



Ricerca di Sistema elettrico

Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali “all-electric” nel settore residenziale: identificazione casi pilota

G. Cavazzini, A. Benato, G. Pavesi, G. Ardizzon, A. Stoppato

MONITORAGGI DI IMPIANTI ASSERVITI AD EDIFICI REALI "ALL-ELECTRIC" NEL SETTORE RESIDENZIALE: IDENTIFICAZIONE CASI PILOTA

G. Cavazzini, A. Benato, G. Pavesi, G. Ardizzon, A. Stoppato (Dipartimento di Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Padova)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

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

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II 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: *LA3.26 - Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali "all-electric" nel settore residenziale: identificazione casi pilota*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Monitoraggi di impianti asserviti ad edifici reali all-electric nel settore residenziale*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Iole Nardi *Iole Nardi*

Responsabile scientifico Dipartimento di Ingegneria Industriale - UNIPD: Prof.ssa Giovanna Cavazzini

Si ringrazia per la collaborazione ed il supporto nell'identificazione dei casi studio l'ing. S. Faganello (Exrg), il Presidente Provinciale di ANACI (dott. Michele Ischia), AGSM Verona s.p.a. (ing. Marco Giusti), Alperia Bartucci s.p.a. (ing. Serena Bari).

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE - LE POMPE DI CALORE	5
1.1 COMPONENTI E FUNZIONAMENTO	5
1.2 CLASSIFICAZIONE DELLE POMPE DI CALORE.....	10
2 STATO DELL'ARTE: LE POMPE DI CALORE E LE LORO PRESTAZIONI IN LETTERATURA.....	13
2.1 INTRODUZIONE: CAMPI APPLICATIVI E PRESTAZIONI	13
2.2 IL MERCATO EUROPEO DELLE POMPE DI CALORE: PROSPETTIVE DI SVILUPPO	14
2.3 PRESTAZIONI REALI DELLE POMPE DI CALORE: LABORATORIO VS. AMBIENTE OPERATIVO	17
2.4 ANALISI SPERIMENTALI E NUMERICHE DELLE PRESTAZIONI DI POMPE DI CALORE IN CASI STUDI ITALIANI	20
3 RICERCA DI CASI STUDIO NEL NORD ITALIA E BARRIERE SOCIALI	21
3.1 TIPOLOGIA DI EDIFICI.....	21
3.2 BARRIERE SOCIALI.....	22
3.3 BARRIERE COVID-19.....	23
3.4 POTENZIALI CASI STUDIO	23
4 CASO STUDIO 1	26
4.1 CARATTERISTICHE GENERALI DI UNA CASA PASSIVA	27
4.2 IMPIANTO DI CONDIZIONAMENTO: SCHEMA GENERALE.....	28
4.2.1 <i>Scambiatore geotermico di pretemperamento</i>	30
4.2.2 <i>Aggregato compatto Nilan Compact P</i>	31
4.2.3 <i>Modalità di funzionamento</i>	32
4.2.4 <i>Prestazione di progetto</i>	35
4.3 DATI A DISPOSIZIONE E SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	36
5 CASO STUDIO 2	38
5.1 IMPIANTO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO CORTE VERONICA	39
5.1.1 <i>Gestione dell'impianto ibrido</i>	43
5.2 IMPIANTO DI RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO DI CORTE SARA	43
5.3 PIANO DI MONITORAGGIO.....	44
5.4 INSTALLAZIONE DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO.....	45
6. CONCLUSIONI	50
7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	52

Sommario

Ai settori residenziale e terziario è imputabile il principale aggregato dei consumi settoriali, pari al 42% dei consumi totali, di cui gran parte dovuti alle necessità di climatizzazione degli edifici (per il residenziale pari al 74% dei consumi di energia totale). Una soluzione per ridurre questi consumi è sicuramente rappresentata da tecnologie elettriche ad alta efficienza come i sistemi di climatizzazione a pompa di calore elettrica (PdC) che garantiscono notevoli vantaggi rispetto ai sistemi tradizionali (risparmio energetico, impatto ambientale limitato, sicurezza, facile integrazione con tecnologie rinnovabili).

Nonostante gli innegabili vantaggi, la diffusione degli edifici full-electric è di fatto ancora modesta a causa principalmente della mancanza di dati di riferimento che consentano più accurate analisi di fattibilità tecnico-economica. L'analisi condotta nella prima parte di questa annualità di progetto ha confermato la necessità di valutare le prestazioni delle pompe di calore in condizioni operative reali e ha evidenziato la dipendenza di tali prestazioni da diversi fattori (zona climatica, tipologia di impianto, tipologia di edificio), cosa che rende estremamente difficile la generalizzazione dei pochi dati sperimentali disponibili a casistiche diverse nonché un'accurata modellazione predittiva degli stessi. L'analisi dello stato dell'arte (a livello di pratica commerciale, di letteratura scientifica e di ricerca internazionale) ha quindi sottolineato l'importanza di condurre azioni di monitoraggio di edifici full-electric, con particolare riferimento a contesti condominiali, completamente assenti negli studi di letteratura.

Si è quindi condotta un'intensa attività di ricerca di potenziali casi studio da monitorare al fine di definire, nella seconda annualità, opportuni indici prestazionali in condizioni operative reali. La ricerca è stata estesa a tutto il Nord Italia e ha visto il coinvolgimento - a supporto - di numerosi "attori" coinvolti nella filiera del residenziale (amministratori di condominio, progettisti, certificatori, fornitori e distributori di energia elettrica, EsCo).

Nonostante la rete di contatti attivata, solo un numero limitato di edifici è risultato possedere caratteristiche sufficientemente in linea con le necessità del progetto. Due risultano essere le motivazioni principali:

- limitata percentuale di edifici residenziali full-electric (principalmente di nuova costruzione) a causa di una scarsa tendenza alla riqualificazione energetica (meno del 3% secondo un'analisi ISTAT).
- predominanza di soluzioni impiantistiche in cui ogni singola unità abitativa è dotata di impianto a pompa di calore dedicato. La motivazione principale è unicamente sociale: l'impianto asservito alla singola unità abitativa garantisce autonomia di gestione e indipendenza totale dalle altre unità abitative.

Si sono individuati 2 casi studio:

- 1- villetta monofamiliare, con caratteristiche di casa passiva, dotata di impianto compatto a pompa di calore integrato con scambiatore geotermico e già dotata di adeguato sistema di monitoraggio.
- 2- Due condomini da circa 60 unità abitative, perfettamente speculari ma dotati di impiantistica differente: il primo è dotato di pompe di calore per il riscaldamento/raffrescamento con caldaia a gas naturale a supporto per condizioni climatiche particolarmente rigide; il secondo con caldaia a gas naturale per il riscaldamento (identica a quella del primo condominio) e gruppi ad assorbimento per il raffrescamento. Tale caso studio rappresenta un'occasione assolutamente unica nel suo genere in quanto consentirà il confronto in condizioni identiche (stesso edificio, stessa zona climatica) tra un impianto tradizionale ed uno ad alta efficienza.

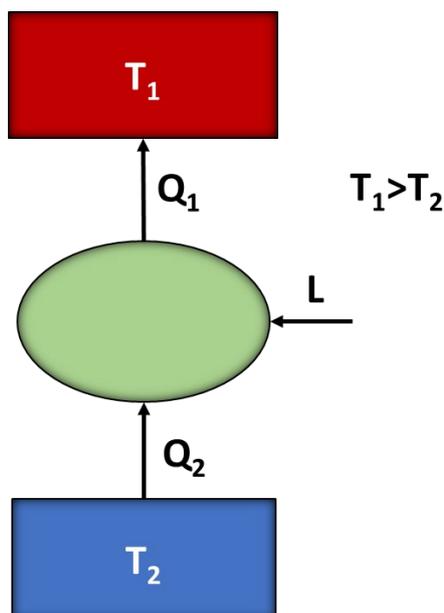
Per i due condomini, si è progettato ed installato un sistema di monitoraggio che consenta di analizzare in dettaglio le prestazioni degli impianti.

1 Introduzione - Le pompe di calore

1.1 Componenti e funzionamento

La tecnologia delle pompe di calore (PdC) è nota e utilizzata fin dagli anni '70, ai tempi delle prime crisi petrolifere, e oggi è presente sul mercato con diverse soluzioni impiantistiche che la rendono adatta e di facile applicazione sia a livello civile che industriale.

La pompa di calore è in grado di trasferire calore da una fonte a bassa temperatura ad una con temperatura più elevata, così come una pompa solleva un fluido da una quota inferiore ad una superiore. Tale processo è inverso rispetto a quello che avviene spontaneamente in natura ed è possibile solo fornendo energia alla macchina (Figura 1.1). Il principale vantaggio della pompa di calore deriva dalla sua capacità di fornire più energia di quanta ne impieghi per il suo funzionamento.



Le pompe di calore possono utilizzare due tipologie di fonti energetiche come input:

a) energia meccanica (pompe di calore a compressione)

Le pompe di calore più diffuse sono quelle alimentate elettricamente. Una pompa di calore elettrica a compressione è costituita da un circuito chiuso percorso da un fluido frigorifero che, in funzione delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato di liquido o di vapore.

Il circuito di una PdC elettrica a compressione è costituito da: un compressore, un condensatore, una valvola di espansione e un evaporatore. I componenti del circuito possono essere raggruppati in un unico blocco o divisi in due parti (sistemi split) collegate dalle tubazioni nelle quali circola il fluido frigorifero.

Le pompe di calore possono essere anche alimentate da un motore a combustione interna, configurazione che permette di sfruttare il calore dei gas di scarico in aggiunta a quello generato a livello del condensatore. In tal caso, però, l'efficienza energetica legata alla conversione dell'energia termica, sviluppata dal motore a combustione, in energia meccanica atta a garantire la rotazione dell'albero del compressore, risulta molto inferiore rispetto a quella caratteristica di un motore elettrico. Le trasformazioni subite dal fluido frigorifero all'interno di questo tipo di pompa di calore sono identiche a quella elettrica a compressione.

Sono, inoltre, presenti in alcune realtà industriali pompe di calore che eseguono il ciclo inverso con un fluido operativo derivante dal processo industriale stesso. Esse funzionano in ciclo aperto attraverso la ricompressione meccanica del vapore.

Con riferimento a questa categoria di pompe di calore, si presenteranno di seguito le caratteristiche del fluido frigorifero oltre a quelli più comunemente impiegati.

Caratteristiche ideali:

- Alta temperatura critica, ben al di sopra della temperatura di condensazione che si realizza nel ciclo;
- bassa temperatura di solidificazione in modo da non solidificare nelle normali condizioni di funzionamento;
- calore di vaporizzazione molto elevato in modo da realizzare una considerevole asportazione di calore dalla sorgente fredda;
- pressioni di esercizio le più basse possibili al fine di evitare costruzioni eccessivamente pesanti e costose (la pressione di evaporazione dovrebbe essere appena al di sopra di quella atmosferica);
- composizione chimica stabile;
- assenza di tossicità e infiammabilità;
- bassa potenzialità di distruzione dell'ozono (Ozone Depletion Potential - ODP) e basso impatto sul riscaldamento globale (global warming potential - GWP).

Nomenclatura:

Esiste una classificazione derivante dalla normativa ASHRAE che ordina e distingue i vari fluidi frigoriferi sintetici in modo univoco assegnando loro una sigla identificativa composta da 7 termini:

R - I - II - III - IV - V - VI

Con:

- R: sigla identificativa di un refrigerante;
- Classe I: si pone una C nel caso in cui si abbiano derivati ciclici; altrimenti 0 che viene omissa;
- Classe II: si inserisce il numero di legami doppi meno uno; se uguale a 0 si omette;
- Classe III: si inserisce il numero di atomi di carbonio meno uno;
- Classe IV: si inserisce il numero degli atomi di idrogeno più uno;
- Classe V: si inserisce il numero di atomi di fluoro;
- Classe VI: vanno inserite una o più lettere dell'alfabeto minuscole o una lettera maiuscola a seconda della struttura della molecola del refrigerante. Questo perché è possibile ottenere fluidi frigoriferi con la stessa composizione chimica, ma con differente struttura molecolare, per cui è necessario distinguerli; per esempio, R134a, R123b, R225eb. Normalmente si pone una "a" per denotare un isomero posizionale asimmetrico.

Con l'introduzione dei nuovi fluidi frigoriferi per i refrigeranti sintetici si è diffuso l'impiego dei simboli CFC, HCFC, HFC al posto della lettera R: ciò permette di distinguere i fluidi completamente alogenati (CFC) da quelli parzialmente alogenati (HCFC) o privi di atomo di cloro (HFC). Dal punto di vista chimico, infatti, i fluidi sintetici appartengono alla famiglia dei composti alogeno-derivati, ovvero derivati dagli idrocarburi più semplici quali metano (CH₄) ed etano (C₂H₆), tramite sostituzione parziale o totale degli atomi di idrogeno con atomi di alogeni come fluoro e cloro. Si possono quindi distinguere le diverse categorie di fluidi frigoriferi:

- CFC = cloro fluoro carburi, elevato ODP;
- HCFC = idro cloro fluoro carburi, basso ODP, elevato GWP;

- HFC = idro fluoro carburi, ODP nullo, elevato GWP;
- HFO = idro fluoro olefine, ODP nullo, basso GWP;
- HC = idrocarburi, ODP nullo, GWP trascurabile;
- Ammoniaca, CO₂ = ODP nullo, GWP nullo o trascurabile.

Uno dei fluidi frigoriferi più comunemente impiegati nelle pompe di calore a compressione di vapore è l'R22 (per impianti più datati). Questo fluido è un gas monocomponente ("puro") appartenente alla famiglia degli HCFC, cioè composto del cloro. Dati i noti effetti dannosi nei confronti dell'ozono, dal 1° gennaio 2004, il suo impiego in nuovi impianti e macchine è vietato. Gli impianti esistenti e le macchine ancora presenti nei magazzini possono utilizzare l'R22 (secondo il regolamento europeo N° 2037/2000 entrato in vigore il primo ottobre 2000) come gas vergine fino al 31/12/2009 o come gas riciclato/rigenerato fino al 31 dicembre 2014. Dal primo gennaio 2015, invece, tutti gli HCFC sono vietati. Così facendo, i costruttori sono stati costretti ad effettuare il passaggio agli HFC (privi di cloro). La soluzione più semplice per adattare le "vecchie macchine" ai nuovi fluidi, prevede l'utilizzo dell'R407C mentre, nel caso di riprogettazione della macchina, si preferisce l'impiego dell'R410A, fluido che consente notevoli miglioramenti in termini di capacità frigorifera, tuttavia raggiunti con pressioni notevolmente più elevate (Tabella 1.1).

Tabella 1.1 Pressioni e temperature dei fluidi refrigeranti R22, R407C, R410A

Confronto pressioni manometriche di lavoro tra R22 - R407C - R410A				
Refrigerante	Temp. Evap. [°C]	Press. Evap. [bar]	Temp. Cond.[°C]	Press. Cond. [bar]
R22	+2	4,31	+50	18,42
R407C	+2	4,91 (liq.)	+50	21,24 (liq.)
R410A	+2	7,57	+50	30,75

Sebbene questi nuovi fluidi presentino caratteristiche simili al loro predecessore (R22), il loro impiego impone cambiamenti nella fase progettuale, costruttiva e manutentiva degli impianti.

L'R407C è una miscela zeotropica, costituita da R32 (23%), R125 (25%) e R134a (52%) allo stato liquido ad una temperatura di 25°C, e da R32 (32,5%), R125 (31,4%) e R134a (36,1%) allo stato di vapore. La tolleranza ammessa per ciascun componente è ±2%. A differenza di un fluido "puro" (R22, R134a, ecc.), una miscela zeotropica è caratterizzata da una temperatura variabile durante il cambiamento di stato.

L'R410A è un refrigerante chimicamente stabile, poco tossico e non infiammabile, appartenente alla famiglia degli HFC. Esso è una miscela di R32 (50%) e R125 (50%), con proprietà molto prossime all'azeotropia (si comporta quasi come un gas puro) ed un glide trascurabile (circa 0,2°C alle normali condizioni di lavoro del sistema split). Inoltre, l'R410a non è esplosivo né infiammabile, ha una bassa tossicità (classe di sicurezza A1, come l'R22) e non è corrosivo in condizioni normali. Il limite di esposizione consentito è uguale a quello dell'R407C e dell'R22.

Di seguito si elencano le principali caratteristiche fisiche di questi fluidi.

Tabella 1.2 Caratteristiche dei fluidi refrigeranti

Fluido	R22	R407C	R410A
Componente	HCFC22	HFC32/HFC125/HFC134a	HFC32/HFC125
Classe di sicurezza	A1	A1	A1
Peso molecolare [g mol ⁻¹]	86,5	86,2	72,6
Punto di ebollizione [°C] (a 1 atm)	-40,8	-43,6	-51,4
Temperatura critica [°C]	96,15	86,5	71,4
Pressione critica [bar]	49,9	46,3	47,7

Pressione di vapore [MPa] (a 25 °C)	0,94	0,9177	1,557
Densità critica [kg m⁻³]	524,21	527	500
Densità liquido [kg m⁻³] (a 25 °C)	1191	1134	1061
Densità vapore saturo [kg m⁻³] (a 25 °C e a 1 atm)	44,4	44,2	64
Calore specifico del liquido [kJ kg⁻¹K⁻¹] (a 25 °C e a 1 atm)	1,24	1,54	1,69
Calore specifico del vapore [kJ kg⁻¹K⁻¹] (a 25 °C e a 1 atm)	0,68	0,83	1,41
Calore di evaporizzazione al punto di ebollizione [kJ kg⁻¹]	256,66	245	233,5
Conduzione termica del liquido [W mo⁻¹ K⁻¹] (a 25 °C)	0,082	0,082	0,098
Conduzione termica del liquido [W mo⁻¹K⁻¹] (a 1 atm)	0,0117	0,0131	0,0155
Limite di infiammabilità in aria[%vol] (a 1 atm)	nessuno	nessuno	nessuno
Glide [°C]	0	5,4	0,11
ODP	0,055	0	0
GWP	1700	1530	1730
Metodo di carica del refrigerante	Fase gassosa	Fase liquida	Fase liquida

b) energia termica (pompe di calore con ciclo ad assorbimento).

Questo tipo di ciclo viene alimentato termicamente, ovvero è prevalentemente il calore a “guidare” il ciclo piuttosto che l’energia meccanica. Nel precedente ciclo a compressione meccanica, per produrre calore si sfrutta la differenza di temperatura tra fase di evaporazione e condensazione del fluido alle diverse pressioni ed il compressore meccanico riporta il fluido dalla pressione più bassa a quella più alta. Nel caso invece di un ciclo ad assorbimento, la compressione viene effettuata da un sistema composto da un assorbitore, una pompa e un generatore in serie (può non essere presente il recupero di calore).

I sistemi di assorbimento sfruttano la capacità di liquidi o sali di assorbire il calore del fluido di lavoro. I fluidi più comuni sono: l’acqua, come fluido di lavoro e il bromuro di litio come assorbente, oppure ammoniaca (fluido di lavoro) e acqua (assorbente).

Operativamente il vapore a bassa pressione presente nell’evaporatore viene inviato, tramite un condotto, all’assorbitore, dove tende a passare in soluzione con il liquido assorbente e, quindi, tramite una reazione esotermica, sviluppa il cosiddetto calore di assorbimento che aumenta la temperatura del liquido. A mano a mano che la soluzione assorbe refrigerante essa perde la capacità di assorbire quindi diviene necessario ricondurre la soluzione alla concentrazione in refrigerante ritenuta idonea per l’assorbimento. Successivamente la soluzione viene pompata verso il generatore a più alta pressione, poiché la temperatura di condensazione nel generatore risulta più elevata rispetto a quella nell’evaporatore. Nel generatore il liquido viene riscaldato tramite una fornitura di calore dall’esterno, in modo che il refrigerante si separi dalla soluzione che, quindi, risulterà rigenerata, cioè ritornerà alla concentrazione desiderata. A questo punto il refrigerante viene inviato al condensatore dove ritorna in fase liquida tramite cessione di calore verso l’esterno e da qui tramite una valvola di laminazione tornerà nell’evaporatore ad una pressione inferiore. La soluzione assorbente invece, una volta rigenerata, potrà ritornare nell’assorbitore ad una pressione inferiore attraverso una valvola di laminazione.

Per il funzionamento di questa tipologia di pompe di calore si utilizza una soluzione di acqua e bromuro di litio (H₂O-BrLi), oppure ammoniaca ed acqua (NH₃- H₂O). In queste miscele, il primo fluido è il refrigerante mentre la seconda sostanza è il solvente. Nel solvente il refrigerante è disciolto in concentrazione più o meno elevata a seconda del punto fisico dell’impianto in cui si opera.

- **Bromuro di litio (BrLi):** viene realizzato con il minerale di litio e con il bromuro ricavato dall’acqua di mare. Maggiore è la sua concentrazione, minore la sua temperatura e più elevata la sua capacità di

assorbimento. In presenza di ossigeno il bromuro di litio diventa corrosivo ma dal momento che l'unità si trova sottovuoto, l'ossigeno presente è assai contenuto e prossimo all'assenza. È tuttavia di estrema importanza l'impiego di efficaci sistemi di spurgo e, per evitare ogni rischio, è opportuno aggiungere alla soluzione assorbente un inibitore di corrosione. È inoltre importante verificare l'alcalinità. L'assorbente deve essere maneggiato con cura ed è necessario verificare la corretta quantità di inibitore tramite analisi chimiche periodiche. Il bromuro di litio risulta essere un fluido non tossico per l'uomo e non dannoso per l'ambiente.

- Ammoniaca (NH₃, oppure secondo la denominazione internazionale R717) si può considerare l'unico fluido naturale che viene costantemente utilizzato nell'industria della refrigerazione fin dalla sua prima applicazione. Per le proprietà fisiche del composto (si veda Tabella 1.3), essa, alla pressione atmosferica, è un gas incolore che non contribuisce né al buco dell'ozono né al riscaldamento globale. Presenta una breve vita atmosferica, durante la quale non dà origine alla formazione di sottoprodotti con effetti negativi sull'ambiente. Nonostante i suoi indiscussi vantaggi in termini di efficienza energetica, in certe applicazioni e regioni geografiche, l'uso dell'ammoniaca è limitato, a causa della sua elevata tossicità e del basso limite di infiammabilità. Questo comporta la sua proibizione all'interno di spazi occupati, mentre è consentito in aree non occupate o all'esterno. Negli ultimi anni si sono introdotti diversi miglioramenti volti a minimizzare il rischio per la salute umana e, in particolare, per le applicazioni in zone densamente popolate. È importante notare che l'ammoniaca ha un forte odore che rende semplice la rilevazione di eventuali fughe. Considerando la compatibilità dell'ammoniaca con i componenti che costituiscono la macchina per la climatizzazione, è fondamentale evidenziare come l'uso del rame debba essere completamente evitato nelle parti bagnate dall'ammoniaca perché essa è altamente corrosiva nei confronti di questo materiale. Pertanto, compressori ermetici e semi-ermetici non possono essere impiegati; solamente i compressori aperti sono utilizzabili in quanto non prevedono il raffreddamento diretto degli avvolgimenti del motore elettrico. Il rame deve essere evitato nelle tubazioni di collegamento, così come negli scambiatori di calore. Negli ultimi anni, si sono sviluppate differenti soluzioni volte a risolvere tali problematiche quali scambiatori a piastre in acciaio inossidabile espressamente sviluppati per ammoniaca o scambiatori a microcanali in alluminio. Inoltre, tra i fluidi naturali, l'ammoniaca è quella che presenta il mercato più consolidato con le maggiori vendite in termini di volumi e ricavi, ma, d'altra parte, gli aspetti critici legati alla sua tossicità, infiammabilità e alla compatibilità con i materiali e i lubrificanti stanno limitandone l'applicazione sia nel settore della refrigerazione che in quello della climatizzazione dell'aria di piccola potenza, confinando il suo utilizzo solamente ai grandi impianti.
- Acqua distillata (H₂O) è il fluido refrigerante (cioè il soluto) di questi impianti e presenta diversi pregi: è stabile, non tossica, facilmente reperibile e caratterizzata da un elevato calore latente di vaporazione (pari a 2256 kJ kg⁻¹). Potrebbe sembrare strano che l'acqua venga impiegata come fluido refrigerante, dato che si è abituati ad osservarne l'ebollizione a circa 100°C; in realtà questo avviene solamente alla pressione atmosferica, mentre invece, alle basse pressioni, la temperatura di ebollizione si avvicina a 0°C.

Di seguito le principali caratteristiche fisiche dei fluidi sopra descritti.

Tabella 1.3 Caratteristiche dei fluidi (Bromuro di litio, Ammoniaca, Acqua distillata)

Fluido	Bromuro di Litio	Ammoniaca	Acqua distillata
Aspetto	Solido bianco	Gas incolore	Liquido trasparente
Formula chimica	BrLi	NH ₃	H ₂ O
Componenti [%]	Li=7,99, Br=92,01	100	100
Peso molecolare [g mol ⁻¹]	86,856	17,031	18,0153
Densità [g cm ⁻³] (a 1 atm)	3,464	7,3·10 ⁻⁷ (a 20°C)	1 (a 0°C)

Punto di fusione [°C] (a 1 atm)	552	-77,73	0
Punto di ebollizione [°C] (a 1 atm)	1256	-33,34	100
Solubilità in acqua [g cm⁻³] (a 20 °C)	166,7 g / 100 ml (a 20°C)	517 g/L (a 20°C)	/
Capacità termica [J mol⁻¹ K⁻¹]	51,88	35,06	75,31
ODP	0	0	0
GWP	0	0	0

1.2 Classificazione delle pompe di calore

La classificazione delle pompe di calore di norma si basa sulla tipologia di sorgente termica: aerotermica, idrotermica, geotermica. Ad essa si affianca una sotto-classificazione derivante dalla combinazione dei due fluidi che scambiano calore con il refrigerante, aria o acqua, verso la sorgente esterna (primo termine) e verso quella interna dell'edificio (secondo termine).

Verso l'interno la pompa di calore può riscaldare o raffreddare, se reversibile, direttamente l'aria degli ambienti oppure può farlo attraverso l'interposizione di un fluido intermedio, normalmente acqua, che trasporta il calore nei vari ambienti, dove un ulteriore scambiatore di calore (ventilconvettori, sistemi radianti ecc.) lo trasferisce all'aria.

Verso l'esterno la pompa di calore può scambiare calore direttamente con l'aria oppure attraverso un fluido intermedio, acqua o acqua e glicole, che a sua volta lo scambierà con la sorgente esterna: acqua superficiale o di falda, terreno o rocce con sonde verticali od orizzontali (Figura 1.2).

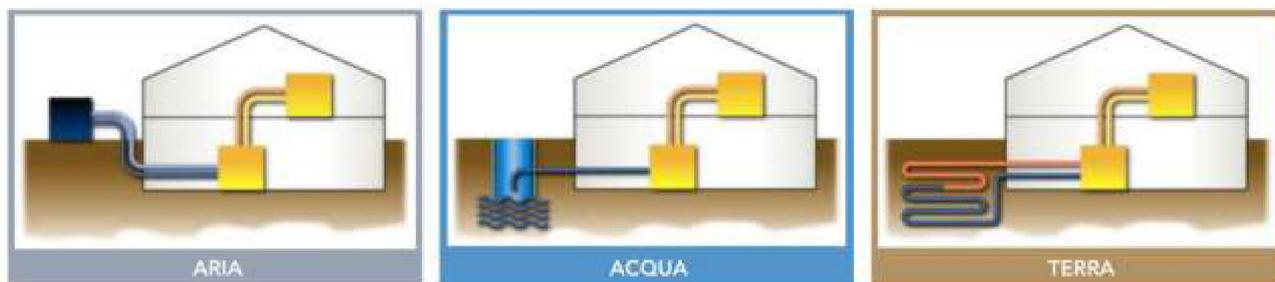


Figura 1-2 Tipologie di sorgenti termiche

La scelta della sorgente termica è importante e si riflette sia sulle prestazioni energetiche dell'impianto, sia sul dimensionamento della pompa di calore e sull'eventuale scelta di un sistema integrativo (caldaia a gas, resistenza elettrica). La temperatura della sorgente termica esterna e i relativi andamenti stagionali sono quindi di estrema importanza per determinare le prestazioni di una pompa di calore.

Di seguito si discutono le varie tipologie di pompa di calore.

- **Pompa di calore aerotermica – ASHP** (sorgente: aria):

È la tipologia più diffusa di pompa di calore perché non necessita di grossi costi di investimento, in quanto la sorgente fredda da cui prelevare il calore è disponibile ovunque. Tuttavia, l'efficienza delle pompe di calore dipende dalla temperatura dell'aria esterna, e diminuisce al diminuire della temperatura della sorgente. Queste pompe hanno quindi un'ottima resa nei climi miti, con rendimenti minimi al di sotto dei 2°C.

In base al tipo di scambiatore, si distinguono le seguenti tipologie di Pompe di Calore:

- ✓ aria-aria

In questo caso i terminali (anche denominati split) di distribuzione utilizzano l'aria come veicolo per il riscaldamento/raffreddamento. Si tratta del meccanismo comunemente sfruttato dai condizionatori che si

trovano diffusamente in commercio, ideale per riscaldare o raffreddare gli ambienti. Questa è la tecnologia più diffusa grazie alla sua semplicità di installazione e relativa economicità.

Tali sistemi operano l'effetto utile sull'aria interna degli ambienti da climatizzare attraverso la cessione o il prelievo di calore dall'aria esterna. Il refrigerante che consente tale processo trasporta il calore tramite la rete di canalizzazioni ai diffusori, che consentono di scambiare calore con l'aria interna degli ambienti.

Nel funzionamento invernale, il calore viene acquisito dall'aria esterna e ceduto a quella interna; nel funzionamento estivo si sfrutta sull'effetto opposto.

Le unità interne di questi impianti possono essere anche di tipo canalizzabile, per cui il calore è trasportato con canali d'aria che possono raggiungere ogni ambiente interno.

Anche l'unità esterna può essere canalizzata, consentendo il prelievo di aria esterna con la quale è possibile lo scambio di calore. Ciò consente di sfruttare il vantaggio di poter collocare tale unità all'interno dell'edificio in un locale tecnico.

Fanno parte di questa tipologia di pompe di calore anche i cosiddetti "rooftop", macchine da esterno con canali di mandata e ripresa dell'aria interna trattata, le cui taglie di capacità superiore vengono normalmente utilizzate per climatizzare grandi spazi commerciali e fiere.

✓ aria-acqua

In questa tipologia di pompe di calore, il mezzo scambiante è l'acqua. Questi sistemi riscaldano o raffreddano acqua contenuta in un circuito che trasporta calore nei terminali posti nelle varie zone da climatizzare. Per tali tipologie di impianto vengono solitamente utilizzati fan coils e pannelli radianti, poiché possono sfruttare in maniera ottimale le basse temperature tipiche delle pompe di calore. Un ulteriore dispositivo diffusore utilizzato con le pompe di calore aria - acqua è l'unità trattamento aria, essa è posta in un locale dedicato o anche all'esterno come avviene per i rooftop e come questi è dotata di canali che trasportano l'aria trattata nelle zone da climatizzare. Queste unità hanno anche la possibilità di depurare e deumidificare o umidificare l'aria fino al valore desiderato oltre a riscaldarla e a raffreddarla. Le pompe di calore che sfruttano l'aria come sorgente trovano le condizioni più favorevoli per il loro impiego nelle zone con clima temperato tipiche di quasi tutte le regioni italiane.

Questa tecnologia rispetto a quella precedentemente citata è meno diffusa per i costi di installazione maggiori, ma può essere impiegata anche per produrre acqua calda sanitaria.

Riassumendo, i vantaggi e gli svantaggi delle pompe di calore aerotermiche sono:

- Vantaggi: costi contenuti, facilità di realizzazione, sorgente di facile reperimento.
- Svantaggi: Temperatura della sorgente variabile e non stabile, efficienza variabile, inefficienza a basse temperature esterne, impatto visivo.

- **Pompa di calore idrotermica – WSHP** (sorgente: acque superficiali o di falda):

✓ acqua-acqua e acqua-aria

Queste pompe di calore possono sfruttare l'acqua come sorgente di calore esterno a bassa entalpia, con la quale operare lo scambio termico sul lato esterno.

In tal caso le soluzioni impiantistiche sono differenti rispetto alle pompe di calore aria - aria o aria - acqua, poiché, nonostante il principio operativo sia il medesimo. Presentano problematiche diverse a seconda che l'acqua sfruttata sia superficiale (mare, lago, fiume, canale) o di falda.

I costi di investimento sono, inoltre, superiori rispetto alla soluzione ad aria, in quanto è fondamentale tener conto dell'intera componentistica necessaria per la realizzazione dell'impianto che tratta acqua: pompe per la circolazione dell'acqua, valvolame, realizzazione di un pozzo artesiano, sistema di

smaltimento dell'acqua esausta, disponibilità del terreno su cui operare i lavori di interrimento delle serpentine dei tubi per lo scambio.

Le pompe di calore che sfruttano le acque superficiali come fonte termica sono più semplici da realizzare rispetto a quelle che sfruttano acqua di falda, ma richiedono un sistema di decontaminazione e filtraggio che eviti di introdurre acque malsane e ricche di detriti con conseguente rischio di danneggiamento della macchina. Si deve tenere conto, inoltre, che le acque superficiali, risentendo molto dei cambiamenti del clima esterno, sono caratterizzate da una temperatura variabile nel corso dell'anno. Tuttavia, a differenza delle pompe ad aria, durante il periodo invernale la temperatura dell'acqua rimane sempre superiore a quella dell'aria (che può scendere di molto al di sotto dello 0°C), consentendo così a queste pompe di avere un'efficienza stagionale superiore a quella delle pompe di calore ad aria.

Nel caso di utilizzo dell'acqua di mare le temperature medie annue sono ancora più elevate, il che comporta efficienze superiori per il funzionamento delle pompe stesse. Lo svantaggio è dato dal fatto che lo scambiatore di calore e il circuito necessari sono maggiormente costosi, poiché devono essere realizzati con materiali in grado di resistere all'elevata salinità nell'acqua.

Nel caso in cui le pompe di calore utilizzino acqua di falda come fonte termica, l'utilizzo di tali acque ha il vantaggio di sfruttare un serbatoio termico a temperatura costante e sufficientemente elevata. L'efficienza delle pompe di calore, in relazione alla temperatura della sorgente fredda, rimane pressoché costante durante l'anno, arrivando a raggiungere alti rendimenti.

Le problematiche di queste soluzioni impiantistiche consistono nel fatto che non sono sempre disponibili falde acquifere da cui attingere il calore necessario alla pompa di calore. Inoltre, se disponibili, non sempre possono essere sfruttate a causa di divieti imposti dalla legge.

- **Pompa di calore geotermica – GSHP** (sorgente: terreno/rocce):

✓ suolo-acqua

Il terreno come sorgente fredda garantisce buone prestazioni energetiche e ha il vantaggio di subire minori variazioni di temperatura rispetto all'aria nel corso dell'anno. Questo consente a queste pompe di calore di raggiungere elevati valori di efficienza, evitando l'utilizzo di sorgenti termiche d'appoggio.

Per sfruttare il terreno come sorgente è necessario installare nel sottosuolo sistemi di scambio termico a circuito chiuso all'interno dei quali circola una soluzione di acqua o di acqua e fluido antigelo. Le pompe di calore a terreno richiedono ampie superfici in cui interrare le tubazioni, nel caso di sonde orizzontali (Figura 1.3(a)), o comportano operazioni di perforazione, nel caso di sonde verticali (Figura 1.3(b)).

Il fluido operativo a bassa temperatura scorre nelle tubazioni sotterranee, assorbendo calore dal terreno. Una volta giunto presso l'apparecchio posizionato nell'edificio da riscaldare, il fluido viene compresso, acquisendo in tal modo una temperatura ancora più elevata, per poi fluire nel condensatore interno al macchinario, con conseguente rilascio del calore accumulato e l'invio verso le tubazioni dell'impianto di riscaldamento domestico e quelle destinate alla fornitura di acqua calda sanitaria.

Al termine di questo percorso, il fluido, nuovamente raffreddato, ritorna nelle tubazioni della sonda sotterranea per accumulare calore e ricominciare il medesimo ciclo. Ovviamente, una pompa di calore suolo-acqua può operare anche il ciclo inverso, garantendo il raffrescamento degli ambienti nella stagione estiva.

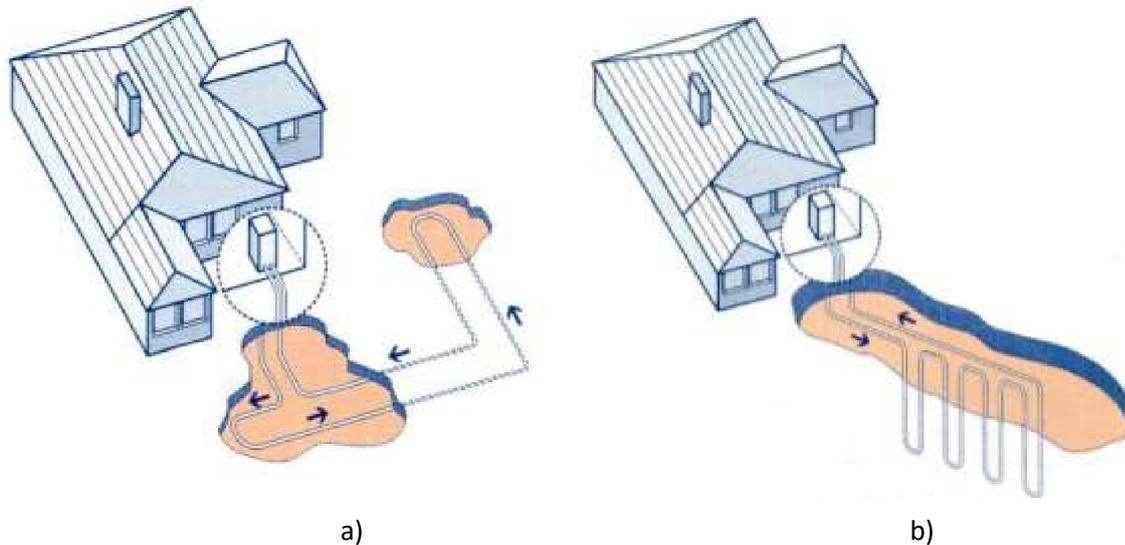


Figura 1-3 Impianto geotermico ad assetto (a) orizzontale e (b) verticale

Nella scelta di una sorgente piuttosto che di un'altra è fondamentale considerare sia gli aspetti economici che le caratteristiche del sito di installazione.

2 Stato dell'arte: le pompe di calore e le loro prestazioni in letteratura

2.1 Introduzione: campi applicativi e prestazioni

L'efficienza energetica e l'energia rinnovabile sono di fondamentale importanza nella strategia dell'Unione Europea (UE) per la crescita sostenibile.

Il sistema di scambio delle quote di emissione dell'UE (ETS) mira a ridurre le emissioni nella generazione di elettricità e nella grande industria. Tuttavia, circa il 40% delle emissioni di anidride carbonica nell'uso finale e il 40% del consumo energetico totale sono attribuibili agli edifici che non sono coperti dall'ETS. Il riscaldamento deve essere sostanzialmente decarbonizzato se si vogliono raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di anidride carbonica e di altri gas serra. I settori dei trasporti e del residenziale sono composti da molti piccoli consumatori di energia, cosa che rende il cambiamento in questi settori particolarmente impegnativo, poiché ogni consumatore considera le proprie esigenze di gestione energetica e di trasporto della propria casa.

Le pompe di calore consentono di elettrificare il riscaldamento domestico. Come brevemente descritto nella sezione precedente, sono sistemi di recupero energetico che utilizzano una parte dell'elettricità per trasferire il calore dal suolo esterno o dall'aria ai circuiti di riscaldamento e acqua calda dell'edificio. L'energia aerotermica, geotermica e idrotermica sono considerate fonti di energia rinnovabile [1].

E' tuttavia noto che le prestazioni di una pompa di calore sono fortemente influenzate dalle condizioni ambientali operative, dalla tipologia di installazione e dalle caratteristiche dell'edificio. Per questo motivo le loro prestazioni nella realtà possono differire da quelle osservate in condizioni di laboratorio e riportate nelle schede tecniche dei produttori.

Per favorirne la penetrazione in un settore così complesso e variegato come il residenziale, è quindi in primo luogo necessario conoscere le caratteristiche e le prestazioni reali delle tipologie di pompe prima descritte così da poterne definire con precisione i possibili campi applicativi e le prestazioni attese.

L'efficienza di una pompa di calore viene valutata tramite il cosiddetto coefficiente di prestazione (COP), definito come il rapporto tra la potenza termica fornita e la potenza elettrica consumata.

La potenza elettrica che la PdC consuma dipende da molti fattori, tra cui il tipo di fonte di calore e dissipatore di calore, le preferenze di comfort degli occupanti della casa e la differenza tra la temperatura esterna e la temperatura di set point dell'ambiente interno.

L'efficienza stagionale (SPF – Seasonal Performance Factor) di una pompa di calore è la media ponderata del COP su un'intera stagione di riscaldamento e tiene conto dell'efficacia media dell'intero sistema di riscaldamento.

In generale le prestazioni della PdC dipendono dalla differenza di temperatura fra pozzo e sorgente: maggiore è la differenza di temperatura e minore è il COP.

Le pompe di calore ad aria (ASHP) sono la forma più comune di pompa di calore in Europa [2]. Si prevede che gli ASHP giocheranno un ruolo significativo per l'elettificazione del riscaldamento domestico, in particolare attraverso schemi di retrofit di vecchie case nelle aree urbane. Esse possono operare in abitazioni ad alta densità dove l'installazione di pompe di calore geotermiche sarebbe assai difficoltose da installare [3] e quindi offrono un potenziale significativo per i programmi di retrofit. Tuttavia, la posizione esposta dell'unità esterna li lascia a rischio di gelo, in particolare in climi umidi o freddi. Il rischio può essere ridotto posizionando l'ASHP in un'area riparata o soleggiata [4], oppure tramite l'accoppiamento con uno scambiatore di calore terra-aria orizzontale (EAHX).

Le pompe di calore geotermiche offrono meno variabilità nelle loro prestazioni perché beneficiano di temperature sotterranee moderate meno variabili, che consentono di raggiungere COP più elevati rispetto agli ASHP [5].

Gli WSHP, grazie alla temperatura relativamente stabile delle acque sotterranee, consentono ai sistemi di raggiungere COP più elevati rispetto agli ASHP. Tuttavia, l'ubicazione geografica di bacini idrici idonei e le difficoltà nel valutare il potenziale trasferimento di calore rispetto alle correnti d'acqua limitano l'assorbimento per l'utilizzo urbano.

2.2 Il mercato Europeo delle pompe di calore: prospettive di sviluppo

Le vendite di pompe di calore in Europa sono aumentate da una base di 7,5 milioni di unità nel 2014 a 11,8 milioni nel 2018, di cui gli ASHP sono il tipo dominante per le motivazioni già illustrate nella sezione precedente [6]. Con un aumento del 12% raggiunto nel 2018, il mercato europeo delle pompe di calore ha registrato una crescita a doppia cifra per il quarto anno consecutivo (Figura 2.1). A questo ritmo, è previsto un raddoppio del mercato europeo delle pompe di calore entro il 2024. Grazie agli 11,8 milioni di unità installate in tutta Europa, la tecnologia delle pompe di calore è diventata rapidamente una pietra miliare dell'approvvigionamento di calore europeo. Per barriere di varia natura tuttavia le pompe di calore riscaldano poco meno del 10% di tutti gli edifici, evidenziando l'esistenza di un vasto potenziale non sfruttato da liberare. Grazie alla flessibilità che le contraddistingue e all'assenza di combustibili fossili, le pompe di calore saranno necessarie nel nuovo sistema energetico per raggiungere gli obiettivi climatici del 2050. Proprio per questo motivo, il mercato delle vendite a livello nazionale evidenzia un trend in continua crescita, capeggiato dalla Francia, seguita da Italia e Spagna (Figura 2.2).

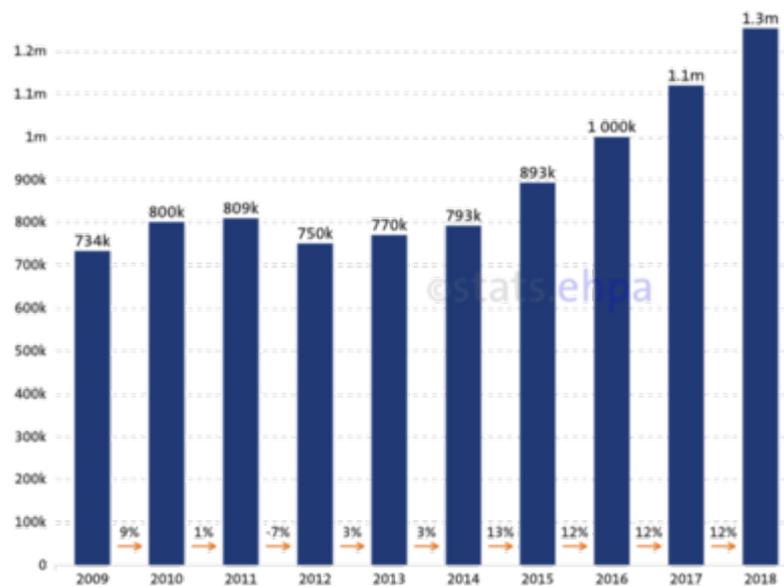


Figura 2-1 Sviluppo vendite 2018, 21 Paesi europei

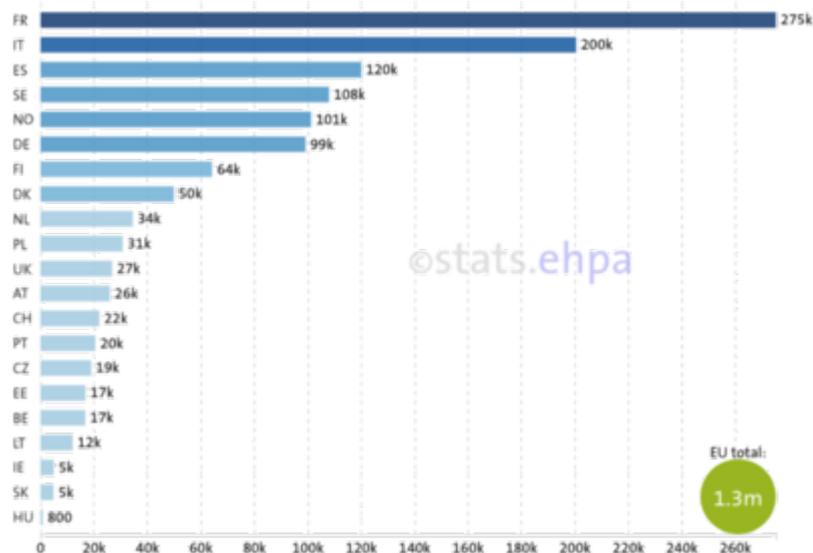


Figura 2-2 2018 Unità vendute per Paese, 21 Paesi europei

Se si analizza in maggiore dettaglio l'ambito degli edifici residenziali multi-familiari, è interessante osservare come per tutti gli otto Paesi considerati, il mercato è rimasto più o meno stazionario fino al 2016 (Figura 2.3). A partire dagli anni 2014-2016 (a seconda del Paese considerato) la vendita di pompe di calore (valutata ogni 1000 abitazioni) è aumentata in modo significativo per Danimarca, Olanda e Francia e, seppure in modo meno marcato, per Italia, Austria e Svizzera. Nonostante questa crescita registrata nelle vendite, l'ambito residenziale multifamiliare conferma una penetrazione ancora ridotta rispetto al potenziale con una percentuale dei sistemi installati non superiore al 10% [7].

A questo proposito è interessante osservare come le percentuali di adozione di questa tecnologia in edifici di nuova costruzione si differenzino tra edifici multifamiliari e mono-familiari. Le pompe di calore sono risultate infatti essere una delle scelte preferite nel caso di abitazioni singole di nuova costruzione, con una buona percentuale di adozione in tutti i Paesi europei considerati con punte superiori al 50% in Francia, Germania ed Austria. Tali percentuali non sono però confermate nel caso degli edifici multifamiliari di nuova costruzione, caratterizzati da percentuali decisamente inferiori: attorno al 4/5% per Francia mentre al 20% per Germania ed Austria.

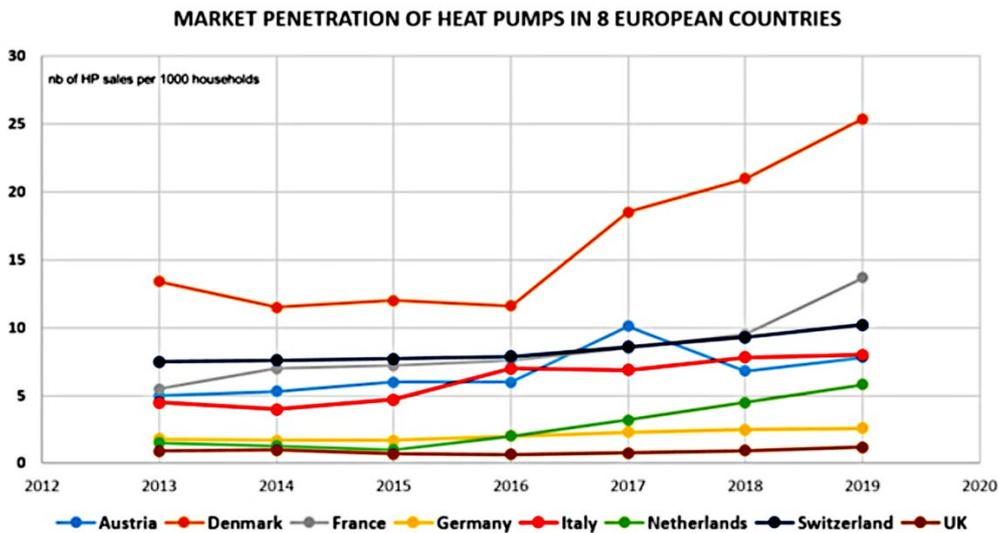


Figura 2-3 Andamento vendite pompe di calore ogni 1000 famiglie, per gli 8 Paesi considerati (Fonte [2] e [7])

Il caso specifico dell'Italia, dai dati Assoclisma elaborati da Amici della Terra [8], conferma in linea generale le tendenze evidenziate dagli altri paesi europei. E' evidente come la ripresa del mercato registrata dal 2014 abbia influito notevolmente sull'aumento di installazioni di pompe di calore in ambito residenziale (Figura 2.4). Nel 2018 risultano quasi 8000 MWt di nuova installazione, quota superata solamente in anni precedenti al 2010. La tecnologia prevalente è quella delle pompe di calore aria-aria, monosplit o multisplit, anche se a partire dal 2014 si nota un trend crescente per quanto riguarda le pompe di calore aria-acqua. In media le unità installate nel periodo analizzato superano il milione all'anno.

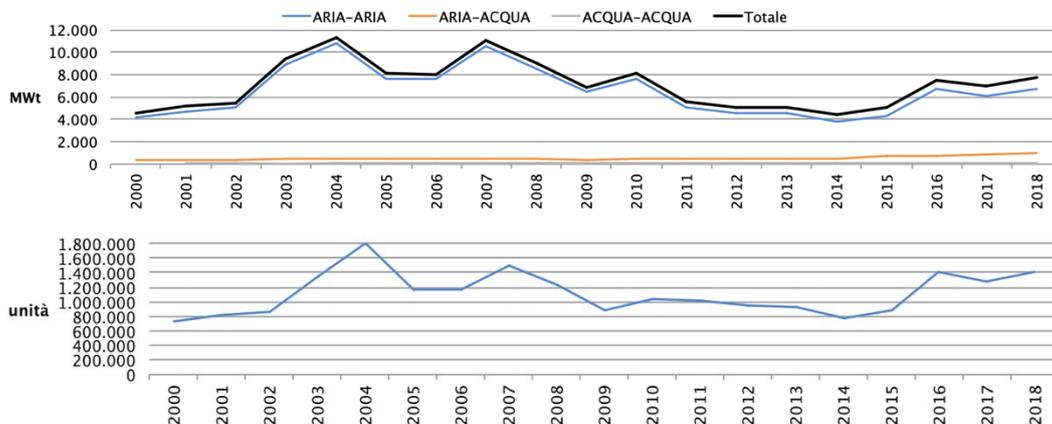


Figura 2-4 In alto andamento dal 2000 al 2018 delle vendite (in termini di capacità in MWt) di pompe di calore in ambito residenziale italiano, suddivise per tipologia. In basso il medesimo andamento in termini di unità (Fonte [8])

Sempre da un'elaborazione di Amici della Terra, su dati ISTAT 2011, emergono dati interessanti per quanto riguarda la tipologia di impianto di condizionamento installato (Figura 2.5), in relazione alla specifica zona climatica (dove zona A è fino a 6000 gradi giorno, mentre zona F oltre 3000 gradi giorno). Le zone fredde (E, F) comprendono circa il 50% delle abitazioni residenziali. Il trend generale prevede che la maggior parte degli impianti installati sia di tipo autonomo in edifici plurifamiliari, mentre la restante parte è suddivisa equamente tra impianti autonomi in edifici monofamiliari e centralizzati.

	Autonomo in edificio monofamiliare	Autonomo in edificio plurifamiliare	Centralizzato			Autonomo in edificio monofamiliare	Autonomo in edificio plurifamiliare	Centralizzato	
A-B-C	870.162	2.938.241	542.409	4.350.812	A-B-C	3,9%	13,3%	2,5%	19,7%
D	1.134.168	3.350.819	1.185.855	5.670.842	D	5,1%	15,2%	5,4%	25,7%
E-F	2.406.491	6.483.142	3.142.820	12.032.453	E-F	10,9%	29,4%	14,3%	54,6%
	4.410.821	12.772.202	4.871.084	22.054.107		20,0%	57,9%	22,1%	100,0%

Fonte elaborazioni Amici della Terra su dati Istat

Abitazioni occupate da residenti per impianto principale di riscaldamento						
	Centralizzato	Autonomo		Centralizzato	Autonomo	
Gas naturale	3.111.861	13.657.742	16.769.604	13,2%	57,9%	71,1%
Gasolio	430.759	466.900	897.659	1,8%	2,0%	3,8%
GPL	92.836	907.537	1.000.373	0,4%	3,8%	4,2%
Biomasse	25.994	3.403.615	3.429.609	0,1%	14,4%	14,5%
Pompa di calore	51.988	629.419	681.408	0,2%	2,7%	2,9%
Rete TLR	795.000		795.000	3,4%	0,0%	3,4%
	4.508.438	19.065.214	23.573.652	19,1%	80,9%	100,0%

Fonte elaborazioni Amici della Terra su dati Istat

Figura 2-5 In alto, tipologia di impianto di riscaldamento installato in funzione della zona climatica. In basso, tipologia di impianto in funzione della sorgente (Fonte [8])

I dati riportati in Figura 2.5 evidenziano come la scelta di autonomia impiantistica contraddistingua non solo le pompe di calore, ma anche tutte le altre sorgenti energetiche o tecnologie, ad eccezione della rete di tele-riscaldamento le cui caratteristiche consentono unicamente un approccio centralizzato.

Questo trend diretto verso l'autonomia impiantistica verrà discusso in uno dei prossimi capitoli (§3.2) in quanto è strettamente correlato a motivazioni di tipo sociale.

2.3 Prestazioni reali delle pompe di calore: laboratorio vs. ambiente operativo

Nonostante il mercato delle PdC abbia evidenziato una forte crescita, la letteratura scientifica sulle PdC e sulle loro prestazioni è indubbiamente limitata ed emerge un quadro quanto mai variegato di riferimenti numerici in termini di prestazioni attese.

A questo proposito, due sono gli studi pubblicati più significativi sull'argomento. Nel primo studio [9] le prestazioni sono ricavate a partire dai dati dei produttori sul COP in diverse condizioni di temperatura per le tre tipologie di pompe di calore (ASHP, GSHP e WSHP). In base ai modelli sviluppati, le prestazioni sono state confrontate con i valori delle misurazioni sul campo, consentendo di definire un fattore di correzione costante da applicare ai valori di COP. Questo studio, oltre a dare una panoramica delle prestazioni delle varie PdC, sottolinea la differenza più o meno marcata tra le prestazioni dichiarate dal costruttore e quelle effettivamente misurate.

In particolare, l'articolo introduce il set di dati "When2Heat" che comprende serie storiche nazionali sintetiche sia della domanda di calore che del coefficiente di prestazione (COP) delle pompe di calore. Copre 16 paesi europei, includendo gli anni dal 2008 al 2018, e presenta una risoluzione oraria. I profili della domanda per il riscaldamento degli ambienti e dell'acqua vengono calcolati combinando i profili di carico standard del gas con i dati di rianalisi della temperatura spaziale e della velocità del vento, nonché i dati geografici della popolazione. Serie temporali COP per diverse fonti di calore - aria, terra e acqua di falda - e diversi dissipatori di calore - riscaldamento a pavimento, radiatori e riscaldamento dell'acqua - sono calcolati sulla base del COP e delle curve di riscaldamento, utilizzando un modello per la determinazione della temperatura di emissione in base alla temperatura esterna.

Per modellare la varianza del COP è stata usata la regressione quadratica proposta da Fischer *et al.* [10]. Questo approccio viene applicato ai dati del produttore sul COP in diverse condizioni di temperatura [11].

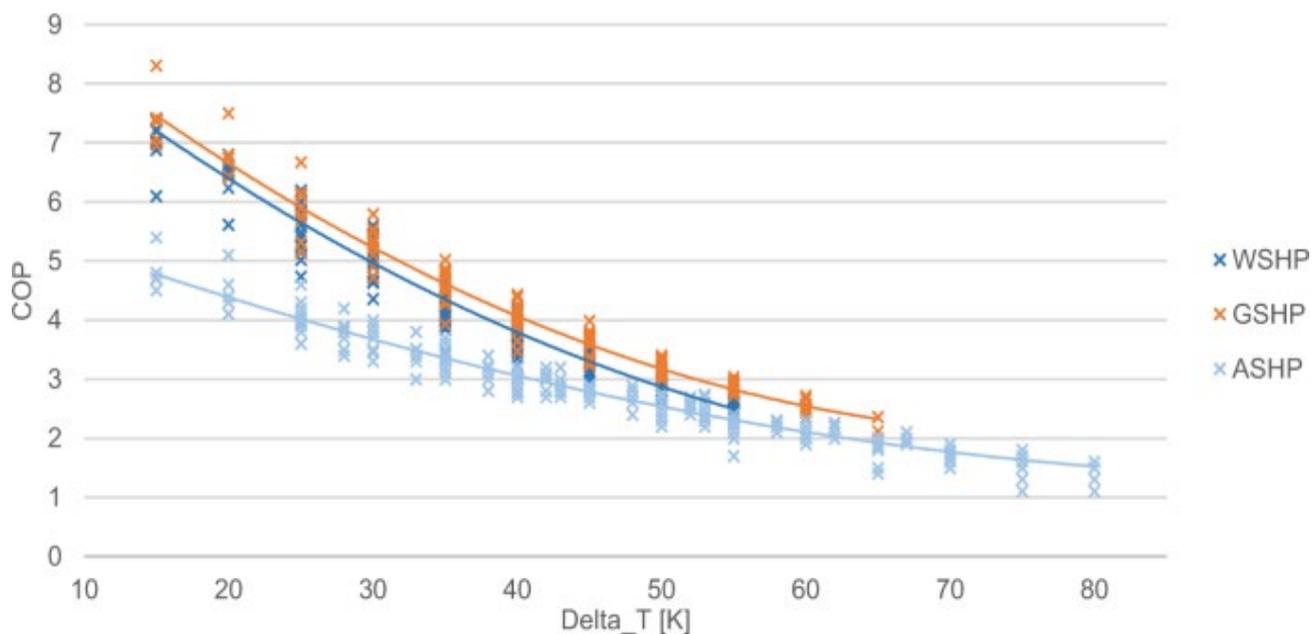


Figura 2-6 Stima delle curve COP. Le regressioni quadratiche vengono eseguite sui dati del produttore distinguendo tra pompe di calore aerotermiche (ASHP), pompe di calore geotermiche (GSHP) e pompe di calore idrotermiche (WSHP)

Nello studio viene applicato un fattore di correzione costante pari a 0.85 a tutte le serie temporali COP per avvicinarsi maggiormente alle prestazioni in condizioni operative reali. I dati utilizzati nelle regressioni fanno infatti riferimento a condizioni operative ideali, non sempre confermate nella realtà. Ad esempio, le condizioni ideali implicherebbero un funzionamento stazionario a pieno carico, condizione non necessariamente verificata nella realtà. Ulteriori inefficienze possono verificarsi dal pompaggio di acque sotterranee per WSHP e salamoia per GSHP. La scelta del valore da assegnare al fattore di correzione (0.85) deriva dai risultati delle misurazioni sul campo condotte da Günther *et al.* [12]. Sebbene tale fattore correttivo consenta di avvicinarsi maggiormente alle prestazioni attese, la scelta di utilizzare un valore costante per tutte le serie temporali limita l'accuratezza del modello predittivo delle prestazioni.

Un recente studio del 2020 [13] si concentra invece sulle pompe di calore ad aria, con particolare riferimento alle pompe ASHP aria-acqua.

L'articolo presenta una revisione sistematica della letteratura degli studi sul campo delle pompe di calore ad aria (ASHP) negli anni 2009–2019, prendendo in considerazione sia studi effettuati sulle prestazioni e il funzionamento degli ASHP in abitazioni occupate, sia esperimenti sulla progettazione ottimale di pompe di calore. Dei 34 articoli considerati nella revisione, si riportano a seguire quelli di maggiore interesse per l'analisi presentata in questo report, cioè quelli relativi alle prestazioni attese di condizioni operative.

Lo studio sottolinea ancora una volta come le prestazioni di ASHP possano variare anche in modo significativo a seconda della progettazione del sistema di riscaldamento e dall'ambiente operativo. La variabilità emerge in modo evidente nel confronto tra i risultati ottenuti nei vari studi. Ad esempio, Wang *et al.* [14] riscontrano COP variabili tra 2 e 4 a seguito di analisi condotte in laboratorio, mentre prove sperimentali in ambiente operativo, condotte in Scozia e Inghilterra [15] e in case ristrutturate nell'Irlanda del Nord [16], hanno evidenziato COP compresi tra 1.2 e 3.2 nel primo caso e superiori a 1.4 nel secondo caso.

Diversi errori di installazione e controllo del circuito sono annotati in [17] come spiegazione parziale delle prestazioni di COP insoddisfacenti di tre sistemi combinati solare-ASHP, con SPF medio annuo di 2,26.

Gli ASHP per il riscaldamento degli ambienti in una prova di retrofit in Scozia hanno prodotto il 12% in meno di carbonio rispetto alle caldaie a gas tradizionali, con costi operativi però più alti del 10% (ai prezzi del 2008) [18].

Per valutare l'influenza del carico sul comfort e sulle prestazioni di una pompa di calore ASHP, Allison et al. [19] hanno condotto una prova sul sistema di riscaldamento a pavimento in una casa dimostrativa a basse emissioni di carbonio a Glasgow, in Scozia nel settembre 2015. I dati sperimentali raccolti durante la prima fase della prova sono stati utilizzati per calibrare un modello di simulazione dell'edificio. Il modello di simulazione è stato quindi utilizzato per determinare le caratteristiche di un controller di spostamento del carico predittivo da installare nella casa. Nella fase finale è stato effettuato l'accesso remoto ad un ASHP tramite un'interfaccia basata su SMS per accendere e spegnere l'ASHP e testare l'algoritmo di spostamento del carico. Hanno osservato che si potevano mantenere condizioni confortevoli durante lo spostamento del carico, ma ancora una volta si sono riscontrate prestazioni energetiche estremamente scarse dell'ASHP.

Oltre a prestazioni non in linea con le attese, in [20] Underwood evidenzia una differenza di prestazioni tra applicazioni di ASHP nel Regno Unito ed applicazioni nell'Europa continentale con conseguente difficoltà di trasferimento dei dati di prestazioni da una zona all'altra. Per ovviare alla mancanza di dati reali, lo studio propone un modello basato su dati di performance media e/o dati derivanti da informazioni di rating standard. I risultati relativi a prove sul campo nel Regno Unito di ASHP evidenziano risultati COP medi di 2.45 e 2.56.

In [21] si dimostra come gli ASHP ad alta temperatura (HT) funzionino vicino al COP nominale di 2.5, con prestazioni migliori ottenute nel caso di riscaldamento diretto degli ambienti, rispetto ad applicazioni con accumulo termico e modalità combinata di calore e accumulo. Tale risultato è confermato da [16] in cui una configurazione di sistema accoppiato ASHP-TES è stata in grado di ottenere un COP di appena 1.41. In tutte le configurazioni, l'HT è risultato comunque essere più costoso di qualsiasi sistema di caldaia a gas (in base ai prezzi del Regno Unito).

Risultati simili (efficienza stagionale media SPF di 2.3) sono stati ottenuti da Huchtemann and Muller in Germania [22]. Tale studio ha anche evidenziato la complessità di un monitoraggio ad ampio spettro, con problemi di strumentazione durante la raccolta dati. Delle 77 case nella prova sul campo tedesca di ASHP e GSHP, solo 43 case hanno prodotto set di dati completi sufficientemente accurati per l'analisi da condurre.

Prestazioni elevate con COP dell'ordine di 3.0-3.5 sono state ottenute da un sistema ASHP reversibile (riscaldamento e raffreddamento) in un edificio di prova di laboratorio non occupato in Canada [23]. Gli ASHP hanno dimostrato di essere economicamente interessanti nei climi freddi canadesi, dati i prezzi dell'elettricità per il tempo di utilizzo canadese.

Valori di prestazioni relativi a sistemi GSHP si ritrovano in alcuni studi svolti in Cina, dove tale tipologia di pompe di calore trova maggiore diffusione. Li et al. [24] nel loro studio analizzano le prestazioni di due pompe di calore asservite ad un edificio nZEB nel periodo Novembre 2014 - Ottobre 2015. Il sistema evidenzia complessivamente prestazioni medio-alte di entrambe le unità ed in entrambe le stagioni (COP medio di 5.0 e 3.9 ed EER di 5.4 e 3.0, per la prima e per la seconda unità rispettivamente) con temperature interne in linea con il livello richiesto di comfort. L'analisi ha evidenziato un'influenza del sistema di riscaldamento radiante, più efficiente nella stagione invernale rispetto all'impiego di radiatori o fan coils. La temperatura del suolo è risultata stabilizzarsi dopo un anno di utilizzo.

Qian et al. [25] hanno analizzato invece gli effetti dello sbilancio termico causato dalla differenza tra calore assorbito e ceduto al suolo tra le varie stagioni. Tale fenomeno potrebbe deteriorare le prestazioni del sistema GSHP nel tempo. A questo proposito viene considerato un caso studio reale per formulare uno schema di simulazione in grado di determinare lo sbilancio termico, basato su fattori di influenza. Si evince come la zona climatica HSCW (Hot Summer Cold Winter) sia la più affetta da un calo di prestazioni nel caso in cui il sistema di riscaldamento sia radiante o il raffrescamento avvenga tramite fan coils.

Prestazioni elevate per pompe GSHP vengono confermate anche nello studio di Matuska et al. [26], condotto su di una casa di nuova costruzione caratterizzata dalla presenza di pannelli fotovoltaici. L'analisi evidenzia come l'integrazione del sistema fotovoltaico (PV) con pompa di calore GSHP consenta all'edificio di raggiungere standard di consumo energetico in linea con le case passive.

E' quindi evidente da questo panorama di studi, condotti a livello internazionale, come sia ancora estremamente difficile definire valori uniformi e generalizzabili di prestazioni delle pompe di calore. In particolare emergono due aspetti critici che ad oggi limitano significativamente la possibilità di effettuare accurate analisi tecno-economiche sull'utilizzo delle PdC in ambito residenziale:

- La diffusa mancanza di dati relativi alle prestazioni delle PdC in condizioni operative reali in tutte le possibili configurazioni impiantistiche;
- La difficoltà nel trasferire i dati ed i risultati disponibili da un contesto socio-economico-climatico ad un altro, data l'influenza di numerosi fattori (prezzo dell'elettricità, tipologia di pompa, tipologia di diffusore, tipologia di abitazione, condizioni climatiche, ecc..).

L'analisi condotta ha quindi fatto emergere in modo evidente la necessità imprescindibile di basare ogni valutazione di prestazioni su dati di monitoraggio acquisiti per periodi di tempo sufficientemente lunghi e in ambienti operativi reali. A ciò si aggiunga la necessità di effettuare l'analisi nel contesto climatico di riferimento a livello quanto meno nazionale, data la notevole difficoltà nell'estensione dei risultati da un contesto ad un altro.

2.4 Analisi sperimentali e numeriche delle prestazioni di pompe di calore in casi studi italiani

Come si è avuto modo di evidenziare nella sezione precedente, la valutazione delle prestazioni di una PdC deve essere effettuata in un contesto operativo reale al fine di risultare significativa. Dal momento che il presente studio fa riferimento al settore residenziale, si sono cercati in letteratura eventuali studi che facessero riferimento a dati sperimentali con particolare attenzione agli edifici multifamiliari integranti pompe di calore.

La ricerca condotta a vari livelli (letteratura scientifica, progetti di ricerca nazionali ed internazionali) ha evidenziato una complessiva carenza di analisi basate su monitoraggi approfonditi e completi. A seguire vengono riportati i pochi studi disponibili, principalmente incentrati sullo sviluppo di modelli numerici più che su campagne sperimentali di misura in condizioni operative rilevanti.

In [27] vengono studiate le prestazioni della pompa di calore assistita da un impianto fotovoltaico ibrido per un edificio sportivo. Viene proposto un report sulle prestazioni globali dell'impianto nel corso di due anni di monitoraggio e i risultati ottenuti evidenziano come sia difficile raggiungere il massimo potenziale di design, per ragioni legate sia alla complessità dell'impianto sia ad una difficoltà di gestione "ottimizzata" da parte dell'utenza e dell'assistenza dell'impianto. I casi di stop nel funzionamento suggeriscono inoltre la necessità di modifiche della configurazione impiantistica nonché limiti prestazionali dei compressori con conseguente necessità di sviluppare nuove soluzioni progettuali più adatte a questa tipologia di impianti. Le considerazioni derivanti da questo monitoraggio sono quindi necessarie per ottimizzare l'impianto.

Tra gli altri studi riportanti analisi sperimentali su pompe di calore in condizioni operative reali, la maggior parte fanno riferimento ad applicazioni di PdC in edifici nZEB (nearly Zero Energy Building) e sono principalmente finalizzati a sviluppare e migliorare modelli numerici tramite validazioni sperimentali.

In [28] vengono riportati i risultati di analisi sperimentali volte a verificare l'accuratezza di correlazioni (in accordo con lo standard EN 14825) per calcolare il COP e l'EER di pompe di calore che lavorano con un Capacity Ratio (CR) differente da quello nominale. Lo studio ha evidenziato una carenza di dati forniti dai produttori per quanto riguarda il funzionamento a carico parziale o l'eventuale influenza di altri componenti. Vengono infine proposte delle nuove correlazioni, i cui risultati sono comparati a livello sperimentale e risultati in buon accordo ma non generalizzabili, data la specifica configurazione dell'impianto.

Un altro studio che si focalizza sul determinare le differenze tra modelli numerici e prestazioni reali, riguarda un complesso di edifici nZEB con comune impianto fotovoltaico e pompa di calore centralizzata [29]. Il confronto con i dati sperimentali ha evidenziato una notevole dipendenza dell'accuratezza del modello numerico dalle assunzioni relative alle condizioni climatiche, alle performance costruttive degli

edifici, ai profili di funzionamento legati al comportamento degli utenti oltre che alle performance dell'impianto (con particolare attenzione al COP della pompa di calore fornito dal produttore). Un'opportuna calibrazione dei parametri di input del modello ha consentito di ottenere risultati numerici in linea con quelli sperimentali.

Considerazioni derivanti da simulazioni semi-stazionarie e dinamiche di una casa nZEB in località collinare del Nord Italia sono riportate in [30] e confrontate con dati sui consumi effettivi. L'analisi numerica ha evidenziato l'importanza della progettazione dell'involucro, così come della gestione degli impianti in termini di set-point e controllo dei componenti.

3 Ricerca di casi studio nel Nord Italia e barriere sociali

L'analisi dello stato dell'arte, presentata nelle sezioni precedenti, ha evidenziato in modo inequivocabile la mancanza di dati sperimentali che consentano di valutare con accuratezza e precisione le prestazioni delle pompe di calore in condizioni operative reali, con particolare riferimento al contesto italiano.

Tutti gli studi condotti hanno infatti evidenziato come le prestazioni indicate dai costruttori facciano riferimento a condizioni ideali lontane dalla realtà operativa e come diversi fattori (caratteristiche dell'edificio, condizioni climatiche, tipologia di impianto, ecc) influenzino le prestazioni finali delle pompe di calore, portando in alcuni casi ad ottenere COP ben al di sotto delle aspettative. Tali fattori di influenza rendono anche estremamente difficile lo sviluppo di modelli numerici predittivi la cui accuratezza è risultata essere estremamente influenzata dalle ipotesi iniziali di modello. E' quindi evidente la necessità sempre più stringente di disporre di dati sperimentali riferiti a condizioni operative reali che possano fare da riferimento per modelli numerici e/o analisi di fattibilità tecno-economica.

Per ovviare alla mancanza di un "benchmark" di riferimento, si sono ricercati nel Nord Italia casi con configurazioni impiantistiche adeguate. La ricerca ha riguardato sia potenziali casi studio già dotati di sistema di monitoraggio sia casi studi con necessità di installare e/o integrare sistemi di monitoraggio adeguati.

Per l'identificazione di potenziali casi studi si è attivata l'intera rete di contatti del gruppo di ricerca, avvalendosi così del supporto di utility (es. AGSM Verona), di Esco attive in ambito residenziale (es. Alperia Bartucci), di studi ingegneristici/costruttori (es. Exrg), di enti certificatori in ambito residenziale (es. Klimahaus), di manutentori di impianti a pompa di calore e della rete degli amministratori di condominio (ANACI).

La rete attivata ha consentito di effettuare una ricerca in tutto il Nord Italia di casi di condomini/edifici residenziali dotati di pompe di calore, ma solo un numero limitato di questi è risultato possedere caratteristiche sufficientemente in linea con le necessità del progetto.

Le motivazioni principali di ciò sono di varia natura e verranno qui brevemente riassunte.

3.1 Tipologia di edifici

Stando al censimento ISTAT del 2011, il Nord Italia è caratterizzata da un'elevata numerosità di edifici con due Regioni (Lombardia e Veneto) che primeggiano a livello Nazionale. Stando a medie regionali, più dell'80% di tali edifici sono ad uso residenziale. Nonostante l'elevata numerosità di edifici, il livello complessivo dal punto di vista energetico ha ancora ampi margini di miglioramento in quanto una quota parte significativa degli edifici residenziali (86%) è stata costruita prima del 1990: in particolare il 57% prima del 1970 ed il 29% tra il 1971 ed il 1990. Si veda ad esempio la distribuzione degli edifici in Veneto (Figura 3.1).

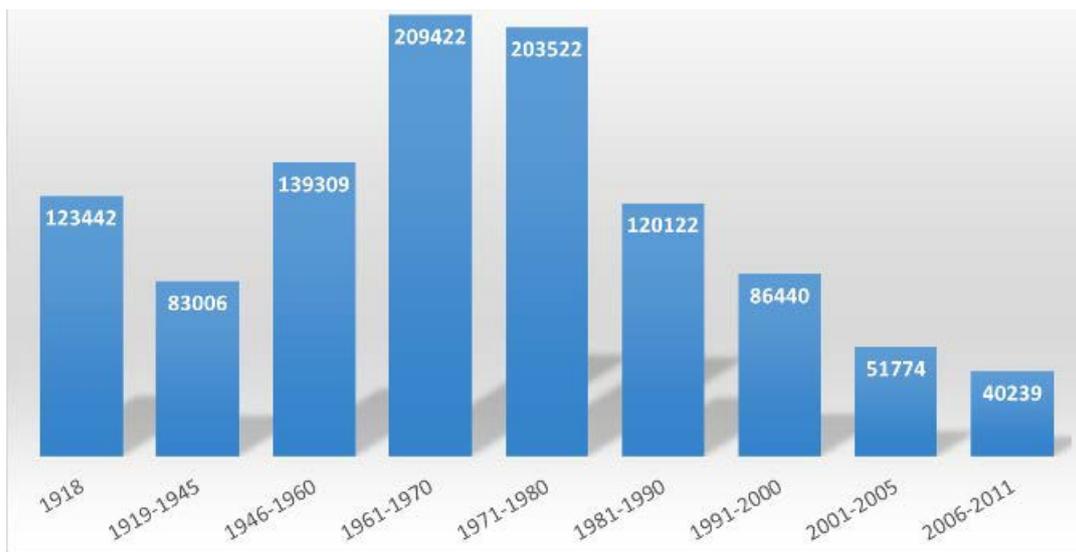


Figura 3-1 Edifici residenziali in Veneto per anno di costruzione

Oltre ad una notevole longevità degli edifici, l'indagine ISTAT evidenzia anche un bassissimo tasso di sostituzione (tra l'1% ed il 3% annuo) di vecchi edifici in nuovi. Ne consegue che, ad eccezione di edifici di nuova costruzione su terreni edificabili, la penetrazione di tecnologie per il riscaldamento/raffrescamento ad alta efficienza energetica è rimasta limitata in quanto deve necessariamente passare attraverso attività di riqualificazione energetica che richiedono non solo consapevolezza/sensibilità dei proprietari degli edifici ma anche investimenti consistenti (eventualmente supportati da politiche energetiche). A ciò si unisca il fatto che le decisioni di riqualificazione di edifici residenziali condominiali devono incontrare il parere positivo a maggioranza dell'assemblea condominiale con tutte le difficoltà che questo comporta.

Questi aspetti spiegano perché, nonostante ci sia una sempre maggiore sensibilità verso la spesa energetica, l'ambito residenziale sia ancora caratterizzato da percentuali limitate di edifici completamente alimentati ad energia elettrica (Figura 3.2).

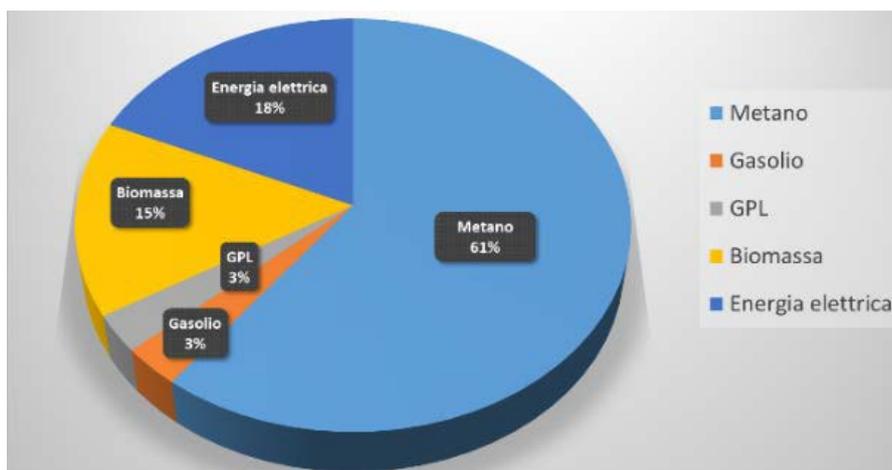


Figura 3-2 Bilancio energetico per gli edifici residenziali in Veneto nel 2012

3.2 Barriere sociali

Oltre a barriere di tipo economico legate agli investimenti di riqualificazione e/o di costruzione ex-novo di edifici full-electric, si sono riscontrate anche barriere di tipo sociale più o meno attese.

A differenza, infatti, di quanto suggerisce la logica in termini di efficientamento, nell'attuale panorama dei nuovi edifici full-electric residenziali multifamiliari, non si è riscontrata una prevalenza di impianti centralizzati (pompa di calore unica a servizio del condominio), ma la grande maggioranza di potenziali casi

studi è risultata essere caratterizzata da soluzioni impiantistiche con impianto dedicato per ogni singola unità abitativa. Gli unici edifici identificati caratterizzati da pompa di calore “condominiale” sono risultati essere edifici oggetto di riqualificazione energetica in cui la caldaia era stata sostituita o integrata con una pompa di calore.

La motivazione principale di questo trend in opposizione alla più efficiente logica di “district heating” (che vedrebbe nella centralizzazione degli impianti la scelta ottima) è risultata essere unicamente sociale. Le unità abitative con impianto di riscaldamento /raffrescamento autonomo sono preferite dagli acquirenti in quanto garantiscono autonomia di gestione e indipendenza totale dalle altre unità abitative. A prescindere quindi da logiche di risparmio ed efficienza, il criterio dell’autonomia sembra essere preponderante e gli edifici full-electric di nuova costruzione confermano questo trend a livello impiantistico.

A questa prima barriera sociale che, come evidenziato, influisce sulle scelte impiantistiche degli edifici, se ne è aggiunta una seconda, sempre di tipo sociale, legata alla diffidenza verso l’introduzione di sistemi di monitoraggio nel condominio e/o nella propria abitazione. La quasi totalità degli edifici del settore residenziale in Italia è infatti priva di sistema di monitoraggio ed i dati di consumo sono disponibili solamente in forma estremamente aggregata e su base mensile, se non addirittura annuale. A differenza di quanto si possa pensare, la motivazione principale non è solamente di tipo economico (elevati costi di installazione di un sistema di monitoraggio) ma anche di tipo sociale, dovuta alla mancanza di consapevolezza dei benefici diretti ed indiretti ad esso correlati. La conoscenza infatti derivante dall’introduzione di un sistema di monitoraggio consentirebbe ai condòmini di acquisire maggiore consapevolezza dei propri consumi nonché di valutare con precisione la convenienza o meno dell’introduzione di nuove tecnologie (conoscere per comprendere).

Questa mancata valorizzazione “sociale” della conoscenza dei propri consumi energetici porta ad una diffidenza generalizzata non solo verso le nuove tecnologie (valutate unicamente in termini di esborso economico) ma anche verso proposte di monitoraggio a costo zero. In alcuni potenziali casi-studio infatti, la proposta di installare il sistema di monitoraggio è stata percepita negativamente: un tentativo di carpire dati senza alcun beneficio per il condominio ma con solo svantaggi (es. disagi legati all’installazione, potenziali malfunzionamenti derivanti dall’introduzione del sistema di monitoraggio, ecc). Per ovviare a questa diffidenza, sarebbe stato opportuno riuscire a pianificare incontri in presenza con i condòmini al fine di consentire una migliore comprensione del progetto di ricerca e fugare ogni dubbio e/o perplessità. Tuttavia, l’emergenza Covid-19 ha impedito qualunque attività di divulgazione presso i condòmini (vedi cap. 3.3)

3.3 Barriere Covid-19

Un altro fattore di influenza inatteso nella ricerca dei potenziali casi studio è risultata anche essere la situazione di emergenza legata alla pandemia Covid-19. La quasi totalità degli amministratori di condominio ha infatti annullato le assemblee condominiali nel 2020. Il continuo procrastinarsi delle assemblee condominiali (nella quasi totalità dei casi individuati non sono state convocate nemmeno all’inizio del 2021) ha reso impossibile la programmazione di attività di monitoraggio in tempi utili per lo svolgimento del progetto nel 2021 e ha rallentato anche le attività di pianificazione ed installazione per due dei casi studio selezionati.

3.4 Potenziali casi studio

A valle delle ricerche effettuate, si è effettuata una preselezione di alcuni casi sottoposti a verifica per una potenziale adesione al progetto (Tabella 3.1).

Tabella 3.1

Tipologia Edificio	Tipologia Impianto	Livello di monitoraggio	di	Posizione
Condominio	Pompa di calore con caldaia di	Parzialmente		Verona

	supporto	presente		
Condominio	Pompa di calore unica per la produzione di acqua calda; pompe di calore dedicate per singola unità abitativa per riscaldamento/raffrescamento	Limitato ad alcuni strumenti di misura	Verona	
Condominio 1 – Casa Clima A	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Bologna	
Condominio 2 – Casa Clima B	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Bologna	
Condominio – Casa Clima	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Brescia	
Condominio (30 u.a.)	Pompe di calore per riscaldamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Castelnuovo del Garda	
Edificio Multipiano Casa Zero	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Torino	
Condominio (60 u.a.)	Pompa di calore con caldaia di supporto	Assente	Provincia di Verona	
Condominio	Pompa di calore per il solo raffrescamento	Assente	Verona	
Villetta monofamiliare – Casa Clima	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento con scambiatore geotermico	Presente	Provincia di Sondrio	
Condominio ATER	Pompe di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Treviso	
Villetta quadrifamiliare	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa con impianto fotovoltaico	Parzialmente presente	Treviso	

Condominio Casa Clima Gold (n. 10 unità abitative)	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Bergamo	
Diversi condomini da 10-15 u.a. di caratteristiche simili	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Assente	Padova	
Condominio - Casa Clima Gold	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Parzialmente presente	Milano	
Condominio - Casa Clima A	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Assente	Rovigo	
Condominio Casa Clima	Pompa di calore per riscaldamento/raffrescamento per singola unità abitativa	Assente	Modena	

La Figura 3.3 riporta la localizzazione dei casi studio riportati in Tabella 3.1.

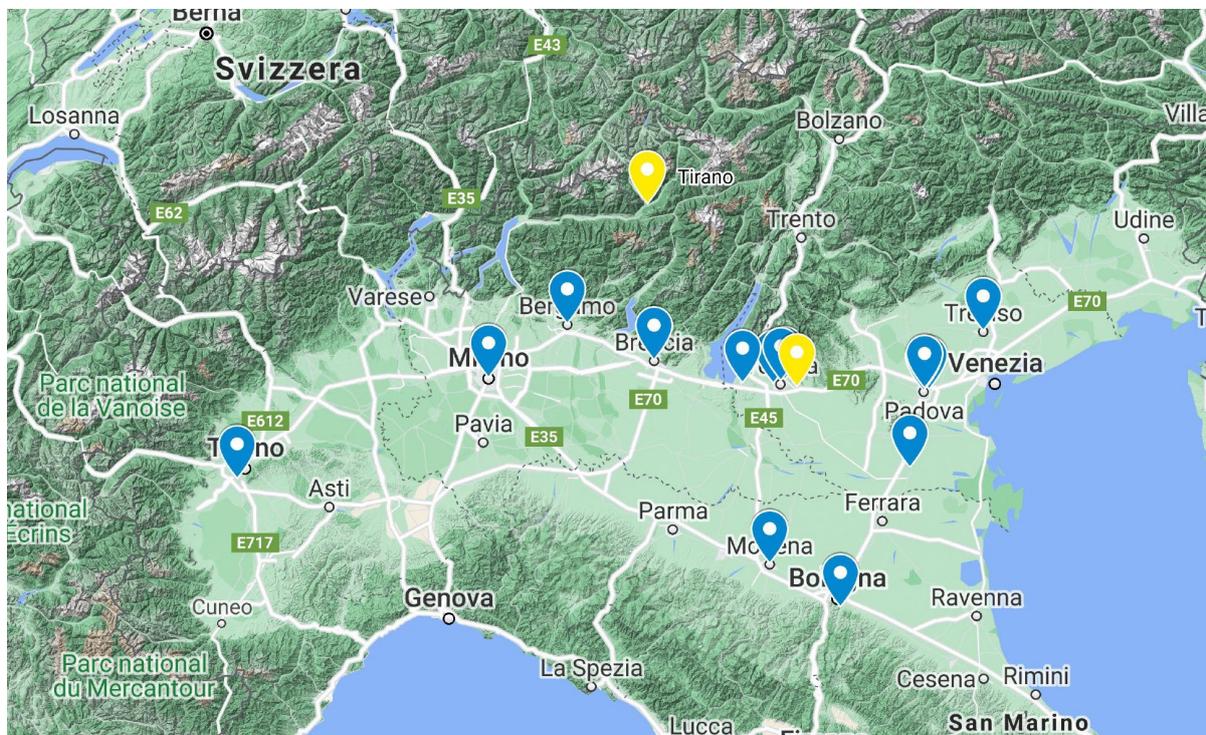


Figura 3-3 Geo-localizzazione dei potenziali casi studio identificati. I casi studio selezionati sono evidenziati in giallo

Tra i potenziali casi studio disponibili, si è effettuata una selezione basata su considerazioni di varia natura. In primo luogo, si è cercato di selezionare casi studi diversificati in termini di categoria costruttiva (tipologia di involucro, grado di isolamento, ecc), soluzione impiantistica (es. pompe di calore acqua-acqua, aria-

acqua, geotermiche) e, nei limiti del possibile, area climatica. A questo si sono aggiunte: i) considerazioni di tipo economico, legate all'esigenza o meno di installazione/integrazione del sistema di monitoraggio; ii) considerazioni in termini di disponibilità a collaborare al progetto; iii) considerazioni legate alla presenza di ulteriori aspetti di interesse, come ad esempio possibilità di analisi e confronto con soluzioni di riscaldamento/raffrescamento tradizionali.

La procedura di selezione ha portato a selezionare due casi studio (evidenziati in verde in Tabella 3.1 ed in giallo in Figura 3.3) che verranno descritti più in dettaglio nei prossimi capitoli.

Il primo caso riguarda una villetta monofamiliare (tipologia Casa Clima), selezionata per le soluzioni impiantistiche e di involucro assolutamente all'avanguardia e per la disponibilità già in essere di un sistema di monitoraggio completo.

Per quanto riguarda invece il secondo caso, si è selezionato un condominio di circa 60 unità abitative, dotato – come da obiettivo della ricerca – di impianto a pompa di calore centralizzato. La peculiarità di questo caso studio – come si avrà modo di descrivere più in dettaglio a seguire – è risultata essere la presenza di un condominio “gemello” dotato di impianto di riscaldamento a caldaia e di raffrescamento a gruppo assorbitore. Il confronto tra i due condomini ha quindi offerto una casistica unica per un confronto tra sistemi tradizionali e full-electric in condizioni climatiche e di tipologia di edificio perfettamente analoghe.

4 Caso studio 1

L'edificio selezionato come caso studio è una casa passiva situata in provincia di Sondrio e così caratterizzata:

- Volume netto riscaldato/raffrescato: 392 m³
- Superficie utile riscaldata/raffrescata: 140 m²
- Struttura Xlam di spessore 10 cm
- Isolamento in lana di roccia con spessore di 24 cm
- Tetto in legno ventilato con isolamento in lana di roccia di spessore pari a 30 cm.



Figura 4-1 Caso studio 1: vista d'assieme e dettagli della fase di costruzione

La casa è stata progettata dall'arch. Ettore Pedrini (strutture) e dall'ing. Paolo Lazzarini (impianti).

4.1 *Caratteristiche generali di una casa passiva*

Le recenti evoluzioni negli standard costruttivi dei nuovi edifici garantiscono una riduzione dei fabbisogni di energia sia per il riscaldamento che per il raffrescamento degli stessi. In particolare, il concetto di "casa passiva" fu concepito alla fine degli anni '80 con l'obiettivo di costruire abitazioni ad emissioni nulle o quasi. Poi, nel corso degli anni, tale concetto è divenuto parte dell'offerta commerciale di diversi costruttori, prima nei paesi del Nord Europa e, in tempi più recenti, anche alle nostre latitudini, per incontrare le richieste di una clientela desiderosa di "abitare" in costruzioni ad alta efficienza energetica.

Per rientrare in questa categoria occorre che il fabbisogno energetico sia inferiore a 15 kWh/m² annui, soglia non facile da raggiungere, ma alla portata di una progettazione accorta.

Il segreto di questi edifici consiste nel mantenere all'interno degli ambienti un buon equilibrio termico, il quale si ottiene, una volta sigillato l'involucro, sia tramite il guadagno solare, sia attraverso l'emissione di calore da parte degli elettrodomestici e degli stessi abitanti, nonché da un controllo dei ricambi d'aria. Solo quando necessario è previsto il ricorso a generatori di calore per il riscaldamento. In questo caso si parla di "near Zero Energy Buildings" (nZEB), ovvero edifici a consumo energetico prossimo allo zero, ai quali l'Unione Europea guarda con sempre più crescente interesse.

Lo standard di Casa Passiva per l'Europa Centrale e l'Italia Settentrionale può così riassumersi:

Tabella 4.1 Caratteristiche standard per edifici passivi in Europa Centrale ed Italia Settentrionale

Fabbisogno termico per il riscaldamento	$\leq 15 \text{ kWh m}^{-2}\text{a}^{-1}$
Energia primaria	$Q_p < 120 \text{ kWh m}^{-2}\text{a}^{-1}$
Assenza di ponti termici (Ψ = trasmittanza di ponte termico lineare)	$\Psi \leq 0,01 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
Trasmittanza termica della facciata	
a) Elementi opachi	$U < 0,15 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
b) Vetrate	$U_w < 0,8 \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-1}$
Recupero di calore (media annuale)	$> 80\%$
Impermeabilità al vento, numero di ricambi d'aria per un gradiente pressorio di 50 Pa tra interno ed esterno	$0,2 < n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$
Rendimento del sistema di recupero del calore	$\eta > 75\%$
Flusso d'aria	orientato
Afflusso/deflusso d'aria	equilibrato $< (\pm 5)\%$
Ricambi d'aria (prEN13779:categ.Aria=2)	$30 \div 40 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ persona}$

4.2 Impianto di condizionamento: schema generale

L'impianto di condizionamento installato presso l'abitazione in esame è del tipo a tutta aria e si compone di:

- uno scambiatore geotermico di pretemperamento
- un aggregato compatto Nilan Compact P (Figura 4.2)
- una resistenza termica integrativa di post riscaldamento



Figura 4-2 Aggregato compatto Nilan Compact P

Lo scambiatore geotermico di pretemperamento consente di preriscaldare l'aria esterna in inverno e preraffreddarla in estate, contribuendo dunque al fabbisogno termico.

L'aggregato compatto Nilan Compact P, di cui si riporta in Figura 4.3 uno schema di funzionamento, contribuisce al fabbisogno termico in riscaldamento/raffrescamento e, in contemporanea, garantisce sia il ricambio d'aria tramite la ventilazione meccanica controllata (VMC), sia la produzione di acqua calda sanitaria (ACS).

La resistenza integrativa di post riscaldamento viene installata sul condotto di immissione e si attiva nei periodi di elevata richiesta (picco di richiesta) durante i cicli di sbrinamento oppure nel caso di produzione prioritaria di ACS.

L'impianto è risultato essere dotata di un sistema di monitoraggio sufficientemente completo che consente di monitorare i parametri principali di esercizio (si veda dettaglio a seguire).

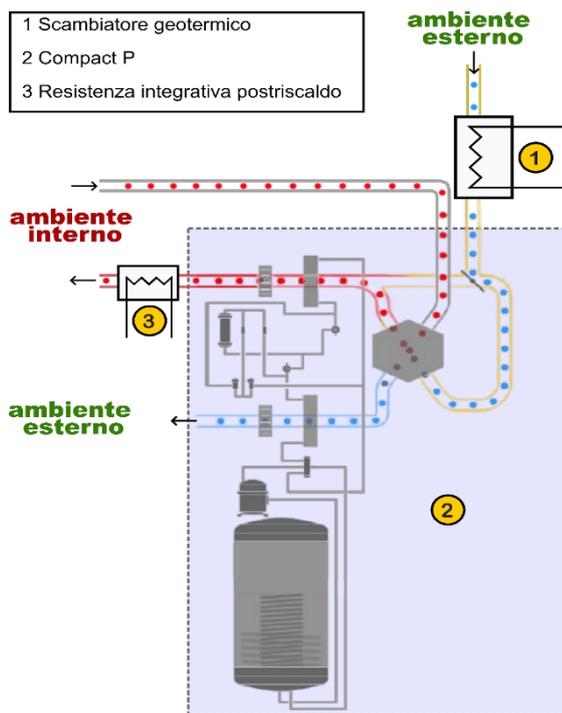


Figura 4-3 Schema dell'impianto di condizionamento, ventilazione e produzione di ACS

4.2.1 Scambiatore geotermico di pretemperamento

Come già sottolineato, l'impianto è risultato essere dotato uno scambiatore geotermico di pretemperamento (numero 1 nello schema di impianto di Figura 4.3) che consente di:

- preriscaldare l'aria in ingresso fino a 9-10°C nel periodo invernale, indipendentemente dalla temperatura esterna
- raffreddare l'aria in ingresso fino a 21.5°C nel periodo estivo, indipendentemente dalla temperatura esterna.

Entrambi gli effetti sono ben visibili in Figura 4.4.

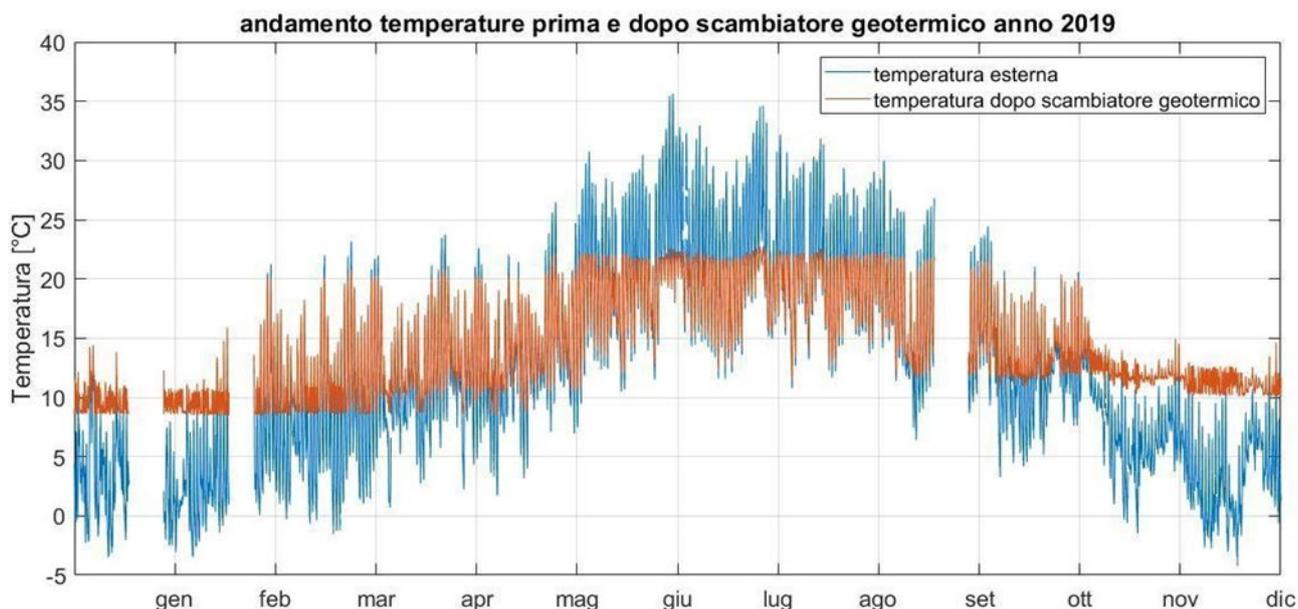


Figura 4-4 Andamento annuale delle temperature prima e dopo lo scambiatore geotermico

4.2.2 Aggregato compatto Nilan Compact P

La tipologia di pompa di calore installata nella villetta è un aggregato compatto Nilan Compact P con molteplici funzionalità:

- riscaldamento
- raffrescamento
- ventilazione meccanica con recupero di calore passivo
- produzione di acqua calda sanitaria
- deumidificazione mediante aria di rinnovo
- filtrazione

In Figura 4.5 è riportato lo schema dei vari componenti dell'aggregato compatto che sono descritti a seguire:

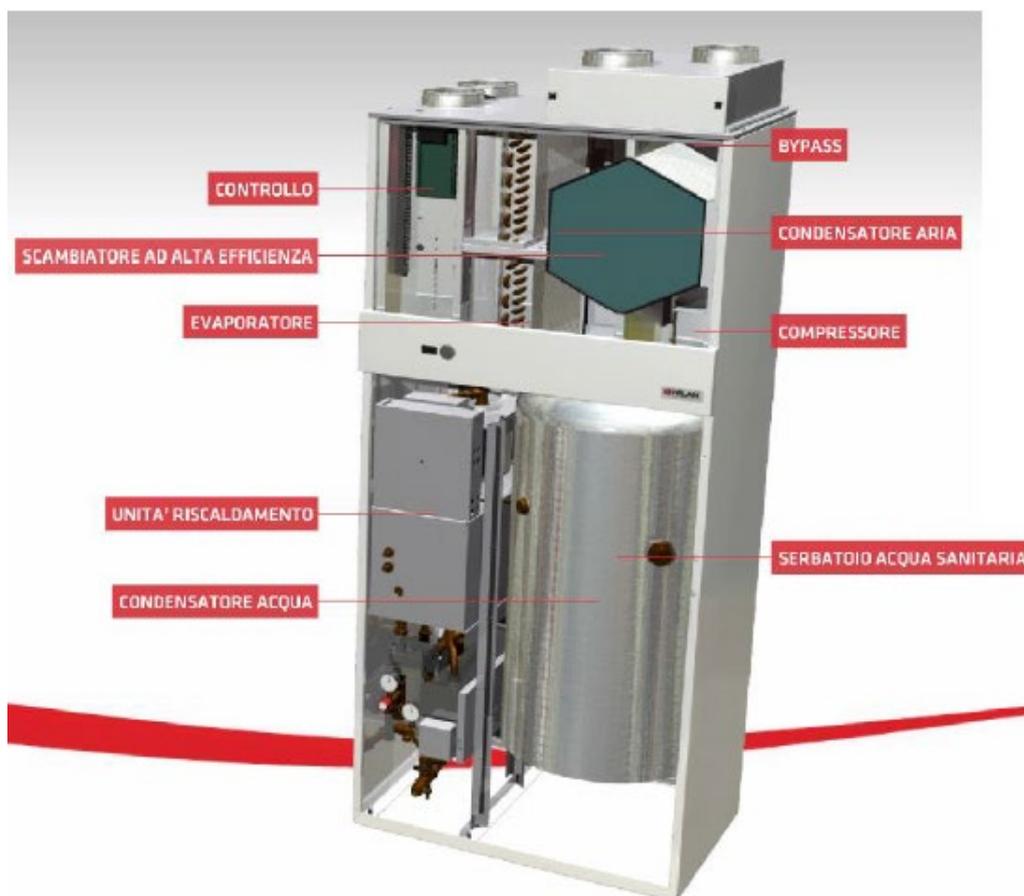


Figura 4-5 Dettaglio dei componenti costituenti l'unità Compact P

- **Controllo:** il controllo integrato consente di definire un programma settimanale di operatività dell'aggregato, programmabile a seconda delle esigenze dell'utente. Inserendo la scheda di espansione PCB è inoltre possibile comandare eventuali post-riscaldatori elettrici da canale/collettore o il recuperatore di calore dalla cappa cucina (EM-Box).
- **Bypass:** elemento essenziale nelle stagioni intermedie ovvero quando la temperatura interna dell'unità abitativa è superiore a quella esterna. Migliora l'efficienza di raffreddamento permettendo all'aria esterna di bypassare lo scambiatore di calore e di essere immessa direttamente nei locali dell'abitazione.
- **Condensatore d'aria:** nel circuito della pompa di calore regola l'emissione di calore attraverso lo scambio termico tra aria e fluido frigorigeno.

- **Scambiatore ad alta efficienza:** il componente, realizzato in polistirene, opera in controcorrente e presenta un'efficienza termica elevata che può raggiungere il 95%. Questa tipologia di scambiatori infatti presenta perdite di calore inferiori rispetto agli scambiatori in alluminio dato il minor effetto conduttivo della superficie. Inoltre, il polistirene è caratterizzato da una durata maggiore rispetto ad altri materiali.
- **Evaporatore:** l'evaporatore ha la funzione di recuperare l'energia contenuta nell'aria di scarico. Esso è un componente chiave del circuito di recupero del calore attivo (pompa di calore).
- **Compressore:** il compressore utilizzato nel circuito della pompa di calore è ermetico on-off. L'alta qualità costruttiva ne assicura un'ottima operatività ed efficienza energetica.
- **Unità di riscaldamento/raffrescamento:** la flessibilità della soluzione aggregato compatto Nilan Compact P consente di inserire all'interno della struttura un'ulteriore pompa di calore aria-acqua (AIR9) o geotermica (GEO) per fornire potenza aggiuntiva all'abitazione. Tale soluzione però non è presente nel caso studio in esame.
- **Bollitore di acqua calda sanitaria:** il bollitore ha una capacità di 180 litri ed è a isolamento schiumato e con doppia smaltatura con perdite di calore dell'ordine di $1,63 \text{ W K}^{-1}$ (da certificato PHI). Ha un elemento elettrico riscaldante interno da 1,5 kW, attivato automaticamente quando la richiesta sanitaria è elevata.
- **Condensatore d'acqua:** nel circuito della pompa di calore, il condensatore regola l'emissione di calore all'aria, recuperando energia dal flusso aspirato dai locali.
- **Filtri:** filtri standard G4, concepiti con un'ampia superficie per garantire la minor perdita di pressione. Un filtro antipolline F7 sull'aria d'ingresso è invece disponibile come opzione. L'impiego di una filtrazione di tipo meccanico garantisce una migliore funzionalità rispetto alla filtrazione elettrostatica. Quest'ultima ha infatti un funzionamento ottimale solamente in condizioni operative costanti, difficilmente riscontrabili in impianti di ventilazione concepiti per adattarsi con continuità alle richieste dell'abitazione. Se a questo si aggiungono i maggiori costi iniziali, le criticità dovute alla manutenzione (pulizia periodica degli elettrodi con liquidi detergenti), ed il consumo elettrico per il funzionamento, risulta evidente come la filtrazione meccanica sia grado di garantire elevata efficienza di filtrazione, semplicità di manutenzione (pulizia in acqua, eseguibile direttamente dall'utente) o sostituzione (consigliata con cadenza annuale) e costi esigui.
- **Sensore di umidità:** consente di regolare il ricambio d'aria sulla base del livello di umidità presente in casa e rilevato dall'unità Compact P.
- **Ventilatori centrifughi EC ad alta efficienza:** i ventilatori centrifughi sono dotati di motore Brushless elettronico in corrente continua, con velocità differenziabili lato estrazione/immissione su quattro diversi livelli operativi. Soluzione che garantisce elevata efficienza e bassi consumi elettrici.

4.2.3 Modalità di funzionamento

La particolarità dell'aggregato compatto è quella di consentire diverse modalità di funzionamento grazie alla presenza delle valvole di bypass e all'invertibilità degli scambiatori di calore lato aria che consentono il funzionamento da condensatore d'inverno e da evaporatore d'estate (Figura 4.6).

Come si evince dalla Figura 4.6, l'impianto è integrato anche con una resistenza integrativa di post riscaldamento (elemento n. 10). Tale resistenza, con potenza di picco poco superiore ai 1000 W, è installata sul condotto di immissione e entra in funzione nei periodi di picco, durante gli sbrinamenti oppure durante la produzione prioritaria di ACS, ossia quando il Compact P non riesce a sopperire al carico termico invernale e alla produzione di acqua calda sanitaria.

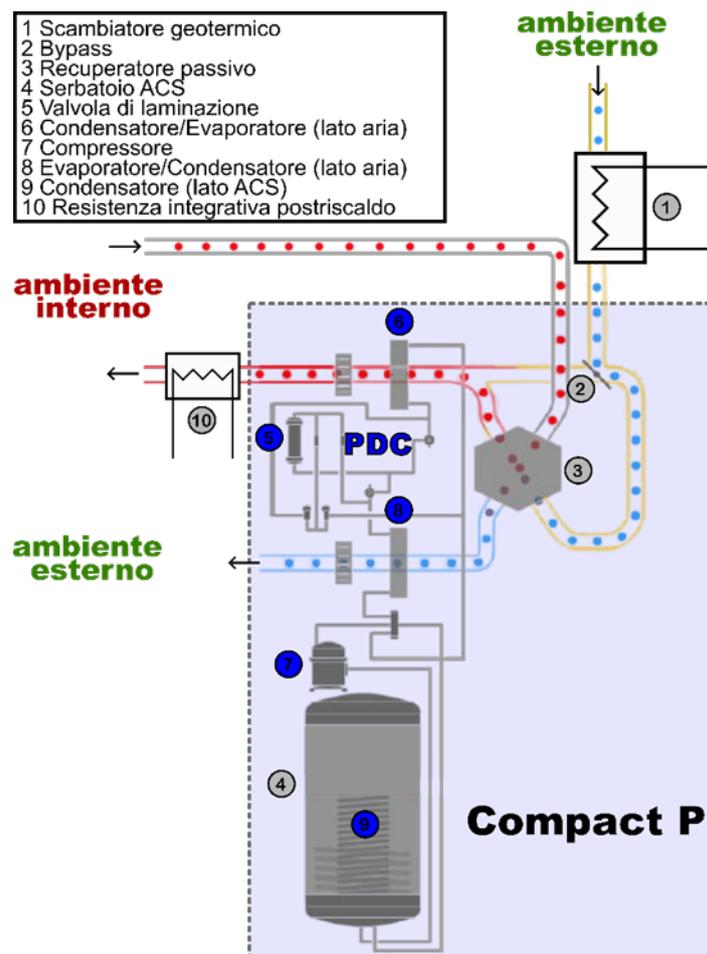
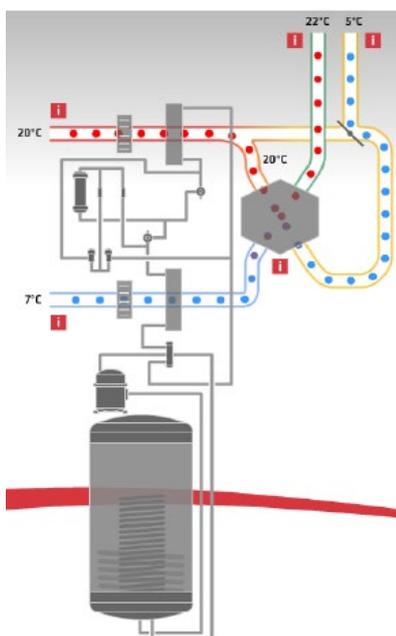


Figura 4-6 Schema di dettaglio dei componenti interni del Compact P

Tali modalità, che consentono all'impianto di ottimizzare le prestazioni in relazione alle condizioni climatiche esterne e all'utilizzo da parte dell'utenza, sono descritte brevemente a seguire.

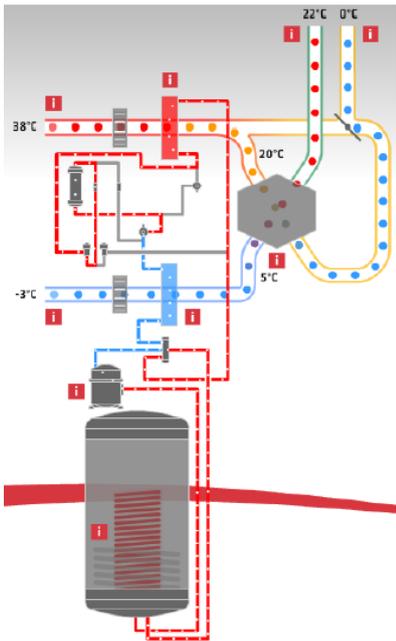


a) Recupero passivo del calore

L'aria esausta proveniente dagli ambienti e l'aria esterna di rinnovo vengono introdotte nel recuperatore passivo.

L'aria esausta più calda cede calore all'aria esterna di rinnovo. Il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore è già sufficiente per soddisfare i fabbisogni dell'abitazione, per cui il compressore non si attiva.

In questa modalità operativa, i consumi dell'unità Compact P si attestano a poche decine di Watt poiché imputabili al solo funzionamento dei ventilatori.



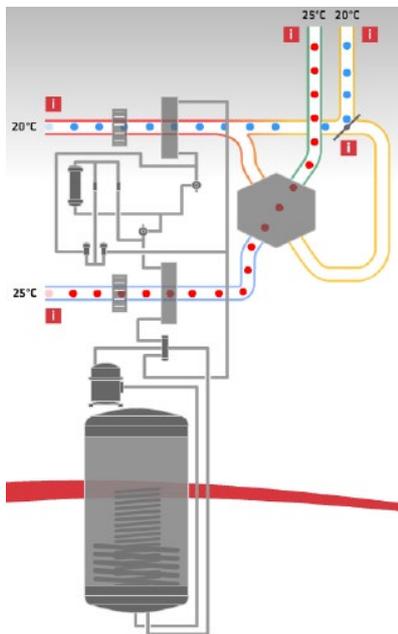
b) Recupero attivo del calore

Il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore passivo non è sufficiente per soddisfare il fabbisogno dell'abitazione, per cui è necessario attivare il recupero attivo in pompa di calore.

L'aria esausta in uscita dal recuperatore possiede infatti ancora del calore, il quale viene sfruttato per evaporare il fluido frigorifero.

Lo stesso fluido viene quindi inviato al compressore. Poi cede calore prima al serbatoio ACS e all'aria in immissione, per mezzo del condensatore.

Il consumo elettrico massimo in questa modalità operativa è inferiore a circa 500 Watt (funzione delle reali condizioni al contorno).

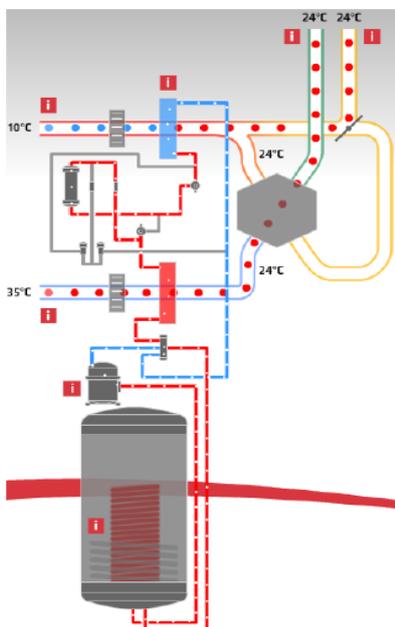


c) Bypass

Nelle stagioni intermedie, quando la temperatura negli ambienti è superiore a quella esterna, si può sfruttare direttamente l'aria di rinnovo per il mantenimento delle condizioni di comfort in ambiente.

Viene infatti attivato il bypass, grazie al quale si evita il passaggio dell'aria di rinnovo nel recuperatore passivo, immettendo la stessa direttamente in ambiente.

L'aria esausta attraversa il recuperatore e viene espulsa. Gli unici assorbimenti della macchina sono imputabili al ventilatore che, anche in questo caso, si attestano su poche decine di Watt.



d) Raffrescamento attivo

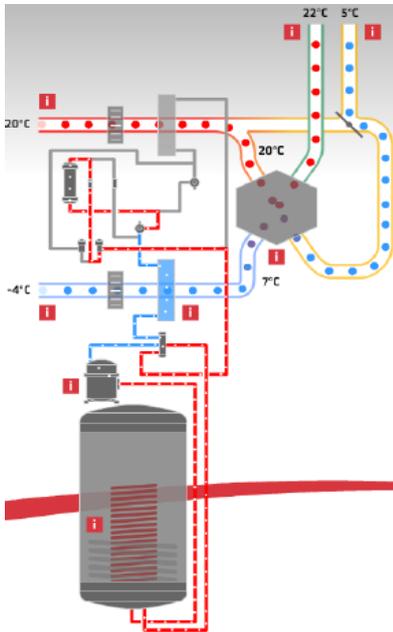
L'aria esterna di rinnovo può scambiare calore con l'aria esausta nel recuperatore passivo o, in alternativa, sfruttare il bypass (come in figura).

Se l'aria di rinnovo è a temperatura troppo alta per poter soddisfare le esigenze di raffrescamento, si attiva il compressore, l'aria cede parte del suo calore al fluido frigorifero nell'evaporatore e viene quindi immessa in ambiente.

Dall'evaporatore il fluido frigorifero viene inviato prima al compressore e, successivamente, nel serbatoio ACS dove cede calore gratuitamente allo stesso (funzionamento a recupero totale).

L'eventuale calore residuo viene infine ceduto all'aria di espulsione nel condensatore.

Il raffrescamento estivo, abbinato alla funzionalità di recupero totale, consente di raggiungere i valori più elevati di COP. Si ottiene in questi casi infatti un doppio effetto utile nonostante il consumo elettrico massimo si attesti a circa 500 Watt.



e) Produzione di acqua calda sanitaria

Quando il livello termico dell'aria di rinnovo in uscita dal recuperatore passivo è già sufficiente per il mantenimento delle condizioni di comfort in ambiente, si può sfruttare il contenuto energetico ancora presente nell'aria esausta per alimentare il serbatoio di acqua calda sanitaria.

Il fluido frigorifero prima evapora grazie al flusso d'aria esausta, viene quindi inviato al compressore ed infine condensa completamente nel serpentino interno al serbatoio ACS.

Quando la modalità di riscaldamento è attiva, il reintegro del serbatoio viene velocizzato.

Il convogliamento del calore può comunque sempre essere prioritariamente deviato sul bollitore sanitario, escludendo parzialmente la cessione di calore sull'aria di rinnovo attraverso il condensatore (funzione impostabile da pannello di controllo CTS700).

4.2.4 Prestazione di progetto

Le prestazioni dichiarate dal costruttore in riscaldamento e raffrescamento sono riportate Tabella 4.2 e Tabella 4.3 e considerano il prelievo di aria dell'ambiente esterno senza alcun tipo di recupero termico. Queste prestazioni quindi non possono considerarsi un riferimento adeguato nel caso in esame a causa della presenza – nel caso in esame - del preriscaldatore geotermico, che comporta una variazione delle prestazioni rispetto a quanto ivi dichiarato, visto che, al Compact P, non viene adottata direttamente aria esterna.

Tabella 4.2 Prestazioni dichiarate dal costruttore in modalità riscaldamento attivo

DATI PRESTAZIONALI IN MODALITA' RISCALDAMENTO													
COMPACT P	Portata d'aria [m ³ /h]	100				180				220			
	Temperatura ambiente [°C]	20				20				20			
	Umidità relativa ambiente [%]	45				45				45			
	Temperatura esterna [°C]	12	7	2	-7	12	7	2	-7	12	7	2	-7
	Umidità relativa esterna [%]	70				70				70			
	Potenza scambiatore passivo [kW]	0,234	0,350	0,510	0,720	0,352	0,640	0,910	1,430	0,542	0,830	1,220	1,730
	Potenza scambiatore attivo [kW]	0,720	0,672	0,609	0,511	1,060	0,921	0,773	0,519	1,232	1,052	0,883	0,547
	Potenza totale [kW]	0,954	1,017	1,114	1,226	1,414	1,561	1,682	1,949	1,775	1,884	2,095	2,283
	Temperatura mandata ambiente [°C]	45,62	42,6	39,0	33,6	39,1	35,5	32,6	26,1	36,2	32,6	30,3	23,8
	Potenza assorbita compressore [kW]	0,319	0,302	0,283	0,251	0,318	0,297	0,279	0,241	0,306	0,291	0,275	0,249
COP complessivo unità	2,63	3,10	3,61	4,45	3,67	4,59	5,22	6,90	4,53	5,17	5,99	7,13	

Riscaldamento EN14511_3

Tabella 4.3 Prestazioni dichiarate dal costruttore in modalità raffrescamento attivo

DATI PRESTAZIONALI IN MODALITA' RAFFRESCAMENTO										
COMPACT P	Portata d'aria [m ³ /h]	180			220			320		
	Temperatura ambiente [°C]	24			24			24		
	Umidità relativa ambiente [%]	50			50			50		
	Temperatura esterna [°C]	40	35	30	40	35	30	40	35	30
	Umidità relativa esterna [%]	60			60			60		
	Potenza scambiatore passivo [kW]	0,90	0,60	0,33	1,10	0,73	0,34	1,59	1,05	0,36
	Potenza scambiatore attivo [kW]	0,95	1,00	1,01	1,09	1,13	1,28	1,15	1,19	1,32
	Potenza totale [kW]	1,85	1,64	1,34	2,19	1,86	1,52	2,74	2,24	1,68
	Temperatura mandata ambiente [°C]	23,90	21,10	16,90	26,10	21,60	17,60	27,70	24,50	22,80
	Potenza assorbita compressore [kW]	0,42	0,40	0,38	0,42	0,40	0,38	0,42	0,40	0,38
EER unità completa	4,40	4,10	3,53	5,21	4,65	4,00	6,50	5,60	4,42	

4.3 Dati a disposizione e sistema di monitoraggio

Come si evince dalle tabelle sopra riportate, l'aggregato compatto è caratterizzato da tre possibili valori di portata d'aria di riscaldamento e raffrescamento. Il progettista dell'impianto ha fornito i dati relativi al caso studio che si riportano qui a seguire:

- Portata d'aria in condizioni di riscaldamento: 180 m³/h
- Portata d'aria in condizioni di raffrescamento: 220 m³/h

Per quanto riguarda invece il sistema di monitoraggio, si riporta a seguire l'elenco dei dati acquisiti dall'impianto con relativa frequenza di acquisizione (Figura 4.7):

- Con un intervallo di campionamento di 1 minuto
 - Temperatura dell'aria esterna;
 - Temperatura dopo lo scambiatore geotermico;
 - Temperatura di immissione dell'aria in ambiente;
 - Temperatura dell'aria esausta espulsa dall'ambiente.
- Con un intervallo di campionamento di 5 minuti:
 - La potenza assorbita dal Compact P;
 - La potenza assorbita dalla resistenza integrativa di post-riscaldamento;
 - L'energia assorbita dal Compact P;
 - L'energia assorbita dalla resistenza integrativa di post-riscaldamento.

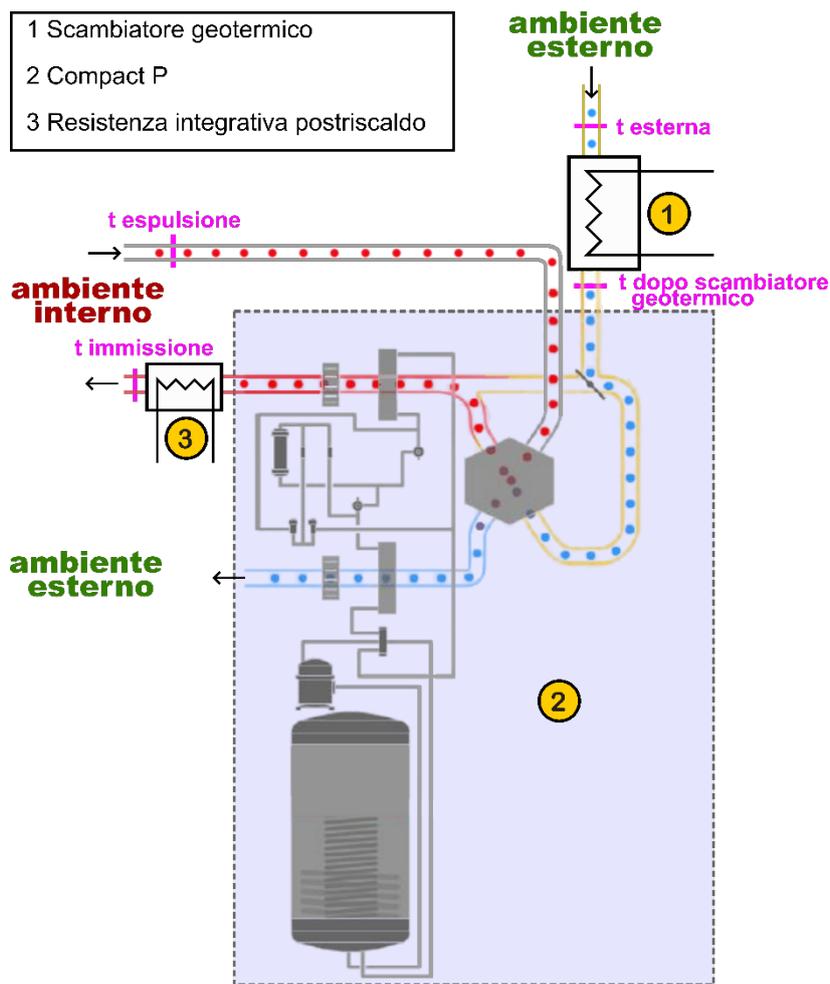


Figura 4-7 Schema impiantistico in cui sono evidenziate i punti in cui le temperature sono misurate

5 Caso studio 2

Il secondo caso studio selezionato include due complessi gemelli della provincia di Verona (Figura 3.3). Originariamente appartenenti al complesso Corte Cavalli, Corte Sara e Corte Veronica sono due condomini speculari separati da una via. Essendo allocati nella periferia di Verona, essi appartengono alla zona climatica E (2371 GG). Entrambi gli edifici sono stati edificati nel 2008 e consistono in 57 unità abitative su 6 scale.



Figura 5-1 A sinistra foto del complesso Corte Veronica, a destra foto del complesso Corte Sara

In origine entrambi i condomini erano caratterizzati dalla stessa soluzione impiantistica centralizzata con caldaia tradizionale a gas per il riscaldamento e gruppi assorbitori per il raffrescamento.

La rottura del gruppo ad assorbimento presente nel complesso di Corte Veronica ha portato ad una sua sostituzione con due pompe di calore che sono state integrate nell'impianto, andando a coprire anche la richiesta di riscaldamento da parte del condominio e mantenendo a supporto la caldaia a gas.

La situazione di specularità dei due edifici rappresenta un'ottima possibilità di confronto di sistemi di riscaldamento e raffrescamento tradizionali rispetto a sistemi full-electric (sebbene ibridati). In particolare, il confronto di Corte Veronica con il condominio gemello di Corte Sara consente di capire i reali vantaggi della tecnologia sia nella fase di integrazione/supporto dell'unità caldaia che nella stagione di raffrescamento estivo.

In entrambi i casi, la centrale termica e i gruppi frigoriferi sono collocati separatamente su due torri (Figura 5.2). La torre dove è situata la centrale termica è coperta, mentre le pompe di calore (nel caso di Corte Veronica) e i chiller (nel caso di Corte Sara) sono posizionati in torri aperte.



Figura 5-2 Sulla sinistra foto di una delle torri sulle quali sono situate le unità adibite al raffrescamento, sulla destra foto di una delle torri chiuse e contenenti la centrale termica.

5.1 Impianto di riscaldamento e raffrescamento Corte Veronica

L'impianto di riscaldamento originario, attualmente impiegato in maniera ausiliaria per il riscaldamento, prevede un sistema di distribuzione di tipo idronico secondo lo schema riportato in Figura 5.3.

L'impianto è composto da:

- 2 caldaie ACV da 218 kW ciascuna;
- 1 disgiuntore;
- 1 produttore sanitario rapido tank in tank ACV (capacità totale 800 L, capacità utile 263 L con superficie di scambio pari a 2.65 m²).

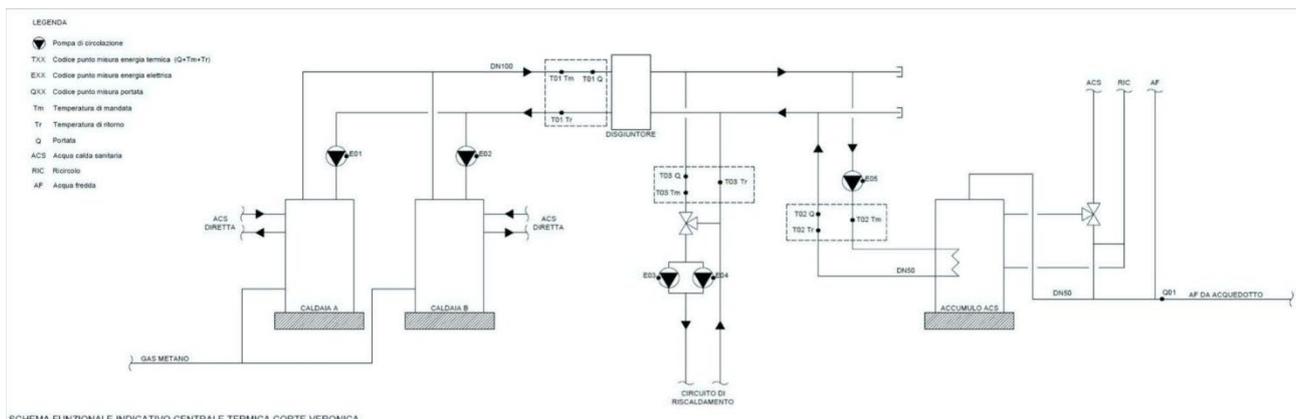


Figura 5-3 Schema funzionale dell'impianto di riscaldamento del condominio Corte Veronica

Pur essendo prevista dallo schema impiantistico, attualmente la connessione diretta per ACS direttamente dalle caldaie non è impiegata. L'acqua proveniente dalle caldaie, dopo aver attraversato il disgiuntore, viene veicolata al circuito di riscaldamento e all'accumulo di ACS. Dal serbatoio si diparte il circuito di ACS e il ricircolo. L'acqua fredda proveniente dall'acquedotto viene quindi smistata tra serbatoio e distribuzione diretta. I circolatori presenti sono:

- un gruppo circolatore gemellare per il circuito di riscaldamento;
- un circolatore per lo scambio caldaia-bollitore;
- un circolatore per ricircolo sanitario;
- 2 circolatori primari per il circuito caldaia-disgiuntore.

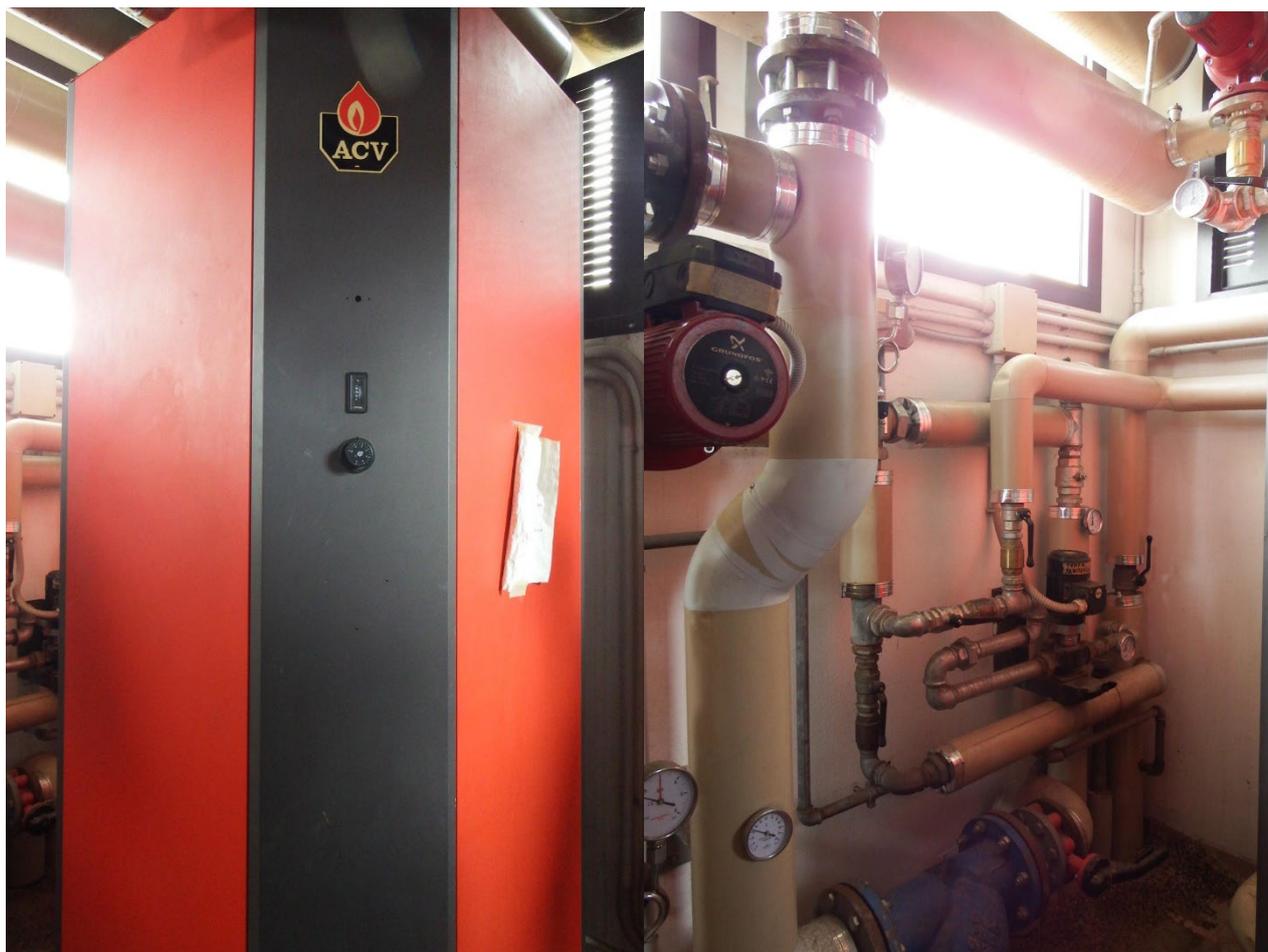


Figura 5-4 A sinistra foto del serbatoio tank in tank ACV, a destra foto del disgiuntore



Figura 5-5 A sinistra foto della pompa gemellare Grundfos, a destra foto della caldaia ACV

Come già sottolineato, nel caso di Corte Veronica, l'impianto originario è stato integrato con pompe di calore.

Le pompe di calore installate in Corte Veronica sono di tipo Daikin modello EWAYQ064CWP e presentano una potenza termica nominale di 64 kW cadauna. Le caratteristiche tecniche vengono riportate in Tabella 5.1, mentre lo schema della centrale di raffrescamento con pompe di calore viene riportato in Figura 5.7.

Tabella 5.1 Parametri prestazionali delle pompe di calore Daikin installate

DAIKIN				EWYQ064CAWP
Capacità di raffrescamento	Nom.	kW	63.3 (1)	
Capacità di riscaldamento	Nom.	kW	62.7 (2)	
Controllo della capacità	Metodo		Controllo ad Inverter	
	Capacità minima		%	25
Potenza assorbita	Raffrescamento	Nom.	kW	25.5 (1)
	Riscaldamento	Nom.	kW	21.4 (2)
EER				2.48
COP				2.93
ESEER				4.05
Dimensioni	Unità	Profondità	mm	780
		Altezza	mm	1,684
		Larghezza	mm	2,98
Peso	Unità		kg	765
Scambiatore di calore refrigerante/acqua	Tipo		Piastra saldobrasata	
	Portata acqua	Min.	l/min	72
	Volume acqua		l	9
Scambiatore calore aria	Tipo		Air cooled coil	
Ventilatore	Pressione statica esterna	Max.	Pa	78
Compressore	Quantità		6	
	Tipo di compressore		Compressore ermetico Scroll	
Livello potenza sonora	Raffrescamento	Nom.	dBA	83
Refrigerante	Tipo		R-410A	
	GWP		2,087.5	
	Circuiti	Quantità	2	
	Controllo		Valvola di espansione elettronica	
Carica	Per circuito		kg	9.60
	Per circuito		TCO2Eq	20.0
Circuito idraulico	Valvola di spurgo aria		Sì	

	Valvola di scarico / valvola di riempimento		Si
	Tubazioni	pollici	1-1/2"
	Diametro delle tubazioni di collegamento	pollici	2" (femmina)
	Valvola di sicurezza	bar	3
	Valvola di intercettazione		Si
	Volume totale acqua	l	11.0 (8)
Alimentazione	Nome		W1
	Fase		3N~
	Frequenza	Hz	50
	Tensione	V	400

Note:

- (1) - Raffreddamento: temperatura dell'acqua in ingresso evaporatore 12°C; temperatura dell'acqua in uscita evaporatore 7°C, temperatura dell'aria esterna 35°C
- (2) - Stato: Ta BS/BU 7°C/6°C - LWC 45°C (Dt=5°C)
- (3) - Stato: Ta 35°C - LWE 7°C (DT = 5°C)
- (4) - È possibile usare acqua sopra i 5°C. Tra 0°C e 5°C è necessario usare una soluzione a base di glicole (propilene o etilene) al 30%. Tra 0°C e -10°C è necessario utilizzare una soluzione a base di glicole (propilene o etilene) al 40%
- (5) - Escluso il volume d'acqua nell'unità. Nella maggior parte delle applicazioni questo volume d'acqua minimo darà risultati soddisfacenti. Tuttavia, nei processi più critici oppure nei locali con carico termico elevato, potrebbe essere necessario un volume d'acqua maggiore.
- (6) - Escluso il volume d'acqua nell'unità. Questo volume garantisce un'energia di sbrinamento sufficiente per tutte le applicazioni; tuttavia, è possibile moltiplicare questo volume per 0,66 se il setpoint di riscaldamento è ≥ 45° C (ad es. unità fan coil)
- (7) - Questa è la caduta di pressione tra attacchi in ingresso e uscita dell'unità. Ciò comprende la caduta di pressione dello scambiatore di calore lato acqua.
- (8) - Compresa tubazioni + scambiatore di calore a piastre; escluso vaso di espansione
- (9) - Nessun picco di corrente grazie al compressore con inverter



Figura 5-6 Una delle due pompe di calore Daikin EWYQ064CAWP posizionate sulla torretta aperta

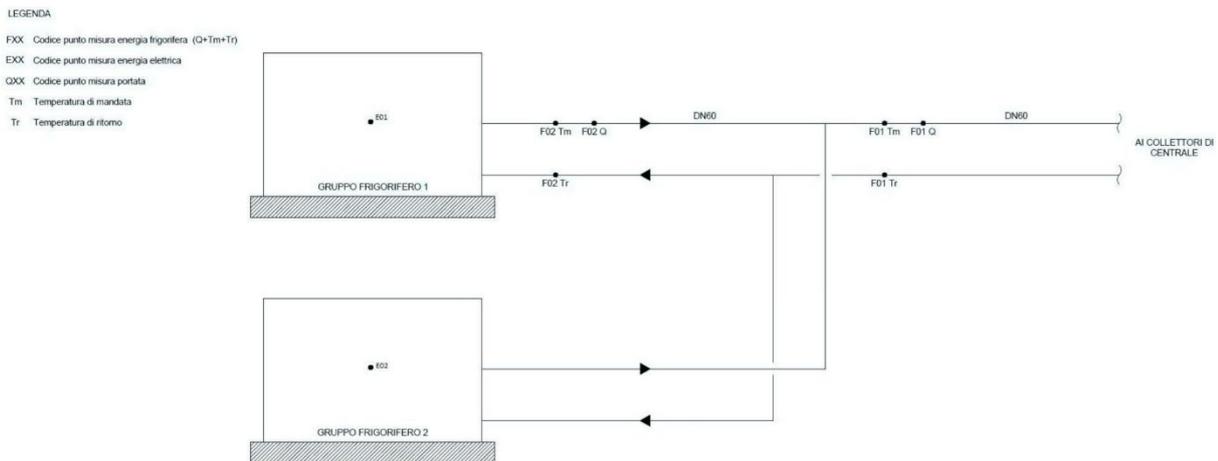


Figura 5-7 Schema funzionale della centrale frigorifera del condominio Corte Veronica

5.1.1 Gestione dell'impianto ibrido

Nello schema di gestione attuale, la pompa di calore fornisce il raffreddamento durante il periodo estivo ed il riscaldamento durante il periodo invernale. La caldaia integrativa subentra alla pompa di calore quando le temperature esterne scendono al di sotto di 2°C. La scelta della temperatura di "switch" tra i due sistemi di riscaldamento non è stata basata su considerazioni tecno-economiche ma semplicemente fissata basandosi su considerazioni pratiche.

Sarà interessante, a valle del monitoraggio dell'impianto e della valutazione dell'efficienza di funzionamento dei due sistemi di riscaldamento, fornire al manutentore indicazioni di gestione ottimizzata dell'impianto ibrido che consentano di ottimizzare il funzionamento del sistema, garantendo livelli di servizio adeguati alle singole unità di abitative. La scelta della temperatura di "switch" sarà anch'essa oggetto di analisi.

5.2 Impianto di riscaldamento e raffreddamento di Corte Sara

Corte Sara si presenta come un condominio perfettamente speculare a Corte Veronica, sia dal punto di vista dell'impianto originario di riscaldamento/raffreddamento, sia dal punto di vista costruttivo. A differenza però di Corte Veronica, non è ancora stato interessato da problemi di funzionamento al gruppo frigorifero e quindi l'impianto continua ad avere la configurazione originaria.

In particolare l'impianto di riscaldamento è basato sulla centrale termica a caldaie già descritta per Corte Sara e riportata in Figura 5.8.

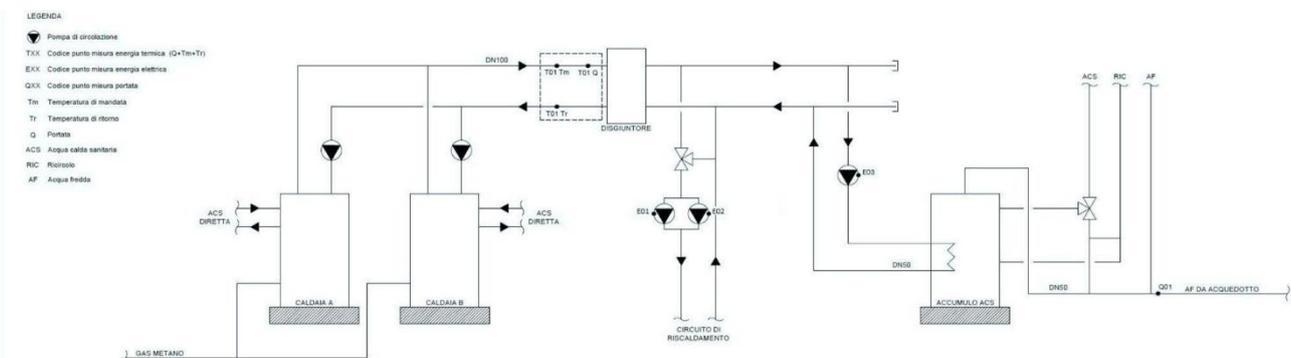


Figura 5-8 Schema funzionale della centrale termica del condominio Corte Sara

L'impianto di raffreddamento si compone invece di un gruppo frigorifero costituito da due chiller (Figura 5.9). Sono pertanto assenti le pompe di calore.

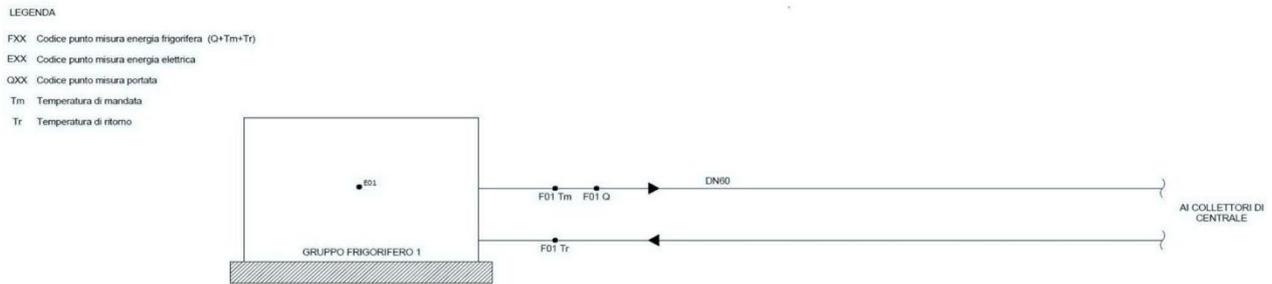


Figura 5-9 Schema funzionale della centrale frigorifera del condominio Corte Sara

Date le caratteristiche perfettamente speculari dal punto di vista costruttivo e climatico, Corte Sara offre l'opportunità unica di poter effettuare un confronto tra configurazioni impiantistiche diverse (tradizione e full-electric) in condizione operative reali.

5.3 Piano di monitoraggio

A differenza del caso studio della villetta monofamiliare, i due condomini sono entrambi privi di un sistema di monitoraggio adeguato. Al fine quindi di analizzare il funzionamento degli impianti e confrontare le prestazioni nei due condomini, si è reso necessario lo sviluppo di un piano di monitoraggio e l'installazione di strumenti di misura e di un sistema di acquisizione e salvataggio dei dati misurati.

Tale attività è stata coordinata con l'ENEA. Nello specifico, a seguito dell'individuazione del caso studio da parte dell'Università di Padova, sono stati congiuntamente definiti gli obiettivi del monitoraggio. A valle di ciò, come riportato anche nel report della linea L 3.24, l'ENEA ha proceduto alla progettazione del sistema di acquisizione (in termini, ad esempio, delle tipologie di sensoristica e di misuratori più idonei), alla definizione, individuazione ed approvvigionamento della strumentazione stessa, e alla definizione, insieme all'Università di Padova, del piano di monitoraggio in sé. A causa dei difficili spostamenti legati alla situazione epidemiologica da Covid-19, e in ragione della vicinanza geografica, è stata l'Università di Padova a seguire da vicino le fasi di installazione e collaudo della strumentazione, il cui posizionamento è reso difficile dalla complessità impiantistica e del piping.

Obiettivo del sistema di monitoraggio è consentire: i) una valutazione accurata delle prestazioni delle pompe di calore installate nel condominio Corte Veronica; ii) un confronto tra le prestazioni delle pompe di calore e le prestazioni degli impianti tradizionali (caldaie a gas + gruppi assorbitori) del condominio Corte Sara.

Alla luce di questi obiettivi, per il condominio Corte Veronica si è deciso di andare a monitorare in primo luogo i consumi di energia elettrica e la produzione di energia termica di ciascuna delle due pompe di calore al fine di determinarne le prestazioni. A questo scopo quindi si è pianificato di inserire 2 contacalorie (F01 ed F02 di Figura 5.7) e 2 contaenergia elettrica (E01 ed E02 di Figura 5.7). Per quanto riguarda i contacalorie, i limiti di spazio disponibile nella torretta delle pompe di calore impedivano l'installazione del contacalorie direttamente in uscita dalla pompa di calore n. 2 e si è deciso di monitorare l'energia termica della pompa di calore n. 1 e del complessivo così da determinare per differenza l'energia termica prodotta della pompa di calore n. 2.

Dal momento che la caldaia a gas non viene ad essere utilizzata solo per la produzione di acqua calda sanitaria ma interviene a supporto delle pompe di calore anche nella fornitura di energia termica per il riscaldamento, si è dovuto pianificare in modo dettagliata anche il monitoraggio della centrale termica originaria. Si è quindi pianificata di monitorare quanto segue:

- i consumi di gas metano delle caldaie A e B (Figura 5.3) e la relativa produzione di energia termica (T01 di Figura 5.3). Note le caratteristiche tecniche delle caldaie, risulterà così possibile valutare: i) i consumi puntuali delle stesse, ii) i profili di funzionamento (cosa essenziale per comprendere l'apporto benefico della pompa di calore in riscaldamento), iii) le loro prestazioni poiché sono note sia le portate di metano in ingresso e le caratteristiche del combustibile e la potenza termica fornita al fluido (grazie alle misure di portata e temperatura sui vari rami del circuito acqua).
- i consumi di energia elettrica dei circolatori sia del circuito principale che dei circuiti secondari (E01-E05 di Figura 5.3, nonché le portate e temperature di mandata e ritorno dei circuiti secondari (T02

e T03 di Figura 5.3), per determinare il calore scambiato al passaggio nel circuito di riscaldamento e nel serbatoio di ACS. Tali misure consentono infatti di valutare da un lato le condizioni di funzionamento dei circolatori e di calcolare l'energia termica inviata alle utenze, determinando con precisione i profili di richiesta di energia per il riscaldamento e di acqua calda sanitaria.

Il monitoraggio complessivo e dettagliato della centrale termica consentirà così di comprenderne i profili di funzionamento in relazione alla richiesta (scorporata tra acqua calda sanitaria e riscaldamento), di analizzare i consumi associati a tale funzionamento (essenziali per comprendere il contributo delle pompe di calore) nonché di valutare l'attuale logica di controllo del sistema ibrido e l'efficacia di potenziali nuove logiche.

Per quanto riguarda invece Corte Sara, il sistema di monitoraggio è stato limitato al minimo indispensabile per determinare le prestazioni delle caldaie e dei gruppi ad assorbimento ai fini del confronto con Corte Veronica.

Si è quindi pianificata l'introduzione di sensoristica che consentisse di monitorare:

- i consumi elettrici del gruppo frigorifero (E01 di Figura 5.9) al fine di stimare le prestazioni del gruppo frigorifero in termini di raffrescamento e definire così un riferimento per il confronto
- i consumi di gas metano delle caldaie A e B della centrale termica (Figura 5.8) e l'energia termica totale prodotta (T01 di Figura 5.8) al fine di stimare le prestazioni puntuali delle caldaie e definire così un riferimento per il confronto.
- I consumi elettrici dei circolatori dei circuiti secondari (E01-E03 di Figura 5.8) così da stimare, a partire dalle curve fornite dai produttori nonché dai dati sperimentali che saranno ottenuti nei circolatori gemelli di Corte Veronica, i punti di funzionamento dei circolatori e quindi i profili di richiesta di riscaldamento ed acqua calda sanitaria.

Ad integrazione della sensoristica di misura, in entrambi i condomini, si è anche pianificata l'introduzione di un sistema di acquisizione e trasmissione dati che consenta di registrare e successivamente rielaborare i dati acquisiti.

In termini di frequenza di campionamento, si è deciso di acquisire i dati dal sistema di monitoraggio ogni 5 minuti. Tale periodo di campionamento è stato ritenuto sufficiente a garantire un'accurata valutazione sia delle prestazioni dell'impianto nei transitori sia dell'efficacia di logiche di controllo alternative. In questo modo si è riusciti a garantire un ottimo compromesso tra le esigenze di analisi e la mole di dati da trasmettere, salvare ed elaborare.

Considerando che i condomini presi in esame sono costruttivamente simili, soggetti alle medesime condizioni ambientali, eserciti e mantenuti dalla medesima azienda, caratterizzati da profili di richiesta da parte delle utenze simili, si può concludere che il sistema di misura sviluppato garantirà di acquisire tutte le informazioni necessarie e con grado di accuratezza elevato per valutare i benefici tecnico-economici introdotti dall'adozione di un sistema a pompa di calore. Inoltre, grazie alla specificità del caso studio e delle misure acquisite sarà possibile sia ricostruire i profili di carico dei due condomini sia valutare se le attuali strategie di gestione consentono un utilizzo ottimale della pompa di calore. Se ciò non risulterà vero, grazie all'elaborazione dei dati e alla computazione delle prestazioni sarà possibile fornire indicazioni operative atte al miglioramento della gestione ottimizzata del sistema pompa di calore-caldaia a gas metano dove installato.

5.4 *Installazione del sistema di monitoraggio*

Una volta definito il piano di monitoraggio, ENEA si è occupata della successiva fase di individuazione sul mercato e di acquisto della sensoristica di monitoring, i cui dettagli sono presenti nel report di ENEA relativo al WP3 L3.24.

La strumentazione di misura è stata installata da una ditta locale che, peraltro, era a conoscenza dei dettagli e della complessità impiantistica del caso studio.

Per completezza, vengono anche qui riassunti i dettagli della strumentazione di monitoraggio acquisita ed installata per i due condomini.

Corte Veronica:

- **Pompe di calore:** 2 contacalorie e 2 contaenergia elettrica;
- **Circuito riscaldamento:** contacalorie generale e contaenergia elettrica sui due circolatori;
- **Caldaie:** contacalorie generale, contaenergia elettrica sulle due pompe primarie e 2 contatori gas;
- **Circuito sanitario:** contacalorie e contaenergia;
- **Centraline rilevamento dati a distanza:** 2 dispositivi di rilevamento dati (frequenza 5 minuti).

Corte Sara

- **Gruppo frigo:** contaenergia elettrica sul gruppo frigo;
- **Centrale termica:** 2 contatori del gas, 2 contaenergia elettrica sulle pompe del circuito secondario e un contacalorie;
- **Centraline rilevamento dati a distanza:** 2 dispositivi di rilevamento dati (frequenza 5 minuti).

Di seguito si indicano la quantità e il nome specifico della sensoristica installata secondo normativa DM 37/08.

Tabella 5.2 Quantità e tipologia di sensori installati

Qt.	Marca e modello	Funzione	Luogo di installazione	Identificativo in Figura
1	Siemens UH50 A70 DN65	Contacalorie	tubazioni di mandata e ritorno generali a valle delle pompe di calore (Corte Veronica)	F02 – Figura 5.7
1	Siemens UH50 A65 DN65	Contacalorie	a valle della prima pompa di calore (Corte Veronica)	F01 – Figura 5.7
1	Siemens UH50 A65 DN50	Contacalorie	tubazioni di mandata e ritorno a monte dell'accumulo di acqua calda sanitaria	T02 – Figura 5.3
3	Siemens UH50 A83 DN100	Contacalorie	tubazioni di mandata e ritorno a monte del disgiuntore (per entrambi i condomini) e a monte dei circolatori del circuito di riscaldamento (solo per Corte Veronica)	T01 – Figura 5.8 T01 – Figura 5.3 T03 – Figura 5.3
9	SENECA S504C-6	Contaenergia	sui circolatori primari, solo in Corte Veronica, e sui gruppi frigo, su entrambi i circolatori del circuito di riscaldamento e dell'ACS di Corte Veronica e su 2 circolatori di Corte Sara	E01/E02 – Figura 5.7 E03-E06 – Figura 5.3 E01 – Figura 5.9 E01/E03 – Figura 5.8
4	SETECNA REG	Centralina trasmissione dati	centrale termica di entrambi i condomini, gruppo frigo e pompe di calore	
4	Riels QAE-PN4-ALU	Contatore gas con contaimpulsi	A monte delle 2 caldaie per ciascuno dei condomini	

Una volta acquisita la strumentazione da parte di ENEA, UniPD ha supervisionato le attività di installazione, provvedendo anche ad acquisire il relativo materiale fotografico. Pertanto, a seguire, sono riportate alcune fotografie relative agli strumenti installati presso Corte Veronica e Corte Sara.

Infatti, con riferimento agli schemi di impianto precedentemente riportati, e alla Tabella 5.2, sono di seguito mostrati nella loro sede di installazione i sensori e la strumentazione di monitoraggio.



Figura 5-10 Sensori Siemens installati secondo normativa sulle pompe di calore nella torretta aperta di Corte Veronica.

Per il condominio Corte Veronica, in considerazione della presenza di due gruppi frigo, è stato necessario installare due sensori di portata (Figura 5-10): nell'immagine di sinistra è mostrato il sensore installato sulla mandata globale delle due pompe di calore (F02), mentre in quella di destra il sensore installato sulla mandata di una delle due pompe di calore (F01).

Nell'immagine che segue (Figura 5-11), sono riportate delle fotografie della centrale termica di Corte Veronica.

L'immagine di sinistra mostra i sensori Siemens installati a monte del disgiuntore (T01 della Tabella 5.2), e l'immagine a destra il sensore a monte dell'accumulo di acqua calda sanitaria (T02 della Tabella 5.2).



Figura 5-11 Sensori Siemens installati all'interno della centrale termica di Corte Veronica: a sinistra a monte del disgiuntore (T01) e a destra a monte dell'accumulo di acqua calda sanitaria (T02)

Da ultimo, si riporta a titolo esemplificativo (Figura 5-12) anche la fotografia di un contaenergia installato su un quadro a servizio del condominio Corte Veronica.

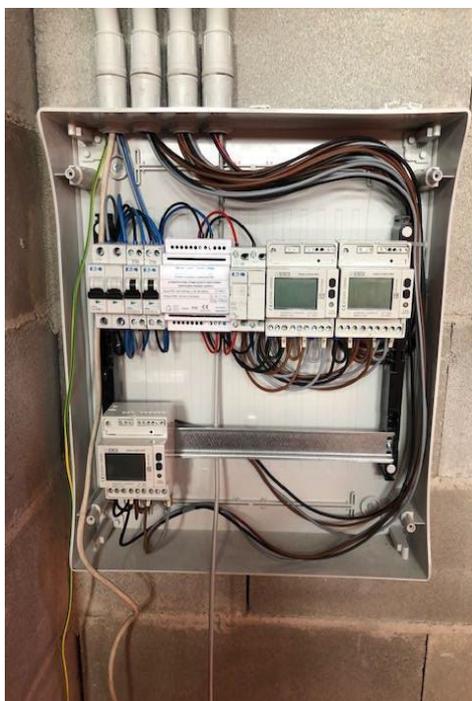


Figura 5-12 Contatori SENECA installati secondo normativa presso Corte Veronica

Per completezza, si riporta in Figura 5-13 anche la fotografia del contacalorie installato su Corte Sara, nella centrale termica nella sezione a monte del disgiuntore.

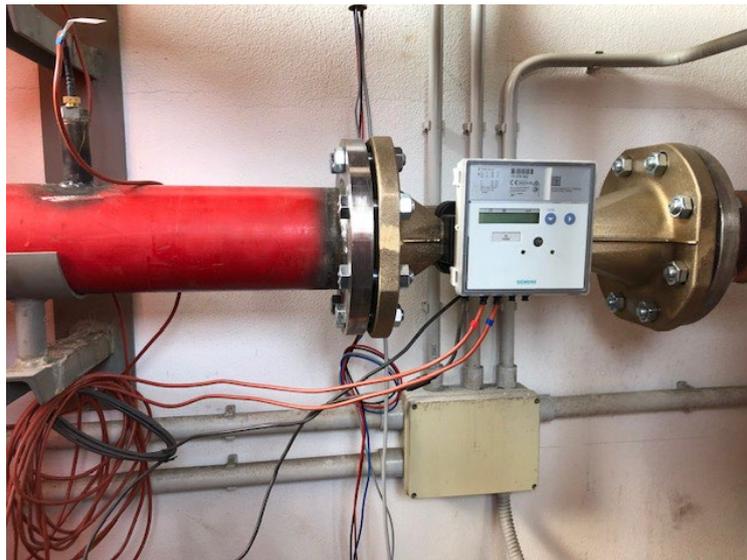


Figura 5-13 Sensore Siemens installati all'interno della centrale termica di Corte Sara a monte del disgiuntore (T01)

6. Conclusioni

Nonostante la progressiva decarbonizzazione della società spinga verso l'introduzione di tecnologie ad alta efficienza non basate su combustibili fossili, il tasso di penetrazione di tali tecnologie in ambito residenziale si conferma limitato con una media circa del 14% di edifici full-electric.

L'analisi dello stato dell'arte ha consentito di evidenziare alcuni elementi critici legati all'applicazione di tecnologie a pompa di calore:

- Lo scostamento tra le prestazioni di targa delle pompe di calore, basate su condizioni operative ideali, e quelle ottenute in condizioni reali di funzionamento.
- La disponibilità limitata di dati sperimentali relativi al funzionamento in condizioni reali delle possibili tecnologie a pompe di calore, in particolare nell'ambito degli edifici condominiali.
- La dipendenza delle prestazioni da fattori di influenza: zona climatica, tipologia di edificio, tipologia di impianto, ecc...
- La difficoltà di standardizzazione di tali prestazioni tramite indici di riferimento

A causa di queste criticità, è difficile definire casi di riferimento per valutazioni tecno-economiche relative all'applicazione di pompe di calore in condizioni operative reali e di conseguenza è estremamente complesso individuare indici di prestazione generalizzabili.

Tale mancanza di riferimenti riconosciuti e validati aumenta la diffidenza complessiva verso queste soluzioni tecnologiche e limita la disponibilità ad investimenti di questo tipo in ambito residenziale.

Per ovviare a questa carenza, durante quest'anno di attività si è condotta un'analisi estesa a tutto il Nord Italia e volta ad individuare potenziali edifici da monitorare al fine di ottenere dati reali di prestazione di tecnologie a pompa di calore.

La ricerca ha consentito di far emergere barriere di varia natura. In primo luogo si è confermato il fatto che l'ambito residenziale italiano è caratterizzato in larga percentuale da edifici con data di costruzione antecedente al 1990 e con classe energetica molto bassa. Raramente tali edifici vengono sostituiti con edifici di nuova costruzione. Ne consegue che, ad eccezione di edifici di nuova costruzione su terreni edificabili, la penetrazione di tecnologie per il riscaldamento/raffrescamento ad alta efficienza energetica è rimasta limitata in quanto deve necessariamente passare attraverso attività di riqualificazione energetica che richiedono non solo consapevolezza/sensibilità dei proprietari degli edifici ma anche investimenti consistenti (eventualmente supportati da politiche energetiche). A ciò si unisce il fatto che le decisioni di riqualificazione di edifici residenziali condominiali devono incontrare il parere positivo a maggioranza dell'assemblea condominiale con tutte le difficoltà che questo comporta. Questi aspetti spiegano perché, nonostante ci sia una sempre maggiore sensibilità verso la spesa energetica, l'ambito residenziale sia ancora caratterizzato da percentuali limitate di edifici completamente alimentati da energia elettrica.

Durante la ricerca è emerso anche una caratteristica inattesa degli edifici full-electric. A differenza infatti di quanto suggerisca la logica in termini di efficientamento (district heating), nell'attuale panorama dei nuovi edifici full-electric residenziali, non si è riscontrata una prevalenza di impianti centralizzati (pompa di calore unica a servizio del condominio), ma di soluzioni impiantistiche con impianto dedicato per ogni singola unità abitativa. Gli unici edifici caratterizzati da pompa di calore "condominiale" sono risultati essere edifici oggetto di riqualificazione energetica con caldaia a gas sostituita/integrata con una pompa di calore.

La motivazione principale è l'esigenza di autonomia di gestione ed indipendenza dalle altre unità abitative. A prescindere quindi da logiche di risparmio ed efficienza, il criterio dell'autonomia, imposto dal mercato, sembra essere preponderante e guida le scelte progettuali negli edifici di nuova costruzione.

In questo panorama, si sono identificati due casi studio oggetto di monitoraggio nella prossima linea di attività. Il primo caso riguarda una villetta monofamiliare nella provincia di Sondrio e offrirà la possibilità di studiare le prestazioni di un aggregato compatto di pompa-calore in un edificio passivo e quindi progettato e costruito in un'ottica di attenzione estrema alla richiesta energetica. Ulteriore riprova della sensibilità spinta verso gli aspetti energetici è la presenza di un sistema di monitoraggio sufficientemente completo.

Il secondo caso studio rappresenta invece un'opportunità unica nel suo genere in quanto coinvolge due condomini perfettamente speculari facenti parte di un unico complesso, ma caratterizzati da soluzioni

impiantistiche diverse. A causa infatti della rottura del gruppo frigo ad assorbimento, uno dei due condomini (Corte Veronica) è stato oggetto di riqualificazione energetica, con installazione di un sistema a pompe di calore al fine di coprire sia la richiesta di riscaldamento che quella di raffrescamento del condominio. La caldaia a gas, originariamente presente in entrambi i condomini, subentra per il riscaldamento alla pompa di calore quando le temperature esterne si abbassano troppo. L'altro condominio (Corte Sara) è rimasto invece nella configurazione originaria con caldaia alimentata a gas e gruppi assorbitori.

Questo secondo caso studio evidenzia una minore sensibilità verso aspetti di efficientamento energetico, come testimonia l'assenza di monitoraggio adeguato a definire logiche di controllo ottimizzate e la scelta di mantenere la soluzione con caldaia a gas nel condominio Corte Sara, rinunciando ai potenziali (ma poco noti e quantificabili) benefici di una soluzione a pompa di calore.

Il sistema di monitoraggio, progettato ed in fase finale di installazione, consentirà di: i) confrontare le due soluzioni impiantistiche (tradizionale e a pompa di calore), definendo opportuni indici prestazionali; ii) valutare i benefici economici derivanti dall'introduzione di tecnologie ad alta efficienza in edifici "tradizionali"; iii) ottimizzare la logica di controllo del sistema ibrido, tenendo in considerazione l'impatto indiretto in termini di comfort percepito (tramite analisi dei consumi delle singole unità abitative).

7. Riferimenti bibliografici

1. COM I., “Direttiva 2009/28 / CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili”, Fuori J Eur Union (5) (2009)
2. EHPA I., “Mercato europeo delle pompe di calore e statistiche” (2018)
URL http://www.stats.ehpa.org/hp_sales/country_cards/
3. N. Kelly, J. Cockroft, “Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data”, Energy and Buildings, 43 (2011), pp. 239-245, [10.1016/j.enbuild.2010.09.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018),
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810003385>
4. I. Staffell, D. Brett, N. Brandon, A. Hawkes, “A review of domestic heat pumps”, Energy & Environmental Science, 5 (2012), pp. 9291-9306, [10.1039/c2ee22653g](https://doi.org/10.1039/c2ee22653g)
5. A. M. Omer, “Ground-source heat pumps systems and applications”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008), pp. 344-371, [10.1016/j.rser.2006.10.003](https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.10.003),
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032106001249>
6. EHPA I., “Mercato europeo delle pompe di calore e statistiche”, (2018),
URL <https://www.ehpa.org/market-data/>
7. O. Cauret, “Heat pumps in multi-family buildings, drivers and barriers”, Heat Pumping Technologies Magazine, 39 (2021), pp. 15-17, <https://doi.org/10.23697/eaz5-wx31>
8. Amici della Terra – Assoclima, “La pompa di calore – Una tecnologia chiave per gli obiettivi 2030”, Report, (2019), URL https://www.assoclima.it/media/files/1686_rapporto_pompedicalore_2019.pdf
9. O. Ruhnau, L. Hirth, A. Praktijnjo, “Time series of heat demand and heat pump efficiency for energy system modelling”, Scientific Data, 6 (2019), 1-10, URL <https://www.nature.com/articles/s41597-019-0199-y>
10. D. Fischer, T. Wolf, J. Wapler, R. Hollinger, H. Madani, “Model-based flexibility assessment of a residential heat pump pool”, Energy, 118 (2017), pp. 853–864
11. Stiebel-Eltron, “Planung und Installation von Wärmepumpen [Planning and installation of heat pumps]”, Planning Manual (Stiebel-Eltron, 2016)
12. D. Günther, M. Miara, R. Langner, S. Helmling, H. Madani, “WP Monitor - Feldmessung von Wärmepumpenanlagen [WP Monitor - Field Measurements of Heat Pumps]”, Final Project Report (Fraunhofer ISE, 2014)
13. P. Carroll, M. Chesser, P. Lyons, “Air Source Heat Pumps field studies: A systematic literature review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 134 (2020), 110275, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120305621>
14. R. Wang, Z. Jin, X. Zhai, C. Jin, W. Luo, T. Eikevik, “Investigation of annual energy performance of a VWV air source heat pump system”, International Journal of Refrigeration, 85 (2018), pp. 383-394, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717303997>
15. S. Caird, R. Roy, S. Potter, “Domestic heat pumps in the UK: user behaviour, satisfaction and performance”, Energy Efficiency, 5 (2012), pp. 283-301
16. K. X. Le, M. J. Huang, N. N. Shah, C. Wilson, P. M. Artain, R. Byrne, N. J. Hewitt, “Techno-economic assessment of cascade air-to-water heat pump retrofitted into residential buildings using experimentally validated simulations”, Applied Energy, 250 (2019), pp. 633-652, [10.1016/j.apenergy.2019.05.041](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.041),
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919308992>
17. S. Stark, A. Loose, H. Druck, “Field test results from combined solar thermal and air-source heat pump systems with a special focus on defrosting”, Energy Procedia, 48 (2014), pp. 654-663, [10.1016/j.egypro.2014.02.076](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.076) Proceedings of the 2nd International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2013). <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214003385>
18. N. Kelly, J. Cockroft, “Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data”, Energy and Buildings, 43 (2011), pp. 239-

- 245, [10.1016/j.enbuild.2010.09.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018),
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810003385>
19. J. Allison, A. Cowie, S. Galloway, J. Hand, N. J. Kelly, B. Stephen, “Simulation, implementation and monitoring of heat pump load shifting using a predictive controller”, *Energy Conversion and Management*, 150 (2017), pp. 890-903, URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417304144>
 20. C. Underwood, “Parametric modelling of domestic air-source heat pumps”, *Energy and Buildings*, 139 (2017), pp. 578
 21. K. X. Le, M. J. Huang, N. N. Shah, C. Wilson, P. M. Artain, R. Byrne, N. J. Hewitt, “High temperature air source heat pump coupled with thermal energy storage: Comparative performances and retrofit analysis”, *Energy Procedia*, 158 (2019), pp. 3878-3885, [10.1016/j.egypro.2019.01.857](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.857) Innovative Solutions for Energy Transitions. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219308987>
 22. K. Huchtemann, D. Müller, “Evaluation of a field test with retrofit heat pumps”, *Building and Environment*, 53 (2012), pp. 100-106
 23. A. Amirirad, R. Kumar, A. S. Fung, “Performance characterization of an indoor air source heat pump water heater for residential applications in Canada”, *International Journal of Energy Research*, 42 (2018), pp. 1316-1327, [10.1002/er.3932](https://doi.org/10.1002/er.3932), URL <https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3932>. arXiv:<https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.3932>
 24. H. Li, W. Xu, Z. Yu, J. Wu, Z. Sun, “Application analyze of a ground source heat pump system in a nearly zero energy building in China”, *Energy*, 125 (2017), 140-151, URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217302906?casa_token=DQWjOGVR-8AAAAAA:iknNSqTCuafAwGmOIX3_Im_pi4tRL7pVrrtLJgtneK6LNV2P5DUoyZCJELnPPSPeVDrtZya2l4E
 25. M. Qian, D. Yan, J. An, T. Hong, J. D. Spitler, “Evaluation of thermal imbalance of ground source heat pump systems in residential buildings in China”, *Building Simulation*, 13 (2020), pp. 585-598, URL <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12273-020-0606-5>
 26. T. Matuska, B. Sourek, M. Broum, “Energy system for nearly zero energy family buildings—Experience from operation”, *Energy Reports*, 6 (2020), pp. 117-123, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719308479>
 27. L. A. Tagliafico, A. Arteconi, A. Cavalletti, C. Marafioti, A. Marchitto, “Performance of a Solar Assisted Heat Pump for Building Heating: Control Problems and Improvements”, *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1599. No. 1. IOP Publishing, 2020, URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1599/1/012036/meta>
 28. R. Bruno, F. Nicoletti, G. Cuconati, S. Perrella, D. Cirone, “Performance Indexes of an Air-Water Heat Pump Versus the Capacity Ratio: Analysis by Means of Experimental Data”, *Energies*, 13 (2020), 3391, URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3391>
 29. N. Aste, R. S. Adhikari, M. Buzzetti, C. Del Pero, H. E. Huerto-Cardenas, F. Leonforte, A. Miglioli, “nZEB: bridging the gap between design forecast and actual performance data”, *Energy and Built Environment*, (2020), URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666123320301033>
 30. A. Magrini, G. Lentini, “NZEB Analyses by Means of Dynamic Simulation and Experimental Monitoring in Mediterranean Climate”, *Energies*, 13 (2020), 4784, URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/18/4784>