pompe di calore il riferimento normativo, a livello europeo è costituito dal pacchetto delle UNI EN 14511 [15] che riguarda i condizionatori, i refrigeratori di liquido e le pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti.

Nel dettaglio, la UNI EN 14511-1 concerne i termini e le definizioni per la classificazione e le prestazioni delle apparecchiature appena elencate, eccezion fatta per le pompe di calore per la produzione di ACS.

La UNI EN 14511-2 è inerente alle condizioni di prova per la determinazione delle prestazioni delle pompe di calore. Per le prove di valutazione devono applicarsi le condizioni previste in conformità a:

- prospetto 3, per unità aria/aria in modalità di riscaldamento;
- prospetto 4, per unità aria/aria in modalità di raffreddamento;
- prospetto 5, per unità acqua/aria e miscela incongelaibile/aria in modalità di riscaldamento;
- prospetto 6, per unità acqua/aria e miscela in modalità di raffreddamento;
- prospetti da 7 a 10, per unità e miscela in modalità di riscaldamento secondo le temperature di applicazione;
- prospetto 11, per unità acqua/acqua, miscela incongelaibile/acqua, acqua/miscela incongelaibile e miscela incongelaibile/miscela incongelaibile;
- prospetti da 12 a 15, per aria/acqua in modalità riscaldamento secondo le temperature di applicazione;
- prospetto 16, per unità aria/acqua e aria/miscela incongelaibile in modalità di raffreddamento;
- prospetto 17, per refrigeratori di liquido con condensatore remoto;
- prospetto 18, per refrigeratori di liquido per condensatore a recupero di calore;
- prospetto 19, per sistemi multi split raffreddati ad aria e sistemi multi split modulari raffreddati ad aria in modalità riscaldamento;

- prospetto 20, per sistemi multi split raffreddati ad aria e sistemi multi split modulari raffreddati ad aria in modalità di raffreddamento;
- prospetto 21, per sistemi multi split modulari raffreddati ad aria a recupero di calore;
- prospetto 22, per sistemi multi split raffreddati ad acqua e sistemi multi split modulari raffreddati ad acqua in modalità di riscaldamento;
- prospetto 23 per sistemi multi split raffreddati ad acqua e sistemi multi split modulari raffreddati ad acqua in modalità di raffreddamento.

La norma UNI EN 14511-3 specifica i metodi di prova per la classificazione e la prestazione delle pdc e specifica il metodo di prova e di preparazione dei rapporti per le capacità di recupero del calore, le capacità ridotte del sistema e la capacità delle singole unità interne dei sistemi multi split se applicabili.

Nella norma vengono, inoltre, dettagliate l'incertezza di misura (prospetto 1), gli scostamenti ammissibili dai valori impostati per l'esecuzione dei test (prospetto 4), le variazioni ammesse nelle prove della capacità di riscaldamento in condizioni transitorie e le informazioni minime da inserire nei report dei test (prospetto 6).

La norma UNI EN 14511-4 specifica i requisiti minimi per garantire che i condizionatori, le pompe di calore e i refrigeratori di liquido con compressore elettrico, che utilizzano aria, acqua o miscela incongelabile come mezzi termo vettori, siano idonei all'uso previsto dal fabbricante quando utilizzati per il riscaldamento e/o raffrescamento degli ambienti.

Alcuni precedenti esperienze [16] dimostrano, inoltre, come la definizione del volume di controllo, ai fini della individuazione delle prestazioni energetiche di una pompa di calore, sia indispensabile. Infatti, vengono distinti quattro Seasonal Performance Factor (SPF) riferiti con un numero progressivo, in ragione dell'estensione del volume di controllo agli ausiliari, alla resistenza di back up e all'intero serbatoio (freddo o caldo), come mostrato in Figura 26 e in Figura 27.

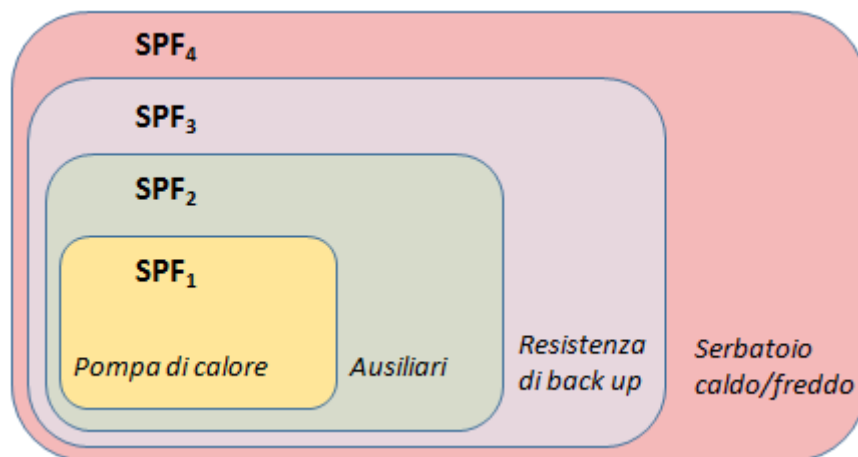


Figura 26. Relazione tra gli SPF in ragione del volume di controllo

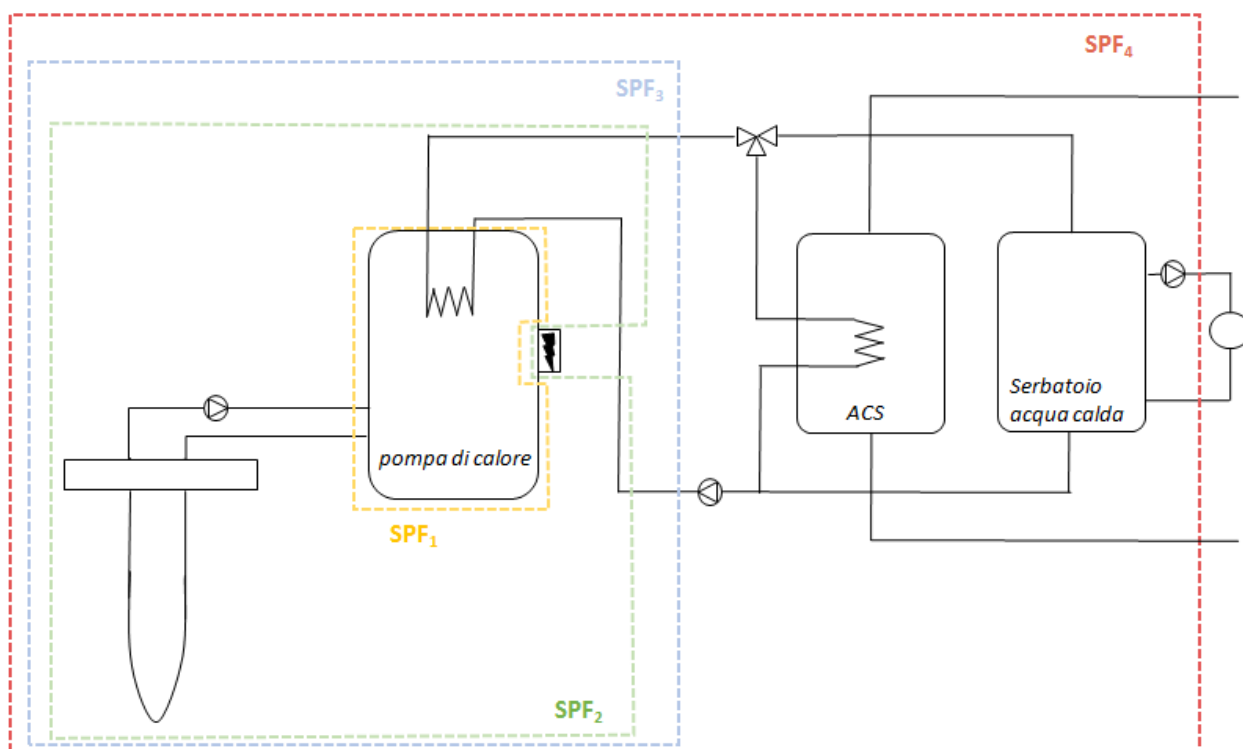


Figura 27. Identificazione del volume di controllo per la definizione dell'SPF

Tabella 3. Confronto delle metodologie di calcolo delle prestazioni [17]

COMPONENTE	SPF ₁	SPF ₂	SPF ₃	SPF ₄	UNI EN 14511	EN 15316-4	EN 14825	EN 16147
Compressore	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Pompa della miscela		✓	✓	✓	H.L.*	✓	H.L.*	
Resistenza di back-up			✓	✓		✓	✓	✓
Serbatoio/pompa per ACS				✓		✓		✓
pompa circolazione acqua calda				✓	H.L.*	✓*	H.L.*	✓
*H.L. : head losses								

La Tabella 3 mostra il confronto fra gli approcci per il calcolo delle prestazioni stagionali delle pompe di calore. In particolare, gli SPF da 1 a 4 si impiegano per le misure in situ, in accordo alla definizione del volume di controllo esposto in Figura 27. Invece, le norme EN 14511:2011, EN 16147:2012 ed EN 14825:2012 si applicano in misure di laboratorio in condizioni fissate. In particolare, la EN 14511 si usa per velocità fissate e pompe di calore a compressione elettrica ed è implementata in caso di carico parziale e

dati climatici provenienti dalla EN 14825. Analogamente per la EN 15316, in cui però viene integrato l'involucro dell'edificio [17].

2.3.1 I cicli di sbrinamento

Come già accennato in precedenza, affinché si realizzi scambio termico all'evaporatore deve risultare che la temperatura della sorgente fredda sia maggiore della temperatura dell'evaporatore stesso. Nel caso di pompe di calore che usano come sorgente fredda l'aria, quando la temperatura dell'evaporatore raggiunge la temperatura di rugiada dell'aria, il vapore acqueo contenuto condensa sulle superfici dell'evaporatore stesso. Se poi la temperatura delle superfici dell'evaporatore raggiunge, o diventa inferiore, a 0°C, si forma brina sulla batteria di scambio termico. Tale brina deve essere eliminata poiché comporta una riduzione delle prestazioni della pompa di calore, in quanto:

- Funge da isolante, e dunque diminuisce la potenza scambiata;
- Incrementa le perdite di carico della batteria e quindi provoca una diminuzione di portata d'aria che attraversa la batteria stessa

Per eliminare il ghiaccio che si forma, si operano dei cicli di sbrinamento periodico, che interessano la batteria dell'unità esterna. Tali cicli devono avere breve durata, in modo da non creare disagio agli occupanti dell'edificio climatizzato, in quanto durante lo sbrinamento si ha l'interruzione o la riduzione dell'energia termica fornita all'edificio in favore della produzione di energia termica necessaria allo sbrinamento della batteria evaporativa.

Si riporta in Figura 28 un grafico qualitativo che mostra il coefficiente correttivo della potenza termica erogata dalla macchina in funzione della temperatura esterna, in diverse condizioni di umidità relativa. La flessione delle curve segnala proprio la presenza di brina. È importante notare che le curve sono espresse in funzione dell'umidità relativa, che pertanto costituisce uno dei parametri di monitoraggio delle pompe di calore (come verrà espresso anche nel seguito). La dipendenza del COP dalla umidità relativa fa sì che due pompe di calore identiche, ma a servizio di edifici realizzati in contesti climatici differenti, non abbiano la stessa performance nell'arco dell'anno per esempio per effetto di un diverso numero di cicli di sbrinamento. Anche questo fattore sarà perciò valutato in fase di monitoraggio nelle prossime annualità.

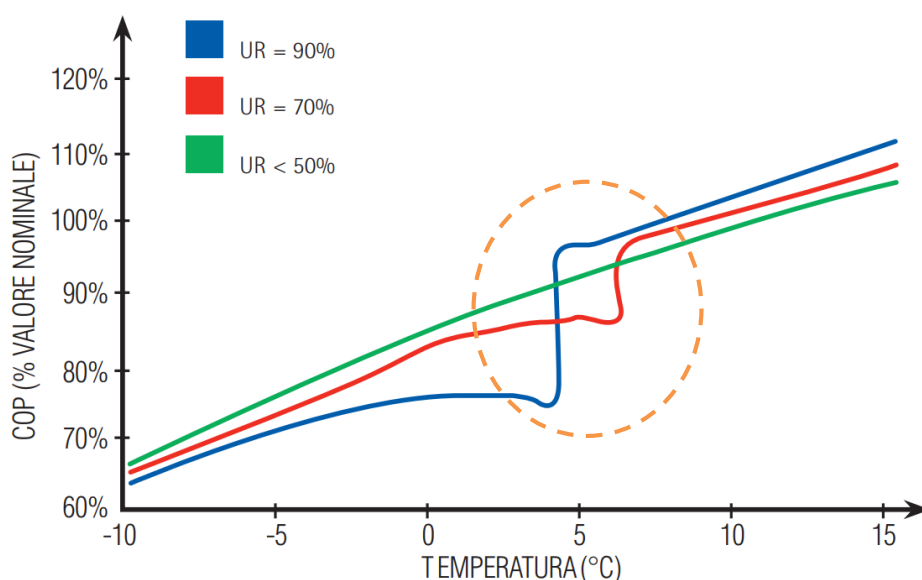


Figura 28. Variazione del COP di una pompa di calore ad aria in funzione della temperatura dell'aria esterna per tre diverse umidità relative [12].

3 La diffusione delle pompe di calore

3.1 La diffusione delle pompe di calore nel contesto europeo

Al 2018 in Europa, il parco (stock) delle Pompe di Calore risulta costituito da 11,8 milioni di unità (Figura 29), considerando, mediamente, 244 milioni di edifici residenziali, significa che il grado di penetrazione della tecnologia delle pdc è pari a circa il 5%.

Il mercato europeo delle pdc risulta in crescita nel periodo 2012÷2018. Al 2018 in Europa, la vendita di pdc si attesta ad un numero di unità pari a 1,26 milioni (+12%) rispetto al 2017.

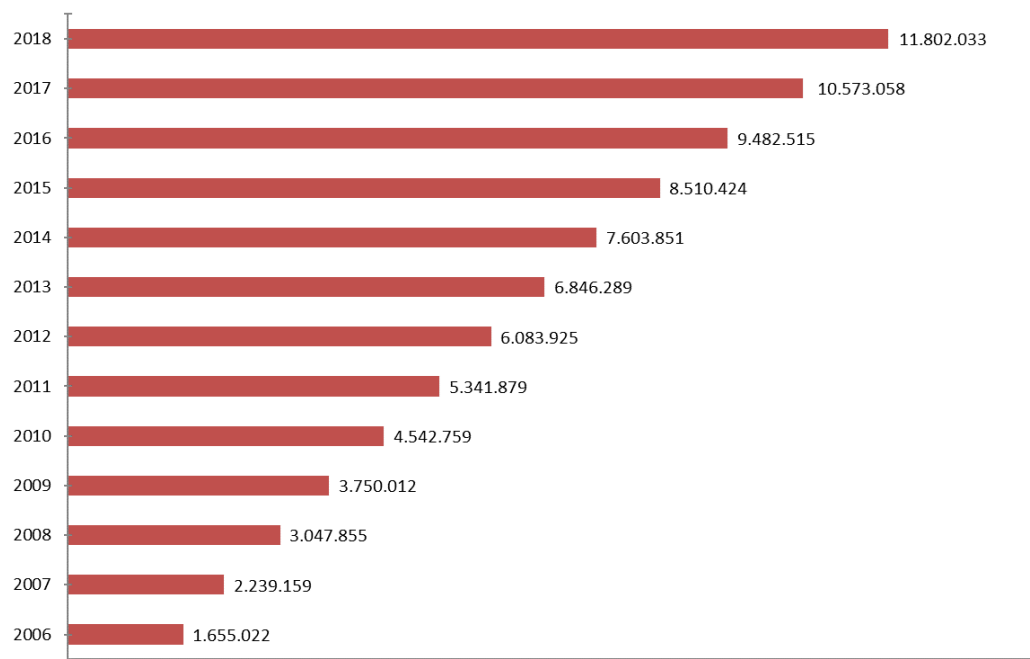


Figura 29. Stock pdc in Europa per anno (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

In riferimento ai dati di vendita divisi per ciascun Paese Europeo al 2018 (Figura 30), il primato spetta alla Francia (275.144 unità), seguono Italia (200.433), Spagna (119.928), Svezia (107.834) e Norvegia (101.146). Il dato è più evidente nella Figura 31, in cui è mostrata la distribuzione geografica delle vendite nel 2018.

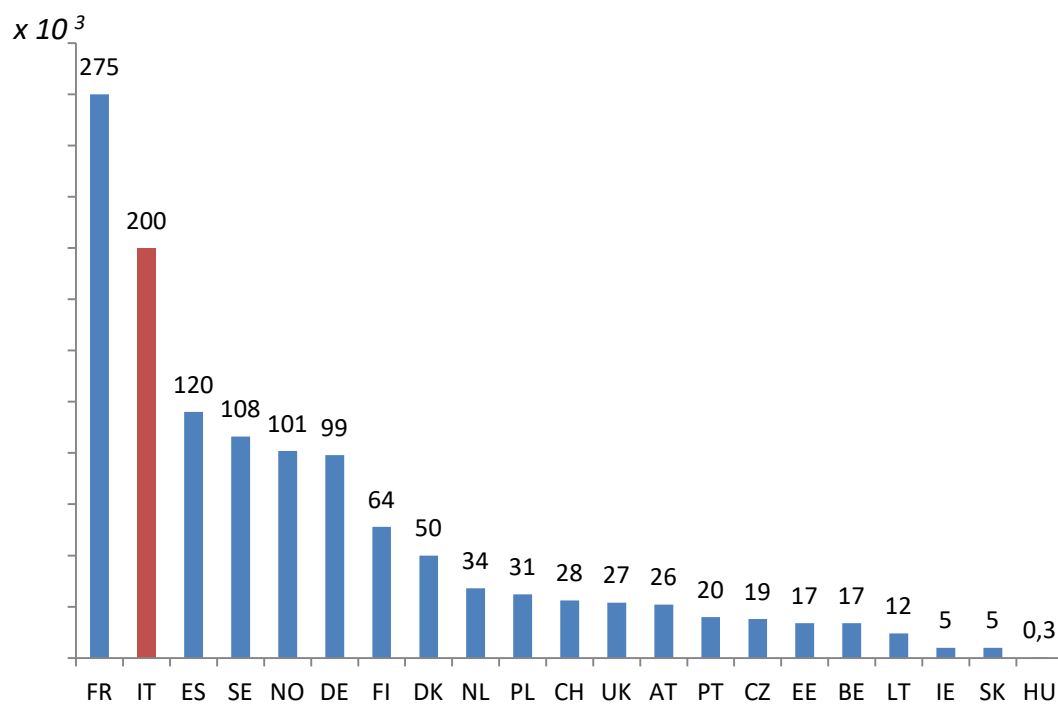


Figura 30. Unità di pompe di calore vendute nel 2018 per Paese (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

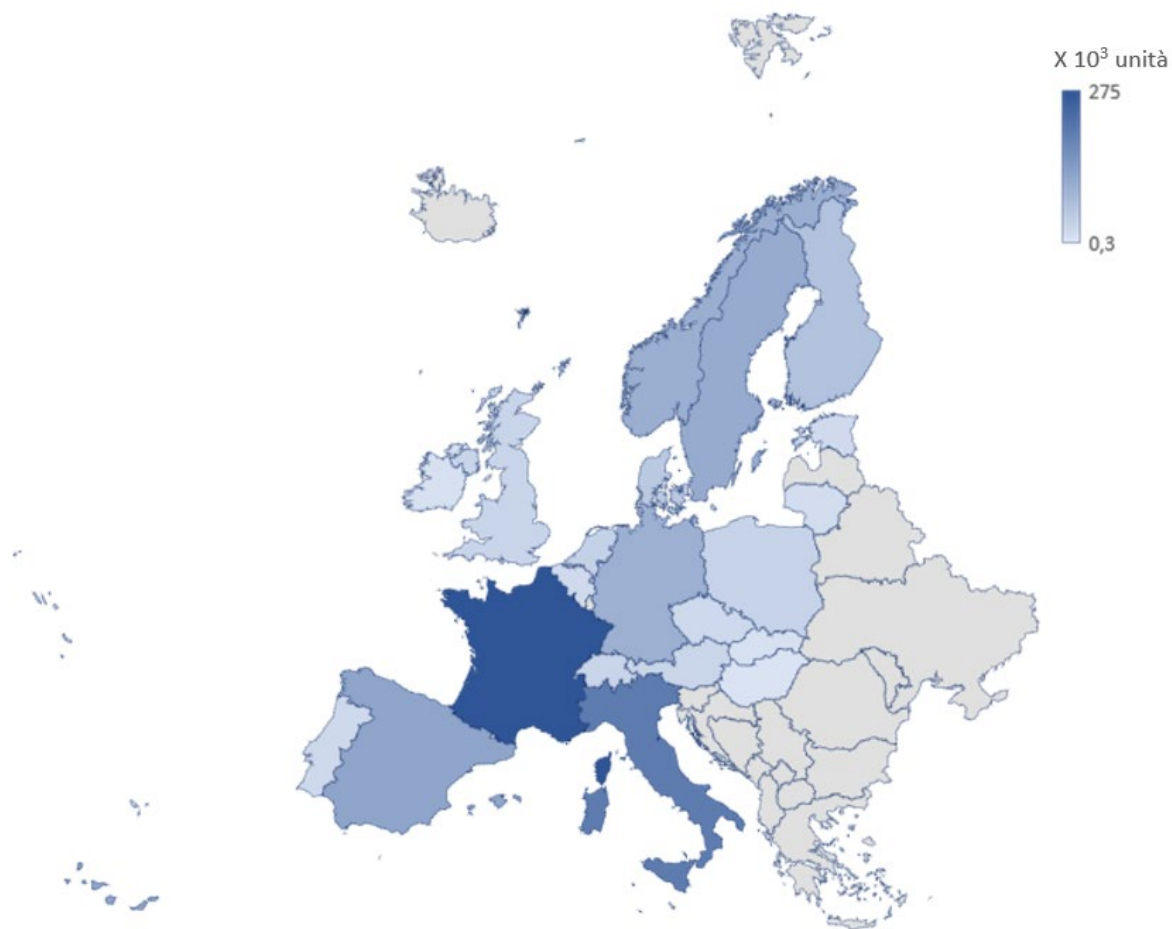


Figura 31. Distribuzione geografica delle pdc vendute nel 2018 (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

In relazione alla variazione percentuale delle vendite nel 2018 rispetto al 2017 (Tabella 4), risulta di rilievo il dato del +70% della Slovacchia, seguono i Paesi Bassi e la Norvegia con, rispettivamente, +40% e +34%. Tutti i Paesi registrano un incremento di vendite, eccetto l'Austria (-2%) e l'Ungheria caratterizzata da una rilevante flessione (-62%).

Tabella 4. Variazione percentuale delle vendite di pdc nel 2018 rispetto al 2017 per Paese (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

	%		%
UK	21	HU	-62
SK	70	FR	12
SE	3	FI	3
PT	8	ES	12
PL	14	EE	0
NO	34	DK	13
NL	40	DE	8
LT	27	CZ	21
IT	12	CH	9
IE	0	BE	7
		AT	-2

Da un'indagine sulle vendite di pdc rapportate a 1000 famiglie al 2018 (Figura 32), emerge il primato dei Paesi del Nord Europa, in particolare, la Norvegia si attesta a 46, segue l'Estonia con quasi 30. La Finlandia, la Svezia e la Danimarca costituiscono un gruppo caratterizzato da oltre 20 vendite. Seguono, a distanza, Francia, Svizzera, Lituania, Italia, Austria, Spagna e Portogallo con un numero compreso nella forchetta [10÷5]. Successivamente, si posizionano nove Paesi caratterizzati da valori minori di vendite, tra i quali, il Regno Unito e l'Ungheria registrano un dato inferiore all'unità.

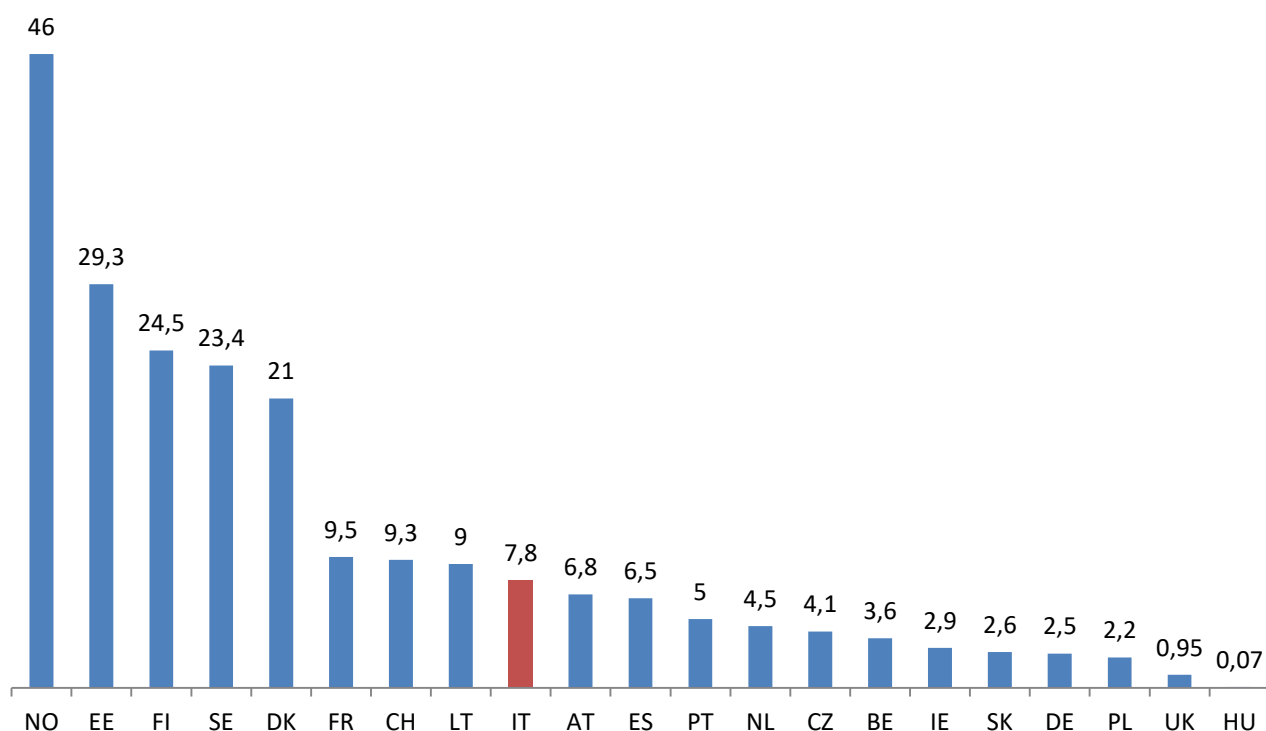


Figura 32. Vendite pdc nel 2018 ogni 1000 famiglie per Paese (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

Volendo disaggregare il dato in relazione alla tipologia di pompe di calore, è possibile desumere dalla Tabella 5 che prevalgono le pdc dedicate al servizio energetico di riscaldamento (1.086.929), in seconda posizione si collocano quelle per la produzione di ACS (160.683) e in terza le ibride, ossia quelle vendute in abbinamento ad una caldaia (9.804). Seguono le pdc per applicazioni industriali (674), quelle ad azionamento termico (95) e quelle per teleriscaldamento (11) per un totale di 1.258.196 pdc.

Visionando i dati per Paesi, l'Italia registra il numero di pdc vendute per riscaldamento più elevato (188.681), segue la Francia (168.435). In riferimento alle pdc per produzione di ACS, il dato più alto è quello della Francia (103.879). Delle 11 pdc vendute per teleriscaldamento, 8 risultano acquistate in Slovacchia. Il Portogallo si attesta a quasi la metà delle pdc vendute per scopi industriali (302). Delle 95 vendite di pdc ad azionamento termico, 80 si rilevano effettuate nei Paesi Bassi. Oltre i 2/3 dei sistemi ibridi risultano venduti in Italia (7.004).

Tabella 5. Vendite pdc nel 2018 per categoria in Europa e per Paese (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

	per riscaldamento	per produzione ACS	Per teleriscaldamento	per impieghi industriali	ad azionamento termico	ibride	TOTALE VENDITE
<i>EU-21</i>	<i>1.086.929</i>	<i>160.683</i>	<i>11</i>	<i>674</i>	<i>95</i>	<i>9.804</i>	<i>1.258.196</i>
AT	20.565	5.218		105			25.888
BE	11.376	5.323					16.699
CZ	18.689	203					18.892
DK	49.653	165					49.818
EE	16.760	-					16.760
FI	64.141	-	3	4			64.148
FR	168.435	103.879				2.800	275.114
DE	84.100	15.000					99.100
HU	300	-					300
IE	4.748	140					4.888
IT	188.681	4.748				7.004	200.433
LT	12.025	-					12.025
NL	33.529	860			80		34.469
NO	101.117	29					101.146
PL	20.836	9.840					30.676
PT	18.707	1.443		302			20.452
SK	4.677	93	8	73	15		4.866
ES	112.867	6.871		190			119.928
SE	107.834	-					107.834
CH	21.964	6.071					28.035
UK	25.925	800					26.725

Dallo stock di pdc in Europa scaturiscono i benefici economici ed ambientali al 2018 riassunti in Tabella 6. Complessivamente, si è conseguito un risparmio in termini di usi finali di energia pari a 164 TWh, cui corrisponde un contributo alla produzione da FER pari a 128 TWh (equivalente a quello di circa 40.000 turbine eoliche) e una riduzione di 33 Mt di emissioni di CO₂; la capacità di accumulo delle pdc è stata di oltre 400 GW (pari a quella di oltre 8.200 batterie di grande scala). Inoltre, aspetto non trascurabile, per effetto dell'impiego delle pdc si sono creati circa 68.000 posti di lavoro legati a: costruzione (54%), installazione (30%) e manutenzione (16%) delle pdc. I dati a livello europeo e nazionale sono dettagliati in Tabella 6.

Tabella 6. Impatto al 2018 dello stock di pdc su parametri ambientali, energetici e sociali in Europa e per Paese (fonte:[19])

	Emissioni CO₂ evitate (Mt)	Produzione FER (TWh)	Numero di posti di lavoro (x 10³)	Capacità di accumulo (GW)	Risparmio di energia finale (TWh)
EU-21	33	128	68	411	164
AT	1	3,9	2	13,5	5
BE	0,64	2,5	1	4	3,2
CZ	0,39	1,5	1	6,1	2
DK	0,52	2	2	9,4	2,6
EE	0,34	1,3	0,632	4,3	1,7
FI	1,7	6,4	3	24,2	8,2
FR	9,6	37,8	14	81,3	48,5
DE	3,8	14,5	10	51,4	18,4
HU	0,06	0,24	0,0328	0,36	0,3
IE	0,1	0,37	0,333	1,6	0,48
IT	3,7	14,4	11	47,9	18,4
LT	0,08	0,29	0,545	1,1	0,37
NL	0,94	3,6	3	8,4	4,6
NO	2	7,9	4	27,1	10,1
PL	0,55	2,1	2	6,1	2,7
PT	0,54	2,1	1	3,5	2,7
SK	0,16	0,63	0,342	0,84	0,82
ES	0,74	2,9	3	17,1	3,7
SE	4,2	16,2	6	74,2	20,5
CH	1,2	4,5	2	16	5,7
UK	0,81	3,2	1	12,5	4,1

Gli indicatori energetici per Paese (Tabella 7), considerati come i consumi energetici medi per unità di superficie utile, ai fini dell'erogazione dei servizi energetici di riscaldamento (RISC) e produzione di ACS, evidenziano una condizione eterogenea del contesto europeo (Figura 33).

Tabella 7. Indicatori energetici per i servizi di riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria per Paese
(fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

	RISC	ACS
	[kWh/ m ²]	
<i>AT</i>	149	24,3
<i>BE</i>	192	31
<i>CZ</i>	150	33,1
<i>DK</i>	117	29,3
<i>EE</i>	178	63,9
<i>FI</i>	185	30,5
<i>FR</i>	138	19,4
<i>DE</i>	161	26,7
<i>HU</i>	133	42,1
<i>IE</i>	135	30,8
<i>IT</i>	74,4	11
<i>LT</i>	101	11,2
<i>NL</i>	123	27,6
<i>NO</i>	122	22
<i>PL</i>	159	32,7
<i>PT</i>	21	16,7
<i>SK</i>	122	36,4
<i>ES</i>	57,3	31,1
<i>SE</i>	124	20,7
<i>CH</i>	96,9	8,9
<i>UK</i>	162	41,2

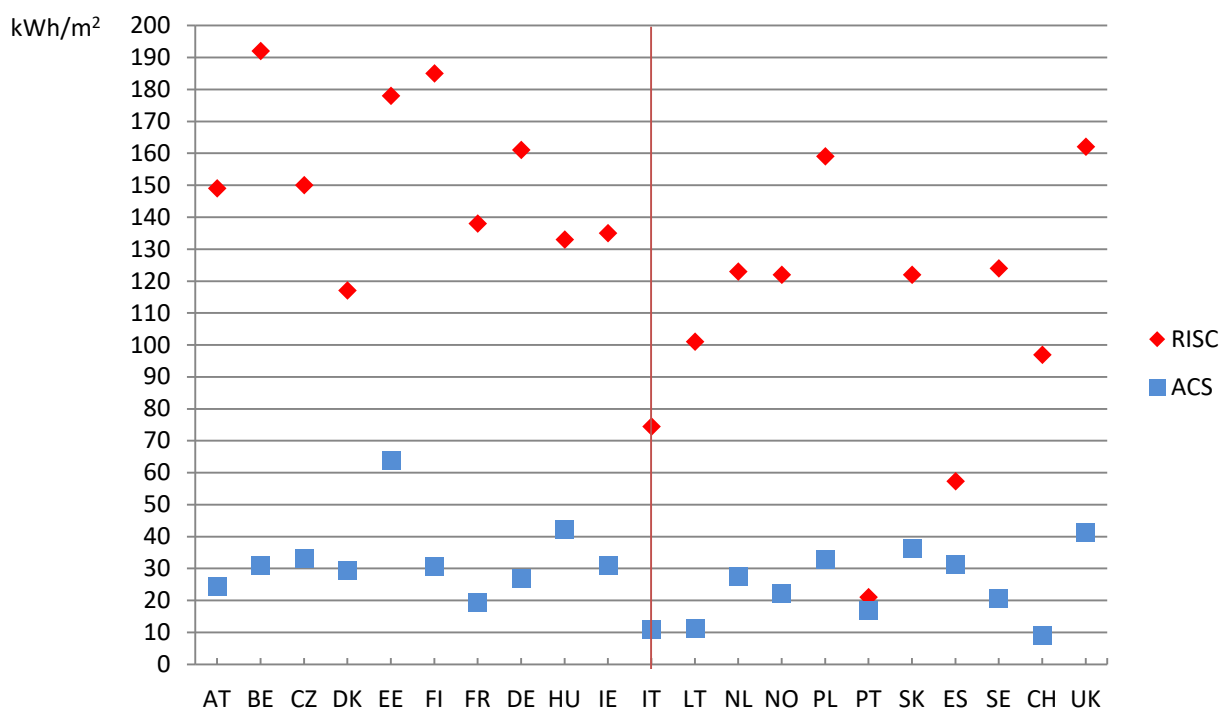


Figura 33. Distribuzione indicatori energetici per RISC e produzione ACS per Paese (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

In riferimento al servizio di riscaldamento, il Paese con il dato minore risulta il Portogallo (21 kWh/m²), mentre il valore maggiore spetta alla Finlandia (185 kWh/m²), sei Paesi orbitano intorno al dato medio (129 kWh/m²) (trattasi di Norvegia e Slovacchia a pari merito (122 kWh/m²), Paesi Bassi (123 kWh/m²), Svezia (124 kWh/m²), Ungheria (133 kWh/m²) e Irlanda (135 kWh/m²)).

Per la produzione di ACS, quattro Paesi si collocano su valori inferiori a 20 kWh/m² (nello specifico, trattasi di Svizzera 8,9 (kWh/m²), Italia (11 kWh/m²), Lituania (11,2 kWh/m²), e Francia (19,4 kWh/m²)). Al contrario, tre Paesi si attestano a dati superiori a 40 kWh/m² (si fa riferimento a Regno Unito (41,2 kWh/m²), Ungheria (42,1 kWh/m²) ed Estonia ((63,9 kWh/m²)). La maggior parte dei Paesi occupa le posizioni centrali ossia prossime al valor medio pari a 28 kWh/m².

E' interessante, inoltre, analizzare la distribuzione delle superfici climatizzate per Paese e per tipo di edificio, come riportato nella Figura 34.

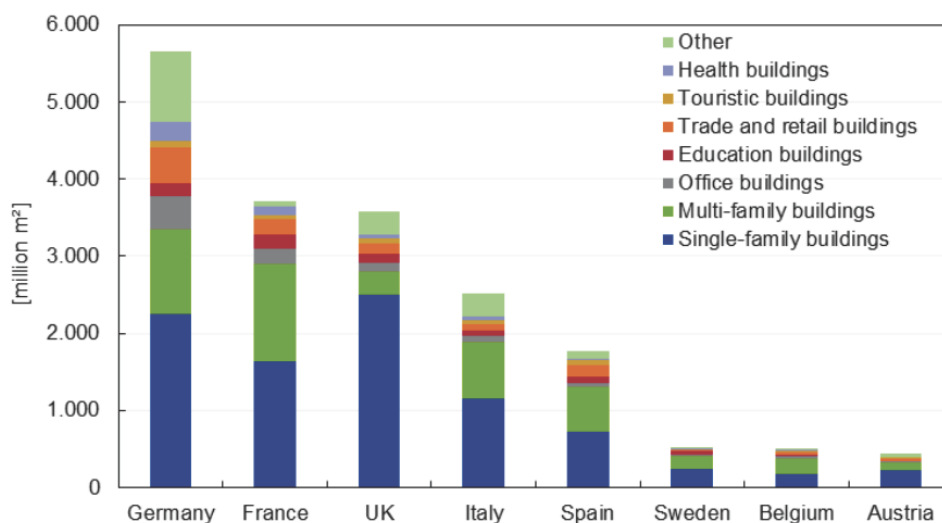


Figura 34. Distribuzione delle superfici climatizzate per Paese e tipo di edificio [20]

3.2 La diffusione delle pompe di calore nel contesto italiano

Secondo i più recenti studi, oltre il 40% degli impieghi finali di energia in Italia è dovuto agli usi civili nei quali ricadono quelli del settore terziario (Figura 35) e tale aspetto fa emergere la necessità di intervenire in via prioritaria su questo ambito. In particolare modo, è necessario rendere meno energivori e più efficienti gli edifici dello stock nazionale. Questo obiettivo si riflette nelle scelte politiche ed economiche e nelle strategie di efficientamento, delineate anche dal PNIEC, che mirano a rendere l'Italia competitiva e virtuosa.

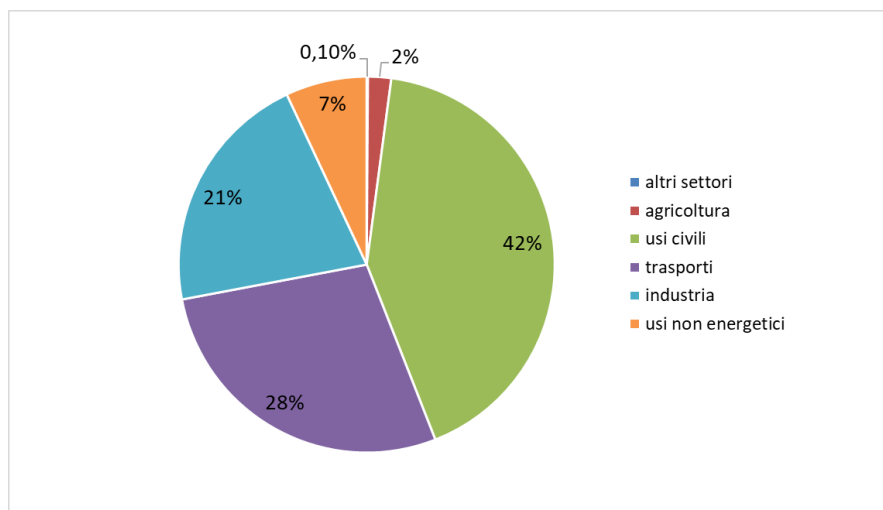


Figura 35. Impieghi finali di energia (%) per settore nel 2017 (fonte: [21])

Come nota positiva, si evince che l'intensità energetica in Italia (mostrata in Tabella 8) è in diminuzione rispetto agli anni '90. Ciò implica una migliore capacità del Paese di rendere efficienti le proprie attività. Tuttavia, è necessario invertire la tendenza rilevata, negli ultimi anni rispetto ai '90, per il settore residenziale e quello dei servizi (ovvero il terziario).

Tabella 8. Intensità energetica (fonte: [21])							
	Intensità energetica (tep/€ ₂₀₁₀)						
	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017
Industria	108,5	113,5	109,5	92,4	82,9	81,8	78,8
Trasporti	26,0	25,5	25,7	24,0	23,4	22,7	21,6
Servizi	11,0	11,6	14,3	16,0	14,6	14,5	16,9
Residenziale	32,1	29,8	35,3	36,5	35,0	34,2	34,5
Agricoltura, foreste e pesca	119,9	105,4	116,2	103,5	97,6	98,0	103,7
Intensità energetica totale	78,4	77,0	80,7	76,7	72,0	70,8	71,0

Proprio per questo motivo, anche il PNIEC delinea in maniera chiara quali sono, per ogni settore economico, gli obiettivi di risparmio energetico al 2030 (Figura 36). Appare evidente il ruolo cardine che assumeranno i settori residenziale (-3.3 Mtep), terziario (-2.4 Mtep) e dei trasporti (-2.6 Mtep).



Figura 36. Ripartizione per settore economico dei risparmi oggetto dell'obiettivo 2030 (Mtep) (fonte: [1])

In Italia sono circa 572.500 gli edifici e complessi di edifici destinati al settore terziario (4% del totale) Figura 37, principalmente localizzati nel Nord del Paese (Figura 38 e Figura 39)

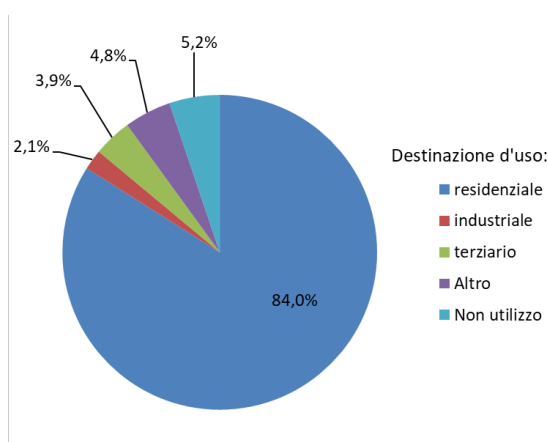


Figura 37. Ripartizione edifici e complessi di edifici al 2011 in Italia per destinazione d'uso (fonte: elaborazione ENEA su dati Istat)

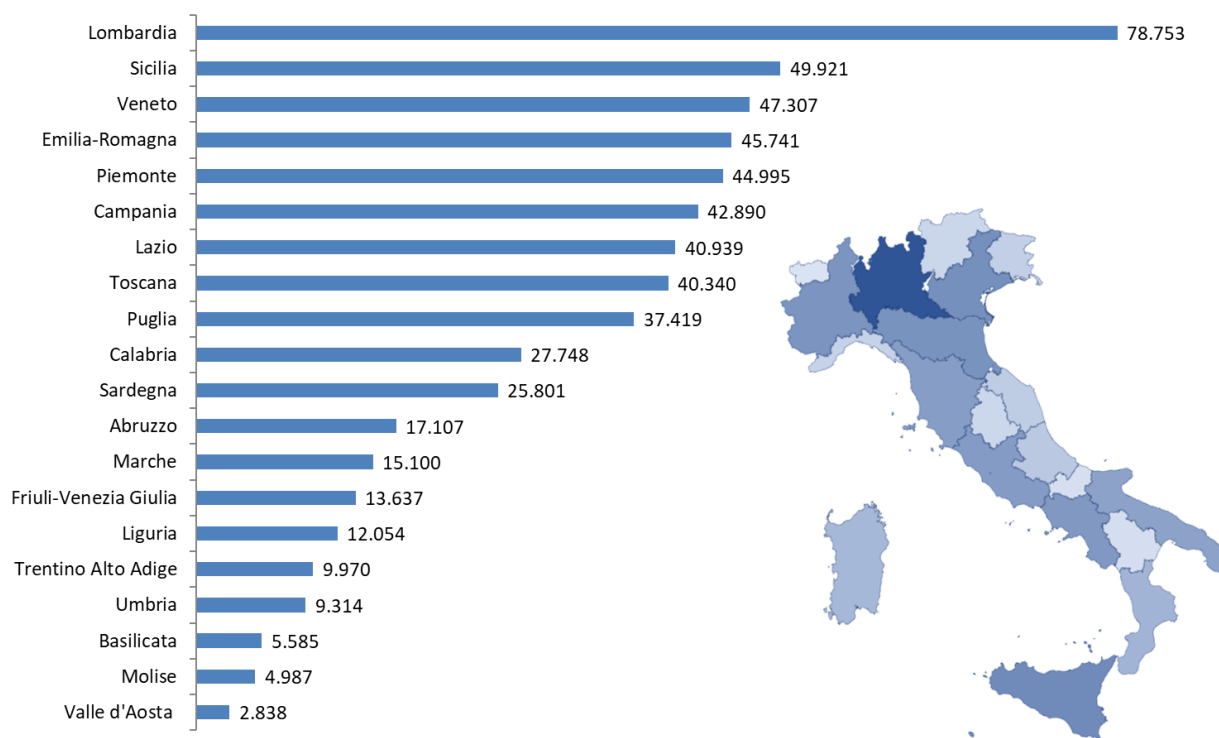


Figura 38. Numero edifici e complessi di edifici del settore terziario al 2011 in Italia per Regione (fonte: elaborazione ENEA su dati Istat)

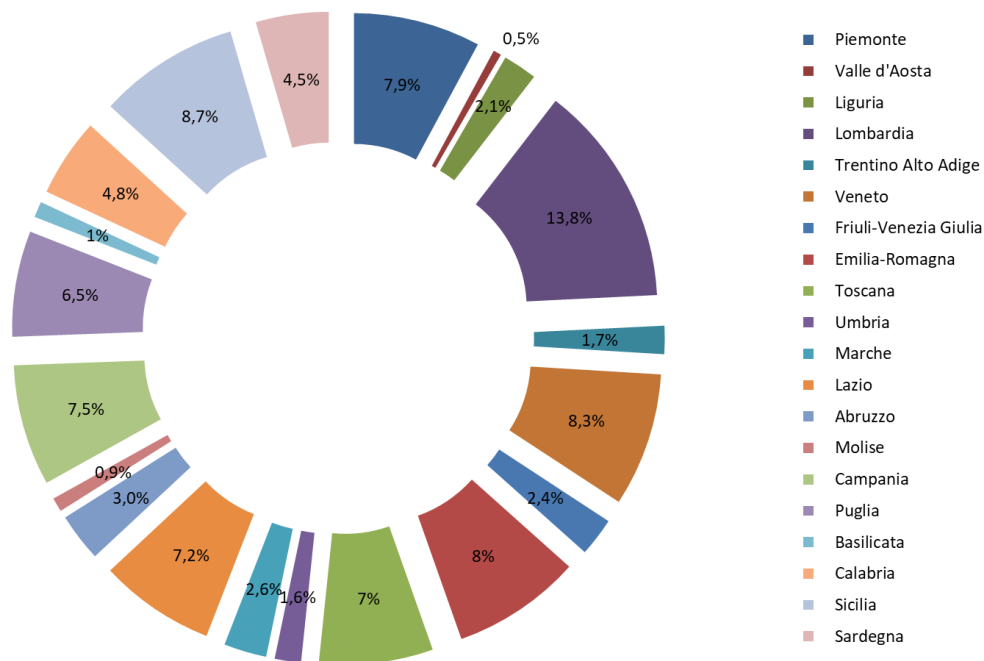


Figura 39. Ripartizione edifici e complessi di edifici del settore terziario al 2011 in Italia per Regione (fonte: elaborazione ENEA su dati Istat)

Nel PNIEC è sottolineato che gli obiettivi del settore terziario possono essere raggiunti *“grazie agli interventi di riqualificazione edilizia e installazione di pompe di calore, oltre a un forte efficientamento dei*

dispositivi di uso finale. A tal riguardo, risulterebbe utile monitorare best practice replicabili agevolmente su scala locale, specie nell'integrazione delle FER in edilizia.” [1]

Anche per queste motivazioni, è necessario prevedere monitoraggi in situ delle prestazioni delle pdc.

Il mercato italiano delle pdc risulta fra i più importanti d'Europa con un parco, al 2018, pari a 1,9 milioni di unità, sebbene il potenziale dello stesso sia ancora parzialmente inespresso [22]

L'andamento delle vendite di pdc (Figura 40) non è stato costante nell'arco degli ultimi anni, anzi risulta oscillante nel periodo 2012÷2018 con il valore più basso al 2014 ed il picco al 2018 (+12%) rispetto al 2017.

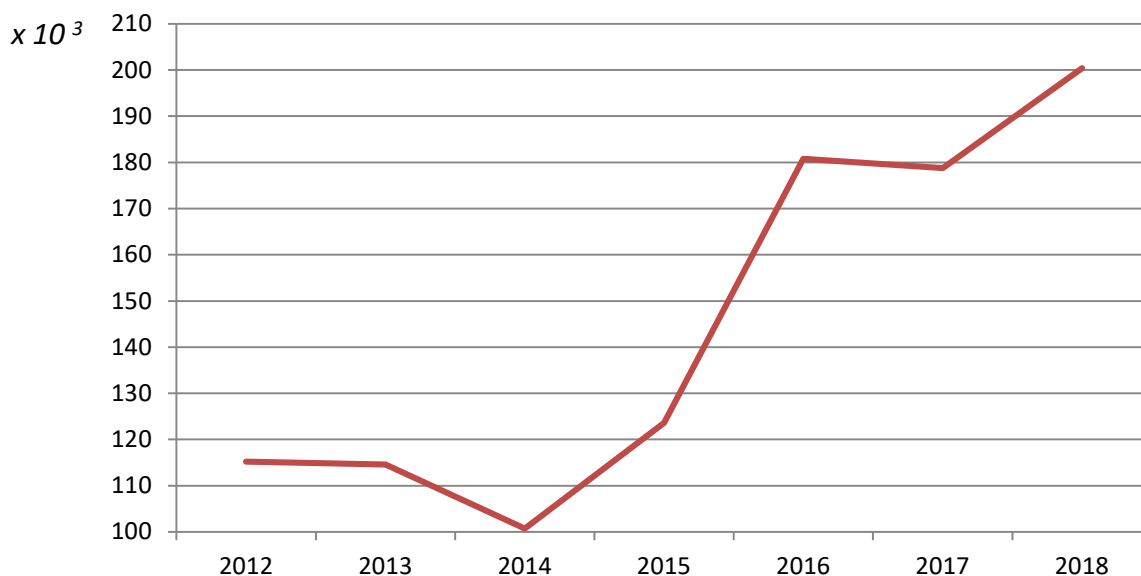


Figura 40. Andamento vendite pdc in Italia per anno (fonte: elaborazione ENEA su dati [18])

Sulla base del parametro delle vendite rapportate a 1000 famiglie (Figura 32), che risulta indicativo del grado di penetrazione della tecnologia sul mercato, si evince che sussistono ragguardevoli possibilità di incremento, in quanto il dato risulta piuttosto basso (pari a 7,8) in una forchetta rappresentativa dei Paesi Europei che sebbene sia caratterizzata dall'estremo inferiore minore dell'unità, reca l'estremo superiore pari a 46.

Nel 2018, quasi la totalità delle pompe di calore vendute in Italia (Figura 41) è deputata al servizio di riscaldamento (94.1%), seguono le pdc ibride (3,5%) e quelle per la produzione di ACS.

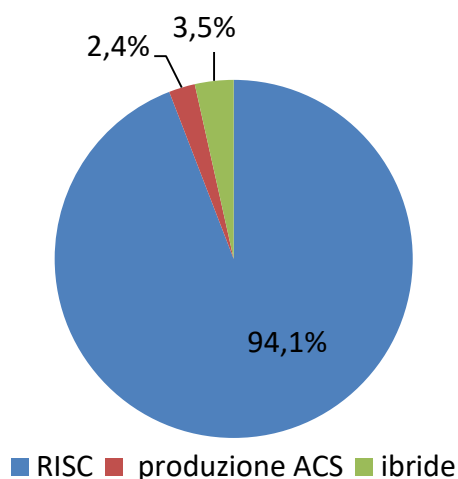


Figura 41. Tipologie di pompe di calore vendute in Italia nel 2018 (fonte: elaborazione ENEA da dati [18])

Nel dettaglio, sempre in riferimento al 2018 (Figura 42), prevalgono le pdc reversibili aria/aria (64%), in seconda posizione si collocano le pdc reversibili aria/acqua (19%), al terzo posto le pdc VRF (10,5%). Seguono con percentuali minori, le pdc ibride e per ACS, con, rispettivamente, 3,5% e 2,4%. Chiudono la sequenza, le pdc per RISC aria/acqua e quelle reversibili acqua glicolata/acqua, a pari merito, allo 0,3%.

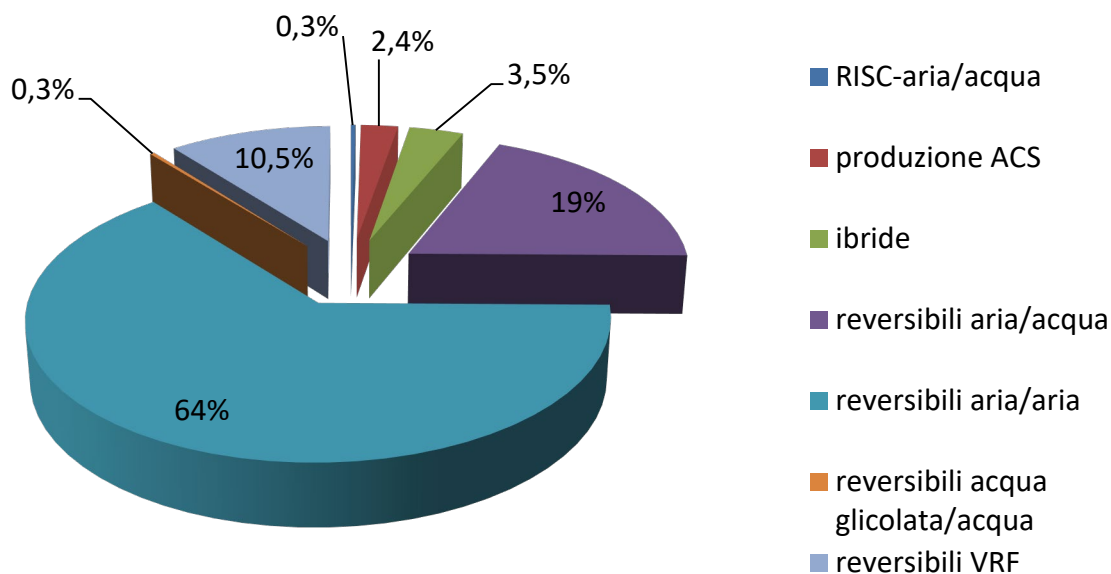


Figura 42. Ripartizione pdc nel 2018 in Italia per tipologia (fonte: elaborazioni ENEA da dati [18])

Dall'indagine sull'effetto al 2018 dello stock di pdc sui parametri ambientali, energetici e sociali emerge che, nel panorama europeo, l'Italia si colloca al terzo posto in termini di emissioni di CO₂ evitate (3,7 Mt) dopo la Francia e la Germania; analogo posizionamento riguardo alla produzione da FER (14,4 TWh); quarto posto per la capacità di accumulo (47,9 GW) dopo Francia, Svezia e Germania; secondo posto, dopo la Francia e insieme alla Germania, per quanto concerne i risparmi negli usi finali di energia (18,4 TWh); mentre il numero di posti di lavoro generati pari a 10.858 risulta secondo solo alla Francia.

E' utile considerare anche gli scenari di penetrazione delle pompe di calore nel parco immobiliare al 2030 (Figura 43), partendo proprio dagli obiettivi di crescita dei consumi di FER da pompa di calore.

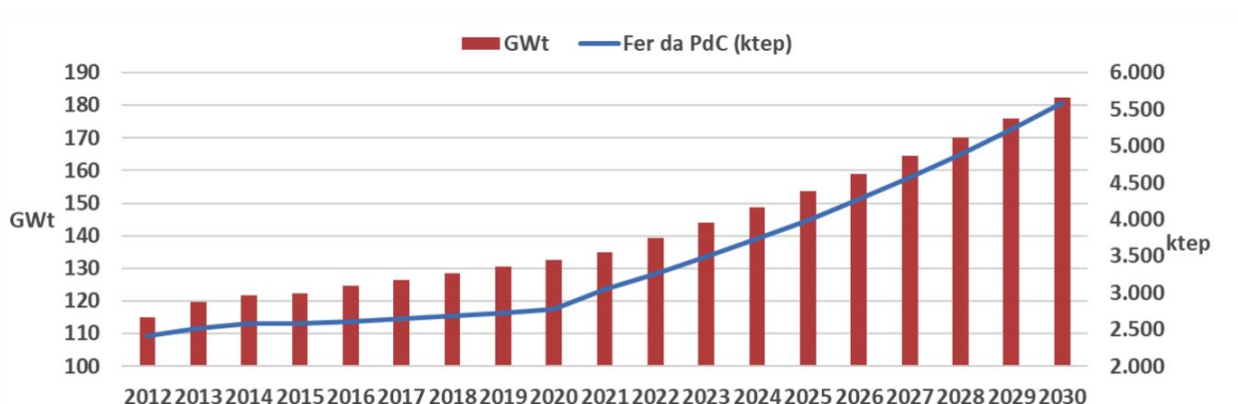


Figura 43. Scenario di penetrazione delle pdc nel parco immobiliare al 2030 (fonte:[2])

L'incremento di capacità installata complessiva al 2030 (incremento pari a 50 GWh) è stimato ipotizzando uno SCOP medio pari a 3 e un incremento delle ore medie di utilizzo delle pdc per il riscaldamento (passando dalle attuali 395 a 535) [2].

Interessante è anche lo scenario di penetrazione delle pompe di calore per il riscaldamento (che ad oggi costituiscono la quasi totalità delle vendite in Italia) nel settore residenziale e terziario al 2030 mostrato in Figura 44.

Per questa proiezione, si considerano le seguenti ipotesi: 1500 ore di funzionamento e trend di crescita dell'installazione degli impianti utilizzati solo per il freddo analogo a quello degli anni precedenti [2]. Ne emerge un incremento di 32 GWh installati, trattasi del raddoppio dell'attuale capacità di 33 GWh.

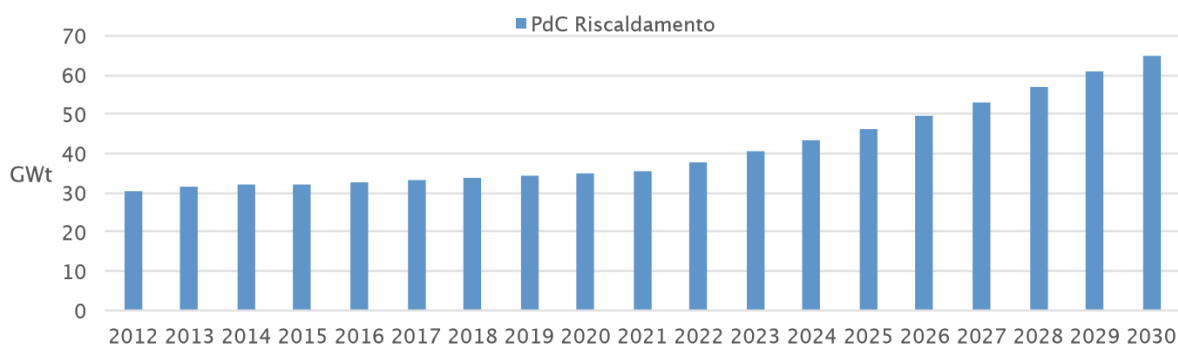


Figura 44. Scenario di penetrazione delle pdc per riscaldamento nel parco immobiliare al 2030 (fonte:[2])

Lo share di installazione per il settore residenziale e terziario è riportato in Figura 45.

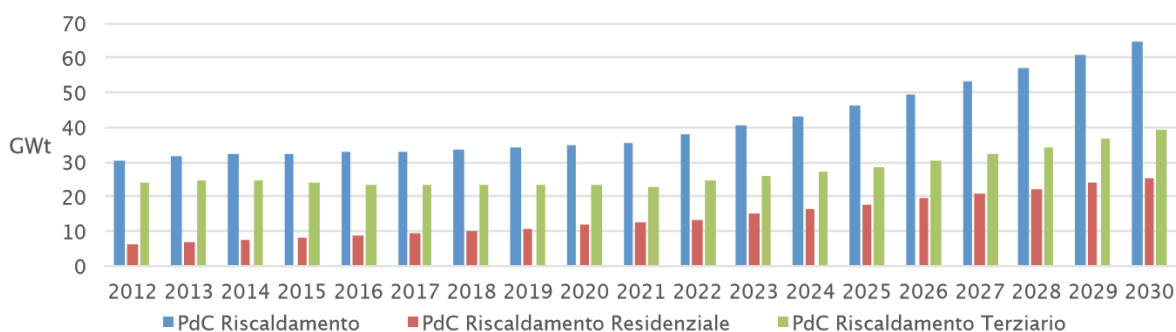


Figura 45. Scenario di penetrazione delle pdc per riscaldamento nel parco immobiliare al 2030 per settore residenziale e terziario (fonte:[2])

Si fa notare che l'incremento di capacità installata previsto al 2030 dovrebbe comportare investimenti per oltre 9,5 miliardi di euro (stima che esclude i costi per gli interventi sui sistemi di distribuzione) [2].

4 Monitoraggi di impianti a pompa di calore

Monitorare le prestazioni di un impianto a pompa di calore risulta indispensabile per la corretta valutazione del risparmio energetico ed economico associato a questa tecnologia.

Infatti, le prestazioni misurate in laboratorio possono differire da quelle rilevate in campo a causa di una serie di fattori:

- Le prestazioni in laboratorio sono misurate in specifiche condizioni di temperatura, e dunque le prestazioni energetiche in intervalli di temperatura differenti da quelle sono “estrapolate”;
- Il fattore di carico influenza il punto di lavoro della pompa di calore, e dunque le sue prestazioni;
- Il profilo di utenza, variabile, determina condizioni di impiego delle pompe di calore che possono determinare scostamenti rispetto ai valori attesi;
- Le condizioni termo-igrometriche del sito di installazione possono determinare condizioni operative di funzionamento che influenzano le prestazioni della macchina.

Scostamenti, seppur minimi, tra prestazioni in laboratorio e prestazioni operative determinano delle differenze anche significative di consumi complessivi di una pompa di calore che si riflettono, da un lato, in maggiori consumi energetici (che hanno un impatto su piccola scala, cioè si traducono in maggiori costi di esercizio per il conduttore dell'edificio) e dall'altro lato, in maggiori emissioni di gas climalteranti (con impatto su grande scala, ovvero sulla collettività).

Pertanto, per poter valutare in maniera più accurata le opportunità di risparmio energetico (ed economico) legate all'utilizzo di un sistema a pompa di calore, è necessario comprendere in che modo le prestazioni risultano influenzate dai fattori prima menzionati.

Per questo motivo, è opportuno prevedere campagne di monitoraggio su più sistemi a pompa di calore, anche localizzati in zone climatiche differenti e con profilo di utenza distinto. Lo scopo di tali monitoraggi non è quello di comparare i diversi produttori di pompe di calore, ma quello di fornire una panoramica chiara sulle differenze di prestazioni operative e nominali.

Comprendere l'entità di tali scostamenti sarà utile, nel lungo periodo, per poter definire meglio le prestazioni dei sistemi a pompa di calore quando, ad esempio, si modellano le prestazioni energetiche degli edifici che adottano tale tecnologia, e ancor di più quando si realizzano le diagnosi energetiche degli edifici. Ciò risulta ancor più importante quando si analizzano e modellano grandi complessi, oppure edifici dedicati al settore terziario, in cui gli impianti, spesso di taglia medio-grande, sono a servizio di grandi superfici in cui sono ospitati numerosi utenti finali (es. uffici, ospedali, banche...).

Riguardo ai monitoraggi delle prestazioni delle pompe di calore, è opportuno in questa sede segnalare precedenti esperienze a livello europeo, come ad esempio il progetto (SEasonal PERformance factor and MONitoring for heat pump systems in the building sector (progetto SEPOMO) 16]. In SEPOMO, concluso nel 2012, sono stati coinvolti sei Paesi europei (Austria, Germania, Grecia, Olanda, Francia e Svezia) che hanno permesso di acquisire, complessivamente, i monitoraggi di 46 impianti a pompe di calore (residenziali e non) con l'obiettivo di definire, se possibile, una metodologia di monitoraggio e di migliorare la qualità dei sistemi tecnologici a servizio.

Il progetto ha messo in evidenza che:

- è indispensabile definire il confine del sistema fisico di riferimento per individuare il rendimento del sistema; sono necessarie specifiche informazioni sul sito di installazione dell'impianto;
- è importante poter disporre di un “diario delle acquisizioni” (log book) in cui utente e installatore possano riportare peculiarità problemi o inconvenienti occorsi durante la campagna di acquisizione. Ciò consente di agevolare la lettura, la valutazione e l'interpretazione dei dati acquisiti;

- il rate di acquisizione dei dati va scelto in funzione anche della tipologia di pdc di cui si dispone, al fine di poter registrare anche piccole variazioni delle grandezze durante il funzionamento (ad esempio, intervalli di acquisizione inferiori a 10 minuti sono consigliabili per le pompe di calore aria-acqua ed aria-aria, in modo da poter analizzare anche i cicli di sbrinamento che possono aver luogo).

Un ulteriore interessante studio è stato condotto in Germania dal Fraunhofer Institute [23], in cui sono state monitorate le prestazioni delle pdc in fase di esercizio, dapprima includendo 75 pdc e poi estendendo il lavoro ad ulteriori 35 macchine, migliorando la procedura di acquisizione. Lo studio descrive anche le fasi preliminari all'installazione della strumentazione, come ad esempio la scelta dei singoli componenti in termini di marca e modello. A conclusione del lavoro, vengono confrontati, in diverse stagioni, gli indici SPF, ma non sono evidenziate le correlazioni con i parametri che possono averne determinato le variazioni.

In linea di massima, è possibile individuare le grandezze per il monitoraggio come illustrato in Figura 46:

- potenza elettrica: tale misura si realizza attraverso un contatore di energia elettrica dedicato, ovvero multimetri da quadro;
- potenza termica: si deve disporre di un misuratore di portata (ad ultrasuoni [24] o meccanico) e della misura della temperatura di mandata e di ritorno dell'acqua (per le pdc con circuito idronico, ad esempio, le temperature si acquisiscono attraverso sonde di tipo Pt100 o termocoppie tipo J o tipo K).
- Clima: è opportuno monitorare temperatura e umidità dell'aria interna ai locali ed esterna, al fine di poter correlare le condizioni ambientali interne, ed eventualmente gli indici di comfort, alle condizioni di carico dell'impianto.

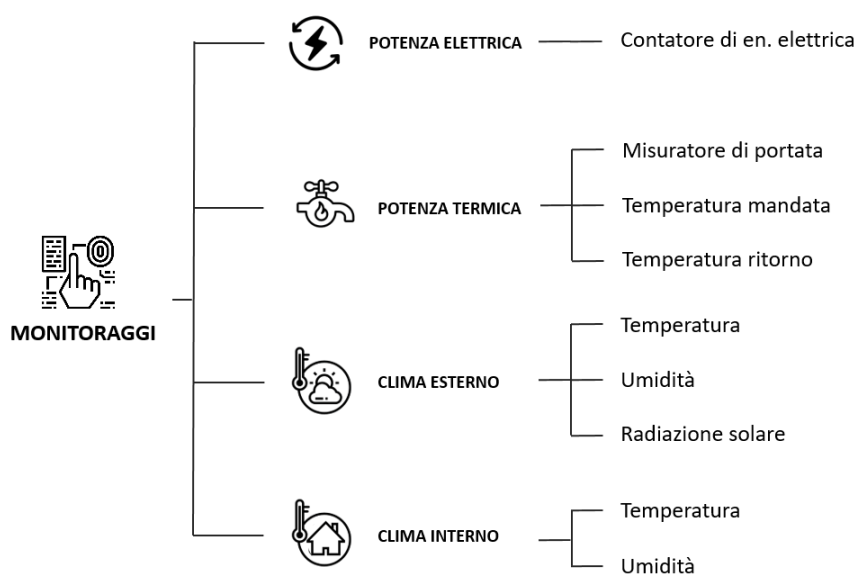


Figura 46. Sintesi delle grandezze minime necessarie per il monitoraggio delle pompe di calore

4.1 I possibili casi studio

Nell'ottica di realizzare i monitoraggi di impianti a pompa di calore e poter definire i benchmark prestazionali in relazione a zona climatica, condizioni climatiche stagionali e profilo di carico, è stata condotta un'analisi preliminare di differenti edifici, oggetto di campagne di rilevazione, per individuare i casi studio significativi e verificare la consistenza delle misure effettuate.

La selezione dei casi studio è stata possibile grazie alla collaborazione dell'**Unità tecnica di Banco BPM e della società tech4eff** che renderanno disponibili le misure in situ di diversi impianti a pdc installati in istituti di credito di differenti località italiane.

I casi studio individuati sono distribuiti in Italia secondo la mappa riportata in Figura 47, mentre le caratteristiche principali degli impianti sono riportate in Tabella 9.

Tabella 9. Sintesi delle principali caratteristiche dei possibili casi studio individuati

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	FIORENZUOLA	SERIATE	MILANO VIA CENISIO	PARMA	SCHIO	ROMA MEDAGLIE D'ORO	ROMA EUR	MARANO SUL PANARO	VERBANIA
ANNO INSTALLAZIONE:	2015	2017	2016	2018	2014	2020	2018	2018	2014
POT. TERMICA [kW]:	69,6	158,5	43,04	23,8	50	42	60	18	142
COP:	3,55	3,57	3,07	3,58	2,8	3,45	3,2	3,9	3,44
POT. FRIGORIFERA [kW]:	60	133	38,31	25,4	48	32	52,9	15,5	110
EER:	2,91	2,96	2,57	3,43	2,95	3	2,83	3,4	2,5
ESEER:	3,29	3,59	3,51	5,22	4,19	4,42	3,97	4,2	3,55
SUP. NETTA [m ²]:	240	944	252	265	487	353	364	153	870



Figura 47. Localizzazione geografica dei possibili casi studio individuati

I casi studio sono situati in 8 città italiane, caratterizzate da differenti gradi giorno, e ovviamente da differenti profili climatici. In particolare, 7 edifici sono localizzati in zona climatica E, mentre 2 edifici sono in zona climatica D. Il dettaglio dei gradi giorni delle 8 località è illustrato in Figura 48.

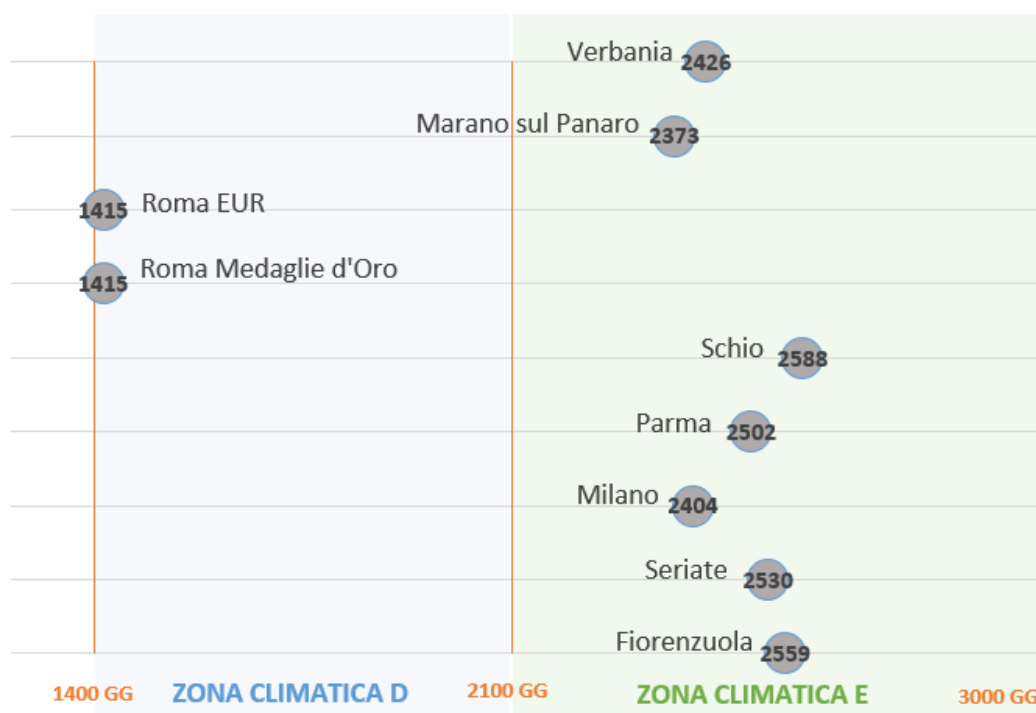


Figura 48. Confronto dei Gradi Giorno dei possibili casi studio individuati

Sulla base di ulteriori approfondimenti e compatibilmente con la disponibilità del conduttore, alcuni di questi edifici saranno monitorati nell'arco dell'intera stagione di raffrescamento e riscaldamento.

Le pompe di calore a servizio degli edifici selezionati sono a compressione del tipo aria- acqua o aria-aria, ovvero la tipologia maggiormente diffusa nel contesto italiano. Inoltre, proprio perché la sorgente fredda di queste pdc è l'aria, sarà possibile, attraverso il monitoraggio, analizzare anche l'influenza del sito di installazione degli impianti sulla frequenza dei cicli di sbrinamento, e dunque sulla riduzione delle prestazioni della pdc stessa.

La Figura 49 illustra la taglia degli impianti selezionati in termini di potenza termica e potenza frigorifera (le dimensioni delle bolle sono proporzionali alla superficie netta climatizzata degli edifici).

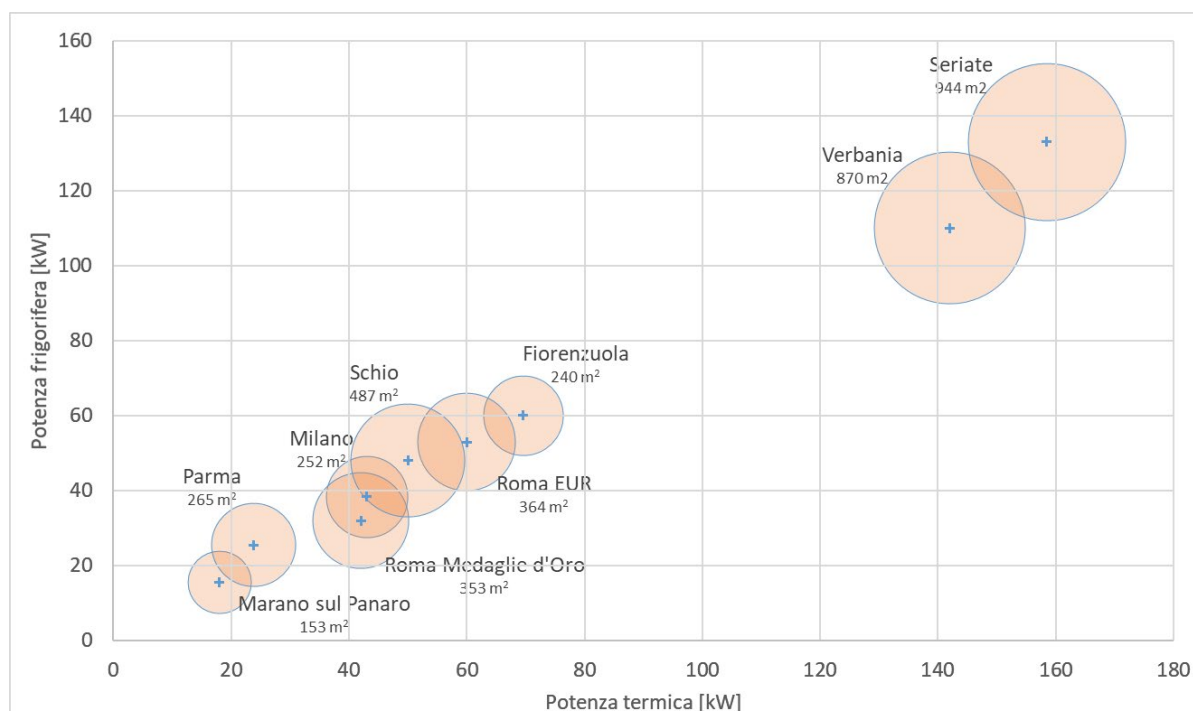


Figura 49. Confronto fra le potenze termiche e frigorifere dei possibili casi studio individuati

Si segnala che gli impianti degli edifici selezionati sono caratterizzati da EER e COP differenti, come mostra la Figura 50, in cui le dimensioni delle bolle ricalcano la proporzione della Figura 49.

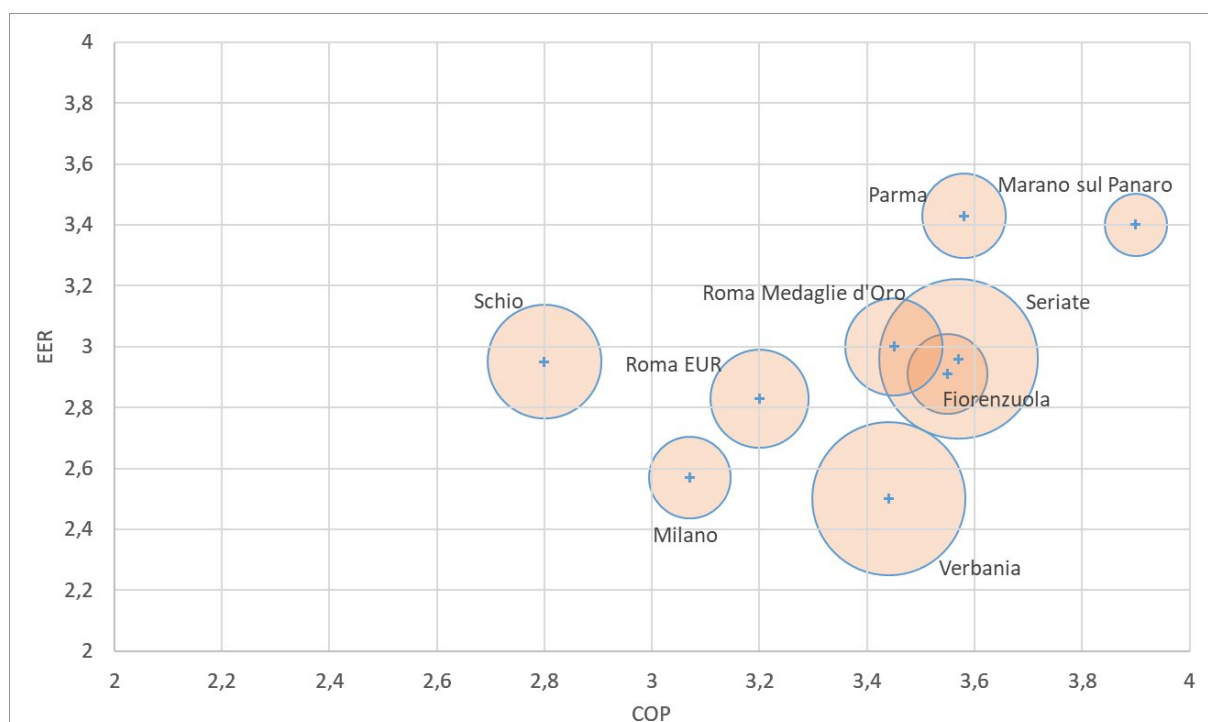


Figura 50. Confronto fra i coefficienti caratteristici (EER e COP) dei possibili casi studio individuati

5 Conclusioni

Gli standard di elevata efficienza energetica degli edifici e gli obblighi di realizzazione di nZEB previsti dalla attuale legislazione (Legge 90/2013, DM 26/6/2015 Requisiti Minimi, D.Lgs. 28/11), hanno consentito una

crescente diffusione di configurazioni impiantistiche - per la climatizzazione degli edifici - basate sull'utilizzo del vettore elettrico.

Inoltre, in virtù degli obblighi di integrazione delle FER (previste nel DM 26/6/2015 Requisiti Minimi e D.Lgs. 28/11), gli impianti deputati alla climatizzazione estiva ed invernale sono sempre più frequentemente costituiti da soluzioni che integrano le FER, o abbinano sistemi tradizionali e accumuli (elettrici e/o termici) che consentono di incrementare l'autoconsumo dell'energia prodotta in situ.

Tali complessità impiantistiche sono accentuate per gli edifici del settore terziario (uffici, ospedali, strutture alberghiere), in cui è necessario far fronte ad esigenze e profili di utenza molto variegati.

Le possibilità di impiego e il funzionamento di tali impianti risultano strettamente legati alle caratteristiche del sito, oltre che al fabbisogno energetico dell'edificio. Per questo motivo, le prestazioni energetiche degli impianti all-electric in condizioni di reale esercizio possono differire dalle prestazioni dichiarate dalle case costruttrici.

L'obiettivo della ricerca nel triennio è l'identificazione di KPI per le prestazioni energetiche in situ di impianti all-electric e soluzioni integrate, in differenti contesti climatici, per edifici del settore terziario.

Tale aspetto implica, perciò, una accurata valutazione delle reali prestazioni energetiche degli impianti all-electric, in relazione all'effettivo profilo di utilizzo e in funzione del contesto climatico di loro ubicazione.

A tale scopo, è indispensabile comprendere lo stato dell'arte sull'uso del vettore elettrico per la climatizzazione (sia estiva che invernale) degli edifici in Italia. La tecnologia impiegata è quella della pompa di calore.

Sotto l'aspetto tecnologico, la pompa di calore è una macchina che trasferisce il calore da una fonte (sorgente fredda) ad un'altra a temperatura maggiore (sorgente calda). Trattasi di una macchina reversibile, ovvero può essere impiegata sia per la climatizzazione invernale che estiva. Nel funzionamento invernale, la pompa di calore preleva calore dall'ambiente esterno (sorgente fredda) e lo trasmette all'ambiente da riscaldare (sorgente calda). Nel funzionamento estivo, la pompa di calore diventa un apparato di refrigerazione che sottrae calore all'ambiente da raffrescare (sorgente fredda) e lo cede all'ambiente esterno (sorgente calda).

In particolare, per la prima annualità, lo studio si è articolato secondo i seguenti step:

- ✓ analisi dello stato dell'arte in merito all'impiego del vettore elettrico per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici in Italia;
- ✓ descrizione della tecnologia delle pdc e delle tipologie di pdc sul mercato;
- ✓ inquadramento geografico delle pdc (diffusione in Europa ed in Italia);
- ✓ identificazione delle grandezze cruciali ai fini dei monitoraggi degli edifici del terziario equipaggiati con pdc;
- ✓ Individuazione di possibili casi studio.

Lo studio del contesto europeo mostra che l'Italia è il secondo Paese in Europa (dopo la Francia) per vendite di pompe di calore nel 2018, con un incremento rispetto all'anno precedente del 12%. Questo è significativo di un progressivo passaggio a questa tecnologia di generazione. Tuttavia, l'indice di penetrazione e diffusione delle pompe di calore, stimabile dal rapporto tra numero di pdc vendute ogni 1000 famiglie, è ancora basso (pari a circa 8), mentre altri Paesi, specialmente quelli scandinavi, hanno un indice significativamente più alto. Nonostante ciò, l'Italia è il Paese che, con il suo stock di pompe di calore, concorre alla produzione dell'11% dell'energia da FER da pdc rispetto ai 21 Paesi dell'Unione Europea; inoltre, contribuisce alla stessa percentuale di risparmio di energia finale e di riduzione delle emissioni di anidride carbonica. Ciò è sintomatico dell'importanza rivestita dal nostro Paese in relazione all'utilizzo delle pompe di calore nello scenario europeo.

Per la maturità tecnologia raggiunta e la possibilità di integrazione con altre FER, le pompe di calore costituiscono una alternativa estremamente efficiente alla generazione da fonti fossili, in linea con quanto previsto dal PNIEC).

Alla luce delle ambiziose sfide a livello nazionale, risulta fondamentale anche il contributo del settore terziario per il raggiungimento delle riduzioni di emissioni di CO₂ e di integrazione delle fonti rinnovabili.

Infatti, al settore terziario compete un risparmio energetico atteso al 2030 pari a 2.4 Mtep

Oltre alle strategie di riqualificazione, si prevede di incrementare la potenza termica installata relativa alle pompe di calore per il riscaldamento, per arrivare a circa 40 GWt al 2030 per il settore terziario e complessivamente ad oltre 60 GWt aggiungendo anche il settore residenziale.

Risulta evidente che il settore delle pdc è in forte crescita e che può portare ad oltre 9,5 miliardi di euro di investimento, nonché ad ampie prospettive occupazionali al 2030.

Benchè le attuali pompe di calore siano, energeticamente, molto efficienti, non sempre le prestazioni attese corrispondono a quelle operative. Ovvero, in fase di esercizio, le condizioni climatiche del sito ed i profili di carico reali comportano spesso scostamenti rilevanti delle prestazioni energetiche, rispetto a quanto previsto in fase di progettazione o riportato nelle schede tecniche delle case costruttrici. Anche i metodi di calcolo più evoluti, infatti, non sempre riescono a replicare i diversi fattori che, in condizioni reali, possono influire sul comportamento e l'efficienza delle macchine installate.

Benchè le configurazioni impiantistiche di tipo all-electric siano ampiamente studiate in letteratura scientifica, molti degli studi disponibili si riferiscono alla sola modellazione numerica del comportamento di tali impianti, in relazione a profili di carico e condizioni standardizzate.

Pochi, invece, risultano gli studi relativi a monitoraggi in campo: ovvero volti alla misura delle prestazioni effettive dei sistemi all-electric durante l'esercizio, e dunque in reali condizioni operative.

Da ciò nasce l'esigenza di condurre un'analisi estesa all'intero territorio nazionale, finalizzata all'acquisizione delle misure in situ delle reali prestazioni di sistemi all-electric, su edifici del settore terziario.

L'obiettivo è quello di determinare le prestazioni energetiche e i KPI in fase di esercizio dell'impianto, anche al fine di quantificare il performance gap che si determina tra condizioni nominali e condizioni reali di esercizio.

Scostamenti, seppur minimi, tra prestazioni in laboratorio e prestazioni operative determinano differenze anche significative di consumi complessivi di una pdc, che si riflettono, da un lato, in maggiori consumi energetici e, dall'altro lato, in un aumento delle emissioni di gas climalteranti.

Determinare i KPI significa misurare l'efficienza della pdc, sia in condizioni estive che invernali, ossia conoscere, simultaneamente, la potenza termica erogata per la refrigerazione o il riscaldamento dell'acqua circolante nell'impianto e quella elettrica assorbita dalla macchina per il funzionamento dei compressori. Il rapporto di tali grandezze è indicativo del rendimento della pdc definito come COP per il riscaldamento e come EER per il raffrescamento.

Tuttavia, l'approccio che adotta, esclusivamente, COP ed EER non è sufficiente per poter caratterizzare le prestazioni della macchina nell'intera stagione di funzionamento. Per tale motivo, vengono introdotti ulteriori indicatori della prestazione, ovvero i rendimenti SCOP per il funzionamento invernale e SEER per il funzionamento estivo.

La metodologia dello studio prevede il confronto fra i benchmark reali e i valori di rendimento medio stagionale della macchina ottenuti con i diversi metodi di calcolo. Soltanto disponendo di benchmark reali è possibile validare e calibrare le analisi energetiche degli edifici, anche adottando i metodi di calcolo più evoluti che sono destinati, progressivamente, a sostituire i metodi semi-stazionari, alla base delle attuali normative.

Inoltre, tale aspetto risulta importante nella conduzione delle diagnosi energetiche degli edifici, in particolare, quelli del settore terziario, per i quali una più accurata valutazione del rendimento stagionale dei generatori installati, al variare delle condizioni climatiche del sito in esame, consente valutazioni

migliori del fabbisogno energetico effettivo dell'edificio e quindi una più corretta analisi costi-benefici degli interventi di riqualificazione individuati.

Infine, i monitoraggi in situ risultano importanti affinché installatori e progettisti prendano consapevolezza delle differenze di performance tra condizioni di laboratorio e condizioni reali, al fine di guidare l'utente finale e/o il committente verso la scelta della soluzione impiantistica più opportuna.

A tal fine, nel corso dell'anno, è stata svolta un'analisi preliminare di differenti edifici, oggetto di monitoraggio, per individuare i casi studio significativi e verificare la consistenza delle misure effettuate: le schede di sintesi relative agli stessi sono riportate in appendice.

In aggiunta, sono stati individuati edifici del settore terziario in cui poter realizzare ulteriori monitoraggi delle KPI

pdc: sulla base di ulteriori approfondimenti e compatibilmente con la disponibilità del conduttore, alcuni di questi edifici saranno monitorati nell'arco dell'intera stagione di raffrescamento e riscaldamento per poter definire, in modo accurato, i benchmark.

6 Riferimenti bibliografici

1. Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima PNIEC (PNIEC)
<https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/energia-e-clima-2030>
2. T. Franci, "La pompa di calore una tecnologia chiave per gli obiettivi 2030", Assemblea Assoclima, 10/07/2019 Milano
http://www.amici dellaterra.it/images/efficienza italia/pompadicalore/presentazione_Franci_Assoclima_10-07-2019.pdf (last access: 24/01/2020)
3. Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia
4. Decreto Ministeriale 26.6.2015 Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle precisazioni e dei requisiti minimi degli edifici.
5. L. Marchisio, "Le sfide per il sistema elettrico" XI Conferenza Nazionale per l'efficienza energetica, 3/12/2019 Roma <http://www.amici dellaterra.it/images/undicesima efficienza/slides/1/Marchisio.pdf> (last access: 24/01/2020)
6. K. Gram-Hanssen et al., "Air-to-air heat pumps in real-life use: Are potential savings achieved or are they transformed into increased comfort?" Energy and Buildings 53 (2012) 64–73
7. A. Uytterhoeven, G. Deconinck, A. Arteconi, L. Helsen, "The Added Value of Heat Pumps for Grid Stability via Demand Response", VOL.37 NO 2 (2019) HPT MAGAZINE
8. K.J. Chua, S.K. Chou, W.M. Yang, "Advances in heat pump systems: A review", Applied Energy 87 (2010) 3611–3624
9. G. Cammarata, "Impianti termotecnici – vol 1b – impianti di riscaldamento (2014)"
10. <http://climatizzazionefontirinnovabili.enea.it/index.php/pompe-di-calore-elioassistite>

11. R. Lazzarin, “Pompe di calore parte teorica, parte applicativa”, Ferroli <https://www.ferroli.com/media/1483459710.pdf> (last access: 07/02/2020)
12. C. Buratti, “Impianti di Climatizzazione e Condizionamento”, (2015), Morlacchi editore, Perugia
13. Decreto Legislativo 3.3.2011, n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE
14. http://www.aicarr.org/Documents/Editoria_Libri/Position_papers/120502_01_AICARR%20Position%20Paper_RES.pdf]
15. UNI EN 14511: 2018 - Condizionatori, refrigeratori di liquido e pompe di calore con compressore elettrico per il riscaldamento e il raffrescamento degli ambienti e refrigeratori per cicli di processo con compressore elettrico
16. <http://sepemo.ehpa.org/>
17. http://sepemo.ehpa.org/uploads/media/SEPOMO_FINAL_REPORT.pdf (last access: 24/01/2020)
18. T. Nowak, P. Westring, "European Heat Pump Market and Statistics", Report (2019), pp. 1-193
19. http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/
20. K. Bettgenhäuser, M. Offermann, T. Boermans, M. Bosquet, J. Grözing, B. von Manteuffel, N. Surmeli, Heat Pump Implementation Scenarios until 2030 – EcoFys 2013
21. RAPPORTO ANNUALE EFFICIENZA ENERGETICA 2019 ENEA Agenzia Nazionale Per Le Nuove Tecnologie, L’energia E Lo Sviluppo Economico Sostenibile
22. M. Pieve, R. Trinchieri, “The heat-pump market in Italy: an in-depth economic study about the reasons for a still unexpressed potential”, Clean Energy (2019), Vol. 3, No. 2, 126–143
23. <https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/wp-effizienz/english/index/index.html>
24. G. Ficco, A. Frattolillo, A. Malengo, G. Puglisi, F. Saba, F. Zuena, “Field verification of the thermal energy meters through ultrasonic clamp-on master meters”, Measurement Volume 151, (February 2020), 107152

Abbreviazioni ed acronimi

pdc	Pompa di calore
ACS	Acqua calda sanitaria
COP	Coefficient of Performance
EER	Energy Efficiency Ratio
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
SPF	Seasonal Performance Ratio
VRV	Variable Refrigerant Volume
VRF	Variable Refrigerant Flow
PNIEC	Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima
nZEB	NEARLY ZERO
mln	milioni
EHPA	European Heat Pump Association
RISC	Riscaldamento
TRL	Teleriscaldamento
FER	Fonti Energetiche Rinnovabili

Normativa di riferimento

Di seguito si elencano le principali normative di riferimento per il calcolo delle prestazioni delle pompe di calore elettriche a compressione:

- UNI EN 14511 – 1, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling Part 1: Terms and definitions;
- UNI EN 14511 – 2, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling Part 2: Test conditions;
- UNI EN 14511 – 3, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling Part 3: Test methods;
- UNI EN 14511 – 4, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors for space heating and cooling Part 4: Requirements;
- UNI EN 16147, Heat pumps with electrically driven compressors Testing and requirements for marking of domestic hot water units;
- UNI EN 14825, Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance.
- UNI/TS 11300-4: Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Allegato 1
Schede di sintesi dei casi studio individuati

SCHEDA N° 1	
FILIALE DI FIORENZUOLA D'ARDA	
VIA SCAPUZZI 1	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1960	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 240 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 306 m ²	
VOLUME: 855 m ³	
NUMERO DI PIANI: 3	
Piano terra, interrato e piano primo	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2015
MARCA:	CLIMAVENETA
MODELLO:	AWR HT LN CA-E 0202
POTENZA TERMICA:	69,6 kW
COP:	3,55
POTENZA FRIGORIFERA:	60 kW
EER:	2,91
ESEER	3,29
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 2	
FILIALE DI <i>SERiate</i>	
VIA DANTE, 9 / DEL FABBRO, 2	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1960	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 944 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 1144 m ²	
VOLUME: 3208 m ³	
NUMERO DI PIANI: 2	
Terra e interrato	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2017
MARCA:	AERMEC
MODELLO:	NRK 0650 HAJ00
POTENZA TERMICA:	158,5 kW
COP:	3,57
POTENZA FRIGORIFERA:	133 kW
EER:	2,96
ESEER	3,59
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 3	
FILIALE DI MILANO VIA CENISIO	
VIA CENISIO, 36	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1950	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 252 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 323 m ²	
VOLUME: 906 m ³	
NUMERO DI PIANI: 2	
Piano terra e interrato	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2016
MARCA:	AERMEC
MODELLO:	CL 200HA
POTENZA TERMICA:	43,04 kW
COP:	3,07
POTENZA FRIGORIFERA:	38,31 kW
EER:	2,57
ESEER	3,51
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 4	
FILIALE DI <i>PARMA</i>	
VIA EMILIO LEPIDO, 47/A ANG. VIA PLINIO	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1965	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 265 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 285 m ²	
VOLUME: 855 m ³	
NUMERO DI PIANI: 1	
Piano terra	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2018
MARCA:	CLIVET
MODELLO:	WSAN XIN 121
POTENZA TERMICA:	23,8 kW
COP:	3,58
POTENZA FRIGORIFERA:	25,4 kW
EER:	3,43
ESEER	5,22
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 5	
FILIALE DI SCHIO	
PIAZZA STATUTO	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1965	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 487 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 553 m ²	
VOLUME: 1556 m ³	
NUMERO DI PIANI: 2	
Piano terra e interrato	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2014
MARCA:	DAIKIN
MODELLO:	EWYQ040BAWN
POTENZA TERMICA:	50 kW
COP:	2,8
POTENZA FRIGORIFERA:	48 kW
EER:	2,95
ESEER	4,19
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 6	
FILIALE DI ROMA AG 35	
PIAZZALE MEDAGLIE D'ORO, 69/70	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1960	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 353 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 400 m ²	
VOLUME: 1100 m ³	
NUMERO DI PIANI: 2	
Terra e interrato	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2020
MARCA:	AERMEC
MODELLO:	CL 150 H
POTENZA TERMICA:	42 kW
COP:	3,45
POTENZA FRIGORIFERA:	32 kW
EER:	3,0
ESEER	4,42
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 7	
FILIALE DI ROMA EUR	
VIALE CIVILTA' DEL LAVORO 62/70	
ZONA CLIMATICA: D	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1960	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 364 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 400 m ²	
VOLUME: 1200 m ³	
NUMERO DI PIANI: 1	
Terra	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2018
MARCA:	TRANE
MODELLO:	PICCO 270
POTENZA TERMICA:	60 kW
COP:	3,2
POTENZA FRIGORIFERA:	52,9 kW
EER:	2,83
ESEER	3,97
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 8	
FILIALE DI MARANO SUL PANARO	
VIA VIGNOLESE 31	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1960	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 153 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 180 m ²	
VOLUME: 540 m ³	
NUMERO DI PIANI: 1	
Terra	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2018
MARCA:	DAIKIN
MODELLO:	RXYSQ6T8Y
POTENZA TERMICA:	18 kW
COP:	3,9
POTENZA FRIGORIFERA:	15,5 kW
EER:	3,4
ESEER	4,2
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL

SCHEDA N° 9	
FILIALE DI VERBANIA	
Corso Cobianchi	
ZONA CLIMATICA: E	
EPOCA DI COSTRUZIONE: 1950	
TIPOLOGIA COSTRUTTIVA: mattoni e pilastri cls	
SUPERFICIE NETTA: 870 m ²	
SUPERFICIE LORDA: 1029 m ²	
VOLUME: 3087 m ³	
NUMERO DI PIANI: 1	
Terra	
TIPOLOGIA DI IMPIANTO:	ARIA PRIMARIA E FAN COIL
PRODUZIONE INTEGRATA DI ACS:	☐ SI ☒ NO
ANNO DI INSTALLAZIONE:	2014
MARCA:	RC GROUP
MODELLO:	REVERSO 124 P2 D C4
POTENZA TERMICA:	142 kW
COP:	3,44
POTENZA FRIGORIFERA:	110 kW
EER:	2,50
ESEER	3,55
TERMINALI DI EROGAZIONE:	FAN COIL