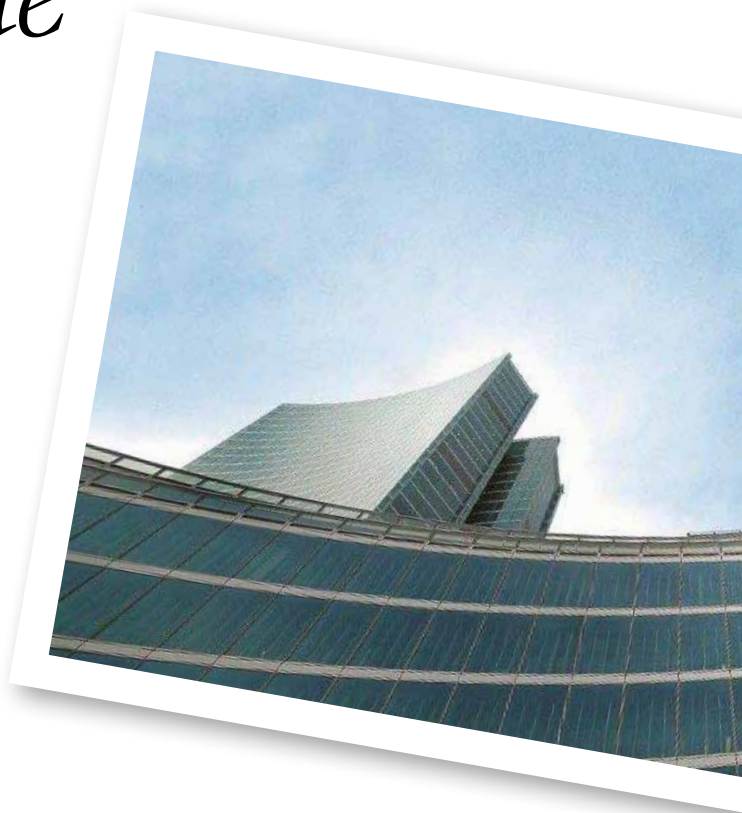


La pompa di calore per un comfort sostenibile



*La pompa
di calore
per un comfort
sostenibile*

Copyright © 2013 Editrice Alkes

Autore: Ricerca sul Sistema Energetico – RSE SpA

Impaginazione e editing: Editrice Alkes

Copertina: Fabio Lancini

Foto di copertina: Regione Lombardia / Piero Mollica. Archivio
Infrastrutture Lombarde

*Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere
riprodotta, archiviata, memorizzata o trasmessa in qualsiasi forma o mezzo,
se non nei termini previsti dalla legge che tutela i diritti d'autore.
L'autorizzazione alla riproduzione dovrà essere richiesta a RSE
Via Rubattino 54 – 20134 Milano - Italia*

Finito di stampare nel mese di Febbraio 2013 presso
Società Cooperativa Sociale Il Melograno
Via Raffaello Sanzio 42/44 – 20021 Cassina Nuova di Bollate (MI)
Prima edizione

ISBN 978-88-907527-2-8



Premessa

Il tema delle pompe di calore è uno di quelli in cui la complessità del sistema energetico trova una propria declinazione quasi paradigmatica. Si tratta di una macchina in grado di portare un contributo decisivo al perseguimento di diversi obiettivi sia di efficienza sia di comfort nel condizionamento degli edifici ma che vede convergere su di sé complessità di tipo tecnologico, regolatorio e di conoscenza degli operatori.

Un contesto quindi ideale per RSE in cui dispiegare il proprio approccio basato su attività di ricerca originale, relazione strutturale con gli operatori industriali del settore e interlocuzione diretta con le strutture di governo e regolatorie.

A questo si aggiunga che l'industria nazionale vanta una posizione di leadership riconosciuta nel settore la cui affermazione permetterebbe un potenziale di sviluppo non trascurabile.

Sul tema RSE ha svolto negli ultimi anni una intensa attività di ricerca e sviluppo che ci permette oggi di consegnare alle stampe questa quarta monografia della serie RSEview. L'approccio è quello ormai consueto: estremo rigore tecnico scientifico ma con una attenzione alla comprensione del problema nella sua accezione più ampia ed in particolare nelle sue correlazioni con il sistema elettrico ed energetico. Un approccio che ha permesso di intercettare il crescente interesse non solo dei tecnici di settore ma di una platea più ampia interessata agli argomenti energetici anche per i risvolti economici che sono sottesi.

Contrariamente ai precedenti temi toccati nella collana quello delle pompe di calore è un tema che impatta direttamente l'utente finale chiamato a scegliere, tra le diverse opzioni disponibili per il condizionamento delle proprie strutture, anche questa tecnologia non ancora conosciutissima, soprattutto nel nostro Paese. Credo quindi che molto opportunamente Walter Grattieri abbia scelto di inserire, abbandonando per un attimo gli aspetti più squisitamente tecnici e metodologici, un paio di capitoli brevi ma densi di indicazioni e suggerimenti sia sulla scelta della pompa di calore (o la non scelta di questa tecnologia quando non ne sussistano le condizioni) e

Premessa

un'analisi puntuale delle principali barriere che si frappongono alla diffusione di questa tecnologia. Un lavoro di valutazione proprio di chi attraverso un'accurata analisi è in grado di fornire valutazioni di grande sintesi e come tali di elevato peso specifico.

Concludo questa breve premessa con un passaggio preso a piene mani dalla monografia dove si indica che è “noto che un utilizzatore informato è anche (o lo diventerà presto) un consumatore esigente” in grado “di condizionare il livello di qualità energetica dei prodotti offerti”; e quindi con l'augurio che anche questo lavoro possa essere un contributo all'attivazione di un circolo virtuoso di cui tutti beneficeremo.

Stefano Besseghini

Amministratore Delegato RSE



Credits

COORDINATORE DELLA MONOGRAFIA

Walter Grattieri. Ingegnere Elettrotecnico (Politecnico di Milano, 1978), ha lavorato presso l'ENEL (Centro di Ricerca Elettrica) e il CESI, occupandosi di pianificazione dei sistemi elettrici, analisi e gestione della domanda di energia, sviluppo di elettrotecnologie per gli usi finali ed efficienza energetica. Attualmente è presso RSE, responsabile dei progetti di ricerca sull'uso razionale dell'energia e vicedirettore del dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici.

CONTRIBUTI DI:

Francesca Bazzocchi. Laureata presso il Politecnico di Milano in Ingegneria Energetica, lavora nel gruppo di ricerca *Scenari del sistema elettrico ed efficienza energetica* del dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici, dove si occupa di efficienza negli usi finali, con particolare interesse ai sistemi a pompa di calore e cogenerativi.

Antonio Capozza. Laureato in Ingegneria Nucleare (Università La Sapienza di Roma), si è specializzato in modellistica dei fenomeni fluidodinamici in sistemi di generazione e di utilizzo di energia termica ed elettrica. Ha coordinato progetti relativi all'efficienza negli usi finali dell'energia elettrica e termica. Attualmente è presso il dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici, dove svolge studi e ricerche nel campo dell'interazione tra pompe di calore e ambiente circostante.

Lorenzo Croci. Diplomato in Termotecnica, ha lavorato presso la struttura Ricerca dell'ENEL e il CESI, partecipando a progetti nel campo dell'analisi strutturale e degli usi finali dell'energia. Attualmente si occupa di attività sperimentali e progettuali su impianti innovativi di climatizzazione presso il gruppo di ricerca *Scenari del sistema elettrico ed efficienza energetica* del dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici. Dal 2009 è responsabile dei laboratori *Efficienza energetica* di RSE.

Alberto Gelmini. Laureato in Matematica (Università Cattolica Brescia) si è specializzato in studi di scenario di sviluppo dei sistemi elettrici ed energetici e nella produzione di modelli e simulatori per il sistema e il mercato elettrico. Attualmente è responsabile in RSE del progetto *Evoluzione della domanda e dell'offerta di energia elettrica e scenari futuri*.

Fabio Lanati. Laureato in Ingegneria Elettrica (Università degli Studi di Pavia), fa parte del gruppo di ricerca *Scenari del sistema elettrico ed efficienza energetica* del dipartimento Sviluppo Sistemi Elettrici di RSE. Attualmente lavora nel campo della modellistica e analisi di scenari energetici di lungo termine.

Francesco Madonna. Laureato in Ingegneria Fisica (Politecnico di Milano) e in Ingegneria Matematica (Politecnico di Torino) fa parte del dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici, in cui si occupa di efficienza energetica negli usi finali con particolare interesse alle prestazioni energetiche degli edifici e agli impianti di climatizzazione a pompe di calore.

Simone Maggiore. Laureato in Ingegneria Fisica (Politecnico di Milano) e in Ingegneria Matematica (Politecnico di Torino, attraverso l'Alta Scuola Politecnica), è entrato in RSE dopo una breve esperienza in Hewlett-Packard Italiana. Attualmente fa parte del dipartimento Sviluppo dei Sistemi Elettrici, in cui si occupa di efficienza energetica negli usi finali e di *demand-response*, in particolare per il settore residenziale e terziario.

Indice

SOMMARIO

Summary

Capitolo 1	Introduzione	12
Capitolo 2	Le tecnologie	17
2.1	Compressione e assorbimento	17
2.2	Vettori energetici e sorgenti termiche	20
2.3	Componenti principali delle macchine	22
2.3.1	Compressore	23
2.3.2	Scambiatori di calore	27
2.3.3	Valvola di laminazione	29
2.3.4	Fluido frigorigeno	29
2.3.5	Assorbitore	31
2.3.6	Generatore	31
2.4	Tipologie di impianto	32
Capitolo 3	Prestazioni ideali e prestazioni reali	37
3.1	L'efficienza energetica	37
3.2	Le prestazioni <i>in campo</i>	43
3.2.1	In sintesi	44
3.2.2	In dettaglio	49
3.2.3	Confronti virtuali	54
Capitolo 4	La sorgente geotermica	57
4.1	Problematiche del geoscambio	57
4.2	Modellazione della deriva termica	58
4.3	Dimensionamento di massima di un campo geotermico	64
Capitolo 5	Interazione fra edificio e pompa di calore	69
Capitolo 6	Analisi costi/benefici: alcuni esempi	75
6.1	Edificio monofamiliare	77
6.1.1	Climatizzazione a ciclo annuo	77
6.1.2	Richiesta di solo riscaldamento	79
6.1.3	Impianto a pompa di calore ad assorbimento a gas	80
6.1.4	Impianto a pompa di calore geotermica	81
6.1.5	In sintesi	81
6.2	Edificio condominiale	82
6.2.1	Climatizzazione a ciclo annuo	82
6.2.2	Richiesta di solo riscaldamento	83
6.2.3	Impianto con pompa di calore ad assorbimento a gas	86
6.2.4	Impianto a pompa di calore geotermica	89
6.2.5	In sintesi	89

Indice

Capitolo	7	Quale pompa di calore?	91
Capitolo	8	Pompe di calore ed obiettivi 20-20-20	95
Capitolo	9	Scenari di sviluppo delle pompe di calore	99
	9.1	Introduzione	99
	9.2	Il sistema energetico nazionale	100
	9.3	Scenari di sviluppo delle pompe di calore (BAU e PAN)	102
	9.4	Analisi di scenario	104
	9.5	Sintesi	109
Capitolo	10	Le barriere alla diffusione	111
Capitolo	11	Conclusioni	123
		Bibliografia	125

Sommario

La domanda di comfort degli edifici è in forte crescita e con essa il consumo di energia delle macchine per la climatizzazione. Il problema è noto da tempo a livello comunitario e presidiato con provvedimenti mirati a contenere l'incremento dei consumi. Quindi, negli Stati membri si sta consolidando il quadro legislativo per il recepimento della Direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico nell'edilizia, ma già incombe la recente 2010/31/UE, destinata a lanciare nuove sfide per quanto riguarda la prestazione energetica degli edifici dell'Unione. In particolare a partire dal 2020, quando per tutti gli edifici ristrutturati o di nuova costruzione diventerà cogente il requisito di *energia quasi zero*. Negli scenari energetici che dunque si configurano, un ruolo fondamentale sarà giocato proprio dalla pompa di calore: un'apparecchiatura in grado di *rigenerare*, con un input energetico ridotto, il calore a bassa temperatura catturato da una fonte rinnovabile, rendendolo idoneo a riscaldare in maniera efficiente un edificio.

L'esperienza maturata da RSE in anni di ricerca sulle pompe di calore è stata condensata in questa pubblicazione, il cui scopo è di illustrare quanto e come la pompa di calore consenta di climatizzare gli edifici, fornendo il comfort desiderato dagli occupanti, con utilizzo di energia rinnovabile, minori emissioni e consumi primari ridotti rispetto alle tecnologie concorrenti.

Il tema è affrontato da diversi punti di vista. Dapprima sono trattati aspetti tecnologici, impiantistici, prestazionali ed economici nella prospettiva del consumatore di energia, che sostiene direttamente i costi di impianto e di esercizio della climatizzazione. A questi fanno seguito considerazioni inerenti la collettività in generale, con particolare riguardo alla diffusione di pompe di calore su larga scala, della quale si analizzano gli effetti in un approccio di scenario energetico integrato. È inoltre discusso il problema del superamento delle barriere alla diffusione, oggi rappresentato da tariffe energetiche poco incentivanti e dalla difficoltà ad affermarsi tipica delle tecnologie emergenti.

Il lavoro si chiude con delle proposte, che riguardano nuove modalità di misura, modelli commerciali ed incentivazioni mirate al pieno sviluppo di un settore produttivo, che annovera l'industria nazionale fra i leader mondiali e rappresenta quindi un'importante opportunità di crescita economica e professionale per aziende e maestranze italiane.



Summary

The demand for comfort in buildings is increasing sharply and with it the energy consumption of the equipment needed for the climatisation. The problem is known for some time at UE level and overseen through measures meant to limit the increase in consumption: in fact while in the Member States the legislative framework is completing for the implementation of Directive 2002/91/EC on the energy performance of buildings, the recent 2010/31/EU already looms, intended to launch new energy challenges to the buildings of the Union. In particular, from 2020, when all renovated or newly built buildings will be subjected to the mandatory requirement of *nearly zero energy*.

In the energy scenarios that can be envisaged a fundamental role will be played by the heat pump: a device able to *regenerate* with a reduced energy input, the low-temperature heat captured from a renewable source, making it suitable for efficiently heating a building.

The experience gained by RSE through years of research on heat pumps has been condensed in this publication, whose purpose is to illustrate how the heat pump can supply the comfort desired by the occupants of buildings, with the use of renewable energy, lower emissions and reduced primary consumption than competing technologies.

The topic is approached from different points of view. Firstly, aspects related to technology, plant architecture, performance and economics are dealt with, in the perspective of the consumer who directly bears the costs of installation and operation of the equipment. Then, issues concerning the society at large are discussed, with particular regard to the diffusion of heat pumps on a wide scale, the effects of which are analyzed in an integrated energy scenario approach.

The problem is also discussed of overcoming the barriers to the diffusion of heat pumps, today represented by little incentive energy prices and the difficulties typically encountered by emerging technologies.

The work closes with some proposals concerning new methods of measurement, business models and incentive structures aimed at the full development of a manufacturing sector, which includes the domestic industry among the world leaders and represents a major opportunity of economic and professional growth for Italian companies and workers.

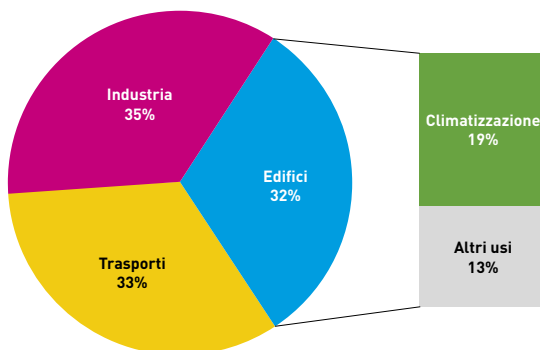
“Gli edifici sono oggi responsabili del 40 per cento del consumo globale di energia nell’Unione Europea. Il settore è in espansione, e ciò è destinato ad aumentarne il consumo energetico. Pertanto, la riduzione del consumo energetico e l’utilizzo di energia da fonti rinnovabili nel settore dell’edilizia costituiscono misure importanti, necessarie per ridurre la dipendenza energetica dell’Unione e le emissioni di gas a effetto serra”.

Così esordisce la recente Direttiva sull’efficienza nell’edilizia [1], già recepita o in via di recepimento in tutti gli Stati Membri e destinata a lanciare nuove sfide per quanto riguarda la prestazione energetica degli edifici dell’Unione. Infatti, a partire dal 2020 i Paesi UE dovranno dotarsi di strumenti legislativi atti a regolamentare il requisito di *energia quasi zero* per tutti gli edifici di nuova costruzione. Ma ancora prima dell’attuazione di tale Direttiva, in Italia potranno comunque aver luogo importanti azioni di miglioramento dell’efficienza, alcune delle quali già richieste dalla legislazione vigente [2] che, secondo le stime, nel 2020 limiteranno la domanda di energia primaria degli edifici a circa 40 Mtep/anno, corrispondente ad un terzo del totale atteso di 120-130 Mtep [3]. Quasi il 60 per cento di tale energia, ovvero il 19 per cento del totale (Figura 1.1), sarà necessaria per la climatizzazione, invernale ed estiva, e la produzione di acqua calda sanitaria, mentre il restante 40 per cento riguarderà in misura prevalente l’illuminazione e l’intrattenimento domestico, seguiti dalla refrigerazione, dal lavaggio e da altri usi energetici delle famiglie e del Terziario.

In questo scenario, un ruolo fondamentale per il contenimento dei consumi di climatizzazione sarà giocato dalla pompa di calore, un’apparecchiatura in grado di *rigenerare* con un input energetico ridotto il calore catturato da una sorgente a bassa temperatura, rendendolo idoneo a riscaldare un ambiente a temperatura più elevata.

FIGURA 1.1

Ripartizione percentuale dei consumi finali di energia attesi nel 2020.



La pompa di calore non è una scoperta recente, la sua invenzione risale infatti al 1852 ed è attribuita al fisico ed ingegnere britannico William Thomson, poi nominato Lord Kelvin, la cui fama rimarrà indissolubilmente legata all'omonima scala delle temperature, nonché ad altre scoperte e teorie scientifiche. Per la sua industrializzazione ed il relativo sviluppo commerciale è stato tuttavia necessario attendere fin quasi i nostri giorni, essendosi dovuti prima risolvere importanti problemi tecnologici, affini a quelli della refrigerazione e del condizionamento dell'aria, la cui crescente popolarità ha senza dubbio fatto da traino alla diffusione di queste macchine.

La presenza della pompa di calore in Italia è principalmente legata alla sua versatilità, che consente l'erogazione del doppio servizio, di riscaldamento e di condizionamento, con un solo apparecchio. Ciò comporta un indubbio vantaggio, che accompagnandosi ai risparmi attesi sui costi di esercizio, possibili grazie alla sua efficienza energetica, la rendono un dispositivo di sicuro interesse per la climatizzazione di buona parte degli edifici situati sul territorio nazionale.

Non si può però dare per scontato che l'efficienza sia una dote intrinseca di tutte le pompe di calore, ma affinché una pompa di calore funzioni davvero in modo efficiente devono essere salvaguardati importanti requisiti, di natura tecnologica, impiantistica e gestionale. I primi possono essere ricondotti alla qualità della progettazione e dei componenti utilizzati per la costruzione e sono, in un certo senso, indicatori dello scostamento fra le prestazioni delle macchine reali e quella teorica della *macchina di Carnot*. Tutti gli altri sono invece la causa del diverso comportamento fra il laboratorio e il *campo*, in quanto legati alle scelte effettuate circa le modalità di distribuzione ed erogazione del calore prodotto, alle variazioni di temperatura della sorgente fredda e del pozzo caldo, nonché ai frequenti passaggi da uno stato di funzionamento ad un altro. Infatti, un sistema di climatizzazione lavora sistematicamente in regime transitorio, dovendo in ogni momento *inseguire* il carico termico dell'edificio che varia al cambiare delle condizioni meteo e, così come avviene per la guida su strada di un veicolo, i suoi consumi reali finiscono col superare quelli nominali, misurati in laboratorio in condizioni stabili e controllate.

Oggi sul mercato troviamo una grande varietà di prodotti consolidati, che originano in gran parte da tre poli di aggregazione industriale: quello asiatico (Giappone, Corea e Cina), quello statunitense e quello europeo, all'interno del quale, per numero di aziende e volumi produttivi, spicca l'industria italiana. E, se nel corso degli

anni gli sforzi dei costruttori si sono concentrati sul miglioramento tecnologico dei prodotti, dando vita a macchine con prestazioni più vicine a quelle teoriche, è rimasto compito di progettisti, installatori e gestori fare in modo che i fattori impiantistici non siano di pregiudizio al loro regolare funzionamento. Ciò si ottiene attraverso il dimensionamento corretto, la scelta della sorgente termica più idonea, l'osservanza delle specifiche di installazione e l'adozione di modalità di gestione appropriate. Solo così le pompe di calore potranno funzionare nelle migliori condizioni operative, cioè per la maggior parte del tempo il più vicino possibile a quelle per le quali sono state costruite, conseguendo il duplice risultato di minimizzare i consumi e conseguire il tornaconto economico per l'utilizzatore.

La pompa di calore però non significa solo "più efficienza e minori consumi". La Direttiva Europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recepita nella legislazione italiana dal Dlgs. 28/2011, considera infatti rinnovabile anche l'energia catturata dalle pompe di calore, qualificandola come contributo ammissibile ai fini degli obiettivi nazionali obbligatori all'anno 2020¹. Il ricorso esteso alle pompe di calore diventa allora un fattore cruciale per l'attuazione del Piano di Azione Nazionale per le energie rinnovabili [4] che, a fronte di un target complessivo di 22,6 Mtep, prevede da parte delle pompe di calore un contributo di ben il 13 per cento, pari a 2,9 Mtep. Perché ciò si verifichi, sarà necessario che oltre il 20 per cento della richiesta di calore sia soddisfatta con tali apparecchiature, una sfida notevole se si considera che oggi stimiamo una copertura della domanda non superiore all'8 per cento.

Di fatto, la diffusione attuale di pompe di calore in Italia è largamente inferiore a quanto auspicabile. Questo, non solo per una carenza informativa ma anche per la presenza di barriere di tipo normativo e tariffario che, producendo oneri impropri, in parte ne disincentivano l'uso. È purtroppo un'occasione mancata di migliorare l'efficienza del sistema ed il danno che ne deriva non può essere sottovalutato. Infatti, oltre all'impatto negativo sull'ambiente e sul bilancio energetico del Paese, rischiamo di dover fronteggiare anche l'impossibilità di tener fede agli impegni internazionali sul contenimento di consumi, di emissioni e sull'utilizzo di fonti di energia rinnovabile.

¹ Per l'Italia, la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia è stabilita pari al 17 per cento.

Attraverso questa monografia il nostro obiettivo è, in primo luogo, quello di fare chiarezza sulle efficienze e sui costi delle pompe di calore, sgombrando il campo dai luoghi comuni e fornendo informazioni verificate sulle prestazioni da attendersi a seconda della natura della macchina, della località di installazione e del tipo di servizio richiesto. Bisogna poi accertare che la diffusione di pompe di calore sia compatibile con l'evoluzione del sistema energetico nazionale, in termini di impatto sul sistema di generazione elettrica, emissioni, consumi primari e di impatto sulle importazioni di prodotti energetici. Infine, vanno identificate le barriere che si frappongono alla diffusione, proponendo gli strumenti più idonei alla loro rimozione ed in grado di trasferire agli utilizzatori virtuosi parte dei benefici sociali conseguiti.

Questa pubblicazione si compone di due parti. La prima - Capitoli da 2 a 6 - riguarda l'apparecchiatura e il suo utilizzo, trattando di aspetti tecnologici, impiantistici, prestazionali ed economici nella prospettiva del consumatore di energia, che sostiene direttamente i costi di impianto e di esercizio della climatizzazione. La seconda parte - Capitoli 8, 9 e 10 - riguarda invece la collettività in generale ed affronta le problematiche della diffusione accelerata di pompe di calore, considerandone gli effetti, positivi o negativi, in un approccio di scenario energetico integrato. Il Capitolo 7 fa da cerniera fra le due parti e sintetizza quanto è opportuno sapere sul singolo componente prima di affrontare aspetti di più ampio respiro.

Il lavoro si chiude con alcune proposte, che riguardano nuove modalità di misura, modelli commerciali ed incentivazioni mirate. Innovazioni, queste, che si ritiene possano imprimere l'impulso desiderato alla diffusione della pompa di calore. Ma non solo. Anche innescare sviluppi della macchina finalizzati alla rendicontazione oggettiva del risparmio energetico e dell'uso di energia rinnovabile, nonché all'integrazione nelle logiche di gestione della domanda tipiche delle reti intelligenti. Seppur ritenute fattibili in linea di principio, sono idee non ancora del tutto definite e che probabilmente non mancheranno di far discutere, ma che rispondono pienamente allo spirito ed alla lettera di questa pubblicazione. RSE vuole infatti contribuire al dibattito tecnico con il *distillato* delle numerose pubblicazioni prodotte in anni di ricerca sul tema e con la visione del problema sviluppata dai propri ricercatori. Non solo quindi teorie scientifiche, ma anche esperienze dirette, pareri pratici e prese di posizione, a volte critiche e forse scomode, sempre però su basi costruttive e, soprattutto, indipendenti.

2.1

COMPRESSIONE E ASSORBIMENTO

La pompa di calore è una macchina comunemente usata per la climatizzazione degli ambienti, che è in grado di trasferire il calore da una sorgente a bassa temperatura ad un pozzo a temperatura maggiore; questo processo, non essendo spontaneo, richiede un certo apporto energetico, rappresentato da energia elettrica, da combustibile o da calore ad alta temperatura.

In modalità riscaldamento (Figura 2.1) una pompa di calore cattura il calore all'esterno (dall'aria, dalle acque superficiali o di falda, o dal terreno) e lo scarica all'interno dell'edificio. Le macchine reversibili, grazie alla possibilità di inversione del ciclo, possono funzionare anche in raffreddamento e in questo caso il calore viene prelevato dall'interno dell'edificio e trasferito all'aria esterna, all'acqua o al terreno.

In riferimento alla tipologia di sorgente termica utilizzata le pom-

FIGURA 2.1

Pompa di calore reversibile: funzionamento invernale (sopra) e funzionamento estivo (sotto).

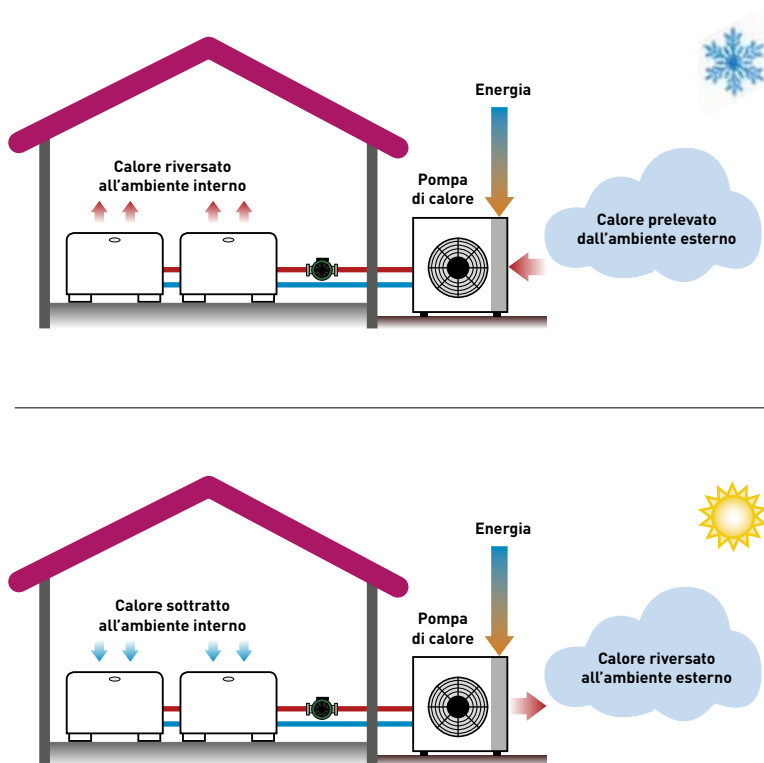
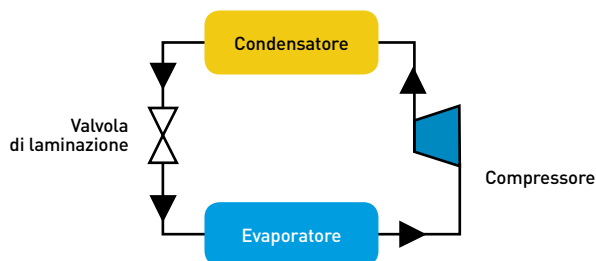


FIGURA 2.2

**Schema
di funzionamento
di una pompa
di calore
a compressione.**



pe di calore vengono classificate come aerotermiche, geotermiche o idrotermiche se sfruttano, rispettivamente l'aria, il terreno o l'acqua di superficie¹.

La quasi totalità delle pompe di calore ad oggi in commercio si basa su un ciclo a compressione di vapore o ad assorbimento. Teoricamente il *pompaggio* di calore da una sorgente più fredda a una più calda si potrebbe ottenere anche con altri cicli termodinamici quali, ad esempio, il ciclo Stirling, il ciclo ad adsorbimento o i sistemi ibridi. Alcuni di questi hanno raggiunto una certa maturità tecnologica e potrebbero rivelarsi significativi nel futuro.

La tipologia più diffusa è rappresentata dalle pompe di calore a compressione che sono costituite da quattro componenti principali: il compressore, la valvola di espansione e due scambiatori di calore (il condensatore e l'evaporatore), connessi in modo da formare un ciclo chiuso percorso da un fluido, detto fluido frigorifero o refrigerante. Con riferimento alla Figura 2.2, in una prima fase il refrigerante, allo stato di vapore, viene compresso e portato ad un livello di temperatura e pressione maggiori. Nel condensatore, poi, passa dallo stato gassoso a quello liquido, cedendo calore all'esterno. In una terza fase transita attraverso la valvola di laminazione, dove diminuiscono sia la sua pressione sia la sua temperatura e si trasforma parzialmente in vapore; infine, nell'evaporatore, il fluido assorbe calore dall'esterno ed evapora completamente.

In particolari applicazioni possono essere utilizzati due cicli a

¹ Questa classificazione corrisponde a quella data dalla Direttiva Europea 2009/28/CE, che sotto determinate condizioni assimila a rinnovabile il calore utile prodotto dalla pompa di calore, distinguendolo in base alla sorgente termica utilizzata.

compressione posti in cascata, in modo cioè che il condensatore del ciclo inferiore ceda calore all'evaporatore di quello superiore. Macchine di questo genere sono particolarmente adatte per la produzione di acqua calda ad alta temperatura.

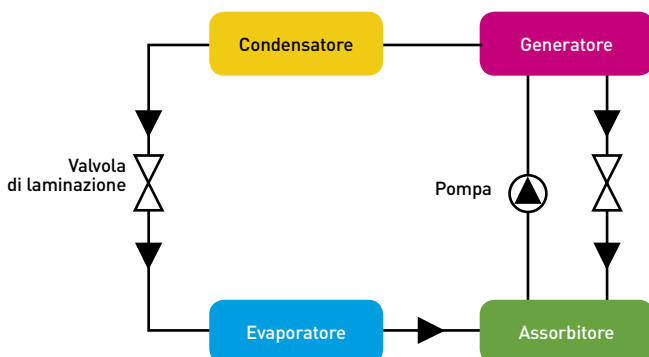
Nelle pompe di calore ad assorbimento la fase di compressione è sostituita dal gruppo generatore e assorbitore; il ciclo risulta così costituito da sei fasi percorse da due fluidi: il refrigerante e il liquido assorbente. Con riferimento alla Figura 2.3, in una prima fase il refrigerante, allo stato di vapore, viene assorbito nel fluido assorbente con rilascio di energia termica e passa quindi allo stato liquido. A questo punto la miscela viene pompata nel generatore e portata a un livello maggiore di pressione.

Qui, grazie all'apporto esterno di calore ad alta temperatura, il refrigerante evapora e si separa dal liquido assorbente che tramite una valvola di laminazione viene inviato nuovamente nell'assorbitore. Il vapore di refrigerante, invece, passa nel condensatore dove ritorna allo stato liquido cedendo calore all'esterno. Nella fase seguente il fluido frigorigeno transita attraverso la valvola di laminazione dove diminuiscono sia la sua pressione sia la sua temperatura e si trasforma parzialmente in vapore; infine, nell'evaporatore, assorbe calore ed evapora completamente.

Anche se ancora poco diffusa, esiste un'altra tipologia di pompe di calore che si basa sul ciclo ad adsorbimento in cui il fluido frigorigeno, l'acqua, viene adsorbito in un minerale poroso, la zeolite. L'acqua, posta in un ambiente sottovuoto, viene inizialmente fatta evaporare grazie a una sorgente termica a bassa temperatura (solare o geotermica); il vapore acqueo, viene quindi adsorbito dalla zeolite

FIGURA 2.3

Schema di funzionamento di una pompa di calore ad assorbimento.



con rilascio di energia termica utile che può essere quindi trasferita all'impianto.

In una seconda fase, la zeolite satura viene *rigenerata* con l'apporto di calore ad alta temperatura (ad esempio, quello rilasciato dalla combustione di gas), il vapore fuoriesce quindi dal minerale e viene fatto condensare con conseguente recupero di calore utile. Per il momento queste macchine sono state utilizzate solamente in applicazioni sperimentali.

2.2

VETTORI ENERGETICI E SORGENTI TERMICHE

Come già si è visto le pompe di calore funzionano normalmente secondo un ciclo a compressione di vapore oppure uno ad assorbimento. Le macchine del primo tipo richiedono l'azionamento meccanico del compressore che ha luogo quasi sempre con un motore elettrico o, più raramente, con un motore a combustione interna.

Le seconde necessitano invece di attivazione termica mediante la *fiamma diretta* di un combustibile oppure con del calore recuperato da un impianto di cogenerazione o da un altro processo industriale. Questo conduce a identificare nell'energia elettrica, nel gas naturale e nel calore di recupero i vettori energetici di elezione per il loro funzionamento.

Le pompe di calore azionate da un motore elettrico sono oggi di gran lunga le più diffuse e questo certamente grazie agli aspetti positivi legati all'uso dell'elettricità; primo fra tutti, la compatibilità ambientale grazie all'assenza di emissioni nel luogo di consumo² e l'ubiquità pressoché totale della rete elettrica che rende utilizzabili le pompe di calore in ogni punto del territorio. È noto che esiste il problema del *caro bolletta*, in Italia più sentito che nella maggior parte degli altri Paesi europei, ma questa realtà va messa in conto considerando il costo delle energie concorrenti, quello delle alternative tecnologiche alla pompa di calore, nonché i rispettivi rendimenti di conversione in calore.

Un altro aspetto potenzialmente critico è anche rappresentato dall'impatto sul sistema elettrico che in caso di elevata diffusione delle pompe di calore può richiedere necessità di potenziamento in vari stadi del sistema di fornitura (generazione, trasmissione, distri-

² Questo rende superflui e non applicabili i controlli obbligatori, viceversa richiesti per i generatori di calore a combustione.

buzione) per adeguarli ai nuovi carichi. Il problema è esaminato per esteso nel Capitolo 9 al quale si rimanda per ogni dettaglio. Tuttavia, si può già anticipare che a livello di sistema aggregato non si prevedono criticità anche se non possono essere escluse a priori eventuali condizioni di sovraccarico in segmenti specifici delle reti di distribuzione interessati da una elevata densità locale di pompe di calore.

L'utilizzo del vettore gas, ancorché oggi ancora ristretto, si presta per considerazioni diverse. Intanto, va osservato che la rete di distribuzione del gas naturale, seppure molto estesa, non raggiunge tutte le località e questo rappresenta in alcuni casi un limite intrinseco all'uso di pompe di calore ad attivazione termica³. Queste, inoltre, basando il loro funzionamento sulla combustione, sono soggette ai controlli ambientali e di sicurezza prescritti in questo caso. La loro maggiore efficienza rispetto ai sistemi tradizionali (caldaie) riduce però la domanda di gas e alleggerisce i problemi di approvvigionamento che nei giorni più freddi di inverni anche recenti hanno richiesto l'interruzione di forniture all'industria per rendere disponibile il gas necessario al riscaldamento degli edifici.

Le sorgenti termiche dalle quali il calore può essere *catturato* sono costituite tipicamente dall'aria esterna, dalle acque superficiali e dal sottosuolo. Ciò qualifica rispettivamente come aerotermiche, idrotermiche e geotermiche le pompe di calore che le utilizzano. Come i vettori energetici, anche le sorgenti presentano ciascuna caratteristiche peculiari. Vediamo le principali.

L'aria ha a suo favore un'inarrivabile facilità di utilizzo, essendo disponibile ovunque e senza particolare sforzo. Le prestazioni delle macchine aerotermiche sono però molto variabili con il clima della località di installazione, per non parlare del problema della formazione di ghiaccio sull'evaporatore che, limitando lo scambio termico con la sorgente, pregiudica l'efficienza. Le pompe di calore ad attivazione termica risentono comunque poco di tale fenomeno per la ridotta dipendenza della loro prestazione dalle caratteristiche della sorgente.

Inoltre, onde conseguire uno scambio termico adeguato è in genere necessario disporre di superfici consistenti e/o di grandi portate d'aria e questo obbliga quasi sempre ad accettare un difficile compromesso fra ingombro della macchina e rumore dei ventilatori.

Le acque di superficie, rappresentate dal mare, da laghi, fiumi e

³ Il limite è ancor più evidente se si considera l'impiego di calore di recupero, la cui disponibilità con caratteristiche idonee è possibile solo in alcune applicazioni industriali.

altri corsi d'acqua, presentano in generale livelli di temperatura più stabili e idonei all'uso di pompe di calore rispetto all'aria. La loro fruibilità è però ristretta alle località rivierasche, con l'ulteriore limitazione nel caso dei fiumi, della variabilità stagionale della portata e della presenza di contaminanti e di solidi in sospensione. Inoltre, nel caso di acque salmastre, il rischio di corrosione implica il ricorso a materiali pregiati per la costruzione degli scambiatori di calore. Infine, vanno messi in conto i costi delle opere di prelievo e di scarico nonché l'eventuale presenza di vincoli all'utilizzo della risorsa e, comunque, la complessità degli iter autorizzativi.

Anche il terreno rappresenta una sorgente termica interessante, in genere con caratteristiche migliori e più stabili dell'aria, nonché più disponibile delle acque superficiali. In questo caso, lo sfruttamento della sorgente avviene secondo due modalità:

- in circuito aperto, emungendo acqua dalla falda attraverso un pozzo ed estraendo da questa il calore necessario, prima di restituirla alla falda stessa mediante un altro pozzo o di scaricarla, se consentito, in un corso d'acqua superficiale;
- in circuito chiuso, inserendo nel terreno delle sonde di *geoscambio* con sviluppo verticale o orizzontale, mediante le quali è possibile catturare calore dal terreno, senza prelievo di acqua.

Entrambe le modalità presentano aspetti positivi ma anche qualche problema. Se l'uso diretto del calore dell'acqua di falda consente di raggiungere i rendimenti termodinamici più elevati, non vanno trascurati i consumi delle pompe di sollevamento che variano in funzione della profondità della falda e della cura manutentiva riservata ai filtri di depurazione i quali devono essere periodicamente liberati dal limo trascinato in sospensione. Inoltre, anche per l'uso dell'acqua di falda va messa in conto la richiesta di numerose autorizzazioni.

Con i sistemi a circuito chiuso si riducono significativamente i consumi di pompaggio, non è più richiesta la filtrazione dell'acqua ed anche l'iter autorizzativo risulta in genere semplificato. Tuttavia per assicurare la persistenza a lungo termine della risorsa geotermica è necessaria un'attenzione particolare al dimensionamento e alla realizzazione del campo sonde che impatta in misura importante sui costi di impianto.

2.3

COMPONENTI PRINCIPALI DELLE MACCHINE

Come è stato accennato, i principali componenti di una pompa di calore sono il compressore o assorbitore/generatore, gli scambiatori di calore, la valvola di laminazione, il fluido frigorigeno.

2.3.1

Compressore

Questo componente comprime il refrigerante allo stato gassoso creando un differenziale di pressione tra il condensatore e l'evaporatore. I compressori utilizzati nelle pompe di calore si dividono in due grandi famiglie:

- i compressori volumetrici, che aumentano la pressione del refrigerante riducendo il volume della camera di compressione attraverso l'applicazione di un lavoro meccanico. Si differenziano a loro volta in alternativi, rotativi e orbitanti;
- i compressori centrifughi, che trasferiscono l'energia cinetica, proveniente dal movimento rotatorio delle palette, al refrigerante, con conseguente innalzamento della pressione. Vengono utilizzati principalmente nel campo delle potenze elevate.

I compressori alternativi

Pur rappresentando da sempre la categoria più diffusa all'interno della famiglia dei compressori volumetrici, gli alternativi tendono attualmente a essere sostituiti dai compressori a vite nella fascia delle alte potenze e dagli *scroll* nelle medio-basse. Possono essere a singolo o doppio stadio: i primi lavorano nel range di temperatura tipico delle applicazioni di condizionamento dell'aria mentre i secondi possono raggiungere temperature anche molto basse (da -30 a -60°C). Vengono commercialmente classificati in tre categorie.

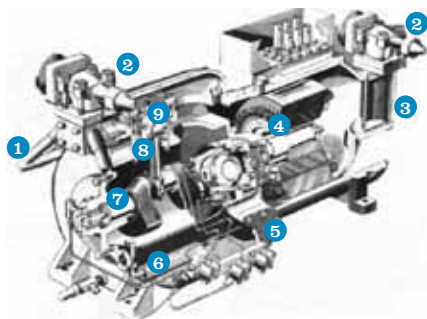
- 1) Compressori ermetici. Il compressore e il motore sono racchiusi in un medesimo involucro stagno completamente saldato dentro il quale non vi è possibilità di accesso per il servizio. In questo caso, il motore è in contatto con il vapore di fluido frigorigeno che ne raffredda gli avvolgimenti prima di subire la fase di compressione. Questi compressori vengono normalmente usati in sistemi di minima capacità frigorifera come ad esempio il frigorifero domestico.
- 2) Compressori semiermetici (o ermetici accessibili). Questi compressori presentano coperchi e testate imbullonati che consentono di accedere alle parti interne per riparazioni e manutenzione (vedi Figura 2.4). Possono essere utilizzati nelle applicazioni di capacità media e alta in alternativa ai compressori a vite di piccola capacità e ai compressori *scroll*.
- 3) Compressori aperti. In questo caso il motore e il compressore sono completamente separati e uniti mediante pulegge e cinghie o un giunto elastico. Il compressore aperto è caratterizzato da una migliore flessibilità operativa poiché è possibile scegliere il motore elettrico e la velocità di rotazione ma può essere soggetto

FIGURA 2.4

**Compressore
alternativo
semiermetico [7].**

LEGENDA:

- 1 Collettori esterni
del gas di mandata
- 2 Rubinetti sul gas
di mandata
e aspirazione
- 3 Filtro meccanico
- 4 Motore elettrico
- 5 Valvole solenoidi
di controllo
- 6 Filtro dell'olio
lubrificante
- 7 Albero a gomiti
e pompa dell'olio
- 8 Pistoni e camicie
- 9 Valvole di mandata
e aspirazione del
gas frigorifero



a perdite di fluido specialmente nei periodi di inattività. Questa configurazione è oggi utilizzata solo per le potenze più elevate per gli impianti a bordo dei veicoli oppure quando (raramente) è richiesto l'uso di ammoniaca come fluido refrigerante la quale, in realizzazioni ermetiche e semiermetiche, può corrodere il rame degli avvolgimenti del motore elettrico.

I compressori rotativi

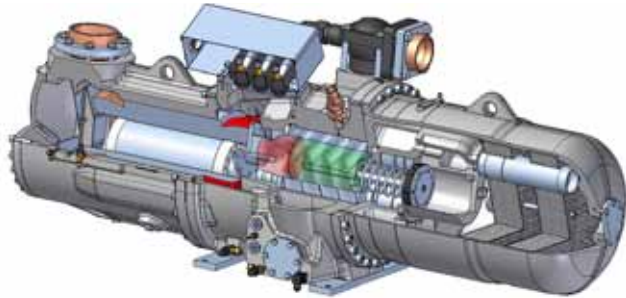
I compressori rotativi sono molto diffusi nel campo del condizionamento dell'aria per le applicazioni domestiche poiché spesso impiegati nelle macchine di modesta potenza. Sono costituiti da un rotore che ruota all'interno di un cilindro e possono essere a lama fissa o a lama rotante. Nei primi il punto di tangenza tra il rotore e la camicia del cilindro si sposta continuamente sulla circonferenza di quest'ultimo, in senso corrispondente alla rotazione. Le zone di aspirazione e compressione del refrigerante vengono separate da una lama fissa, che aderisce al rotore per effetto di una molla.

I secondi possono comprendere, invece, due o quattro lame che sono situate entro il corpo stesso del rotore e che contribuiscono allo svolgimento delle fasi di aspirazione e compressione mentre il punto di contatto del rotore con il cilindro rimane fisso. I compressori rotativi a lama fissa (detti anche *rolling piston*) vengono principalmente usati nelle piccole applicazioni domestiche, mentre quelli a lama rotante possono trovare applicazione laddove è richiesta un'elevata compattezza come, ad esempio, nei mezzi di trasporto [5].

Appartengono a questa categoria anche i compressori a vite (vedi Figura 2.5) che sono costituiti essenzialmente da un motore di trazione e da due elementi accoppiati che ruotano l'uno in senso opposto all'altro il cui profilo agisce in modo da esercitare una riduzione del volume occupato dal gas. Questi compressori trovano larga ap-

FIGURA 2.5

Spaccato
di un compressore
a vite. (Clivet)



plicazione in diversi settori, e in particolare dove vengono richieste grandi potenze frigorifere (da 100 kW a 2 MW [6]), in quanto la loro efficienza migliora all'aumentare della taglia a causa del minor peso delle perdite di trafilamento.

I compressori orbitanti

Il compressore a spirale orbitante, o *scroll*, è costituito da due spirali, una fissa e una mobile (vedi Figura 2.6), posizionate una dentro l'altra e racchiuse da un involucro. Il movimento della spirale inferiore consente l'aspirazione del gas refrigerante dall'esterno e la compressione durante il movimento verso la parte centrale dell'accoppiamento tra le spirali.

Infine il gas compresso viene espulso attraverso un orifizio situato nella parte centrale della spirale fissa. Questo processo avviene in modo continuo e uniforme ed è quindi privo di vibrazioni e pulsazioni. Il compressore *scroll* presenta i vantaggi dell'assenza di valvole,

FIGURA 2.6

Compressori *scroll*.
(Clivet)



della ridotta presenza di parti in movimento e garantisce minore rumorosità, peso ed ingombro rispetto ad un equivalente compressore alternativo; inoltre non richiede l'iniezione di olio per la lubrificazione delle parti in movimento.

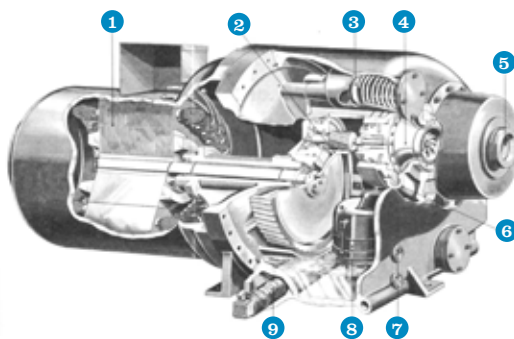
Anche le perdite per attriti meccanici sono ridotte, in quanto le variazioni del volume interno sono generate da piccoli spostamenti della parte mobile. Il compressore *scroll* copre il campo di potenze comprese tra i pochi kW fino ad oltre i 200 kW di potenza frigorifera [6].

FIGURA 2.7

Compressore centrifugo monostadio semiermetico [7].

LEGENDA:

- 1 Motore elettrico
- 2 Moltiplicatore di giri a ingranaggi
- 3 Pistone
- 4 Girante
- 5 Ingresso gas frigorifero
- 6 Voluta della girante
- 7 Spia livelli olio
- 8 Pompa principale dell'olio ermetica
- 9 Elettroscaldatore dell'olio



I compressori centrifughi

I compressori centrifughi sono costituiti essenzialmente da una girante palettata, situata all'interno di un'opportuna camera, accoppiata ad un motore di trascinamento. La girante viene fatta ruotare ad alta velocità e le palette imprime al refrigerante un'energia cinetica elevata, sospingendolo attraverso la ristretta luce di mandata e aumentandone così la pressione. Questi compressori sono impiegati in macchine di grande o grandissima potenza (da 350 kW a 35 MW) [7].

Attualmente, i compressori più utilizzati nelle pompe di calore per uso domestico sono i compressori *scroll* e i compressori rotativi (*rolling piston*) nel caso di macchine aerotermiche mentre per gli impianti ad acqua (geotermici o ad acqua di falda) vengono impiegati i compressori *scroll*, i compressori a rotore eccentrico, e per impianti di potenza media o grande i compressori a vite.

Nel campo della climatizzazione, caratterizzato da ampie variazioni dei carichi termici, è particolarmente importante per l'efficienza energetica stagionale il comportamento dei componenti a carico parziale. La parzializzazione del lavoro fornito dal compressore può avvenire con diverse metodologie.

Le tecnologie

Il metodo più usato nei piccoli sistemi fino a non molto tempo fa consisteva nello spegnimento e riaccensione ciclici della macchina in funzione del carico termico. Oggi, tuttavia, si va rapidamente diffondendo la regolazione a velocità variabile del compressore. Questo è possibile mediante l'inverter con il quale viene variata secondo necessità la frequenza di alimentazione e quindi la velocità di rotazione del motore elettrico che trascina il compressore. Così facendo, si migliora il rendimento in quanto diminuiscono le perdite legate alla velocità di rotazione della macchina e si riducono inoltre gli stress meccanici dovuti ai continui avviamenti e arresti.

Altre modalità, adatte ad impianti di taglia maggiore, prevedono l'adozione di più compressori inseribili in sequenza, in funzione del carico termico richiesto, uno dei quali può a sua volta essere dotato di inverter per una regolazione più fine della potenza termica prodotta. In aggiunta o in alternativa si ricorre anche a dispositivi di bypass del fluido di lavoro: meccanismi *alzavalvole* per i compressori alternativi, valvola *a cassetto* per i compressori a vite, eccetera.

2.3.2

Scambiatori di calore

Il condensatore e l'evaporatore sono degli scambiatori di calore che consentono il trasferimento di energia dal fluido frigorigeno al pozzo di calore o viceversa. Il condensatore permette al refrigerante, entrante come vapore surriscaldato, di raffreddarsi e condensare cedendo calore all'ambiente da riscaldare. Nella maggior parte dei casi il fluido viene poi sottoraffreddato di alcuni gradi prima di essere inviato alla valvola di laminazione.

L'evaporatore, invece, riceve la miscela uscente dalla valvola d'espansione e la pone in contatto termico con un fluido a temperatura maggiore. Il refrigerante assorbe quindi calore dall'esterno ed evapora fino a surriscaldarsi.

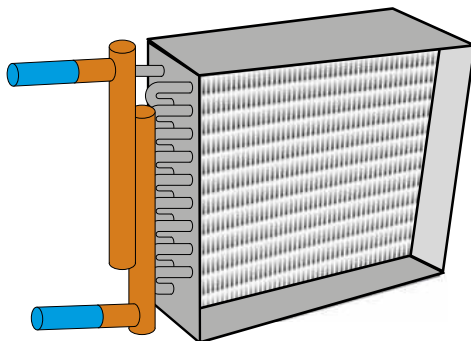
Le caratteristiche costruttive di questi componenti dipendono principalmente dalla natura delle sorgenti calda e fredda; ovvero, se viene utilizzata l'aria o l'acqua (di falda o proveniente da un circuito chiuso geotermico). Le famiglie di scambiatori di calore possono essere quindi suddivise in: scambiatori refrigerante/aria e scambiatori refrigerante/acqua.

Scambiatori refrigerante/aria

Vengono generalmente utilizzate batterie a tubo alettato (vedi Figura 2.8) che garantiscono un maggior coefficiente di scambio termico dovuto alla maggiore superficie di contatto tra i due fluidi. Questi

FIGURA 2.8

Scambiatore
a tubi alettati.
(Grundfos)



scambiatori sono comunemente raggruppati in batterie a pacco dove il fluido refrigerante scorre all'interno di uno o più ranghi di tubi mentre l'aria attraversa trasversalmente la superficie alettata.

La geometria e il materiale delle alette variano a seconda dell'applicazione e del tipo di refrigerante utilizzato all'interno del ciclo; possono essere in alluminio, in rame, o con ricopertura di stagno in presenza di problemi di corrosione.

Scambiatori refrigerante/acqua

Quando lo scambio termico avviene tra due liquidi possono essere utilizzati gli scambiatori a piastre (vedi Figura 2.9). Questi compo-

FIGURA 2.9

Scambiatori
a piastre [7].

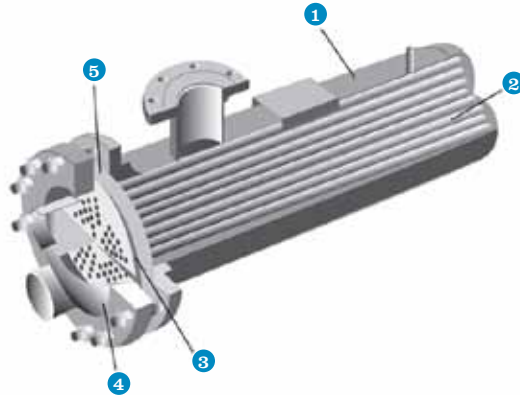


FIGURA 2.10

Scambiatore di calore a fascio tubiero.
(Grundfos)

LEGENDA:

- 1 Mantello
- 2 Fascio tubiero
- 3 Guarnizioni
- 4 Testa
- 5 Piastra tubiera



nenti sono costituiti da piastre saldo brasate in modo da creare due circuiti separati percorsi in controcorrente dai fluidi. Negli impianti di grandi dimensioni possono essere anche impiegati gli scambiatori a fascio tubiero (vedi Figura 2.10) che sono costituiti da un mantello percorso all'interno da tubi in parallelo.

2.3.3

FIGURA 2.11

Valvola di laminazione elettronica.
(Castel)



Valvola di laminazione

La valvola di laminazione è il dispositivo atto a ridurre la pressione del refrigerante da quella di condensazione a quella di evaporazione. Tale operazione induce nel fluido una parziale evaporazione: il fluido entrante è liquido mentre in uscita si ottiene una miscela composta da liquido saturo con un piccolo titolo di vapore.

Esistono vari tipi di valvola di laminazione, i più semplici sono costituiti da un restringimento del condotto in cui circola il fluido ottenuto mediante un orifizio o un tubo capillare. Le macchine più sofisticate dispongono invece di una regolazione della valvola di tipo termostatico in grado di adattare il flusso di refrigerante in base alle condizioni in uscita dall'evaporatore (vedi Figura 2.11).

2.3.4

Fluido frigorifero

Il fluido frigorifero, o refrigerante, è il fluido di lavoro nel ciclo di una pompa di calore. Questo fluido assorbe calore da un ambiente, durante la fase di evaporazione, per poi riversarlo in un altro, durante quella di condensazione.

Esistono numerosi fluidi frigoriferi utilizzabili nelle applicazioni di climatizzazione, di tipo naturale (come l'ammoniaca e l'anidride

carbonica) o di sintesi; la loro scelta dipende dal miglior compromesso tra le proprietà termofisiche e le esigenze del ciclo e dei vari componenti.

In generale, un refrigerante deve soddisfare diversi requisiti riguardanti oltre alle buone proprietà di scambio termico la stabilità chimica nelle condizioni di utilizzo, la non infiammabilità e la bassa tossicità per alcune specifiche applicazioni.

Le prime applicazioni nel campo della refrigerazione hanno visto l'utilizzo dei fluidi naturali, anidride carbonica e ammoniaca, che presto sono stati però sostituiti da quelli artificiali, come i clorofluorocarburi (CFC), gli idroclorofluorocarburi (HCFC), gli idrofluorocarburi (HFC) o le miscele (come l'R407C o l'R410A).

I sempre più stringenti requisiti per la tutela dello strato di ozono hanno però portato a bandire entro il 2030 i fluidi contenenti cloro ed entro il 2015 l'utilizzo degli HCFC, tra cui l'R22. Si pone dunque il problema della sostituzione di questo fluido che era il più comunemente usato negli impianti di climatizzazione.

Nel campo delle pompe di calore a compressione l'R22 è già stato progressivamente sostituito dall'R407C e, negli impianti di nuova progettazione, dall'R410A che ha una migliore adattabilità a sistemi che prevedono l'inversione del ciclo. Nelle macchine ad acqua dotate di compressore a vite viene spesso usato l'R134a (così come per le applicazioni a bordo degli autoveicoli). Nelle macchine a doppio stadio viene normalmente utilizzato l'R410A nel ciclo inferiore e l'R134a in quello superiore che raggiunge temperature di condensazione maggiori.

La crescente preoccupazione per la tutela e la sostenibilità ambientale ha riportato l'interesse sui fluidi naturali, innocui nei confronti della biosfera, come gli idrocarburi (propano, butano e propilene), l'ammoniaca e l'anidride carbonica. In particolare, quest'ultima può essere utilizzata in alcune particolari applicazioni qualora venga richiesta acqua ad alta temperatura (per la produzione di acqua calda sanitaria o per processi industriali) eventualmente in contemporanea con esigenze di refrigerazione [8].

Nel caso della pompa di calore ad assorbimento si incontrano due fluidi di lavoro: il fluido refrigerante e il fluido assorbente. Questi due componenti devono avere una forte affinità, cioè la sostanza assorbente deve avere un'elevata capacità di assorbire i vapori dell'altra e portarli in soluzione. Le coppie di fluidi comunemente usate sono: ammoniaca/acqua e acqua/bromuro di litio.

Nel primo caso, il fluido refrigerante è l'ammoniaca e l'assorbente è l'acqua mentre, nel secondo, l'acqua circola nel ciclo frigorifero

Le tecnologie

e il bromuro di litio è la sostanza assorbente. Nella realtà però, la miscela acqua/bromuro di litio presenta caratteristiche che la rendono raramente utilizzabile per il riscaldamento incontrandola piuttosto nelle grandi macchine refrigeratrici per applicazioni nel condizionamento dell'aria o nella refrigerazione industriale.

La miscela ammoniacale/acqua è invece utilizzabile sia in riscaldamento sia in raffrescamento.

2.3.5

Assorbitore

L'assorbitore è il componente nel quale il refrigerante, sotto forma di vapore, viene assorbito nel liquido assorbente spruzzato dall'alto in modo da favorire il contatto tra i due fluidi (vedi Figura 2.12). Questo processo è esotermico, il calore prodotto viene asportato da una serpentina percorsa dalla miscela di refrigerante e liquido assorbente diretta al generatore che si preriscalda diminuendo così l'apporto di calore richiesto dalla fonte esterna.

2.3.6

Generatore

Il generatore è il componente che garantisce la separazione tra la miscela di refrigerante e liquido assorbente (vedi Figura 2.13). Per questo passaggio è necessario l'apporto esterno di calore ad alta temperatura che può essere garantito dalla combustione diretta di gas o da calore di scarto di altri processi. Il vapore di refrigerante fuoriesce dall'alto del generatore mentre il liquido assorbente si deposita sul fondo e viene inviato nuovamente nell'assorbitore attraverso una

FIGURA 2.12

Raffigurazione schematica di un assorbitore. (Robur)

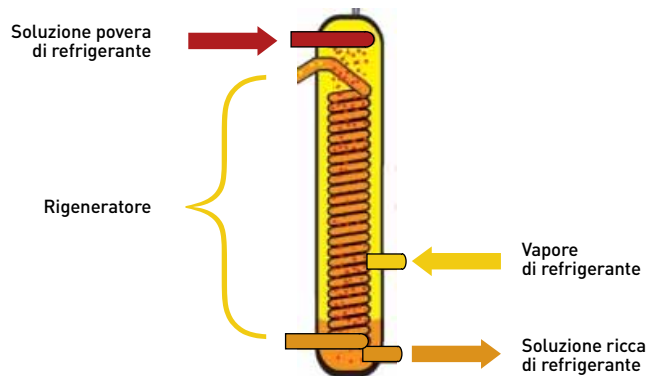
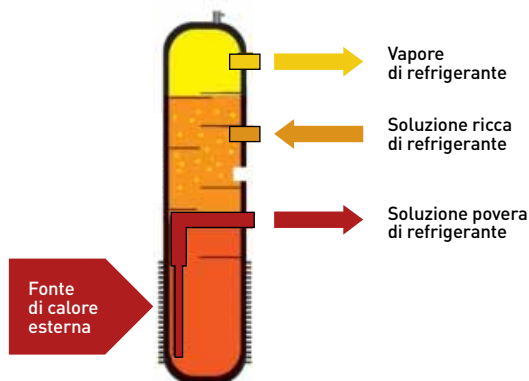


FIGURA 2.13

Raffigurazione schematica di un generatore.
(Robur)



valvola di laminazione. Se la macchina utilizza il calore derivante dalla combustione del gas, il generatore è costituito anche da un bruciatore che deve trasmettere il calore generato alla miscela.

2.4

TIPOLOGIE DI IMPIANTO

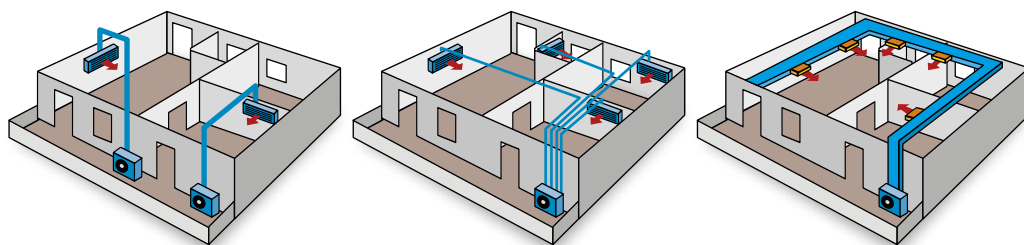
La pompa di calore deve poi essere abbinata ad un opportuno sistema di distribuzione in grado di trasportare (o asportare) il calore all'interno dei locali. Il fluido di distribuzione all'interno dei locali può essere l'aria (quella dell'ambiente per i sistemi ad espansione diretta oppure quella dei canali di immissione per i sistemi a tutt'aria) e l'acqua (se l'impianto è dotato di sistema idronico che distribuisce il calore in terminali situati nei locali).

Gli impianti ad aria possono essere a espansione diretta o tutt'aria. Gli impianti di media o piccola potenza possono essere di entrambe le categorie: sono costituiti da un'unità esterna e una o più unità interne (mono o multisplit), raccordate tra loro mediante tubazioni nelle quali scorre il refrigerante oppure da canalizzazioni per il trasporto dell'aria (vedi Figura 2.14). Nei settori terziario e residenziale si può ricorrere anche a sistemi con flusso di refrigerante variabile (chiamati VRF o VRV a seconda della casa produttrice); questi impianti risultano essere molto efficienti in tutte quelle applicazioni con carichi estremamente variabili.

Negli impianti di grosse dimensioni si possono utilizzare i sistemi a tutt'aria costituiti da una o più unità di climatizzazione dalle quali si dirama un circuito di canali che porta l'aria trattata nei vari locali

FIGURA 2.14

Soluzioni impiantistiche, da sinistra a destra: monosplit, multisplit, canalizzato.



con opportuni diffusori di mandata. Questo tipo di impianto comprende un sistema di ventilazione meccanica grazie al quale l'aria ambiente viene estratta dai singoli locali e in parte rimandata all'unità di trattamento aria e in parte espulsa all'esterno, dopo, eventualmente, un recupero del calore attraverso delle batterie di scambio termico. Impianti di questo tipo sono anche quelli *rooftop*, utilizzati prevalentemente nel settore terziario con ambienti di grandi dimensioni (sale spettacolo, grande distribuzione) dove l'unità di climatizzazione è posta sul tetto e i canali di mandata e ripresa distribuiscono l'aria nei locali da climatizzare (vedi Figura 2.15).

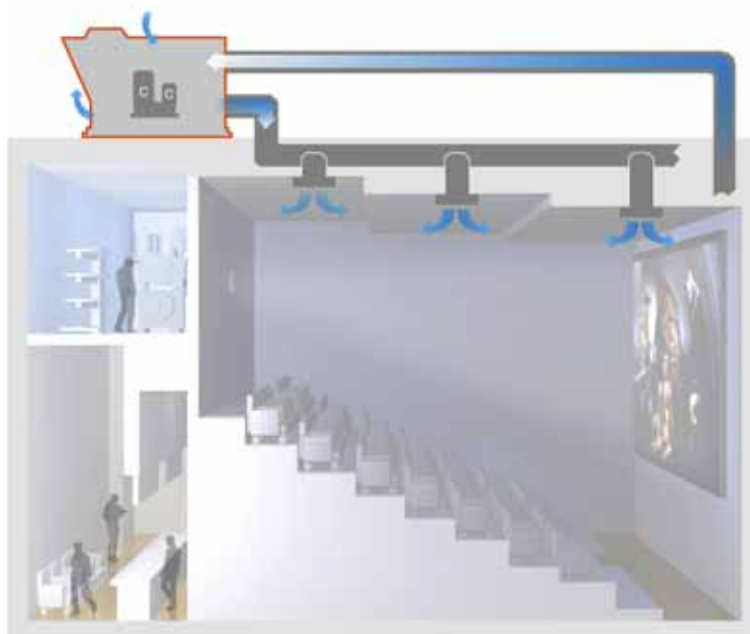
Se l'impianto è idronico i terminali tipici presenti nei locali da climatizzare sono i radiatori, i ventilconvettori (*fan coil*) o i pannelli radianti.

I radiatori rappresentano la soluzione più frequente nell'edilizia residenziale e prevedono una temperatura di ingresso dell'acqua di circa 80 °C e di uscita di 60 °C. Attualmente si stanno diffondendo anche i radiatori a bassa temperatura che permettono di avere acqua in mandata all'impianto a circa 55 °C. Questa soluzione non permette però di soddisfare anche la richiesta di raffrescamento estivo degli ambienti.

Il *fan coil* è uno scambiatore di calore acqua/aria che attraverso un ventilatore preleva l'aria dell'ambiente interno, la filtra e la pone a contatto con la batteria di riscaldamento (o raffrescamento) in cui scorre l'acqua dell'impianto. Questi dispositivi permettono una regolazione individuale della temperatura dell'ambiente e possono essere realizzati a due o quattro tubi; in quest'ultimo caso, la circolazione simultanea di acqua calda e fredda consente di riscaldare e

FIGURA 2.15

Impianto *rooftop*
tutt'aria. (Clivet)



raffrescare contemporaneamente ambienti diversi. I *fan coil* richiedono una temperatura dell'acqua pari a circa 45/40 °C in inverno e 7/10 °C in estate.

I pannelli radianti sono tubazioni in materiale plastico o in rame, poste alternativamente sotto il pavimento o sul soffitto, a volte anche dietro le pareti. La prima opzione è quella maggiormente utilizzata nel settore residenziale e nel terziario mentre la seconda è più adatta per locali di grandi dimensioni, capannoni industriali o quando l'intervento sulle pavimentazioni non è agevole. I pannelli radianti forniscono il calore agli ambienti sia per irraggiamento sia per convezione e la loro grande superficie non richiede elevate differenze di temperatura tra il fluido termovettore e l'ambiente da scaldare (o raffreddare). Durante il raffreddamento è necessario però un sistema per la deumidificazione poiché l'umidità dell'aria tende a condensare, depositandosi sul pavimento che è relativamente più freddo. Le temperature di mandata dell'acqua prevedono circa 35 °C in inverno e 18/20 °C in estate.

Esistono infine impianti misti aria-acqua che si caratterizzano per la presenza di un'unità per il trattamento dell'aria primaria (UTA) e di terminali ad acqua ubicati negli ambienti da climatizzare. Oltre

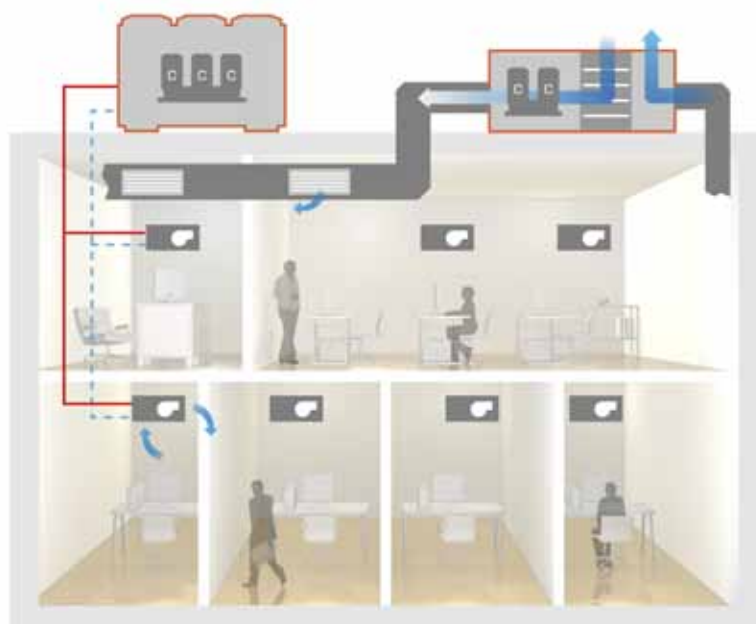
FIGURA 2.16

Esempi di sistemi di emissione con indicazione della temperatura tipica di esercizio (da sinistra): pavimento radiante 35 °C (*Rossato Group*), ventilconvettore 45 °C (*Clivet*), radiatori a bassa temperatura 55 °C. (*Clivet*)



FIGURA 2.17

Sistema idronico con Unità di Trattamento Aria per il terziario. (*Clivet*)



alla rete di tubazioni per l'alimentazione dei terminali, questi sistemi richiedono l'installazione di canalizzazioni aerauliche necessarie sia per la distribuzione dell'aria di ricambio, opportunamente trattata in

modo da presentare le caratteristiche termoigrometriche desiderate, sia per la ripresa dell'aria da espellere dopo il recupero del calore contenuto.

Si tratta di sistemi previsti per edifici di grandi dimensioni caratterizzati da elevata occupazione come centri commerciali, ospedali, alberghi e uffici (vedi Figura 2.17).

3.1

L'EFFICIENZA ENERGETICA

L'efficienza di una pompa di calore è definita dal rapporto tra l'effetto utile e l'energia spesa per ottenere tale effetto. Poiché in modalità riscaldamento l'effetto utile è rappresentato dall'energia termica fornita, mentre in raffreddamento è l'energia termica sottratta all'ambiente climatizzato, si utilizzano due indicatori differenti: rispettivamente il COP (*Coefficient Of Performance*) e l'EER (*Energy Efficiency Ratio*).

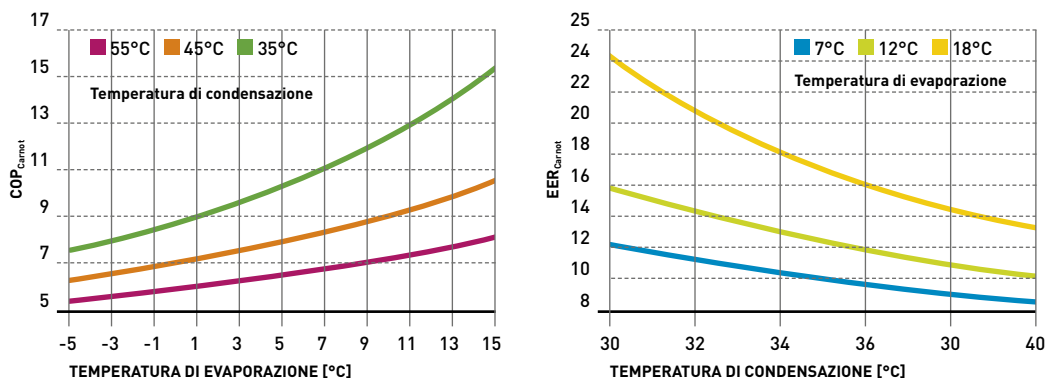
Il valore assunto da questi indicatori è fortemente influenzato dalle condizioni in cui opera la macchina, in particolare dalle due temperature, di evaporazione e di condensazione, e dal fattore di carico. Per comprendere a fondo il legame con la temperatura è opportuno fare riferimento alla pompa di calore ideale che opera secondo un ciclo termodinamico (ciclo di Carnot inverso) in cui l'efficienza dipende esclusivamente dalle temperature citate nel modo indicato nelle formule (1) e (2)¹ e mostrata in Figura 3.1.

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{condensazione}}{T_{condensazione} - T_{evaporazione}} = \frac{T_{condensazione}}{\Delta T} \quad (1)$$

$$EER_{Carnot} = \frac{T_{evaporazione}}{T_{condensazione} - T_{evaporazione}} = \frac{T_{evaporazione}}{\Delta T} \quad (2)$$

FIGURA 3.1

Indicatori ideali di efficienza COP_{Carnot} ed EER_{Carnot} in funzione delle temperature di lavoro (in °C).



¹ In queste equazioni le temperature sono espresse in kelvin.

Dalle formule si osserva che COP ed EER aumentano al diminuire di ΔT e quindi risultano maggiori nel caso di temperature di evaporazione elevate e temperature di condensazione ridotte. Questo è vero non solo per un ciclo ideale ma anche per una macchina reale.

Da questa considerazione si comprende l'attenzione rivolta alla scelta della sorgente termica. Infatti, in modalità riscaldamento, specialmente nei climi freddi, può risultare conveniente ricorrere a sorgenti alternative all'aria esterna quali, ad esempio, il terreno o l'acqua del mare, che consentono di avere una temperatura di evaporazione più elevata. Inoltre, dalle medesime formule si intuisce il vantaggio dei sistemi di emissione a bassa temperatura come i pannelli radianti e, in misura minore, i ventilconvettori, i quali permettono di ridurre la temperatura di condensazione. Anche il beneficio dovuto all'adozione di una strategia di compensazione climatica è spiegato da queste relazioni. Tale regolazione, infatti, consiste nel diminuire la temperatura di condensazione all'aumentare della temperatura esterna in maniera tale da incrementare l'efficienza senza compromettere il comfort. Per quanto riguarda la modalità raffrescamento, è possibile fare commenti analoghi, ribaltando però il punto di vista: l'efficienza aumenta incrementando la temperatura di evaporazione e al diminuire della temperatura della sorgente esterna (condensazione). Inoltre, si osservi che nel caso di un ciclo ideale si ha la relazione:

$$COP_{Carnot} = 1 + ERR_{Carnot} \quad (3)$$

Si può notare quindi che, a parità di temperatura di evaporazione e di condensazione, il COP è sempre maggiore dell'EER. Ciò avviene perché, in regime di riscaldamento, l'energia spesa per alimentare il compressore concorre all'effetto utile. Nella realtà, però, è assai raro avere le medesime temperature in regime di riscaldamento e di raffrescamento; in particolare, nei nostri climi, in raffrescamento le macchine lavorano in condizioni più favorevoli per cui generalmente si ottengono valori di EER simili, se non superiori, a quelli ottenuti per i COP. Infine si noti che nel caso di un ciclo ideale il COP è sempre maggiore di 1; questo è vero anche per una macchina reale nelle usuali condizioni di lavoro.

Le prestazioni delle pompe di calore dipendono non solo dalle temperature a cui opera il ciclo ma anche dal fattore di carico. In particolare è lecito attendersi una diminuzione delle prestazioni qualora la potenza termica richiesta dall'edificio risulti inferiore alla potenza minima che la macchina può erogare in continuo. Difatti, in queste

Prestazioni ideali e prestazioni reali

condizioni, la macchina è costretta a ricorrere a cicli di accensione e spegnimento che ne riducono l'efficienza, poiché ad ogni avviamento la macchina deve ristabilire il livello delle pressioni nel ciclo e, inoltre, durante i periodi di *off* continuano ad essere presenti consumi legati al riscaldatore del carter, al sistema di controllo, alle pompe e ad altri usi parassiti. Vari studi hanno mostrato che, per elevate parzializzazioni, anche un piccolo consumo durante i cicli di *off* ha un impatto importante sull'efficienza [9].

Per ridurre l'eccessivo ricorso a cicli di accensione e spegnimento, possono essere intraprese varie strategie come ad esempio aumentare l'inertza termica dell'impianto con degli *accumuli tattici* e/o dotare la macchina di più compressori, di compressori pluristadio o di compressori a velocità variabile.

Oggigiorno una soluzione sempre più diffusa, soprattutto per macchine di piccola taglia, consiste nell'utilizzare compressori a velocità variabile; tali macchine sono dotate di un inverter che varia la velocità del compressore in funzione del carico termico, riducendo, quando necessario, sia la potenza erogata sia quella assorbita fintanto che la velocità minima del compressore è raggiunta.

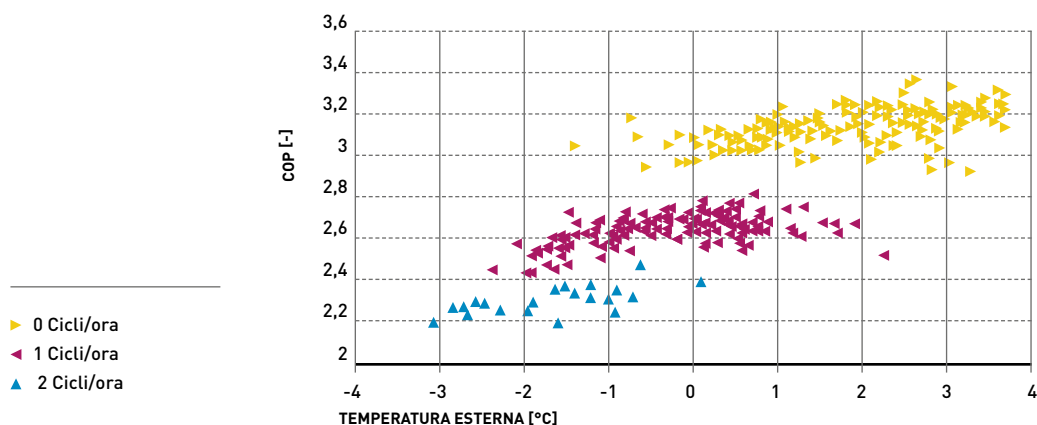
Quando il compressore lavora a velocità ridotta si osserva un ulteriore vantaggio: con il carico parzializzato gli scambiatori di calore risultano sovradimensionati in rapporto alla potenza termica scambiata, riducendo la differenza di temperatura fra evaporazione e condensazione a beneficio dell'efficienza complessiva della macchina.

Inoltre, con la funzione *soft start*, l'inverter consente un avviamento graduale del motore elettrico, salvaguardando da stress meccanico l'accoppiamento motore-compressore e riducendo la caduta di tensione grazie alla minore corrente di spunto. Tuttavia, è opportuno precisare che le diverse tipologie di compressori si comportano in maniera differente rispetto alla parzializzazione e, in taluni casi, l'adozione dell'inverter può risultare una soluzione non ottimale.

Un aspetto che influenza le prestazioni delle macchine aerotermitiche è rappresentato dai cicli di sbrinamento. Quando una macchina ad aria funziona in modalità riscaldamento può capitare che vi sia formazione di brina sulla superficie dello scambiatore esterno (evaporatore). Questo fenomeno avviene quando la temperatura superficiale è inferiore sia al punto di congelamento dell'acqua sia al punto di rugiada dell'aria umida. Agendo come isolante e riducendo il passaggio dell'aria, la brina accumulatasi comporta un degrado delle prestazioni e, in particolare, un progressivo abbassamento della temperatura di evaporazione che potrebbe causare danni anche gravi al compressore.

FIGURA 3.2

COP orario in funzione della temperatura esterna con evidenza del numero di cicli di sbrinamento avvenuti nell'ora [18].



Per evitare ciò sono necessari periodici cicli di sbrinamento. Attualmente la tecnica di sbrinamento più diffusa consiste nell'inversione del ciclo: il flusso del refrigerante è invertito cosicché il gas caldo uscente dal compressore attraversa lo scambiatore esterno e può far sciogliere la brina (si noti che in tal modo parte del calore è sottratto all'edificio). Tutto ciò, oltre che un possibile peggioramento del comfort interno, provoca sicuramente una diminuzione del COP poiché il compressore continua a funzionare anche quando non è fornito calore all'edificio. Questo comportamento è riportato in Figura 3.2: il COP (media oraria) è mostrato in funzione della temperatura dell'aria esterna con l'indicazione del numero di cicli di sbrinamento effettuati nell'ora considerata.

Come visto, quindi, le prestazioni di una pompa di calore variano fortemente in funzione delle condizioni di lavoro. Ciò rende meno semplice il confronto tra diverse unità in quanto è sempre necessario specificare le condizioni in cui certi livelli di efficienza sono stati raggiunti. Inoltre, anche ammesso di avere a disposizione dati ottenuti nelle medesime condizioni, è tutt'altro che immediato identificare quale sia l'apparecchio più performante nell'arco di un'intera stagione. Per venire incontro a questa esigenza, sempre più spesso i costruttori forniscono anche indicatori stagionali, frutto di valutazioni che considerano sia la temperatura della sorgente termica sia il fattore di carico.

Per questi indici si suole anteporre una "S", con il significato di *seasonal*, agli indicatori che abbiamo già incontrato (SCOP e SEER) o, in alternativa, si usa la sigla SPF (*Seasonal Performance Factor*).

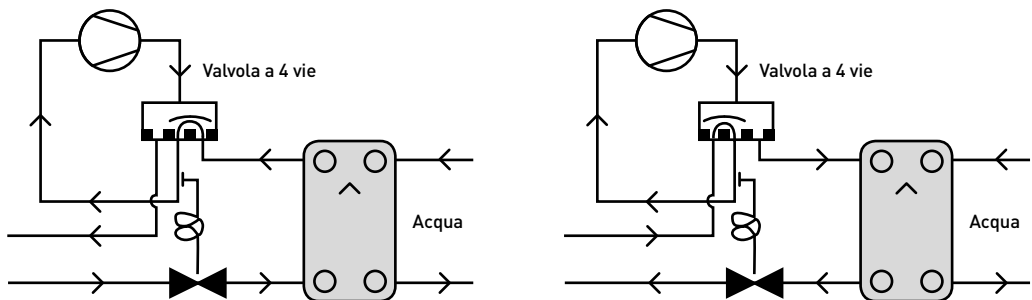
Prestazioni ideali e prestazioni reali

Ovviamente i valori di SPF indicati nei cataloghi sono solo orientativi in quanto sono calcolati solo per alcune località e tengono conto di curve di carico predeterminate (spesso funzione della sola temperatura esterna). Tuttavia è un bene che si diffonda l'uso di tali indicatori, giacché premiano quei prodotti che globalmente hanno un'efficienza migliore, penalizzando quelli ottimizzati solo per una particolare condizione di lavoro.

La reversibilità, ossia la capacità di un apparecchio di soddisfare sia il servizio di riscaldamento sia quello di raffrescamento, è un indubbio vantaggio che può aiutare a ridurre i costi di investimento degli impianti. Tuttavia, è opportuno sottolineare che le macchine progettate per funzionare su una singola stagione possono raggiungere prestazioni più elevate. Infatti, in modalità riscaldamento, la macchina lavora con un rapporto di compressione maggiore rispetto a quanto avviene in modalità raffrescamento. Pertanto, nelle unità reversibili, la scelta del compressore è frutto di un compromesso tra quella che sarebbe stata la soluzione ideale nel caso di funzionamento solo estivo o solo invernale. Inoltre, è probabile che in una delle due stagioni la macchina risulti sovradimensionata a scapito dell'efficienza. Ad eccezione delle acqua-acqua, una macchina, per funzionare in entrambe le modalità, deve essere dotata di organi aggiuntivi come la valvola a quattro vie per permettere l'inversione del ciclo e di accorgimenti costruttivi necessari al fine di escludere il possibile arrivo di liquido all'aspirazione del compressore.

FIGURA 3.3

Visione schematica di una pompa di calore reversibile e di uno scambiatore a piastre.



Il sistema funziona, con flusso in controcorrente, come evaporatore (a sinistra) e con flusso parallelo, come condensatore (a destra). La valvola a quattro vie indirizza il flusso del refrigerante a valle del compressore e controlla il funzionamento. Nell'immagine non è mostrato lo scambiatore refrigerante-aria (a sinistra).

Tutti questi elementi contribuiscono ad aumentare le perdite di carico all'interno del circuito frigorifero. Infine nelle macchine aria-acqua, i due flussi (refrigerante e acqua di impianto) possono essere in controcorrente e quindi con massima efficienza di scambio termico solo in una delle due modalità di funzionamento (Figura 3.3).

Quanto visto finora si applica propriamente solo alle macchine a compressione elettriche. Per le macchine a compressione azionate da motori endotermici si utilizza un altro indicatore: il GUE (*Gas Utilization Efficiency*)², a volte italianizzato in CUC (*Coefficiente di Utilizzo del Combustibile*), definito come il rapporto tra l'energia termica resa e l'energia contenuta nel combustibile impiegato. In questa tipologia di apparecchi, oltre al circuito frigorifero *tradizionale* (compressione, condensazione, laminazione ed evaporazione), è presente anche un secondo circuito impiegato per il raffreddamento del motore. In inverno, il calore proveniente da questo circuito è diretto sull'evaporatore in maniera tale da consentire una temperatura di evaporazione pressoché costante anche nei giorni più freddi evitando così la formazione di brina sullo scambiatore esterno e contrastando la diminuzione di potenza resa e di efficienza. In estate, invece, questo calore deve essere dissipato in ambiente, in aggiunta a quello scaricato dal condensatore.

Complessivamente, quindi, in raffrescamento bisogna attendersi prestazioni inferiori rispetto alle macchine elettriche. Tuttavia, potrebbe essere interessante utilizzare il calore proveniente dal motore endotermico per altri usi, come ad esempio la produzione di acqua calda sanitaria.

Anche per le macchine ad assorbimento l'indicatore utilizzato per quantificare l'efficienza è il GUE. Da un confronto di questa tecnologia con le macchine a compressione si nota che la potenza resa e la prestazione energetica sono meno sensibili alle variazioni di temperatura della sorgente, in quanto solo meno di un terzo del calore fornito all'edificio è prelevato dalla sorgente. Ne consegue che anche la formazione di brina è ridotta³. Inoltre, si osserva anche una minore dipendenza dalla temperatura di condensazione, indubbio vantaggio perché permette di sostituire impianti tradizionali senza la necessità di modificare gli emettitori. Il rovescio della medaglia si ha in raffrescamento, dove è necessario evacuare una quantità maggiore di ca-

² Alcuni autori utilizzano la sigla FUE (Fuel Utilization Efficiency).

³ Oltre a ciò nelle macchine ad assorbimento i cicli di sbrinamento avvengono senza che sia interrotto il servizio di riscaldamento.

lore per ogni frigoria fornita all'edificio. Infine, si tenga presente che nel GUE non sono tenuti in conto i consumi elettrici della macchina che sono pari a circa il 3 per cento dell'energia termica fornita [15]; per tenere conto anche di questi consumi (oltre che per confrontare apparecchi che utilizzano vettori energetici differenti) si utilizza il PER (*Primary Efficiency Ratio*), definito come rapporto tra l'effetto utile e i consumi totali espressi in energia primaria.

In chiusura segnaliamo che, a seguito della probabile adozione di regolamenti europei attualmente in bozza [10] collegati alla Direttiva 2010/30/UE, la classe energetica di una pompa di calore dovrà essere determinata attraverso un indicatore di efficienza riferito all'energia primaria (per la modalità riscaldamento).

Questo nuovo indicatore si chiamerà η_s (*seasonal space heating energy efficiency*) e sarà definito come il rapporto tra l'energia termica resa durante una stagione di riferimento e i consumi totali dell'apparecchio espressi in energia primaria. In questo modo sarà più facile confrontare, sulla base di prestazioni stagionali, tecnologie che utilizzano vettori energetici differenti.

3.2

LE PRESTAZIONI IN CAMPO

RSE conduce da tempo un programma di diagnosi energetiche strumentali di impianti di climatizzazione, installati sia presso i propri laboratori sia presso edifici di proprietà di terzi. I dati raccolti (efficienza stagionale, energia erogata, energia assorbita, problemi di funzionamento) riguardano l'esercizio reale di una campionatura di impianti che rappresentano uno spaccato delle soluzioni di maggiore interesse per la realtà climatica italiana: pompe di calore ad aria, ad acqua di falda, geotermiche, ad alimentazione sia elettrica sia a gas.

Con questo lavoro si intende fare chiarezza sui reali livelli di affidabilità e di efficienza delle pompe di calore, fornendo indicazioni sulle prestazioni energetiche da attendersi a seconda della natura della macchina, della località di installazione e del tipo di servizio richiesto.

I risultati ottenuti contribuiscono a inquadrare la reale convenienza economica ed energetica della tecnologia, grazie ad informazioni indipendenti e verificate sperimentalmente. In questo modo si forniscono a progettisti, costruttori e utilizzatori gli elementi conoscitivi di una tecnologia con grandi potenzialità ma che ancora non fa parte delle scelte abituali in materia di climatizzazione degli edifici; allo stesso tempo, attraverso il confronto fra soluzioni concorrenti, si

vuole stimolare l'industria a produrre e immettere sul mercato apparati sempre più efficienti e qualificati.

3.2.1

In sintesi

Nel seguito si riportano i risultati salienti di alcune campagne di monitoraggio stagionale [11][12][13][14][15], condotte su impianti che, per loro caratteristiche intrinseche, risultano particolarmente interessanti come dimostrativi di soluzioni tecnologiche di avanguardia.

Si tratta di impianti differenti per tipologia (pompe di calore elettriche e a gas), taglia (da 6 a 1.300 kW termici) e sorgente fredda utilizzata (aria, acqua di falda, terreno). Oltre a diverse PdC, è stata oggetto di monitoraggio anche una moderna caldaia a condensazione. Una sintesi delle prestazioni stagionali misurate è riportata nella Tabella 3.1 e rappresentata in forma grafica nella Figura 3.4, dove il confronto energetico tra macchine elettriche e a gas è possibile calcolando il PER (*Primary Energy Ratio*), vale a dire il rapporto fra l'energia utile prodotta (energia termica) e l'energia primaria utilizzata. Il PER è stato calcolato assumendo un rendimento complessivo del sistema elettrico nazionale pari al 46 per cento (Delibera AEEG n. EEN 3/08).w

TABELLA 3.1

Sintesi delle prestazioni invernali degli impianti monitorati.

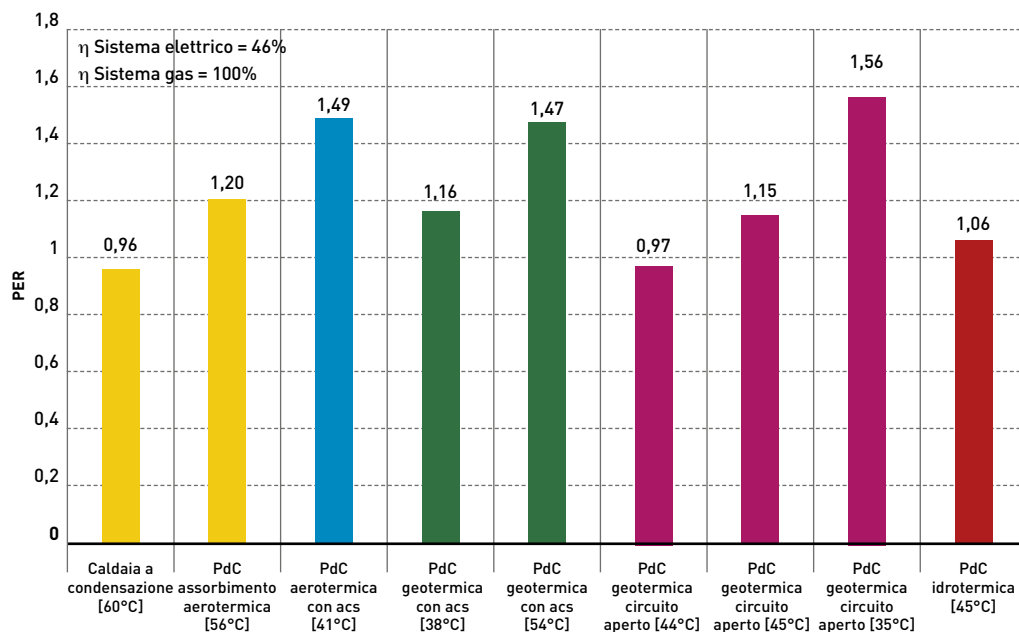
Impianti monitorati			SCOP - SGUE macchina (1)	SCOP - SGUE impianto (2)
-	Caldaia a condensazione	GAS	0,96	0,96
n°1	PdC assorbimento aerotermica con acs		1,30	1,20 [4]
n°2	PdC aerotermica con acs		3,23	3,23
n°3	PdC geotermica con acs	ELETTRICHE	2,83	2,53
n°4	PdC geotermica con acs		3,46	3,20
n°5	PdC geotermica circuito aperto		2,86	2,11
n°6	PdC geotermica circuito aperto		3,46	2,49
n°7	PdC geotermica circuito aperto		4,30	3,40
n°8	PdC idrotermica		3,90	2,30

LEGENDA: **SCOP** Seasonal Coefficient of Performance
SGUE Seasonal Gas Utilization Efficiency
PER Primary Energy Ratio (calcolato con rendimento del sistema elettrico nazionale pari al 46%)
(1) Prestazione riferita alla sola PdC, pompe di circolazione lato impianto escluse

Prestazioni ideali e prestazioni reali

FIGURA 3.4

Primary Energy Ratio (PER) degli impianti monitorati.



PER impianto	Temp. mandata [°C] (3)	Temp. sorgente fredda [°C] (3)	Regolazione climatica	Potenza nominale [kW]	Località
0,96	60	-	sì	2 x 100	(BG)
1,20	56	6	sì	2 x 38,3	(BG)
1,49	41	7	sì	7	(MI)
1,16	38	4	sì	67	(AL)
1,47	54	16	no	42	(GE)
0,97	45	11	no	2 x 1.300	(MI)
1,15	44	11	no	420	(MI)
1,56	35	15	no	6,2	(MI)
1,06	45	11	no	500	(CO)

- (2) Prestazione riferita alla PdC includendo gli equipaggiamenti ausiliari (pompe di emungimento e/o di movimentazione del fluido di scambio, pompe di circolazione lato impianto escluse)
- (3) Valori di temperatura media stagionale
- (4) Nella PdC ad assorbimento a gas i consumi elettrici sono stati valorizzati in energia primaria

Come può essere osservato, le prestazioni energetiche dei vari impianti monitorati sono alquanto differenti tra loro; per poter meglio comprendere tali differenze è opportuno analizzare alcuni aspetti non marginali.

In primo luogo l'efficienza degli impianti che sfruttano il calore a bassa entalpia del terreno e dei corpi idrici sotterranei o superficiali non può prescindere dai consumi energetici degli equipaggiamenti ausiliari preposti allo scambio di calore con la sorgente termica (essenzialmente le pompe di emungimento o di movimentazione del fluido di scambio), i quali sono necessari per rendere disponibile quella che viene considerata una vera e propria fonte energetica rinnovabile. Questi apparecchi ausiliari possono assorbire una percentuale rilevante dei consumi energetici complessivi e riducono pertanto le efficienze reali di impianto.

In dettaglio, negli impianti geotermici a circuito aperto, gli ausiliari (principalmente le pompe di sollevamento, oltre ad eventuali altre pompe installate tra la PdC e lo scambiatore intermedio) possono consumare una quantità rilevante di energia che nelle nostre rilevazioni varia in percentuale fra il 15 e il 26 per cento dei consumi energetici complessivi.

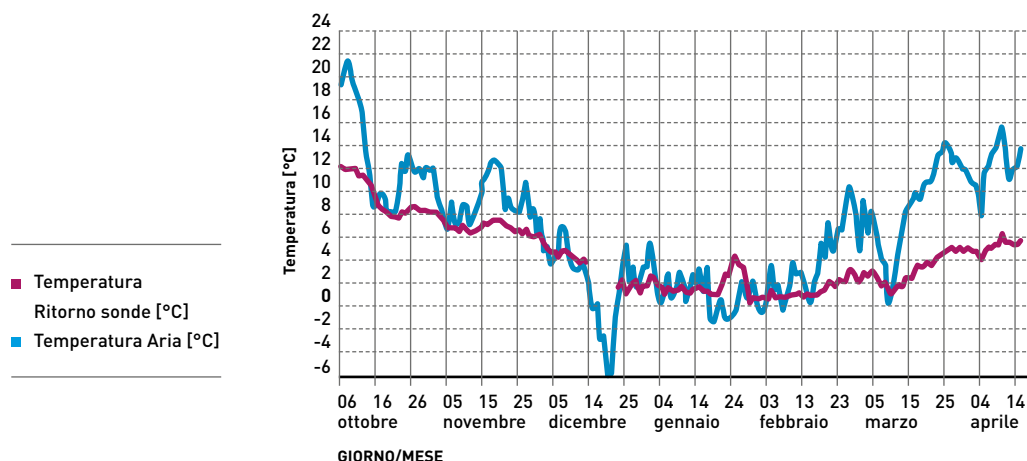
Gli impianti geotermici a circuito chiuso, invece, presentano una minore incidenza degli ausiliari dal momento che – non prevedendo emungimento di acqua – richiedono unicamente una pompa di circolazione in grado di vincere le perdite di carico del circuito delle geosonde. In questo caso, il consumo risulta compreso tra il 5 e il 12 per cento dei consumi energetici complessivi. In generale si può aggiungere che i consumi degli ausiliari sono spesso più elevati di quanto preventivato in ragione del fatto che in fase di progettazione e realizzazione dell'impianto si trascurano gli accorgimenti necessari a limitarli, come, ad esempio, il ricorso ad azionamenti a velocità variabile in funzione del carico termico, l'adozione di tempi di accensione appropriati e un'attenta manutenzione.

In secondo luogo, è opportuno interpretare le prestazioni di Tabella 3.1 avendo presente che il rendimento del ciclo termodinamico della pompa di calore è tanto più elevato quanto minore è la differenza tra la temperatura di condensazione e quella di evaporazione (par. 3.1). A tale riguardo, è interessante analizzare i risultati monitorati in un impianto con sonde geotermiche verticali (impianto numero 3 di Tabella 3.1) dove la prestazione complessiva è stata in parte condizionata dalla bassa temperatura dell'acqua in ingresso alla pompa di calore, proveniente dalle sonde geotermiche. Tale temperatura (ritorno sonde in Figura 3.5) ha subito un progressivo abbassamento nel corso

Prestazioni ideali e prestazioni reali

FIGURA 3.5

Temperatura esterna e temperatura dell'acqua proveniente dalle sonde geotermiche.



della stagione invernale correlato all'aumento del carico termico richiesto dall'edificio al diminuire della temperatura esterna.

Da valori prossimi ai 10 °C, riscontrati all'inizio della stagione di riscaldamento, dalla fine di dicembre e per buona parte dei mesi successivi, la temperatura media giornaliera è scesa fino a circa 1 °C, valore eccessivamente basso in considerazione della collocazione geografica dell'impianto (AL). Ciò è stato anche causa di un fermo impianto imprevisto dopo la metà di dicembre (si noti l'interruzione della linea relativa alla temperatura delle sonde); il ripristino del funzionamento è stato possibile dopo l'introduzione nel circuito delle sonde di liquido anticongelante sotto forma di glicole etilenico⁴.

Si evidenzia anche come la temperatura media giornaliera dell'acqua proveniente dal campo geotermico sia stata per lunghi periodi inferiore alla temperatura dell'aria esterna. Per questo motivo risulta interessante il confronto, presentato più avanti, tra le prestazioni della PdC in esame e una PdC aria/acqua, allo scopo di valutare le differenze in termini energetici e di complessità impiantistica tra le due soluzioni.

Oltre al progressivo abbassamento della temperatura delle sonde

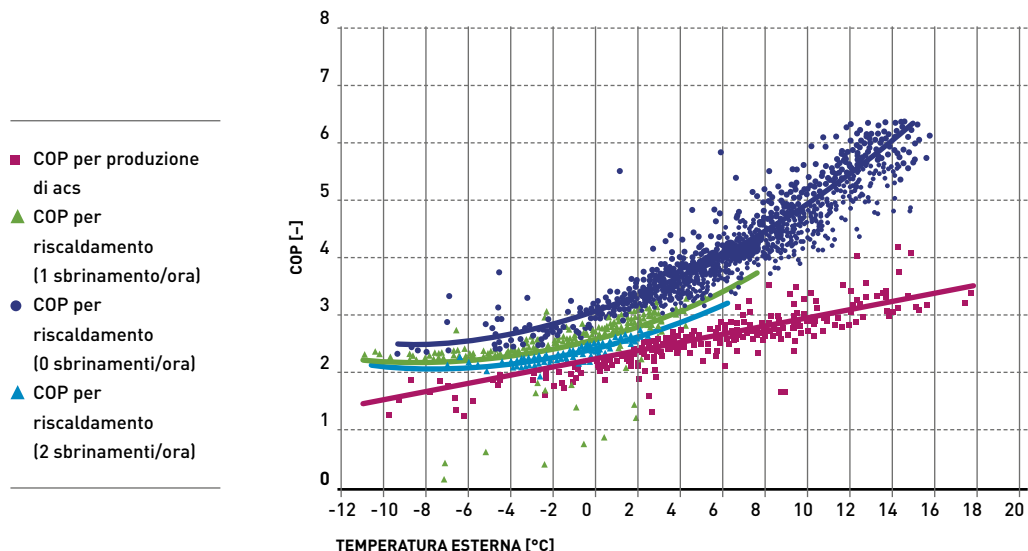
⁴ Questa eventualità non era stata prevista in sede di progettazione dell'impianto.

geotermiche durante la stagione di riscaldamento, è necessario mettere in conto anche la variazione delle prestazioni termiche del terreno nel corso degli anni di esercizio dell'impianto che sappiamo essere sensibile all'energia netta complessivamente immessa o prelevata annualmente. Come infatti ampiamente spiegato nel Capitolo 4, il terreno non è una sorgente illimitata di calore, ma tende gradualmente ad esaurirsi quando viene sfruttato oltre le proprie capacità.

In terzo luogo, nelle macchine che ricorrono all'aria come fonte di energia, non si può trascurare l'importanza dei cicli di sbrinamento⁵. L'uso dell'aria implica inevitabilmente, nei climi più rigidi e umidi, la formazione di brina sull'evaporatore, che ostacola lo scambio termico fra l'aria e il fluido refrigerante e che, per evitare il blocco del funzionamento, viene rimossa tramite cicli di sbrinamento da ripetersi periodicamente con frequenza tanto maggiore quanto più bassa è la temperatura esterna ed elevata l'umidità. Questo aspetto, unito al calo delle prestazioni dovuto alla bassa temperatura dell'aria,

FIGURA 3.6

Pompa di calore aerotermica - COP netto (esclusi i consumi del circolatore) in funzione della temperatura esterna.



⁵ In linea di principio, questo aspetto è significativo in particolare per le macchine ad azionamento elettrico.

Prestazioni ideali e prestazioni reali

lascerebbe supporre che la pompa di calore ad aria possa risultare inadeguata a soddisfare il fabbisogno termico degli edifici proprio quando la richiesta di riscaldamento è massima.

L'analisi del funzionamento di impianti esistenti ha tuttavia permesso a RSE di ottenere dati molto interessanti sulla presunta criticità di questa tipologia di macchine, riscontrando che, grazie ai miglioramenti introdotti dai costruttori in questi ultimi anni, gli episodi di formazione di brina sulla superficie dell'evaporatore non rappresentano più un fenomeno rilevante nel bilancio energetico della macchina.

A titolo d'esempio, una PdC aerotermica (impianto numero 2 di Tabella 3.1), installata alla periferia di Milano, nel mese invernale più critico (gennaio) ha fatto registrare in media un ciclo di sbrinamento, con durata di circa 5 minuti, ogni due ore di esercizio mentre la massima frequenza di sbrinamento è stata di un ciclo ogni 45 minuti in una giornata particolarmente rigida in cui la temperatura media è stata di $-1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'influenza dei cicli di sbrinamento sul COP è illustrata in Figura 3.6.

3.2.2

In dettaglio

Oltre alle precedenti considerazioni aventi carattere generale, in questa sezione si riportano alcune note di commento in merito alle caratteristiche, prestazioni energetiche e criticità riscontrate in ciascun impianto monitorato.

Impianto numero 1 - PdC ad assorbimento aerotermica Temperatura media di mandata $56\text{ }^{\circ}\text{C}$, località Bergamo

Si tratta di un sistema, costituito da due pompe di calore ad assorbimento (GAHP) acqua/ammoniaca non reversibili e due caldaie, che soddisfa il servizio di riscaldamento e acqua calda sanitaria di un fabbricato industriale in provincia di Bergamo. Le pompe di calore sono chiamate a coprire il carico di base richiesto dall'edificio mentre il gruppo termico a condensazione è impiegato sia per le punte di carico nei momenti di maggior richiesta sia per la disinfezione termica anti legionella dell'acqua sanitaria.

Le pompe di calore hanno complessivamente fornito delle buone prestazioni, in linea con quanto indicato dal costruttore, con GUE (*Gas Utilization Efficiency*) stagionale superiore al 130 per cento (PER pari a 1,2). L'incidenza dei consumi elettrici è risultata contenuta,

nell'ordine del 2-3 per cento dell'energia termica prodotta. Questo livello di efficienza è stato garantito nonostante l'elevata temperatura di mandata dell'impianto, superiore a 55 °C medi stagionali, prova di un possibile accoppiamento di questa tecnologia anche in impianti esistenti dotati di radiatori. Le pompe di calore aerotermiche ad assorbimento si sono distinte per la capacità di funzionare con temperature esterne rigide garantendo comunque la continuità del servizio e fornendo circa il 50 per cento della potenza termica anche durante i cicli di sbrinamento. Questi sono stati inoltre meno frequenti rispetto alle pompe di calore elettriche poiché le GAHP, oltre a utilizzare un refrigerante in grado di evaporare anche a temperature particolarmente basse, dipendono meno dalle caratteristiche della sorgente termica.

***Impianto numero 2 - PdC aerotermica con acs
Temperatura media di mandata 41 °C, località Milano***

L'impianto è composto da una pompa di calore, di piccola taglia, che utilizza come sorgente termica l'aria esterna. L'impianto è situato presso la sede milanese di RSE in un edificio prefabbricato di circa 60 m², assimilabile ad un appartamento di piccole dimensioni e suddiviso in vari ambienti, ognuno dotato di ventilconvettori.

La macchina utilizzata è equipaggiata con un compressore a *doppio rotore* con controllo a inverter che permette una modulazione continua del numero di giri e di conseguenza della potenza termica erogata. L'impianto è progettato per erogare anche il servizio di acqua calda sanitaria in aggiunta a quello di climatizzazione.

Il monitoraggio di questo impianto ha riguardato tre inverni e i dati stagionali riportati in Tabella 3.1 sono quelli medi delle tre stagioni di riscaldamento. Durante il funzionamento invernale l'impianto ha conseguito delle prestazioni stagionali molto soddisfacenti: COP pari a 3,2 (comprensivo sia del servizio di riscaldamento, sia di acqua calda sanitaria) corrispondente ad un PER di 1,5. Questo risultato è stato possibile grazie anche alla capacità della macchina di prevenire e contrastare efficacemente la formazione di brina sulla superficie dell'evaporatore con opportuni cicli di sbrinamento.

Il livello di efficienza è stato buono anche per quanto riguarda la sola produzione di acqua calda sanitaria, alla temperatura di 55 °C: il COP stagionale è risultato di 2,5 (PER pari a 1,2), che corrisponde ad un rendimento primario superiore a quello che si sarebbe ottenuto per il medesimo servizio con una moderna caldaia. In merito alla produzione di acqua calda sanitaria va osservato che la momenta-

Prestazioni ideali e prestazioni reali

nea sospensione del servizio di climatizzazione, in assenza di logiche sulla tempistica di produzione, può provocare delle variazioni non trascurabili della temperatura interna impostata, in particolare nella stagione estiva.

Impianto numero 3 - PdC geotermica con acs Temperatura media di mandata 38 °C, località Alessandria

L'impianto, a servizio di un condominio composto da 12 appartamenti, è costituito da una pompa di calore elettrica acqua-acqua non reversibile che fornisce sia il riscaldamento invernale sia la produzione di acqua calda sanitaria durante tutto l'anno.

La distribuzione interna prevede un sistema a pannelli radianti a pavimento. A servizio della pompa di calore è stato realizzato un campo geotermico composto da 15 sonde di profondità 100 metri, distanti tra loro 4-5 metri. Il monitoraggio di questo impianto ha riguardato tre inverni e i dati stagionali riportati in Tabella 3.1 sono quelli medi delle tre stagioni di riscaldamento. Come si può osservare l'impianto ha fornito prestazioni appena sufficienti, comunque inferiori alle aspettative per questo tipo di pompa di calore.

Il COP è stato più elevato durante la prima stagione per poi calare considerevolmente durante gli inverni successivi; il valore medio della macchina è risultato pari a 2,83 che scende a 2,53 considerando i consumi ausiliari. Questo comportamento può in parte essere ricondotto alla temperatura della sorgente, particolarmente bassa a causa di un dimensionamento inadeguato del campo geotermico.

In sintesi, anche se l'impianto ha fornito prestazioni superiori a quelle ottenibili da una moderna caldaia a gas, queste non sono state tali da giustificare i maggiori oneri che questa soluzione impiantistica comporta.

Impianto numero 4 - PdC geotermica con acs Temperatura media di mandata 54 °C, località Genova

Il sistema geotermico monitorato riguarda un impianto costituito da tre pompe di calore asservite al servizio di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria di un edificio adibito a casa di riposo situato in provincia di Genova.

L'impianto è dotato di 22 sonde geotermiche di profondità pari a 110 metri. Le tre pompe di calore installate sono in grado di fornire acqua calda a due livelli termici di temperatura che in questo caso sono impostati a 55 °C per il riscaldamento e a 65 °C per l'acqua

calda sanitaria. Finora il monitoraggio ha riguardato due inverni e i dati stagionali riportati in Tabella 3.1 sono quelli medi delle due stagioni di riscaldamento. Il funzionamento delle macchine è stato molto regolare, registrando valori molto simili tra una stagione e l'altra. La temperatura dell'acqua proveniente dalle sonde geotermiche si è sempre mantenuta nell'intorno dei 16 °C, anche durante i periodi più freddi sia grazie alla fortunata collocazione dell'impianto, situato in prossimità del mare, sia per il ridotto carico termico dell'edificio, che ha ospitato solo una parte della capienza massima della struttura.

Anche il consumo di energia elettrica degli equipaggiamenti ausiliari è stato contenuto nell'ordine del 7,5 per cento dei consumi totali di energia elettrica. Questo fattore ha permesso di ottenere delle buone prestazioni complessive di impianto (COP 3,2) nonostante la temperatura di mandata del circuito di riscaldamento sia stata mantenuta sempre su valori piuttosto elevati, attorno ai 54 °C.

Impianti numero 5 e 6 - PdC geotermica a circuito aperto Temperatura media di mandata 44-45 °C, località Milano

Il complesso impiantistico serve un vasto centro commerciale sorto sull'area di uno stabilimento industriale dismesso, suddiviso in diverse sotto-centrali, tutte dotate di pompe di calore elettriche del tipo acqua-acqua alimentate con l'acqua emunta dalla prima falda freatica attraverso due pozzi profondi circa 60 metri e distribuita alle sotto-centrali mediante un *anello d'acqua* comune⁶. In particolare, le pompe pozzo riversano la loro portata in un serbatoio di accumulo (si tratta di un manufatto fuori terra preesistente nello stabilimento industriale, che svolge anche funzioni di accumulo di acqua per l'impianto antincendio), nel quale si riversa anche l'acqua stessa dopo aver *lavorato* nelle pompe di calore e prima di essere scaricata all'esterno.

In tal modo si riesce a contenere l'emungimento annuale di acqua di falda nei limiti consentiti dalla concessione di prelievo di cui l'impianto dispone; questo implica però un mescolamento fra l'acqua prelevata dal sottosuolo e quella che è già stata elaborata dalle pompe di calore. Ne consegue un calo di efficienza dovuto al fatto che le macchine sono alimentate in inverno con acqua un po' più fredda e in estate con acqua un po' più calda rispetto a quella della falda.

Il consumo di energia elettrica degli equipaggiamenti ausiliari costituisce una percentuale rilevante dell'ordine del 26 per cento dei

⁶ L'impianto di distribuzione si avvale di quattro pompe a velocità variabile.

Prestazioni ideali e prestazioni reali

consumi totali di energia elettrica. Incide notevolmente in questo caso il fatto che l'acqua debba essere sollevata dai pozzi e che venga fatta circolare in un anello di distribuzione molto esteso che serve le diverse sotto-centrali. Inoltre, a causa della temperatura di sorgente poco adeguata, i coefficienti di prestazione netti delle sole pompe di calore non assumono valori particolarmente brillanti, tanto che avrebbero potuto essere ottenuti con soluzioni impiantistiche più semplici ed economiche quali pompe di calore aria-acqua.

Come conseguenza i coefficienti di prestazione complessivi di impianto (COP 2,11 e 2,49) e il coefficiente di utilizzo dell'energia primaria non sono buoni (PER 0,97 e 1,15) e poco diversi da quelli ottenibili con una buona caldaia.

Rimane ovviamente il vantaggio di poter utilizzare le stesse macchine sia per il riscaldamento invernale sia per il condizionamento estivo.

Impianto numero 7 - PdC geotermica a circuito aperto Temperatura media di mandata 35 °C, località Milano

L'impianto è composto da una pompa di calore acqua-acqua di piccola taglia installata presso la sede milanese di RSE e posta a servizio di un edificio sperimentale di dimensioni tali (60 m²) da simulare una abitazione unifamiliare. L'acqua viene emunta dalla prima falda freatica, tramite una pompa elettrica sommersa, da un pozzo profondo 30 metri.

Il valore stagionale del coefficiente di prestazione della sola pompa di calore presenta dei buoni valori (COP 4,3), che si mantengono discreti (COP 3,4) anche mettendo in conto l'energia elettrica consumata dalla pompa sommersa per il sollevamento dell'acqua di falda che rappresenta il 20 per cento dei consumi totali di energia elettrica. Questi valori sono comunque ottenuti con una temperatura media di mandata di 35° C, compatibile unicamente con un sistema di distribuzione radiante.

Si è notato tuttavia un degrado delle prestazioni complessive associato a un corrispondente aumento della percentuale di energia elettrica consumata dalla pompa sommersa rispetto a quella consumata dalla pompa di calore. Tale effetto è dovuto al progressivo calo delle prestazioni della pompa sommersa causato principalmente dallo sporcamento del circuito dell'acqua di falda, dovuto probabilmente alla presenza di ferro-batteri. Il fenomeno è stato contrastato solo in parte con una pulizia molto assidua dei filtri dell'impianto.

L'inconveniente, ancora gestibile in un impianto sperimentale, dimostra l'esistenza di fattori apparentemente secondari e sottovalu-

tati in fase di progetto ma che possono in realtà provocare fastidiosi inconvenienti e degrado delle prestazioni energetiche.

***Impianto numero 8 - PdC idrotermica
Temperatura media di mandata 45 °C, località Como***

L'impianto è stato realizzato per fornire il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo a un edificio storico situato sulle rive del lago di Como. Il circuito di prelievo dell'acqua di lago è disaccoppiato da quello della pompa di calore tramite l'inserimento di uno scambiatore di calore a piastre; si evita in questo modo il contatto diretto fra l'acqua lacustre (fonte di potenziale contaminazione) e gli scambiatori di calore della macchina ma si è in tal modo costretti a inserire delle pompe (potenza nominale 5 kW) per attivare la circolazione fra la macchina e lo scambiatore a piastre. Il consumo di energia di questi circolatori si aggiunge a quello delle pompe di prelievo dell'acqua di lago in numero di tre (una di riserva) con potenza nominale di 6 kW ciascuna.

Il coefficiente stagionale di prestazione della pompa di calore presenta valori abbastanza buoni (COP 3,90) ma gli ausiliari consumano una notevole quantità di energia, in percentuale il 40 per cento dei consumi elettrici complessivi, causando un inevitabile e notevole calo del coefficiente complessivo dell'impianto e del suo PER (1,06).

Il risultato complessivo è peggiorato dal fatto che sia le pompe di circolazione sia quelle di aspirazione dell'acqua lacustre risultano sovradimensionate e lavorano a velocità costante. Inoltre la stessa gestione operativa dell'impianto è stata spesso poco accorta lasciando, ad esempio, in funzione entrambe le pompe acqua di lago anche quando non sarebbe stato necessario in base al carico termico a cui stava funzionando la pompa di calore.

Il consumo energetico delle pompe acqua di lago ha avuto la tendenza a crescere nel tempo in conseguenza della scarsa manutenzione dei filtri che ne ha causato il progressivo sporcamento.

3.2.3

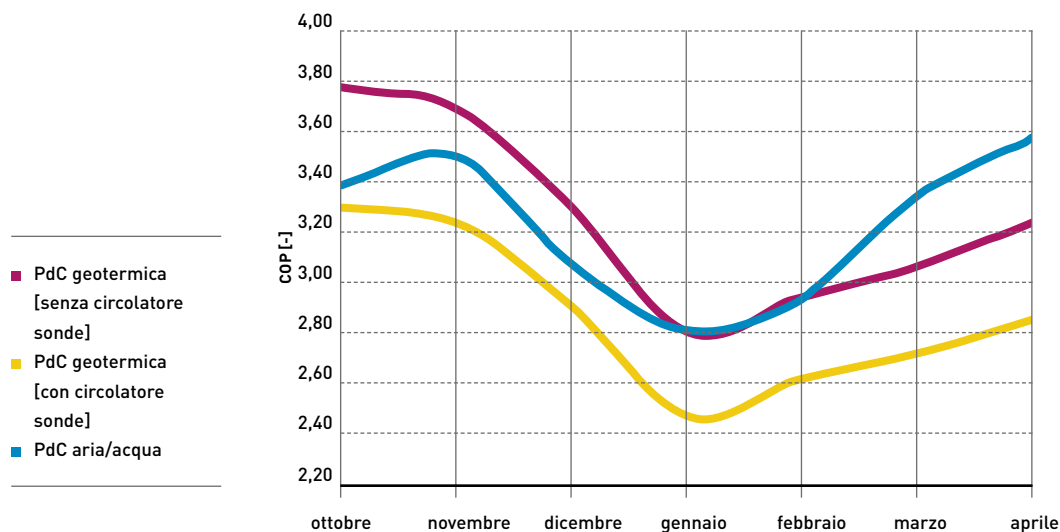
Confronti virtuali

Come sarà estesamente descritto nel seguito (Capitolo 5), i dati sperimentali raccolti durante la campagna di monitoraggio energetico hanno consentito di sviluppare e validare una procedura software in grado di simulare dinamicamente il funzionamento di una pompa di calore aria/acqua installata presso un edificio situato in una località qualunque.

Prestazioni ideali e prestazioni reali

FIGURA 3.7

COP ottenuti dal confronto tra la pompa di calore geotermica e quella aerotermica.



Questo permette il confronto virtuale tra le prestazioni di questa macchina e un'altra, come se entrambe funzionassero contemporaneamente nello stesso impianto con le medesime condizioni operative. Si è allora scelto come *banco prova* l'edificio di Alessandria, visto in precedenza, nel cui impianto è stata idealmente inserita una macchina aerotermica al fine di determinare analiticamente il COP stagionale⁷, nelle stesse condizioni meteo e di carico termico per le quali è stata misurata la prestazione della macchina geotermica presente in realtà.

Il confronto è illustrato in Figura 3.7 e mostra che, nello specifico caso in esame, una pompa di calore ad aria avrebbe fornito delle prestazioni migliori rispetto a quelle registrate con la macchina geotermica esistente nell'impianto. Infatti, il COP stagionale calcolato per la macchina aerotermica sarebbe stato equiparabile a quello misurato considerando i soli consumi della macchina geotermica ma si-

⁷ Il calcolo delle prestazioni della macchina è stato eseguito tenendo in considerazione sia i cicli di sbrinamento sia il fattore di carico e simulando un sistema di regolazione della temperatura dell'acqua di mandata con curva climatica compresa tra 35 e 45 °C. La temperatura dell'acqua calda sanitaria è stata impostata a 55 °C.

stematicamente maggiore di quello comprendente anche il consumo della pompa di circolazione dell'acqua del circuito sonde con il quale va più realisticamente confrontato.

Tale esito, per certi versi sorprendente, è imputabile al fatto che per una buona parte del periodo invernale (come mostrato in Figura 3.5) la temperatura dell'aria esterna è stata maggiore di quella dell'acqua proveniente dalle sonde geotermiche e ciò ha ridotto il COP della macchina geotermica rispetto ai valori attesi.

Nella Figura 3.7 si può notare come la prestazione della macchina ad aria risulti inferiore a ottobre rispetto a novembre nonostante la maggiore temperatura dell'aria esterna possa far supporre il contrario.

Questo calo di efficienza è chiaramente dovuto al funzionamento parzializzato, tipico del periodo iniziale (e finale) della stagione di riscaldamento. Il grafico mostra anche come la pompa di calore ad aria fornisca prestazioni pressoché equivalenti in mesi, novembre e marzo, aventi la stessa temperatura esterna media, e come la macchina geotermica risenta invece dell'effetto di accumulo del terreno la cui temperatura a fine stagione è ancora influenzata dalle estrazioni di calore dei mesi precedenti. Quindi, se il COP mensile della macchina ad aria presenta un andamento a "U", con l'impianto geotermico, a fine stagione, non è possibile ottenere le prestazioni dell'inizio.

Questo evidenzia la sensibilità anche della macchina geotermica alle condizioni esterne; ciò assume particolare rilievo se si considerano la complessità impiantistica e l'investimento economico richiesti per la sua realizzazione, specie se dettata dall'obiettivo di ottenere un vantaggio energetico significativo. Della complessità circa lo scambio di calore col terreno e degli accorgimenti da adottare per la realizzazione di campi geotermici adeguati parleremo nel prossimo Capitolo 4.

4.1

PROBLEMATICHE DEL GEOSCAMBIO

È stato a più riprese affermato che l'efficienza di una pompa di calore è tanto maggiore quanto più è alta la temperatura della sorgente. La versione di tali macchine *a sorgente geotermica*, le quali sfruttano cioè il calore naturale del terreno, risulta per tale motivo particolarmente attraente rispetto alle macchine ad aria; tali pompe di calore, infatti, utilizzano una sorgente la cui temperatura è, durante la stagione invernale, mediamente maggiore di quella dell'ambiente esterno.

Viceversa, durante la stagione estiva, la temperatura del sottosuolo è inferiore a quella dell'aria, il che giova all'efficienza di tali apparecchi anche durante il servizio di condizionamento. Queste pompe di calore si suddividono a loro volta in due categorie: sistemi a circuito aperto, che fanno ricorso al calore dell'acqua emunta dalla falda e reimessa nella stessa, e sistemi a circuito chiuso, che estraggono calore direttamente dal terreno mediante un complesso di scambiatori (o *sonde*) lineari inseriti nel terreno, sviluppati in senso verticale o orizzontale, i quali costituiscono il cosiddetto *campo geotermico*.

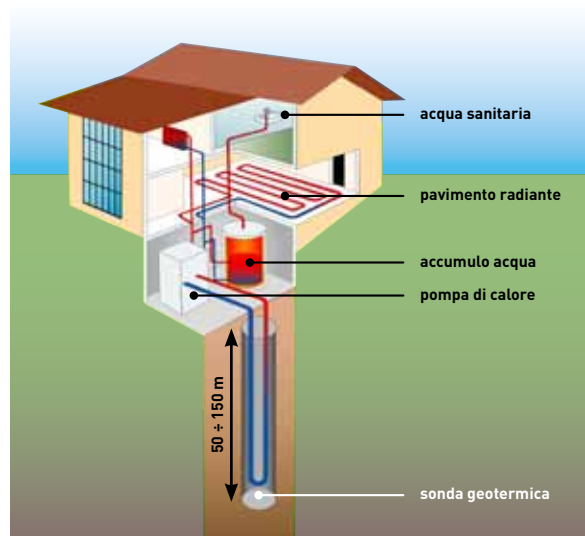
Un impianto a pompe di calore con sonde geotermiche verticali è mostrato in Figura 4.1. Come è noto, la pompa di calore fornisce calore (ed eventualmente acqua calda sanitaria) all'ambiente interno dell'edificio. Tale calore è prelevato dal terreno attraverso la sonda geotermica, la quale è perforata ad una profondità tipicamente compresa

tra 50 m e 150 m. Attraverso il ciclo frigorifero tale calore viene quindi rigenerato e ceduto all'ambiente interno.

In maniera estremamente semplificata è possibile vedere il terreno che circonda le sonde come un serbatoio dal quale l'impianto, durante la stagione invernale, attinge calore. Questa porzione di terreno dovrebbe ricaricarsi in maniera naturale prelevando a sua volta calore dal terreno circostante. Generalmente, durante la stagione invernale, si preleva più calore di quanto il terreno riesca a richiamare, per cui si assiste a una progressiva diminuzione della temperatura. Durante la stagione

FIGURA 4.1

**Schema di
impianto a pompa
di calore con
sonda geotermica
verticale.**



estiva, se l'impianto è correttamente dimensionato, il terreno dovrebbe completare il processo di ricarica e ritornare alla temperatura originaria grazie anche al calore che viene immesso nel terreno dall'impianto, funzionante eventualmente in modo reversibile quale condizionatore.

Numerosi impianti, realizzati da tempo nel Nord Europa, sfruttano questo principio con risultati soddisfacenti che stanno suscitando interesse crescente anche in Italia.

In presenza però di uno squilibrio del campo geotermico, sostanziale e non previsto in sede di progetto, tra il calore prelevato dal terreno e quello immesso, si può assistere al sistematico abbassamento della temperatura nell'intorno delle sonde geotermiche che coll'andare del tempo è causa di inconvenienti, quali:

- minore performance della pompa di calore che lavora con un'efficienza bassa e in condizioni lontane da quelle ottimali;
- rischio di congelamento dell'acqua nella sonda geotermica con conseguente blocco dell'impianto e, quindi, necessità di miscelazione con liquido antigelo (laddove consentito dalla normativa ambientale vigente);
- aumento dei consumi di pompaggio dell'acqua miscelata con antigelo a causa della maggiore viscosità;
- possibilità di congelamento del terreno, in casi estremi e ripetuti di sottrazione eccessiva dovuta a condizioni meteorologiche eccezionali o a sproporzionato sfruttamento della sorgente.

Per lo stesso motivo, in condizioni in cui lo squilibrio sia di tipo opposto, si può riscontrare un progressivo aumento della temperatura del terreno, il che porta ad un deterioramento dell'efficienza della macchina nella sua funzione di raffreddamento.

4.2

MODELLAZIONE DELLA DERIVA TERMICA

Una grandezza molto importante per il monitoraggio del fenomeno è quindi la temperatura del terreno, la cui variazione nel tempo è spesso stimata in maniera divergente rispetto ad evidenze sperimentali o a calcoli approfonditi. Talvolta, persino le norme sembrano indicare un raffreddamento o un riscaldamento del suolo, nel corso degli anni, minore di quello osservato nella realtà.

Il depauperamento termico del terreno è un fenomeno abbastanza lento, per cui gli effetti sono destinati ad enfatizzarsi con il passare degli anni a meno di interventi di mitigazione. Studi modellistici effettuati da RSE congiuntamente ad attività sperimentali indicano, in

La sorgente geotermica

caso di impianti non correttamente dimensionati, una diminuzione in dieci anni della temperatura del terreno circostante fino a 10-12 °C: un valore più che sufficiente a modificare in maniera significativa le stime iniziali sull'efficienza e profittabilità di qualunque installazione. In questi casi, i rimedi non sono semplici né tantomeno a buon mercato: si passa dagli interventi sull'involucro dell'edificio per ridurne il fabbisogno energetico all'estensione del campo geotermico, fino alla sua integrazione con altre fonti rinnovabili.

RSE ha sviluppato uno strumento di calcolo, denominato LENGTH (Low ENthalpy Ground THERmal exchange), il quale è in grado di valutare il campo termico nel terreno, di caratteristiche termofisiche assegnate, originato dopo N anni di esercizio da uno o più cluster di sonde geotermiche verticali di caratteristiche geometriche e termiche assegnate. Lo strumento è descritto in dettaglio in [16] per gli aspetti teorici ed in [17] per quelli applicativi e fornisce la valutazione su di una sezione orizzontale del sottosuolo, in presenza o meno di moto di falda. LENGTH è disponibile gratuitamente su richiesta.

Attraverso l'utilizzo di LENGTH, è stata effettuata una valutazione [16] che consente di evidenziare meglio gli aspetti quantitativi del

FIGURA 4.2

Caso esempio: visione planimetrica dell'impianto geotermico.

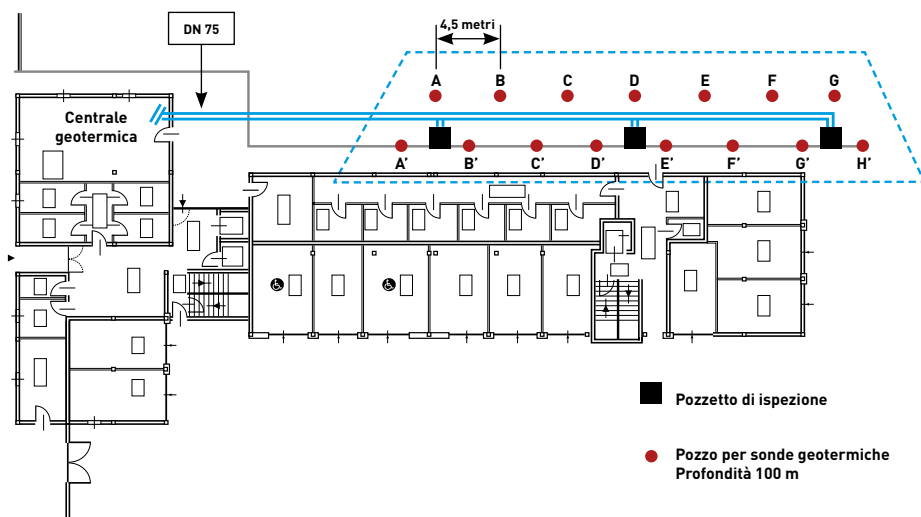
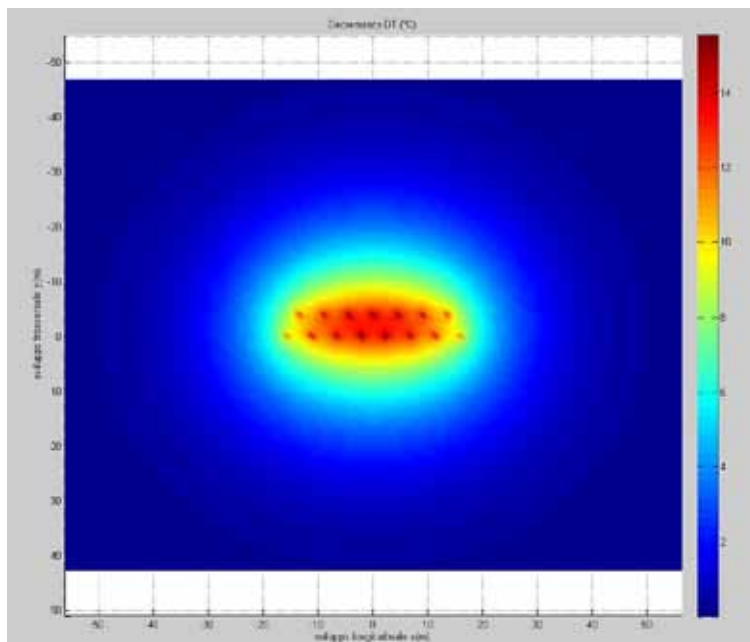


FIGURA 4.3

**Caso esempio:
perturbazione
termica nel terreno
dopo 10 anni
di funzionamento.**



fenomeno della deriva termica e che viene qui presentata, con riferimento ad un impianto composto da 15 scambiatori verticali, disposti a matrice triangolare ed associati ad un edificio con un fabbisogno di solo riscaldamento di 173.000 kWh/anno (vedasi lo schema in pianta di Figura 4.2)

In Figura 4.3 viene riportato il campo stimato da LENGTH del decremento della temperatura, rispetto al valore indisturbato di 15 °C, che si riscontra dopo 10 anni di esercizio ininterrotto dell'impianto per solo riscaldamento. Si osserva che tale decremento è massimo in prossimità della parete dei perfori che alloggiavano gli scambiatori verticali e può raggiungere valori prossimi ai 15 °C (con il che si osserverebbe il congelamento del terreno circostante).

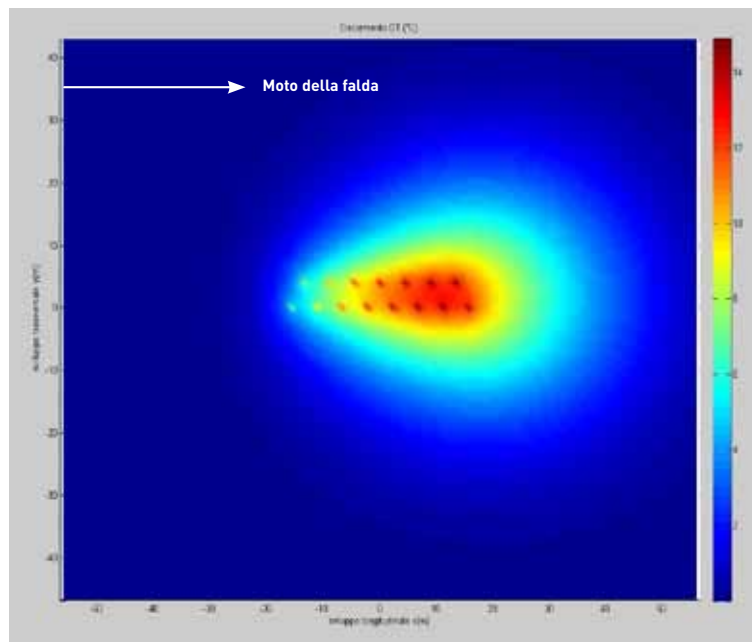
È anche individuabile una porzione di terreno circostante gli scambiatori verticali, denominata *volume di accumulo*, in cui si localizza la parte più rilevante del fenomeno della deriva termica.

Tale volume è composto dall'unione dei cilindri di raggio pari alla semi-distanza tra le sonde e centrati sulle sonde stesse (nel caso in esame, vedasi l'area trapezoidale a bordo blu tratteggiata di Figura 4.2). La deriva termica può essere valutata quantitativamente come

La sorgente geotermica

FIGURA 4.4

Caso esempio:
perturbazione
termica nel terreno
dopo 10 anni di
funzionamento –
 $U=4$ m/anno.
Layout in direzione
del moto di falda.



la variazione media della temperatura entro tale volume, che nel caso in esame risulta pari ad un decremento di 11 °C.

La valutazione appena presentata prescinde dalla presenza di un moto di falda il quale, invece, può influire in maniera notevole e a volte determinante sul contenimento della deriva termica, poiché consente di affiancare allo scambio termico conduttivo tra scambiatore e terreno una ulteriore componente convettiva, la quale si dimostra assai efficace al crescere della velocità di falda stessa. Ovviamente, in questo caso anche la direzione del moto di falda rispetto al layout del campo degli scambiatori ha grande rilievo. Nelle Figure 4.4, 4.5 e 4.6 è riportato il campo di perturbazione termica per vari valori U della velocità di falda e per diverse direzioni della velocità stessa.

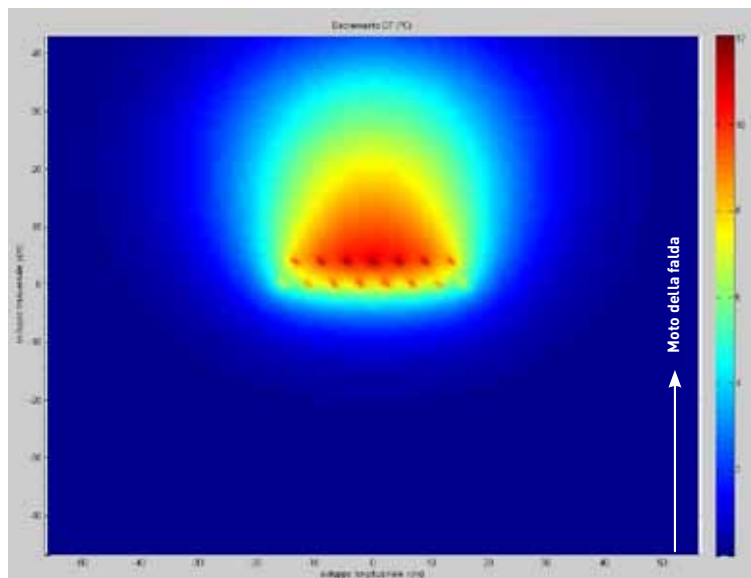
In particolare, il calcolo di Figura 4.4 mostra l'effetto benefico del moto di falda che porta la deriva dagli 11 °C in assenza di moto di falda a 9,2 °C.

Il calcolo di Figura 4.5 evidenzia l'influenza positiva del moto di falda in direzione trasversale, che abbassa la deriva a 7,7 °C.

Il confronto tra la Figura 4.4 e la Figura 4.5 fornisce anche indicazioni sulla più opportuna disposizione in pianta da adottare, che

FIGURA 4.5

Caso esempio:
perturbazione
termica nel terreno
dopo 10 anni
di funzionamento –
 $U=4$ m/anno. Layout
perpendicolare
al moto di falda.

**FIGURA 4.6**

Caso esempio:
perturbazione
termica nel terreno
dopo 10 anni
di funzionamento –
 $U=40$ m/anno.
Layout in direzione
del moto di falda.

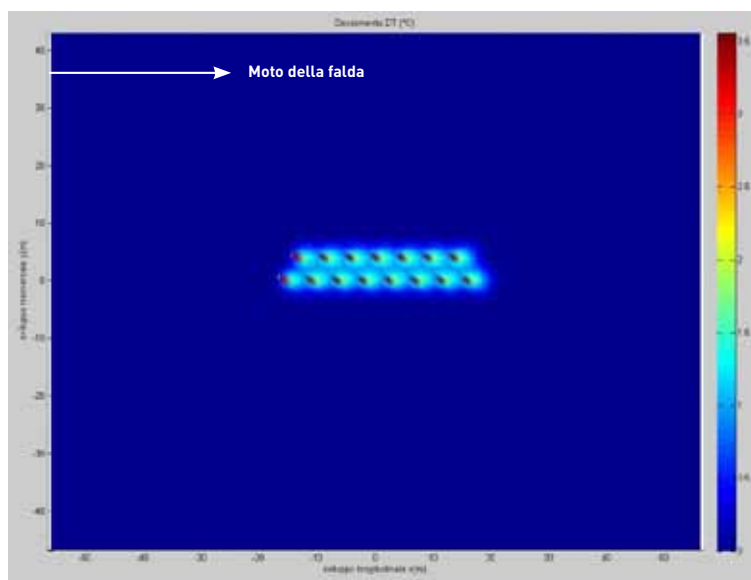
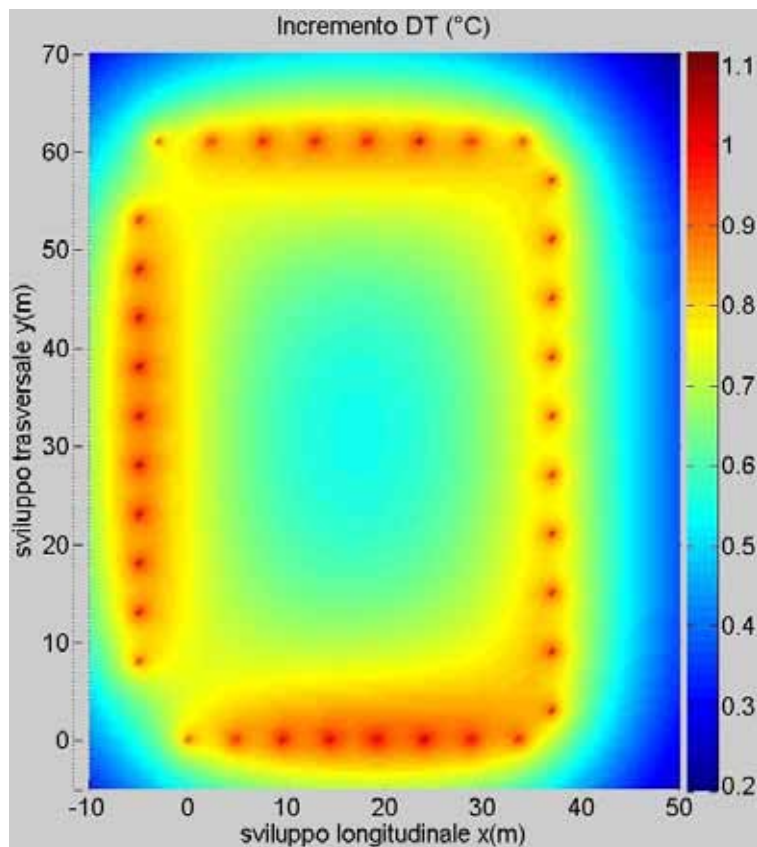


FIGURA 4.7

Caso esempio con fabbisogno di climatizzazione equilibrato: perturbazione termica nel terreno dopo 10 anni di funzionamento.



consiste qualitativamente nello sviluppo del layout in direzione ortogonale al senso del moto di falda in modo tale da minimizzare gli effetti della scia termica che ciascuna sonda produce.

La Figura 4.6 indica inoltre che un più intenso moto di falda, di 40 metri/anno, può portare la deriva a valori trascurabili (circa 1 °C).

Infine, nella successiva Figura 4.7 viene presentato il campo perturbato relativo ad una situazione in cui la pompa di calore geotermica è chiamata a soddisfare un carico invernale equilibrato con uno estivo. Il campo geotermico è realizzato attraverso 36 scambiatori verticali a terreno disposti attorno al perimetro dell'edificio. In virtù di una più accorta progettazione termica, il calore sottratto al terreno nella stagione invernale compensa quello ceduto ad esso in quella

estiva e la deriva risultante, che corrisponde ad un aumento di temperatura, è del tutto trascurabile.

4.3

DIMENSIONAMENTO DI MASSIMA DI UN CAMPO GEOTERMICO

Il problema della valutazione di massima della lunghezza totale di scambio per sonde verticali, del numero delle sonde e della superficie di terreno impegnata, a fronte della semplice caratterizzazione dell'edificio (localizzazione, criteri di progetto e tipologia), è stata affrontata da RSE in una recente attività di ricerca [17].

In tale valutazione, si ipotizza che l'impianto a pompa di calore sia destinato al soddisfacimento del fabbisogno di caldo invernale e di freddo estivo. Ovviamente, la totalità degli altri parametri in gioco relativi alla pompa di calore (COP/EER di progetto e stagionali, temperature

TABELLA 4.1

Pompa di Calore.

	Riscaldamento	Raffrescamento
COP / EER di progetto [-]	3,8	3,3
Temperatura in ingresso alla PdC lato terreno in condizioni di progetto [°C]	6	28
Temperatura in uscita dalla PdC lato terreno in condizioni di progetto [°C]	2	32
COPms / EERms medio stagionale [-]	4,7	4,1

TABELLA 4.2

**Scambiatore di
Calore a Terreno.**

Tipologia doppia U	
Tubazione	
Diametro interno della tubazione [mm]	26
Diametro esterno della tubazione [mm]	32
Distanza tra le tubazioni all'interno della perforazione [mm]	45,2
Conduttività termica del materiale della tubazione [W/(m K)]	0,4
Diametro della perforazione [mm]	150
Conduttività termica del materiale di riempimento [W/(m K)]	1,7
Campo geotermico	
Tipologia di layout	a matrice
Interasse tra le sonde [m]	7

La sorgente geotermica

TABELLA 4.3

Terreno.

Conduttività termica [W/(m K)]	1,7
Capacità termica volumica [MJ/(m ³ K)]	2,5
Temperatura indisturbata [°C]	
Milano	12,41
Roma	15,24
Palermo	18,42

di evaporazione e condensazione), allo scambiatore di calore a terreno (tipologia e geometria) e al terreno (proprietà termofisiche) è stata determinata sulla base delle buone pratiche applicate oggi negli impianti geotermici. Le Tabelle 4.1, 4.2 e 4.3 mostrano i valori così attribuiti d'ufficio alla pompa di calore, allo scambiatore a terreno e al terreno stesso.

In particolare, per quanto riguarda la temperatura indisturbata del terreno, essa è stata considerata pari alla media annuale dell'aria esterna in base ai dati climatici delle località esaminate. Per quanto riguarda il campo geotermico, è stata considerata una disposizione del tipo a matrice con l'interasse pari a 7 metri e si è supposto assente il moto di falda. Inoltre, la disposizione degli scambiatori influenza notevolmente le prestazioni dell'impianto, soprattutto quando i fabbisogni energetici lato terreno (di riscaldamento e raffrescamento) sono particolarmente sbilanciati; in questo studio è stata adottata la soluzione più compatta, per limitare la superficie di terreno.

Una siffatta metodologia, che è utile per un approccio alla problematica di primissima approssimazione ma di assai immediato utilizzo, è denominata *metodo standardizzato*. La Tabella 4.4 mostra, per assegnate tipologie, criteri di progetto degli edifici e per le tre zone climatiche delle città di Milano, Roma e Palermo, i valori dei parametri ottenuti mediante il *metodo standardizzato*.

Come è possibile osservare, per le località di Roma e Palermo, per la singola tipologia edilizia, il criterio di progettazione adottato non porta a grandi differenze in termini di lunghezza totale di scambio e di ingombro superficiale.

Questo è dovuto al fatto che l'impianto geotermico risulta essere dimensionato prevalentemente sul fabbisogno di raffrescamento che non varia molto al variare del criterio di progettazione stesso. Risulta inoltre evidente come per la località di Milano, adottando criteri di progettazione dell'involucro sempre più stringenti, la lunghezza totale degli scambiatori si riduca anche più del 50 per cento. Ciò suggerisce che agire sull'involucro edilizio è sicuramente prioritario rispetto al ricorso ad un impianto innovativo o a fonti rinnovabili, con un risparmio sia economico sia energetico.

TABELLA 4.4

Risultati del *metodo standardizzato*.

	Tipologia Condominio	Criteri di progettazione	Edificio				
			Sc [m²]	E _H [kWh]	E _C [kWh]	P _H [kW]	P _C [kW]
MILANO	Grande	373/76	1.920	182.238	-54.495	119,04	-114,70
	Grande	10/91		98.946	-55.543	82,56	-101,64
	Grande	DPR 59/09		48.322	-58.898	55,68	-86,28
	Medio	373/76	960	97.209	-24.229	62,4	-58,31
	Medio	10/91		53.357	-24.519	44,16	-51,78
	Medio	DPR 59/09		26.549	-26.801	29,76	-43,14
	Piccolo	373/76	480	56.150	-10.655	34,08	-29,15
	Piccolo	10/91		32.346	-10.564	24	-25,89
	Piccolo	DPR 59/09		15.924	-12.140	16,32	-21,57
	Monofamiliare	373/76	90	16.571	-1.420	8,91	-5,39
	Monofamiliare	10/91		10.651	-1.361	6,03	-4,78
	Monofamiliare	DPR 59/09		5.215	-1.684	3,96	-4,06
ROMA	Grande	373/76	1.920	92.797	-72.457	109,44	-97,0
	Grande	10/91		43.462	-68.636	76,8	-89,86
	Grande	DPR 59/09		11.292	-73.524	42,24	-82,18
	Medio	373/76	960	50.795	-31.954	58,56	-47,53
	Medio	10/91		24.183	-30.331	41,28	-43,01
	Medio	DPR 59/09		6.218	-33.860	22,08	-40,13
	Piccolo	373/76	480	31.506	-13.878	32,16	23,29
	Piccolo	10/91		16.204	-13.424	22,56	-21,03
	Piccolo	DPR 59/09		4.429	-15.873	12,96	-20,07
	Monofamiliare	373/76	90	10.705	-1.860	8,73	-4,11
	Monofamiliare	10/91		6.394	-1.763	5,94	-3,78
	Monofamiliare	DPR 59/09		2.093	-2.452	3,42	-3,60
PALERMO	Grande	373/76	1.920	28.523	-113.940	82,56	-118,08
	Grande	10/91		19.125	-87.491	67,20	-105,97
	Grande	DPR 59/09		759	-96.593	21,12	-94,45
	Medio	373/76	960	15.442	-51.462	44,16	-60,00
	Medio	10/91		10.982	-39.021	36,48	-52,99
	Medio	DPR 59/09		508	-44.085	12,48	-47,23
	Piccolo	373/76	480	10.278	-24.148	24,48	-30,00
	Piccolo	10/91		8.042	-18.145	21,12	-26,97
	Piccolo	DPR 59/09		677	-21.107	8,64	-23,61
	Monofamiliare	373/76	90	4.064	-3.991	6,30	-5,82
	Monofamiliare	10/91		3.588	-2.953	5,76	-5,35
	Monofamiliare	DPR 59/09		772	-3.658	2,97	-4,54

La sorgente geotermica

Scambiatore di calore a terreno

Q_a [kW]	L_d [m]	L' [m]	N [-]	S [m ²]
8,369	3.500	100	35	1715
1,005	2.000	100	20	980
-4,021	1.500	100	15	735
5,295	1.800	100	18	882
1,313	1.000	100	10	490
-1,420	700	100	7	343
3,533	1.000	100	10	490
1,407	600	100	6	294
-0,293	351	117	3	147
1,288	252	84	3	147
0,764	170	85	2	98
0,230	100	100	1	49
-1,949	2.000	100	20	980
-5,840	2.000	100	20	980
-9,425	2.000	100	20	980
0,027	1.000	100	10	490
-2,134	900	100	9	441
-4,249	1.000	100	10	490
0,861	500	100	5	245
-0,450	400	100	4	196
-1,856	500	100	5	245
0,698	150	75	2	98
0,324	100	100	1	49
-0,160	80	80	1	49
-13,616	4.200	100	42	2.058
-10,705	3.500	100	35	1.715
-13,648	3.500	100	35	1.715
-5,920	2.000	100	20	980
-4,554	1.600	100	16	784
-6,214	1.600	100	16	784
-2,505	1.000	100	10	490
-1,854	800	100	8	392
-2,936	800	100	8	392
-0,201	160	80	2	98
-0,097	140	70	2	98
-0,450	130	65	2	98

LEGENDA:

- Sc** Totale superficie calpestabile assunta per l'edificio
- E_H** Energia termica annuale richiesta per il riscaldamento (esclusa la produzione di acqua calda sanitaria)
- E_C** Energia frigorifera annuale richiesta per il raffrescamento (sensibile e latente)
- P_H** Potenza termica massima durante la stagione di riscaldamento
- P_C** Potenza frigorifera massima (in valore assoluto) durante la stagione di raffrescamento
- Q_a** Potenza termica annuale media vista dal terreno
- L_d** Lunghezza totale risultante degli scambiatori di calore a terreno
- L'** Lunghezza risultante del singolo scambiatore di calore a terreno
- N** Numero risultante degli scambiatori di calore a terreno
- S** Superficie risultante occupata dagli scambiatori di calore a terreno

In conclusione, le pompe di calore geotermiche, in particolare quelle a circuito chiuso, costituiscono una soluzione tecnologica per la climatizzazione degli ambienti di edilizia civile che presenta requisiti molto interessanti per quanto riguarda l'efficienza energetica e la sua relativa indipendenza dalle condizioni ambientali esterne.

Tale tipologia impiantistica è però anche di sensibile complessità; è allora richiesta attenzione e competenza in fase di progettazione, al fine di evitare gli effetti legati al depauperamento della sorgente geotermica che inevitabilmente si risolvono in un deterioramento a medio e lungo termine di un'efficienza di per sé assai concorrenziale con altre tecnologie più diffuse.

Interazione fra edificio e pompa di calore



Gli addetti ai lavori definiscono interazione edificio-impianto la reciproca influenza che ciascuno di questi due sottosistemi esercita sull'altro, influenzandone (nel bene o nel male) l'efficacia e l'efficienza nello svolgere il compito previsto.

Tale comportamento è stato osservato sistematicamente nei tanti monitoraggi di sistemi di climatizzazione svolti da RSE, nel corso dei quali si è riscontrato come, ad esempio, le prestazioni energetiche di impianti a pompa di calore siano dipese dallo stato dell'involucro, dai tempi di occupazione e dalle temperature impostate. Da queste esperienze è nata l'esigenza di poter disporre di strumenti di simulazione versatili, capaci di predire il comportamento di impianti ed edifici tipici prima ancora di costruirli. A tale scopo è stata condotta un'attività di ricerca [18] che ha fornito indicazioni sui consumi di macchine *stato dell'arte* in edifici residenziali.

Il punto di partenza è stato il monitoraggio di una piccola unità di tipo aria/acqua dotata di inverter. Dall'analisi critica dei dati sperimentali e sulla base di considerazioni termodinamiche è stato sviluppato un modello analitico in grado di simulare, con passo orario, le prestazioni di macchine simili a quella monitorata. In estrema sintesi, tale modello esprime il COP e l'EER come il prodotto di più termini:

$$COP = COP_{fl} \times PLF \times DOF = [1 + \alpha_h \times (COP_{Carnot} - 1)] \times \frac{PLR}{\beta_h \times PLR' + 1 - \beta_h} \times (1 - \gamma_h \times CSF) \quad (4)$$

$$EER = EER_{fl} \times PLF = \alpha_c \times EER_{Carnot} \times \frac{PLR}{\beta_c \times PLR + 1 - \beta_c} \quad (5)$$

Il primo termine (pedice fl) rappresenta le prestazioni a pieno carico di una pompa di calore reale correlandole alle prestazioni di un ciclo ideale operante alle medesime temperature. Il secondo termine (PLF) tiene conto della perdita di efficienza che si osserva nel caso di carichi parziali ed è funzione del livello di parzializzazione (PLR). Infine, il terzo termine (DOF), presente solo in regime di riscaldamento, esprime la perdita di efficienza dovuta alle inversioni del ciclo necessarie per provvedere allo scioglimento della brina formata sullo scambiatore esterno. Questo termine dipende dalle condizioni termo-igrometriche dell'aria esterna attraverso un fattore di severità climatica (CSF). Le variabili che alimentano il modello sono la temperatura e l'umidità dell'aria esterna, la temperatura di mandata dell'acqua del circuito di climatizzazione e il fabbisogno termico dell'edificio. Infine, le specificità proprie di ciascuna macchina sono tenute in considerazione attraverso parametri (α , β e γ) determinati attraverso le campagne di monitoraggio.

Grazie all'integrazione di questo modello all'interno di un programma di simulazione dinamica del carico termico degli edifici sviluppato *ad hoc*, è stato creato uno strumento che consente di eseguire interessanti valutazioni, a partire dalla determinazione dei fabbisogni stagionali e delle potenze di picco necessarie per garantire la temperatura desiderata all'interno degli edifici, fino al calcolo dei fattori di prestazione di impianti a pompa di calore, sia a livello stagionale sia relativi all'intero anno.

A titolo esemplificativo delle potenzialità dello strumento, in Tabella 5.1 si riportano i risultati di un'analisi su un campione di edifici residenziali, in parte monofamiliari e in parte bifamiliari, differenti per località (Milano, Roma e Palermo) e per epoca di costruzione (Anni '80, Anni '90 e nuovi). Le prestazioni degli impianti sono rappresentate attraverso gli indici *SCOP* (fattore di prestazione stagionale in riscaldamento), *SEER* (fattore di prestazione stagionale in raffrescamento) e *APF* (fattore di prestazione annuale), definiti come:

$$SCOP = \frac{\sum_i Q_{h,i}}{\sum_i E_{h,i}} \quad SEER = \frac{\sum_i Q_{c,i}}{\sum_i E_{c,i}} \quad APF = \frac{\sum_i Q_{h,i} + Q_{c,i}}{\sum_i E_{h,i} + E_{c,i}} \quad (6)$$

dove Q è l'energia termica fornita, E è l'energia elettrica assorbita, i pedici h e c fanno riferimento al riscaldamento e al raffrescamento e le sommatorie sono estese alle ore che compongono le relative stagioni o l'intero anno. I consumi tengono conto anche della pompa di

Interazione fra edificio e pompa di calore

circolazione (generalmente incide per circa il 10 per cento).

Le simulazioni hanno permesso di formulare alcune considerazioni:

- Avere un'unica pompa di calore che soddisfa sia il servizio di riscaldamento che quello di raffrescamento è una soluzione interessante per edifici di piccole dimensioni. In questo caso il dimensionamento dell'impianto è da farsi sulla stagione più severa la quale coincide, per gli edifici trattati, con l'inverno a Milano e a Roma e con l'estate a Palermo. Questo aspetto non deve essere tralasciato perché una macchina dimensionata perfettamente sul servizio più severo può risultare molto sovradimensionata per l'altro servizio.

Questo aspetto è particolarmente marcato negli edifici meno recenti di Roma e Milano, in cui la potenza che la macchina può erogare in raffrescamento è più del doppio del necessario; ciò si ripercuote sull'efficienza stagionale che, nonostante la presenza di un inverter, risulta penalizzata dalla parzializzazione (meno 25 per cento circa) come si vede in Figura 5.1. A Palermo la situazione è opposta, in quanto il sovradimensionamento avviene in

TABELLA 5.1

Fabbisogno termico e prestazioni annuali e stagionali.

Località	Categoria edificio	Epoca	Fabbisogno termico [kWh/m²/anno]		Prestazioni (temperatura di mandata fissa)			Prestazioni [strategia di compensazione climatica]		
			risc.	raff.	APF	SCOP	SEER	APF	SCOP	SEER
Milano	Monofamiliare	'80	181	11	2,49	2,52	2,03	2,68	2,70	2,37
		'90	117	11	2,49	2,52	2,27	2,69	2,69	2,69
		New	58	13	2,44	2,42	2,55	2,65	2,58	3,08
	Bifamiliare	New	43	15	2,55	2,43	2,93	2,78	2,58	3,58
Roma	Monofamiliare	'80	115	14	2,87	2,96	2,30	3,25	3,33	2,72
		'90	70	15	2,80	2,89	2,44	3,18	3,24	2,92
		New	24	18	2,81	2,71	2,94	3,24	3,02	3,59
	Bifamiliare	New	15	21	2,99	2,70	3,23	3,47	2,96	3,96
Palermo	Monofamiliare	'80	43	25	3,18	3,39	2,87	3,74	4,03	3,33
		'90	38	23	3,19	3,41	2,89	3,76	4,06	3,35
		New	9	27	2,98	2,84	3,03	3,53	3,35	3,59
	Bifamiliare	'80	30	28	3,16	3,39	2,95	3,72	4,03	3,44
		'90	25	26	3,13	3,36	2,94	3,69	4,00	3,44
		New	5	29	3,03	2,52	3,12	3,60	2,94	3,73

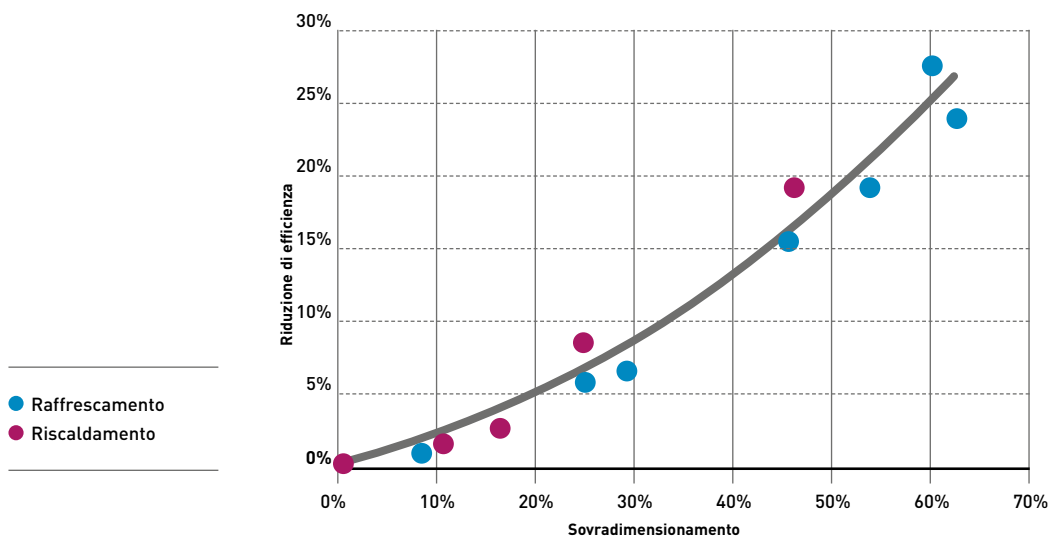
riscaldamento ed è rilevante solo per gli edifici nuovi (le riduzioni di efficienza sono del 19 per cento nel bifamiliare e del 9 per cento nel monofamiliare). Per evitare questi *effetti collaterali* si potrebbe dotare l'edificio di un adeguato sistema di accumulo il quale, però, comporterebbe una riduzione di efficienza a causa delle dispersioni termiche del serbatoio e un aumento dei costi di investimento.

Una soluzione alternativa potrebbe essere l'utilizzo di due pompe di calore in serie, di cui una di tipo reversibile, scelta in base alla minima tra la potenza termica e frigorifera, e l'altra, non reversibile, con funzione integrativa del solo servizio più severo. In tal modo l'impianto sarebbe correttamente dimensionato per entrambe le stagioni; di contro, però, si avrebbe una maggiore complessità e un aumento dei costi. Una variante, tesa a limitare gli svantaggi della soluzione precedente, consiste nell'utilizzo di un'unica macchina dotata di due compressori. Tuttavia bisogna constatare la difficoltà di reperire sul mercato macchine pluricompressore nel campo delle basse potenze.

- Sovradimensionamento a parte, le prestazioni stagionali sono influenzate principalmente dal clima e secondariamente dall'età e

FIGURA 5.1

Riduzione di efficienza dovuta al sovradimensionamento nella stagione meno severa.



Interazione fra edificio e pompa di calore

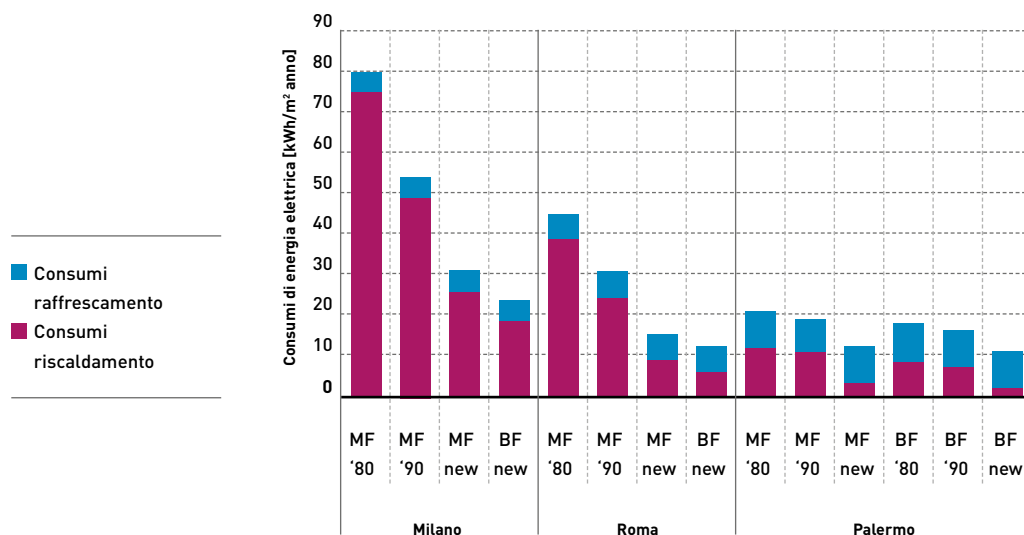
dalla tipologia dell'edificio. Il ruolo del clima è ovvio mentre la maniera in cui il tipo di edificio impatta sull'efficienza è più sottile.

In particolare in quelli più recenti e quindi migliori sotto il punto di vista dell'isolamento termico le prestazioni sono lievemente peggiori. Ciò avviene perché negli edifici maggiormente coibentati il fabbisogno termico tende ad annullarsi nei giorni più miti e quindi, in media, gli impianti lavorano con temperature dell'aria esterna più basse. Il fattore di forma gioca il medesimo ruolo dell'isolamento dell'involucro, cosicché negli edifici più dispersivi si ottengono risultati leggermente migliori. In tali edifici, tuttavia, a parità di temperatura dell'acqua del circuito di climatizzazione (ipotesi assunta nelle simulazioni) è necessario disporre di emettitori con una superficie maggiore. Altrimenti, per mantenere il medesimo livello di comfort, è necessario innalzare la temperatura di condensazione con una conseguente perdita di efficienza.

- Il valore che assume l'indice APF dipende soprattutto dal clima della località e le differenze che si osservano a livello stagionale per una medesima località tendono a compensarsi su base an-

FIGURA 5.2

Consumi di energia elettrica per riscaldamento e per raffrescamento negli edifici di riferimento.



nuale. Inoltre, nonostante lo sbilanciamento tra le potenze di picco estiva e invernale provochi un sovradimensionamento nella stagione meno severa e conseguentemente una cospicua riduzione delle prestazioni, a livello annuale l'effetto è attenuato. Ciò avviene perché maggiore è lo sbilanciamento tra le potenze, minore è il peso dei consumi della stagione meno severa su quelli annuali.

- In generale, il fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento si riduce notevolmente per gli edifici più recenti, mentre quello per raffrescamento rimane pressappoco costante. Pertanto il peso delle prestazioni estive aumenta negli edifici più recenti (vedi Figura 5.2).
- L'adozione di una strategia di compensazione climatica nella regolazione della temperatura dell'acqua del circuito di climatizzazione consente di migliorare le prestazioni. In particolare il miglioramento è maggiore laddove gli inverni sono miti e le estati non troppo calde. Difatti, in modalità riscaldamento, il miglioramento è di circa il 7 per cento a Milano, l'11 per cento a Roma e il 18 per cento a Palermo. In raffrescamento, invece, le differenze tra le località sono meno marcate: il beneficio è intorno al 20 per cento a Milano, 21 a Roma e 17 per cento a Palermo.

Analisi costi/benefici: alcuni esempi



Questo capitolo esamina i costi per la climatizzazione degli edifici residenziali confrontando gli impianti a pompa di calore con altri basati su tecnologie più tradizionali. Lo scopo dell'analisi è quello di verificare se, e in quale misura, il maggiore costo che si presume di dover sostenere per l'installazione di una pompa di calore sia ripagato attraverso i risparmi in bolletta conseguiti grazie alla sua efficienza energetica.

Le applicazioni trattate riguardano *sistemi di climatizzazione a ciclo annuale*, intendendosi gli impianti in grado di rispondere a esigenze di riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda per usi sanitari. Sono considerate due tipologie abitative, un edificio monofamiliare e un condominio composto da 12 appartamenti, che per una completa rappresentatività territoriale si considerano situate in tre diverse zone climatiche del Paese: Sud (località di riferimento Palermo, zona climatica B); Centro (località di riferimento Roma, zona climatica D); Nord (località di riferimento Milano, zona climatica E).

I casi considerati riguardano edifici nuovi, o soggetti a completa ristrutturazione, per la possibilità di scegliere liberamente la soluzione impiantistica più idonea senza vincoli architettonici o la necessità/opportunità di riutilizzare parte dell'esistente. A tale proposito, si è fatto riferimento a due soluzioni ritenute equivalenti in relazione al servizio erogato.

- **Impianto tradizionale.** Installazione di un sistema di riscaldamento costituito da una caldaia a condensazione con distribuzione a pavimento radiante, integrato da condizionatore RAC¹ ad espansione diretta con quattro unità interne (due per la zona giorno e due per la zona notte). Nell'edificio unifamiliare si hanno in sostanza due impianti autonomi indipendenti e la richiesta di acqua calda sanitaria è soddisfatta dalla caldaia in modalità istantanea.

Il condominio prevede invece il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria entrambi centralizzati mentre per il condizionamento di ciascuna unità abitativa sono previsti sistemi autonomi identici a quello adottato per l'unifamiliare.

- **Impianto a pompa di calore.** Installazione di una pompa di calore aria-acqua reversibile con terminali fan coil, per la climatizzazione invernale ed estiva, nonché produzione e accumulo di acqua calda sanitaria. L'impianto sarà di tipo autonomo per l'edificio unifamiliare e centralizzato con contabilizzazione individuale dei consumi nel caso del condominio.

L'analisi economica ha l'obiettivo di accertare quale alternativa presenta i costi minori durante il ciclo di vita, previsto di 15 anni, con valutazioni nella prospettiva dell'utente finale svolte in *differenziale*, confrontando cioè la variazione dell'investimento iniziale con la differenza attualizzata e cumulata dei costi di esercizio. Oltre al calcolo della convenienza economica per il privato, è anche svolta una valutazione preliminare inerente i possibili benefici per la collettività (*esternalità positive*) determinati dall'utilizzo della pompa di calore. In particolare:

- minor consumo di energia primaria;
- minori emissioni di CO₂;
- utilizzo di energia da fonte rinnovabile come contributo alla quota obiettivo nazionale prevista al 2020 dalla Direttiva 2009/28/CE [4].

Nel seguito saranno esaminate separatamente le due tipologie abitative considerate, avvertendo che le considerazioni esposte, benché valide per confronti fra i diversi impianti utilizzati in condizioni di funzionamento ben differenziate, non possono ritenersi sempre generalizzabili. Per snellire la trattazione si è deciso inoltre di non

¹ Room Air Conditioning.

riportare qui le ipotesi di lavoro, i metodi di calcolo e i risultati delle elaborazioni relativi a fabbisogni, costi e prestazioni. I lettori interessati troveranno tutti i dettagli in [20] e [21].

6.1

EDIFICIO MONOFAMILIARE

6.1.1

Climatizzazione a ciclo annuale

La seguente Figura 6.1 riporta il confronto fra il maggior costo di investimento della soluzione a pompa di calore e la somma attualizzata dei risparmi di costo annuo di esercizio che essa consente.

Con le ipotesi adottate è riscontrabile una certa indifferenza circa l'effettiva profittabilità della pompa di calore a Palermo e a Roma, mentre a Milano il recupero del costo di investimento attraverso i risparmi in bolletta sembra invece possibile. Il vantaggio aumenta dunque al crescere dei fabbisogni di riscaldamento ma anche a Milano rimane piuttosto basso (quasi 40 euro/anno).

Ora, se la profittabilità economica per l'utilizzatore privato sembra talvolta in dubbio, sono fuori discussione altri benefici che riguardano maggiormente la sfera sociale, quali: il minor consumo

FIGURA 6.1

Confronto fra il Δ costo iniziale e la somma dei risparmi di esercizio attualizzati della pompa di calore rispetto all'impianto tradizionale. (Climatizzazione a ciclo annuo).

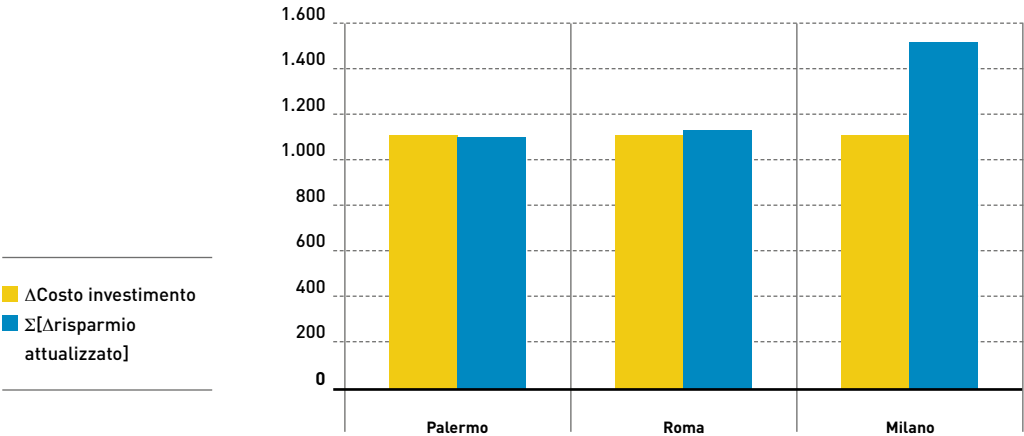


FIGURA 6.2

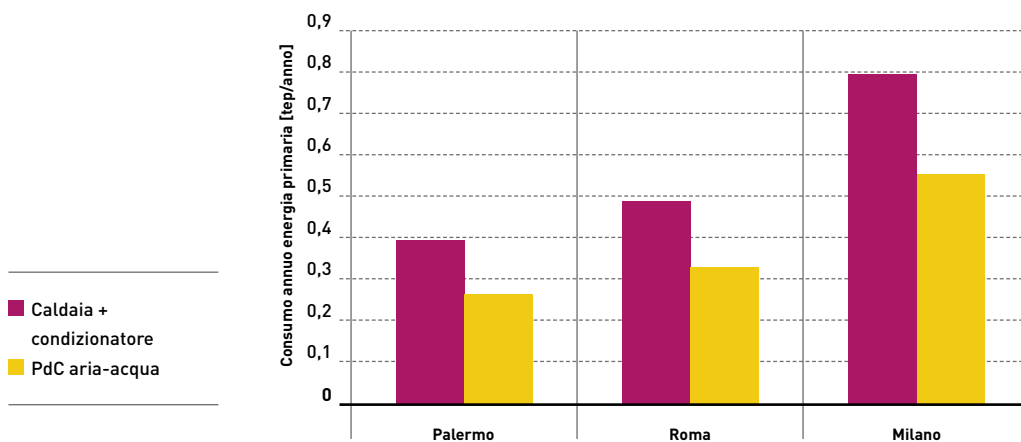
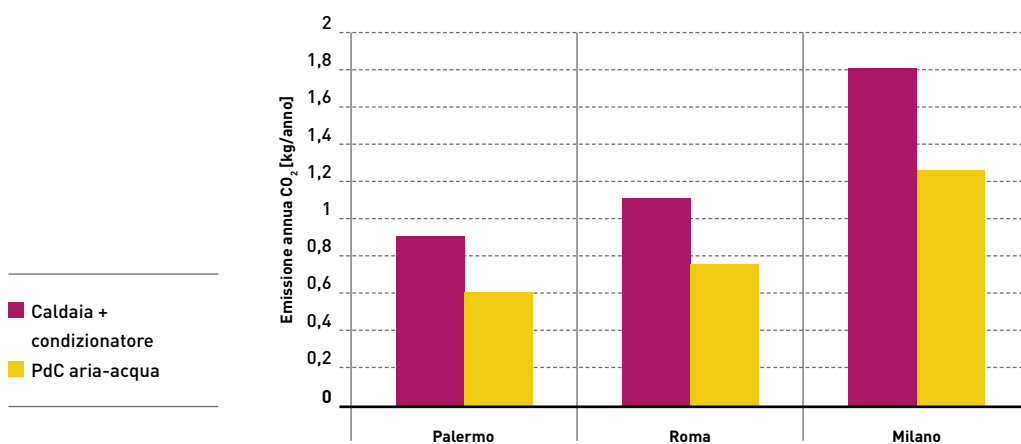
Consumo annuo di energia primaria negli interventi considerati².

FIGURA 6.3

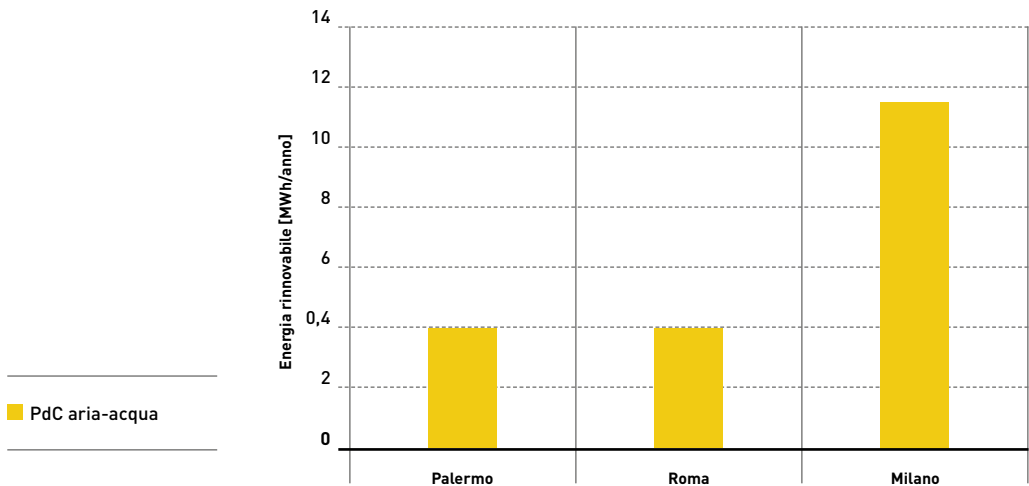
Emissione annua di CO₂ negli interventi considerati².

² Il consumo di energia fossile primaria e l'emissione di CO₂ della pompa di calore è stato calcolato assumendo che sia alimentata da un ciclo combinato di ultima generazione.

Analisi costi/benefici: alcuni esempi

FIGURA 6.4

Energia rinnovabile utilizzata dalla pompa di calore³.



di energia primaria, la riduzione di emissioni e l'utilizzo di energia rinnovabile.

Come risulta evidente dalle Figure 6.2, 6.3 e 6.4, sotto questo aspetto la pompa di calore dimostra la sua superiorità sul sistema tradizionale. Superiorità che giustificherebbe un riconoscimento economico sotto forma di incentivo alla diffusione negli ambiti dove la convenienza economica diretta è meno significativa o addirittura assente.

6.1.2

Richiesta di solo riscaldamento

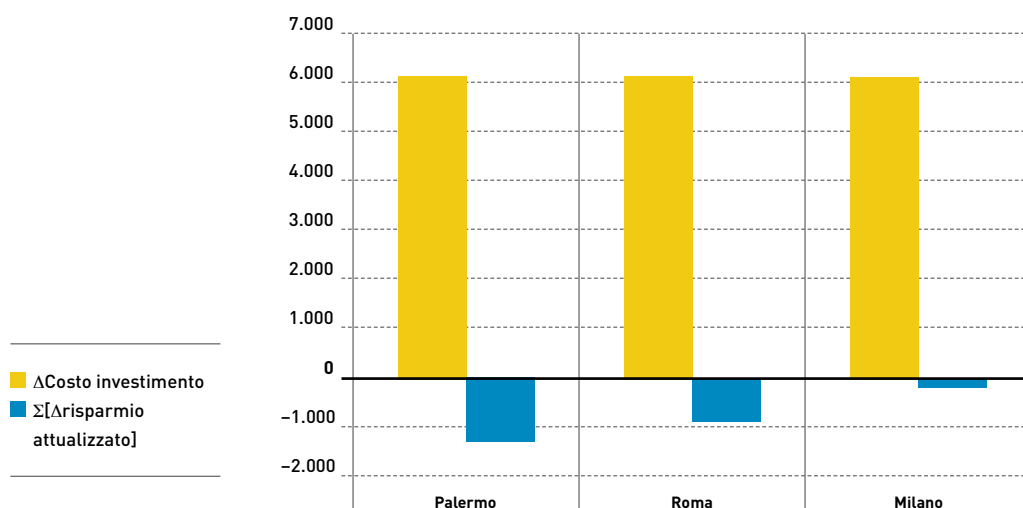
Nel caso in cui è richiesto di soddisfare il solo fabbisogno invernale, la differenza di costo di impianto aumenta in favore della soluzione tradizionale la quale non deve più dotarsi del condizionatore mentre rimangono pressoché immutati i costi della pompa di calore.

Per contro, nonostante la maggiore efficienza, i costi energetici di quest'ultima aumentano anziché diminuire (vedi Figura 6.5) dove si osservano dei risparmi negativi. Ciò a causa dell'incidenza dei costi

³ L'energia rinnovabile utilizzata dalla pompa di calore è stata calcolata secondo la metodologia descritta nel Capitolo 8.

FIGURA 6.5

Confronto fra il Δ costo iniziale e la somma dei risparmi di esercizio attualizzati della pompa di calore rispetto all'impianto tradizionale. (Richiesta di solo riscaldamento).



fissi della fornitura di energia elettrica che continuano a gravare anche quando la pompa di calore non è utilizzata, il che non giustifica economicamente l'impiego di una pompa di calore ad azionamento elettrico per il solo servizio di riscaldamento.

6.1.3

Impianto a pompa di calore ad assorbimento a gas

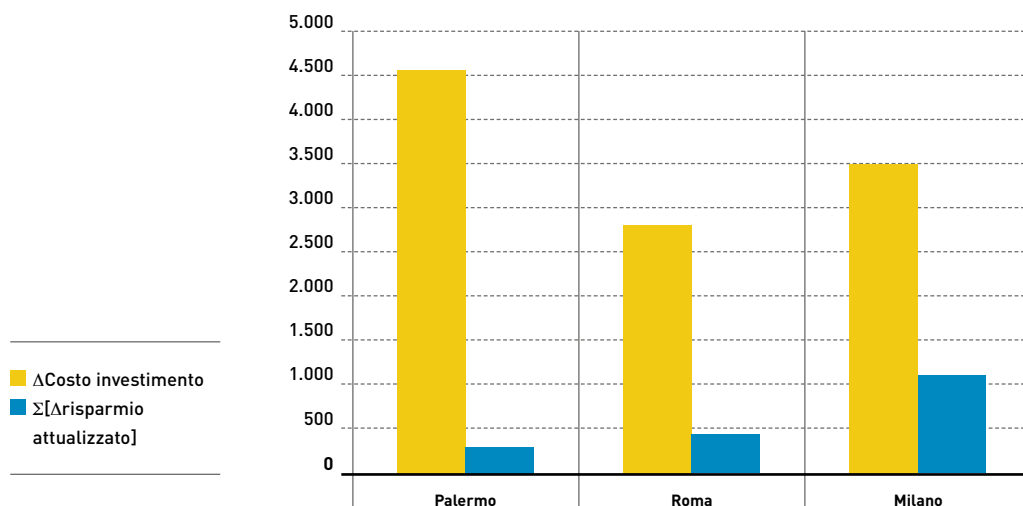
L'utilizzo di una pompa di calore ad assorbimento è certamente interessante, tuttavia la minima taglia oggi disponibile sul mercato è pari a 35 kW e risulta largamente sovradimensionata per le normali necessità di climatizzazione di un edificio unifamiliare⁴.

L'apparecchiatura attualmente commercializzata sarà presa in considerazione in seguito a proposito dell'utenza condominiale.

⁴ È in fase di sviluppo una nuova macchina da 18 kW [24], decisamente più adatta al riscaldamento e alla produzione di acqua calda di un'utenza unifamiliare.

FIGURA 6.6

Confronto fra il costo di realizzazione di un campo di sonde geotermiche e la somma attualizzata dei risparmi di esercizio annui di una pompa di calore geotermica rispetto ad una aerotermica. (Climatizzazione a ciclo annuo).



6.1.4

Impianto a pompa di calore geotermica

Nel caso di una pompa di calore geotermica a circuito chiuso le principali differenze, rispetto ad una aerotermica, sono rappresentate dal costo di installazione più elevato a causa della messa in opera di un campo di sonde geotermiche che in teoria permette a questo tipo di macchina di avere, in generale, dei rendimenti più elevati.

Ma, come illustrato in Figura 6.6, il maggiore costo di investimento non viene ripagato dal risparmio annuo sui costi di esercizio.

Nel caso quindi di un'utenza monofamiliare e anche con riferimento alla climatizzazione a ciclo annuo, la pompa di calore geotermica presenta ancora dei costi di installazione troppo onerosi che non la rendono competitiva rispetto ad altre tecnologie, sempre a pompa di calore, ma che utilizzano come sorgente termica l'aria esterna.

6.1.5

In sintesi

Il confronto per un nuovo edificio monofamiliare fra l'installazione di un impianto di climatizzazione a pompa di calore e quello di

una caldaia a condensazione abbinata ad un condizionatore fornisce le seguenti indicazioni:

- l'utilizzo di una pompa di calore permette di unificare in un solo impianto le funzioni di climatizzazione estiva e invernale e di produzione di acqua calda sanitaria;
- il costo della bolletta elettrica, ancorché mitigato dall'opzione del contatore dedicato, risente di oneri fissi che attenuano o pregiudicano la convenienza economica nel caso di fabbisogni limitati o di sola domanda di riscaldamento;
- la convenienza di una pompa di calore si basa su una combinazione fra i seguenti fattori, fortemente dipendenti dalla zona climatica in cui è situato l'edificio: risparmio sui costi di esercizio, che aumenta all'aumentare del fabbisogno invernale ed estivo (una tecnologia efficiente sarà tanto più conveniente quanto più viene utilizzata) e potenze di progetto invernale ed estiva che, più sono vicine fra loro, più consentono di dimensionare la macchina in maniera bilanciata fra le due stagioni di funzionamento;
- la pompa di calore consente una riduzione consistente, superiore al 50 per cento, dei consumi di energia primaria rispetto ad una caldaia, a cui si associa una riduzione delle emissioni di CO₂ di medesima entità;
- la pompa di calore utilizza energia rinnovabile che può essere contabilizzata per il raggiungimento degli obiettivi assegnati dalla Direttiva 2009/28/CE;
- la pompa di calore geotermica ha in generale rendimenti più elevati rispetto a una pompa aerotermica e amplifica la riduzione dei consumi di energia primaria, delle emissioni di CO₂ e l'utilizzo di energia rinnovabile. Essa, tuttavia, presenta costi di installazione molto alti che, con i fabbisogni di climatizzazione considerati nello studio, la rendono poco interessante dal punto di vista economico rispetto sia ad una caldaia a condensazione sia ad una pompa di calore aerotermica.

6.2

EDIFICIO CONDOMINIALE

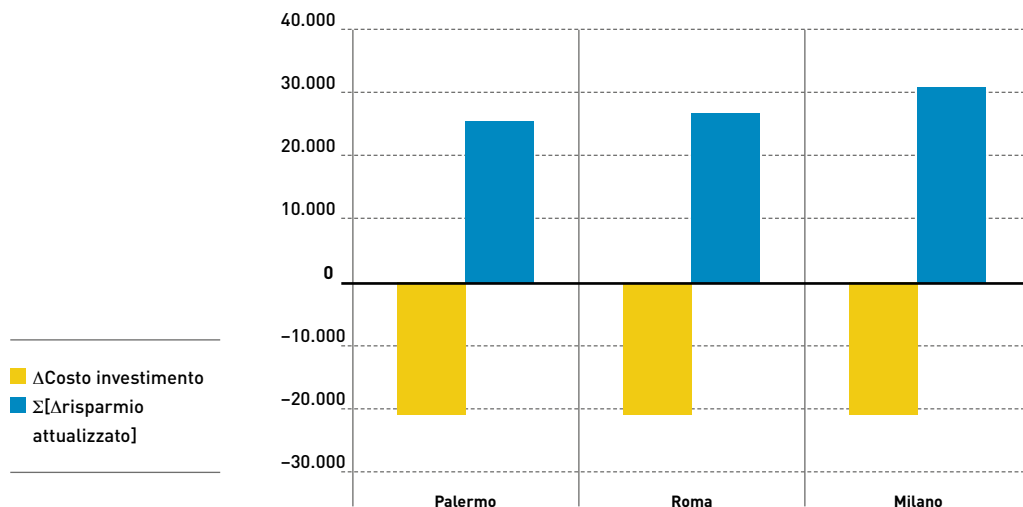
6.2.1

Climatizzazione a ciclo annuale

La seguente Figura 6.7 riporta il confronto fra la variazione del costo di investimento e la somma dei risparmi annui attualizzati di un sistema a pompa di calore rispetto alla soluzione tradizionale.

FIGURA 6.7

Confronto fra il Δ costo iniziale e la somma dei risparmi di esercizio attualizzati della pompa di calore rispetto all'impianto tradizionale. (Climatizzazione a ciclo annuo).



In questo caso la soluzione tradizionale risulta più onerosa di quella a pompa di calore che, per installazioni di questa tipologia, può sfruttare importanti economie di scala rappresentate dalla possibilità di erogare con un solo impianto i servizi richiesti. Questo è evidenziato in Figura 6.7 dalla variazione negativa del costo di investimento. Unitamente a costi di esercizio inferiori ai corrispondenti costi dell'impianto tradizionale ciò dimostra la convenienza della pompa di calore in tutte le zone climatiche analizzate.

Per quanto riguarda i benefici sociali, valgono le stesse considerazioni fatte in precedenza nel caso di utenza monofamiliare. L'entità di tali benefici è illustrata nelle Figure 6.8, 6.9 e 6.10 (pubblicate a pagina 84-85).

6.2.2

Richiesta di solo riscaldamento

Nel caso particolare in cui si richiede di soddisfare il solo fabbisogno invernale, la differenza di costo di impianto arriva a circa 29.000 euro, stavolta però a favore della soluzione tradizionale che non ha più necessità di installare un condizionatore, mentre i costi del sistema a pompa di calore rimangono sostanzialmente invariati. Anche

FIGURA 6.8

Consumo annuo di energia primaria negli interventi considerati.

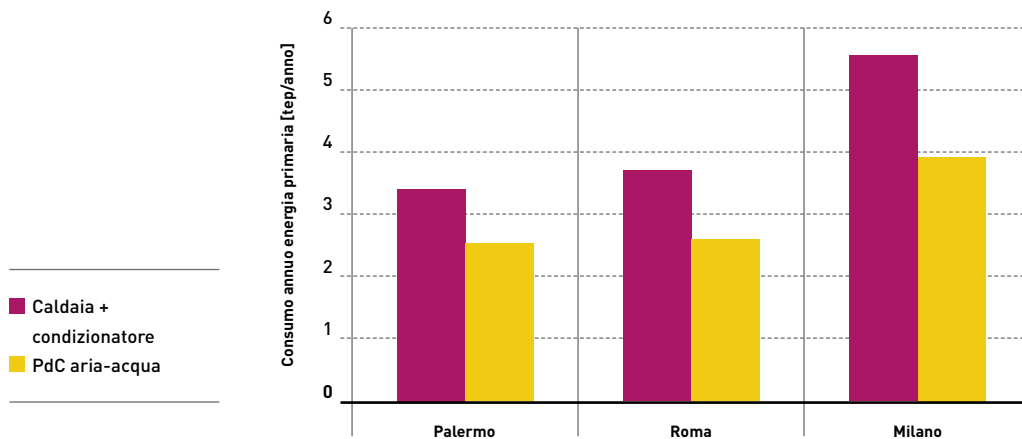
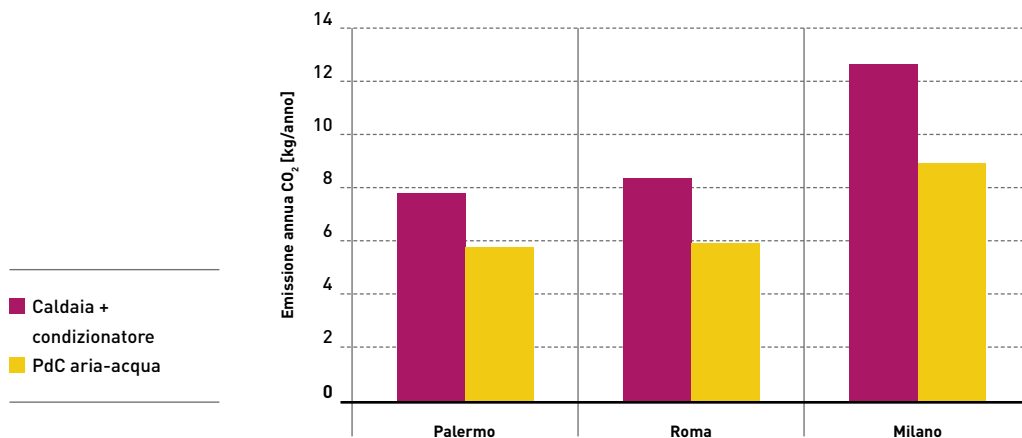


FIGURA 6.9

Emissione annua di CO₂ negli interventi considerati.

qui, pur se in misura minore rispetto al caso dell'edificio unifamiliare, i costi fissi della fornitura elettrica non permettono il recupero del maggiore investimento richiesto dalla pompa di calore; i costi energetici addirittura aumentano a Palermo e a Roma e solo a Milano per il maggiore utilizzo del riscaldamento risultano leggermente minori di quelli di una caldaia (vedi Figura 6.11).

Se ne deduce quindi che anche nel caso del condominio la pompa

Analisi costi/benefici: alcuni esempi

FIGURA 6.10

Energia rinnovabile utilizzata dalla pompa di calore.

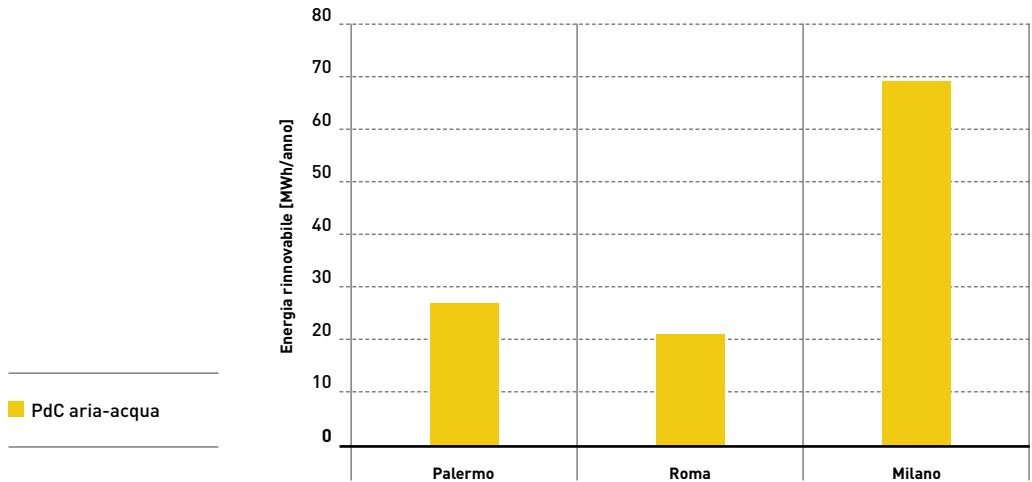
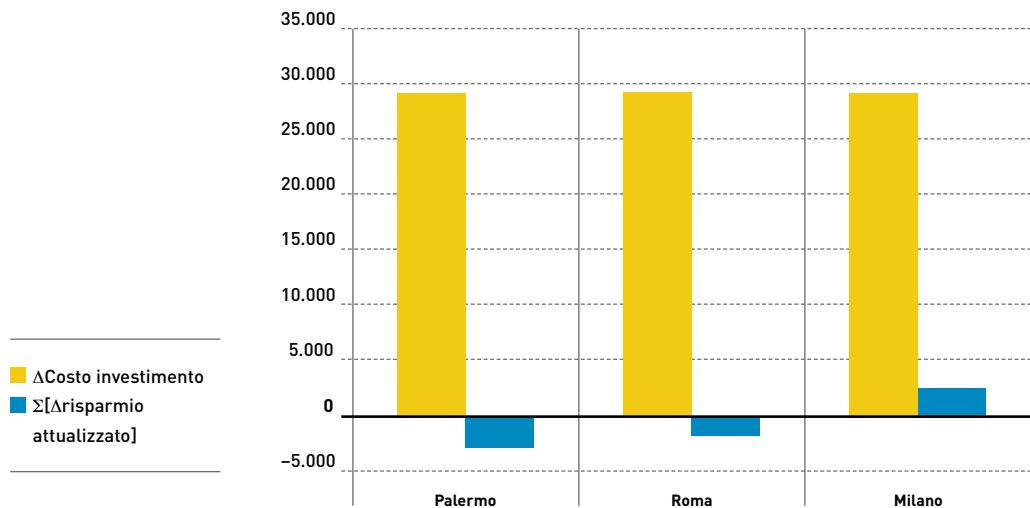


FIGURA 6.11

Confronto fra il Δ costo iniziale e la somma dei risparmi di esercizio attualizzati della pompa di calore rispetto all'impianto tradizionale. (Richiesta di solo riscaldamento).



di calore può diventare una soluzione competitiva rispetto a quelle tradizionali solo se il confronto viene fatto sull'intero anno considerando il soddisfacimento sia del fabbisogno di riscaldamento sia di quello di raffrescamento.

6.2.3

Impianto a pompa di calore ad assorbimento a gas

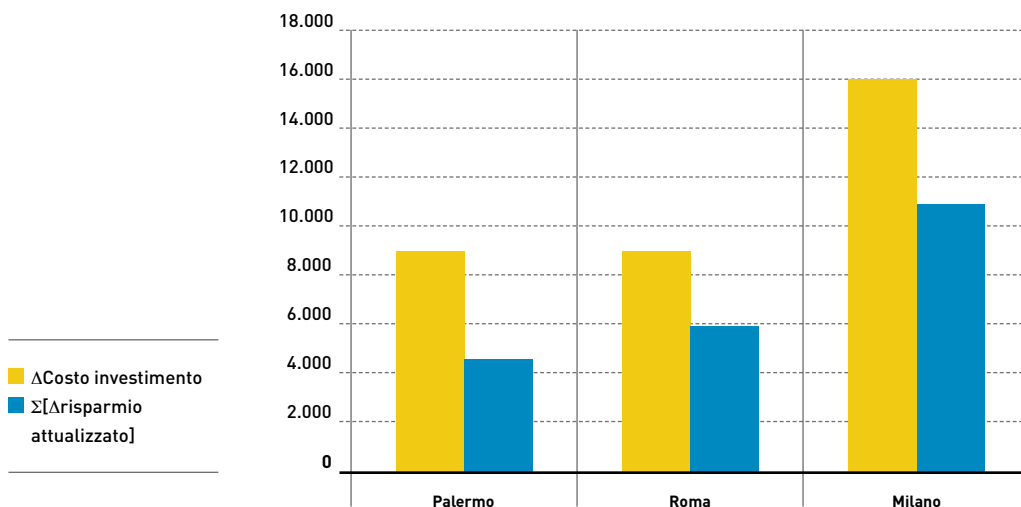
Anche in questo caso si richiede di soddisfare il solo fabbisogno invernale, poiché il basso rendimento di queste macchine in regime di raffrescamento ne sconsiglia l'uso per tale servizio.

Si è considerato un impianto di distribuzione a pavimento radiante sia per la soluzione tradizionale sia per la pompa di calore; la differenza di costo di impianto arriva così a circa 16.000 euro a favore della soluzione con caldaia. I costi di esercizio risultano ridotti in ragione del maggior rendimento (più 25 ÷ 30 per cento) della pompa di calore a gas rispetto alla caldaia a condensazione; vedasi in proposito la Figura 6.12.

Come si può osservare dalla Figura 6.12, nei tre siti considerati il risparmio sui costi di esercizio dell'impianto a pompa di calore non riesce però a compensare il maggiore investimento che risulta

FIGURA 6.12

Confronto fra il Δ costo iniziale e la somma dei risparmi di esercizio attualizzati della pompa di calore a gas rispetto all'impianto tradizionale. (Richiesta di solo riscaldamento).



Analisi costi/benefici: alcuni esempi

relativamente ancora troppo alto. Recupero di costo che sarà invece possibile in località con fabbisogno invernale maggiore, stante anche la capacità della pompa di calore ad assorbimento di funzionare soddisfacentemente con temperature rigide.

Va altresì osservato che il dimensionamento di impianti basati su queste macchine sconta in alcuni casi la scarsità di taglie disponibili commercialmente, comportando costi di installazione in eccesso rispetto alle effettive necessità.

Per questo motivo vengono suggerite realizzazioni miste, con caldaia integrativa, che possono raggiungere la convenienza per fabbisogni di riscaldamento non particolarmente elevati; va da sé che l'efficienza complessiva del sistema si abbassa. Tale alternativa non è stata considerata in questo studio.

I benefici di natura sociale della pompa di calore ad assorbimento a gas sono illustrati in Figura 6.13, Figura 6.14 e Figura 6.15. Come può essere riscontrato, anche questo tipo di macchina permette di ottenere benefici rispetto a un sistema tradizionale.

Quindi, anche per la pompa di calore a gas, la sussistenza di benefici sociali giustificerebbe l'erogazione di incentivi per favorirne la diffusione dove la convenienza economica è insufficiente.

FIGURA 6.13

Consumo annuo di energia primaria negli interventi considerati.

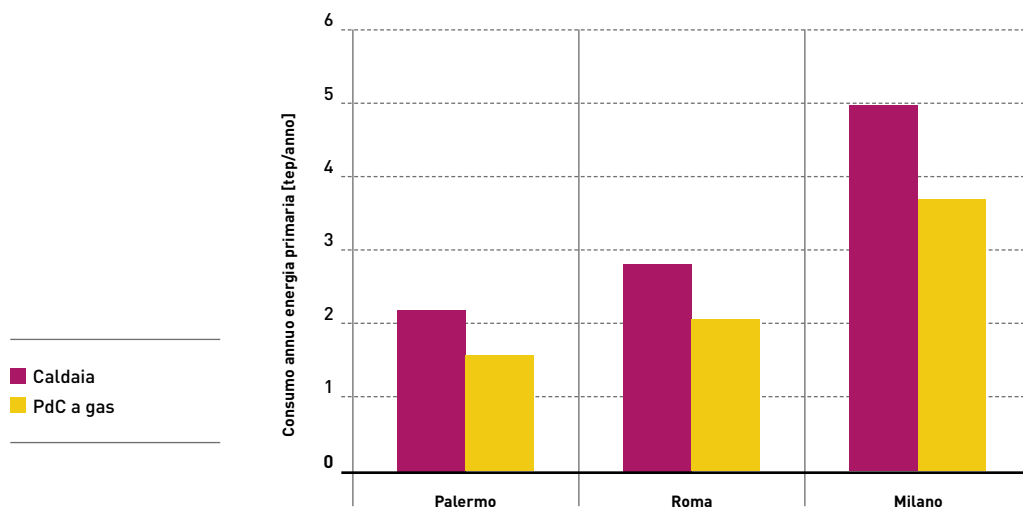


FIGURA 6.14

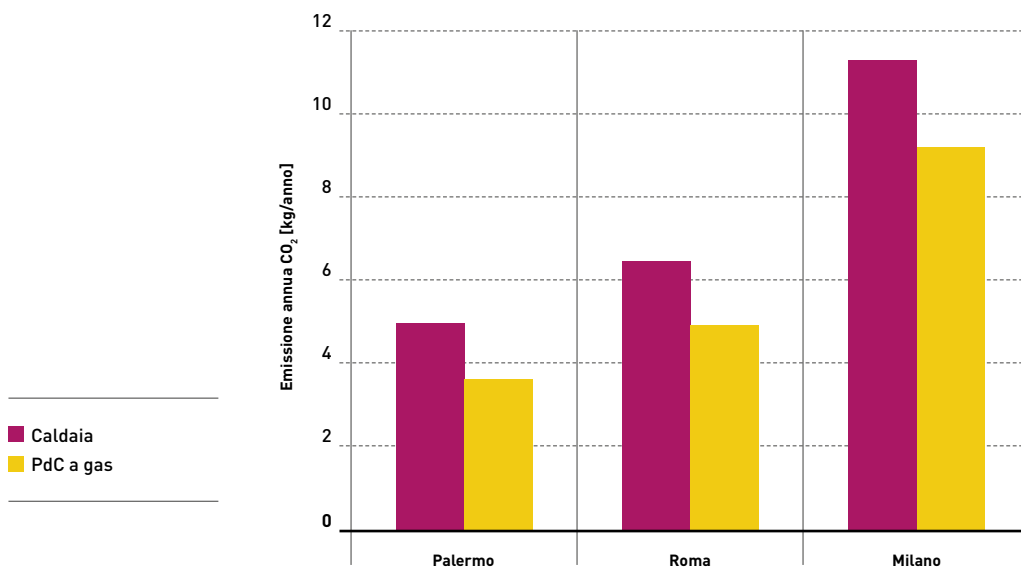
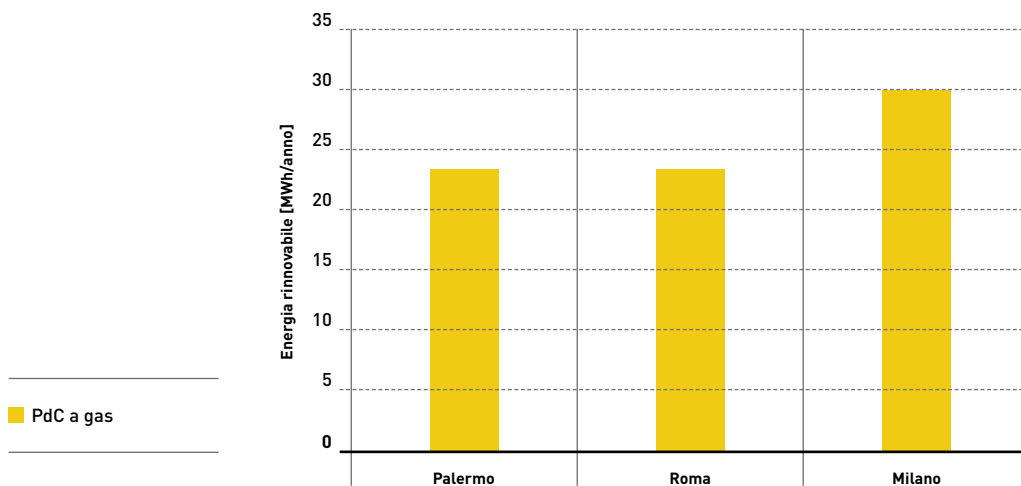
Emissione annua di CO₂ negli interventi considerati.

FIGURA 6.15

Energia rinnovabile utilizzata dalla pompa di calore ad assorbimento a gas.



6.2.4

Impianto a pompa di calore geotermica

Per quanto riguarda il paragone tra l'intervento di installazione di una pompa di calore geotermica e di una aerotermica, valgono le stesse considerazioni fatte nel caso dell'utenza monofamiliare: i costi più elevati di installazione, dovuti in particolare al costo della messa in opera del campo geotermico, non la rendono competitiva con la soluzione a pompa di calore aria-acqua illustrata in precedenza, anche in presenza di costi energetici più contenuti grazie a rendimenti superiori.

Si aggiunga a ciò il fatto che un campo geotermico adeguato alle esigenze di un condominio coprirebbe un'area molto estesa, dell'ordine delle centinaia di metri quadri, che renderebbe la soluzione impraticabile nelle aree più urbanizzate.

6.2.5

In sintesi

Si sono confrontate le soluzioni a pompa di calore con l'alternativa tradizionale data dalla caldaia e dal condizionatore nel caso di un condominio composto da 12 appartamenti, situato in tre differenti zone climatiche.

Per quanto riguarda la pompa di calore aria-acqua, si sono ottenute indicazioni molto simili a quelle già emerse nel caso di utenza monofamiliare. La sua convenienza dipende dal bilanciamento fra una serie di fattori, influenzati dalla zona climatica, quali: la temperatura e la potenza di progetto, il fabbisogno di riscaldamento e di raffrescamento dell'edificio analizzato e i rendimenti medi stagionali.

Si è poi considerato il confronto fra l'installazione di una pompa di calore ad assorbimento a gas e una caldaia a condensazione per il soddisfacimento del solo fabbisogno invernale del condominio: la convenienza rispetto alla caldaia a condensazione si ha solo in presenza di un elevato fabbisogno di riscaldamento o mediante l'integrazione con una caldaia ma a scapito dell'efficienza complessiva.

Infine, si è analizzato il caso dell'installazione di una pompa di calore geotermica che non è risultata conveniente rispetto alla pompa di calore aria-acqua a causa degli elevati costi del campo di sonde geotermiche che, pur in presenza di rendimenti medi stagionali più alti, non vengono recuperati nel corso della vita tecnica dell'impianto.

Esistono dei vantaggi che accomunano le diverse tipologie di pompa di calore e che sono indipendenti dalla convenienza economica dell'investimento. Essi sono le possibili *esternalità positive* per

il Sistema Paese derivanti dal loro impiego, in termini di minori consumi di energia primaria, riduzione delle emissioni di CO₂ e utilizzo di energia rinnovabile.

Il valore di tali esternalità potrebbe essere in parte impiegato sotto forma di incentivi per favorire la diffusione delle pompe di calore, specialmente dove queste non trovano ancora giustificazione economica.

Quale pompa di calore?



A questo punto del nostro percorso, che abbiamo già visto disseminato di numerosi *distinguo* tecnici, ponderosi e talvolta insidiosi, verrebbe da chiedersi *come* scegliere la pompa di calore *giusta*. Ma ancor prima, però, sarebbe più lecito domandarsi *se* la pompa di calore sia la scelta giusta.

Non sembri un gioco di parole: come si è visto, stiamo parlando di un'apparecchiatura sofisticata, con costi importanti e per la quale valutazioni troppo approssimative portano, al momento dell'esercizio, a sorprese le cui conseguenze non sono normalmente sanabili in modo indolore.

Vale allora la pena di porre per un istante in secondo piano gli aspetti più fortemente tecnicistici di questa materia e fermarsi invece a riflettere per un momento su quanto fino ad ora emerso in termini più o meno evidenti.

Innanzitutto, come capita sempre in questi casi, è fuor di dubbio che affrontare costi di impianto ingenti è giustificabile soprattutto a fronte della previsione di un utilizzo relativamente elevato. Solo così sarà possibile recuperare con i risparmi in bolletta il maggiore investimento rispetto ad una caldaia. Pertanto, dovremmo innanzitutto escluderne l'uso nelle seconde case e in genere negli edifici con ridotta occupazione.

A meno che non sussista un'esigenza prioritaria di condizionamento. In questo caso una pompa di calore elettrica aria/aria, di tipo

split o multisplit reversibile¹, sarà in grado di raffrescare l'abitazione in estate e, quando e se necessario², anche di riscaldarla in inverno in modo efficiente con un'impiantistica semplificata a costi contenuti.

A maggior ragione, questo sarà vero anche per le abitazioni principali e per tutte le altre categorie di edificio con domanda di climatizzazione a ciclo annuale e richiesta di condizionamento non trascurabile. Se il numero di locali da servire diventa consistente (ad esempio, almeno un intero appartamento) può essere però preferibile un impianto più *robusto* dell'aria/aria e all'occorrenza espandibile. Diviene allora interessante la soluzione aria/acqua che permette anche la produzione di acqua calda sanitaria nonché l'integrazione, grazie alla distribuzione idronica, di un eventuale caldaia di *back-up*, sempre utile dove fa più freddo. Per il clima italiano, questa può essere considerata la configurazione di riferimento nelle due varianti: elettrica, se anche la domanda di condizionamento è significativa, oppure a gas, dove l'inverno è più rigido ma solo se il fabbisogno di raffrescamento è limitato e si ha titolo ad una fornitura di gas con accisa ridotta³.

L'eventuale ricorso alla sorgente geotermica va valutato attentamente in relazione al costo del sistema di *cattura* del calore (campo sonde, o pozzi di emungimento/restituzione dell'acqua di falda) e del miglioramento di efficienza possibile. Dovrebbe limitarsi alle sole applicazioni con azionamento elettrico in edifici con fabbisogno di riscaldamento proporzionato rispetto a quello di raffrescamento, purché maggiore di quest'ultimo di un fattore compreso tra 1,5 e 2, per consentire il ripristino termico del terreno durante l'estate.

Se viceversa il condizionamento non è una priorità o non è nemmeno necessario, perché ad esempio l'edificio si trova in zona montana o collinare, il discorso cambia. È probabile infatti che gli inverni siano più freddi della media e questo pregiudica la resa di una macchina aerotermica con azionamento elettrico. Nemmeno il ricorso alla geotermia sembra indicato; è infatti difficile che il maggiore investimento possa ripagarsi con i risparmi in bolletta, a causa di oneri tariffari che continuano a gravare in misura fissa anche durante i mesi estivi in cui la pompa di calore non viene utilizzata.

Ma, se apparentemente la pompa di calore elettrica non sembra

¹ Da scegliere fra quelle con prestazione estiva più elevata.

² Stante l'enfasi sul condizionamento è presumibile ci si trovi in località con inverni miti.

³ In questo caso la minore efficienza in raffrescamento inciderà poco sul bilancio energetico e sui costi.

Quale pompa di calore?

reggere il confronto con la caldaia, ci si può orientare verso l'interessante soluzione della pompa di calore a gas (ad assorbimento o a compressione di vapore): con consumi inferiori del 25-30 per cento rispetto a una caldaia, il rientro dall'investimento iniziale è meno problematico. Specialmente se la località in questione non è raggiunta dal metano e il combustibile di riferimento è il GPL, decisamente più costoso. Queste macchine hanno la capacità di funzionare efficientemente anche ad alta temperatura di mandata (circa 60 °C) e questo consente, in caso di ristrutturazioni, di riutilizzare i radiatori eventualmente preesistenti senza sostituirli con fan coil o con il pavimento radiante.

Inoltre, la ridotta dipendenza delle prestazioni dalle caratteristiche della sorgente ne permette l'impiego in configurazione aerotermica anche in località relativamente fredde con limitati problemi di brinamento dell'evaporatore.

Ora, le occasioni per utilizzare con soddisfazione e profitto la pompa di calore sarebbero ampie e diffuse ma questo rappresenta quanto suggerirebbe la logica. È noto invece che non sempre le scelte del consumatore sono, o possono essere, ispirate dalla cruda razionalità e da questo punto di vista il consumatore di energia non fa certamente eccezione.

Prova ne è il fatto che la pompa di calore è installata in Italia molto al di sotto delle sue potenzialità tecniche e, anche dove lo è, viene largamente sottoutilizzata: si veda in proposito [23], da cui risulta che solo il 9,5 per cento delle macchine reversibili mono/multisplit è effettivamente impiegato in riscaldamento. Ci occuperemo di questo aspetto e delle sue conseguenze nel Capitolo 10.

Torniamo ora a trattare altri aspetti relativi a scenari di sviluppo che, assieme a quelli sulle barriere alla diffusione, fino ad ora non considerati in dettaglio, danno supporto e consistenza a queste e ad altre delle nostre argomentazioni espresse in termini più sintetici.

Pompe di calore ed obiettivi 20-20-20

La Direttiva Europea 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recepita nella legislazione italiana dal Dlgs. 28/2011, stabilisce un quadro comune per la promozione dell'energia ottenuta da tali fonti e fissa obiettivi nazionali obbligatori all'anno 2020 per la quota complessiva di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia. Per l'Italia tale quota è stabilita pari al 17 per cento.

La Direttiva considera rinnovabile e quindi ammissibile ai fini del raggiungimento degli obiettivi assegnati anche l'energia catturata dalle pompe di calore e disponibile in natura. A seconda della sorgente che la *contiene* tale energia è classificata come:

- aerotermica (calore accumulato nell'aria ambiente);
- geotermica (calore immagazzinato sotto la crosta terrestre);
- idrotermica (calore presente nelle acque superficiali).

Da qui l'uso, sempre più comune, di definire anche le pompe di calore rispettivamente aerotermiche, geotermiche¹ ed idrotermiche in funzione della sorgente termica utilizzata.

L'allegato VII alla Direttiva indica inoltre le modalità di computo dell'energia rinnovabile e il requisito di efficienza energetica minima richiesto per l'ammissibilità. Vi si stabilisce infatti che la quantità di energia (aerotermica, geotermica, o idrotermica) catturata dalle pompe di calore da considerarsi energia da fonti rinnovabili - E_{RES} - sia calcolata in base alla formula seguente:

$$E_{RES} = Q_{usable} \times \left(1 - \frac{1}{SPF} \right) \quad (7)$$

dove:

- Q_{usable} è il calore totale stimato prodotto da pompe di calore che rispondono ai criteri di ammissibilità;
- SPF è il fattore di rendimento stagionale medio stimato per tali pompe di calore.

La condizione sull'efficienza minima prevede quindi che siano ammissibili solo le pompe di calore per le quali:

¹ Rientrano in tale categoria sia le macchine a circuito chiuso, che attingono il calore dal sottosuolo mediante delle sonde di scambio termico, sia quelle a circuito aperto che lo prelevano dall'acqua di falda.

$$SPF > 1,15 \times \frac{1}{\eta} \quad (8)$$

dove:

- η è il rapporto tra la produzione totale lorda di elettricità e il consumo di energia primaria per la produzione di energia, calcolato come media a livello UE sulla base dei dati Eurostat². Nel caso di pompe di calore a gas η è posto pari a 1 fino alla determinazione di un più appropriato valore, effettuata dal Ministero dello Sviluppo Economico con apposita circolare al GSE.

L'apparente semplicità del metodo previsto dalla Direttiva si scontra però con l'impossibilità della sua applicazione oggettiva per la quale sarebbero necessari valori certi dell'energia consumata e del calore prodotto e quindi l'installazione di contatori dedicati (di elettricità, o di gas e di energia termica) per ogni macchina. Dal momento che in pratica questo si verifica solo in via eccezionale, nelle more di poter eseguire il calcolo oggettivo di cui sopra, la Direttiva ammette che la determinazione dei valori di Q_{usable} e di SPF abbia luogo mediante una metodologia statistica di stima.

A questo scopo, le disposizioni finali del citato Allegato VII hanno previsto che "entro il 1° gennaio 2013 la Commissione stabilisce orientamenti sul valore che gli Stati membri possono conferire ai valori Q_{usable} e SPF per le varie tecnologie e applicazioni delle pompe di calore, prendendo in considerazione le differenze nelle condizioni climatiche, particolarmente per quanto concerne i climi molto freddi". Al momento di andare in stampa, inizio 2013, si è tuttavia ancora in attesa di conoscere il pronunciamento formale della Commissione.

Per la messa a punto del metodo di stima, già nel 2009 è stata costituita presso Eurostat la task force *Heat pump Statistics*, ai cui lavori hanno preso parte i tecnici di RSE, che ha perfezionato varie proposte di conteggio. Le indicazioni più recenti sono riportate in un documento di consultazione presentato da Eurostat alla fine del 2010 [24] che prevede la stima del calore prodotto (Q_{usable}) in funzione della potenza termica installata, da determinarsi con inchieste nazionali, e delle ore di utilizzazione della stessa ($Q_{usablefactor}$).

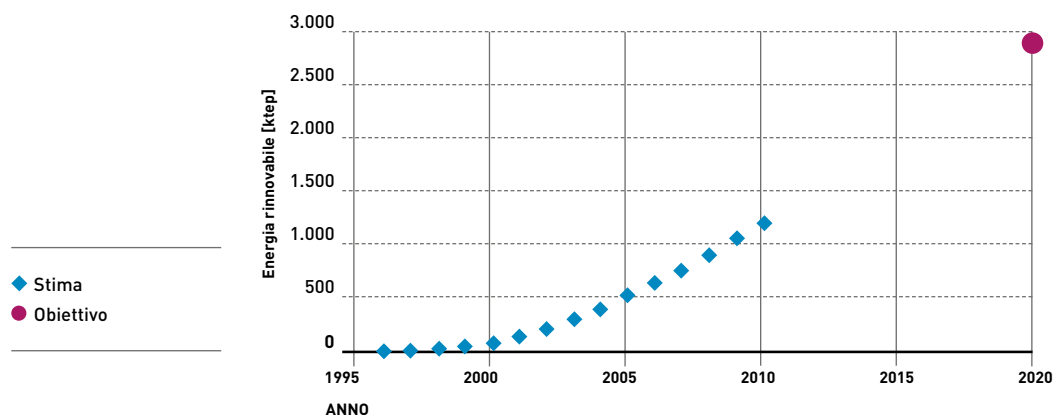
Il documento fornisce anche i valori standardizzati delle ore di

² Eurostat, l'ufficio statistico dell'Unione Europea, è l'organismo incaricato della contabilità energetica a livello comunitario.

Pompe di calore ed obiettivi 20-20-20

FIGURA 8.1

Energia rinnovabile delle pompe di calore, stime a consuntivo e obiettivo all'anno 2020.



utilizzazione e del *Seasonal Performance Factor (SPF)* relativamente a tre macroaree climatiche nelle quali è ripartita l'Europa.

Sulla base di queste modalità di calcolo, un gruppo di lavoro costituito da esperti di GSE³, RSE, CTI⁴ e COAER⁵ ha elaborato le stime di energia rinnovabile prodotta dalle pompe di calore nel 2010 che sono state quindi pubblicate da parte di GSE nella *Prima relazione dell'Italia* [25].

Gli esperti hanno anche potuto ricostruire l'andamento dell'energia rinnovabile prodotta dalle pompe di calore installate in Italia negli ultimi 15 anni; la Figura 8.1 riporta tale andamento unitamente al contributo atteso dalle pompe di calore all'obiettivo di energia rinnovabile nel 2020, così come stabilito dal Piano di Azione Nazionale [4] trasmesso alla Commissione europea.

Il PAN specifica il contributo all'obiettivo complessivo di ciascuna fonte; come può essere osservato dalla Figura 8.2, l'energia rinnovabile da utilizzare nel 2020 sarà pari almeno a 22.600 ktep, di cui il 13 per cento - equivalente a 2.900 ktep - dipenderà dall'utilizzo delle pompe di calore per il riscaldamento invernale degli edifici. Affinché ciò si verifichi, si stima necessario che almeno il 20 per

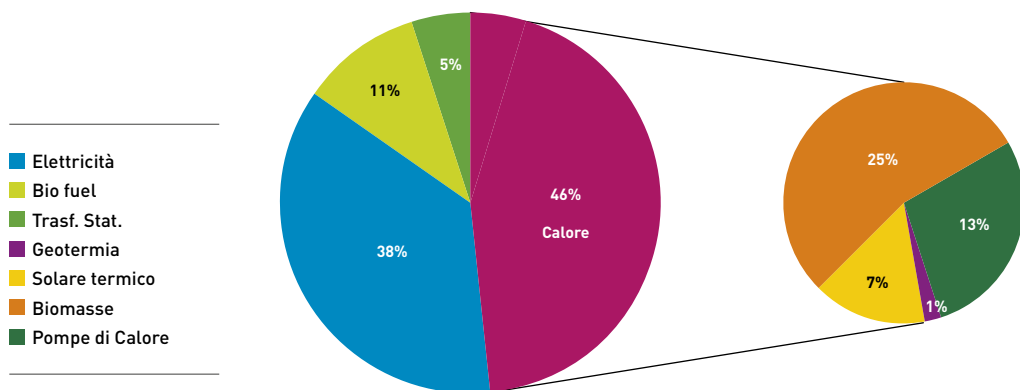
³ Gestore del Sistema Energetico.

⁴ Comitato Termotecnico Italiano.

⁵ Associazione Costruttori di Apparecchiature ed Impianti Aeraulici.

FIGURA 8.2

Contributo di ciascuna fonte al raggiungimento degli obiettivi vincolanti fissati al 2020.



cento della domanda di calore degli edifici (residenziali e del terziario) sia soddisfatta con impianti a pompa di calore.

Ora, la quota di energia rinnovabile contabilizzata al 2010 corrisponde a circa 1.200 ktep, che equivale a una copertura della domanda di riscaldamento pari all'8 per cento, un valore ancora molto lontano dall'obiettivo di 2.900 ktep del 2020.

Se si mette inoltre in conto il fatto che il trend di crescita relativamente favorevole degli anni passati, dovuto alla fase di diffusione più dinamica, è destinato a esaurirsi con la progressiva saturazione del mercato, si può facilmente constatare che l'obiettivo assegnato potrà essere raggiunto solo grazie ad un grande sforzo di promozione e incentivazione dell'uso di pompe di calore. Ma soprattutto dovranno essere quanto prima rimosse le barriere che a vario titolo si frappongono alla completa diffusione di tale tecnologia.

Di questo si parlerà nel Capitolo 10.

9.1

INTRODUZIONE

Uno *scenario* è uno strumento concepito per comprendere meglio l'evoluzione di un sistema complesso e quindi diverso da una previsione, poiché va osservato e analizzato rispetto ad altri scenari; tipicamente si confronta uno scenario di riferimento con uno o più scenari alternativi. Nel nostro caso sono analizzati due differenti scenari di sviluppo delle pompe di calore:

- A. Lo scenario BAU.** Si riferisce a una proiezione dei consumi delle pompe di calore fino al 2030, stimata da RSE in uno scenario di riferimento conservativo [26];
- B. Lo scenario PAN.** Si riferisce alla proiezione dei consumi da pompe di calore al 2020 stabilita nel Piano di Azione Nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia (PAN) [4], spinta fino al 2030 sulla base delle ipotesi descritte nel paragrafo 9.3.

L'obiettivo di questa analisi di scenario è di valutare, in termini di consumi finali, risparmi di energia primaria ed emissioni di CO₂, gli impatti sul sistema energetico nazionale di uno sviluppo sostenuto delle pompe di calore elettriche¹ per il riscaldamento del settore civile.

Questo studio trae origine dai risultati delle attività di ricerca svolte da RSE a supporto del Ministero dello Sviluppo Economico [27] e [28] e trova una più dettagliata descrizione in [29].

La quantità di energia rinnovabile proveniente da pompe di calore prevista dal PAN al 2020 è pari a 2.900 ktep; ovviamente essa si riferisce al calore ambientale utilizzato e non a tutto il calore utile generato. Questa quota è suddivisa in base alle tecnologie di produzione del calore adottate (Tabella 9.1) e ripartita tra i settori residenziale e terziario (Tabella 9.2).

L'impiego delle pompe di calore è stato limitato ai settori residenziale e terziario (con una prevalenza nel terziario) assumendo che eventuali impieghi nell'industria e in agricoltura siano quantitativamente non rilevanti.

¹ Lo studio si focalizza sulle sole pompe di calore ad azionamento elettrico senza prendere in considerazione gli effetti delle pompe di calore a gas. Questa scelta, non di merito, deriva dalla limitata diffusione prevista dal PAN tale da non renderne quantificabili gli impatti sul sistema energetico nazionale.

TABELLA 9.1

Impiego delle fonti rinnovabili termiche da pompe di calore attese dal PAN al 2020.

Energia rinnovabile da pompe di calore al 2020	2.900 ktep
di cui aerotermica	2.175 ktep
di cui geotermica	522 ktep
di cui idrotermica	203 ktep

TABELLA 9.2

Ripartizione settoriale dell'obiettivo delle pompe di calore previsto dal PAN al 2020.

Energia rinnovabile da pompe di calore al 2020	2.900 ktep
residenziale	890 ktep
terziario	2.010 ktep

Le analisi di scenario sono state effettuate utilizzando il modello multi-regionale del sistema energetico italiano: MONET (MOdello Nazionale Energetico Times) [30] e [31] (vedi l'approfondimento nel BOX 1).

Il modello MONET è basato sul generatore di modello Markal-TIMES dell'ETSAP-IEA [32] ed è stato sviluppato da RSE per analizzare scenari a lungo termine, concentrandosi sui principali driver della domanda e offerta di energia per sostenere il processo decisionale di governo del sistema e del mercato energetico. Il modello combina vincoli energetici, socio-economici e ambientali per determinare lo sviluppo ottimale del sistema energetico.

9.2

IL SISTEMA ENERGETICO NAZIONALE

Nel 2010 il consumo finale di energia in Italia è stato pari a circa 130 Mtep. Di questi, i consumi per la produzione di calore rappresentano la quota più importante, pari a circa il 45 per cento del totale, seguiti dai trasporti, con poco più del 30 per cento, e infine dai consumi elettrici. I trasporti sono il settore a più alto consumo di energia finale, seguito dall'industria (26 per cento), dal residenziale (23 per cento) e dal terziario (15 per cento) [33].

Il consumo finale di energia del settore civile (residenziale + terziario) è stato pari a circa 49 Mtep, di questi il 28 per cento sono consumi elettrici (14 Mtep) mentre il 72 per cento consumi termici

Scenari di sviluppo delle pompe di calore

Il modello energetico multiregionale MONET

Il Modello multiregionale MONET è un modello dell'intero sistema energetico nazionale sviluppato da RSE in collaborazione con E4SMA. La sua peculiarità risiede soprattutto nella natura *multiregionale* attraverso la quale il sistema energetico di ciascuna Regione italiana è descritto e risolto all'interno di un unico problema decisionale e secondo un unico obiettivo che, generalmente, è rappresentato dalla minimizzazione del costo globale di sistema.

Le due caratteristiche fondamentali di MONET - modellazione dell'intero sistema energetico e dettaglio regionale - lo rendono uno strumento ideale per analizzare gli effetti di uno sviluppo sostenuto delle pompe di calore per uso riscaldamento nel settore civile.

Il dettaglio regionale di MONET consente, infatti, di differenziare in funzione della diversa distribuzione delle zone climatiche nelle varie regioni, il diverso funzionamento delle pompe di calore (in termini di ore di funzionamento annuo, gradi giorno, di distribuzione nelle diverse stagioni e di COP medi stagionali).

Dall'altro lato, la capacità di trattare l'intero sistema energetico, permette a MONET di valutare correttamente gli effetti di azioni che, seppur finalizzate al risparmio energetico e allo sviluppo delle fonti rinnovabili, determinano uno spostamento dei consumi da un settore all'altro. Questo è nello specifico il caso delle pompe di calore che riducono i consumi di combustibili ed emissioni degli edifici civili (settore "non-ETS") aumentando però il consumo di elettricità la cui produzione determina un aumento di consumi ed emissioni per il settore della generazione (settore "ETS").

Il sistema MONET è pertanto in grado di stimare gli effetti in termini di consumi finali, fabbisogni primari, emissioni complessive e sviluppo delle infrastrutture e delle tecnologie necessarie (ad esempio, l'installazione di nuove centrali elettriche). Ma anche di mettere in competizione le diverse tecnologie o di sfruttare sinergie quali, ad esempio, l'aumento dei consumi elettrici in bassa e media tensione in un contesto di ampia diffusione della generazione distribuita.

(35 Mtep). Il fabbisogno di calore per il riscaldamento rappresenta il 65 per cento dei consumi termici del settore civile (23 Mtep) mentre il rimanente 35 per cento (12 Mtep) è destinato alla produzione di acqua calda sanitaria e altri usi termici.

Al 2010 il fabbisogno di calore per riscaldamento soddisfatto mediante pompe di calore è stimato in quasi 1,8 Mtep, mentre il COP

medio stagionale degli impianti venduti nello stesso anno si ritiene possa essere di poco superiore a 3². In termini percentuali la quota di riscaldamento coperta dalle pompe di calore nel settore civile è pari a circa l'8 per cento.

9.3

SCENARI DI SVILUPPO DELLE POMPE DI CALORE (BAU E PAN)

I due scenari di sviluppo sono caratterizzati da una serie di ipotesi comuni sull'evoluzione dei consumi finali di energia nei diversi settori: l'elemento discriminante tra le due valutazioni è la diversa diffusione delle pompe di calore, rispettivamente secondo un'ipotesi conservativa e una evolutiva.

L'evoluzione della domanda di servizi energetici è conseguenza dell'andamento atteso dei driver socio-economici che ne guidano lo sviluppo. A tale riguardo, come indicatori dello sviluppo socio-economico sono stati adottati i seguenti:

- **per i settori industria, terziario, agricoltura** il PIL nazionale;
- **per il settore residenziale** la popolazione residente, il numero di famiglie e le superfici abitative; la diffusione presso le famiglie dei diversi elettrodomestici, con le rispettive caratteristiche tecniche (consumi specifici, vita); il miglioramento dell'isolamento degli edifici nuovi o ristrutturati;
- **per il settore trasporti** l'entità del traffico merci e passeggeri e la diffusione di auto elettriche.

La fonte delle serie storiche di tali indicatori è stata prevalentemente l'Istat. Salvo che per la popolazione, non sono disponibili previsioni *ufficiali* sugli andamenti futuri degli altri indicatori utilizzati e pertanto si è provveduto ad effettuare delle estrapolazioni sulla base delle indicazioni fornite dalla letteratura disponibile come, ad esempio, gli scenari PRIMES [34].

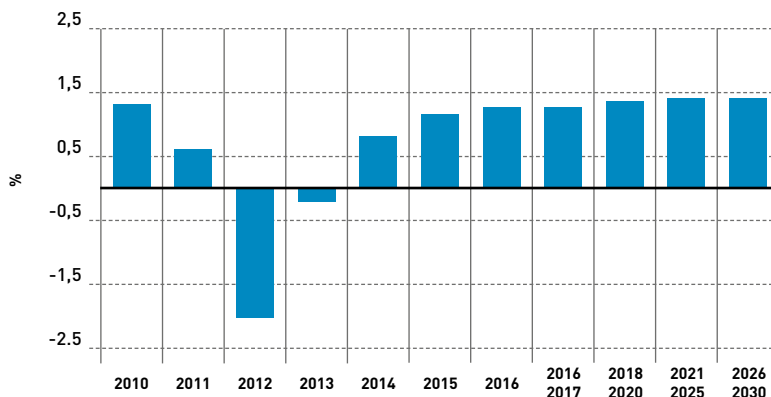
Il modello MONET considera i consumi energetici di tutti i settori tra cui quelli produttivi che sono trainati dall'economia. L'ipotesi adottata per la variazione del PIL negli scenari è riportata in Figura 9.1. Essa deriva per il 2011 dal Governo Italiano, dal 2012 al 2013 dalla

² *Stime RSE a partire dalla prima relazione dell'Italia sui progressi realizzati nella promozione e nell'utilizzo di energia da fonti rinnovabili redatta e trasmessa alla Commissione Europea dal Ministero dello Sviluppo Economico, con il supporto del GSE, ai sensi del decreto legge G.U. n°37 del 14 gennaio 2012.*

Scenari di sviluppo delle pompe di calore

FIGURA 9.1

Ipotesi di variazione del PIL nell'intervallo temporale 2010-2030.



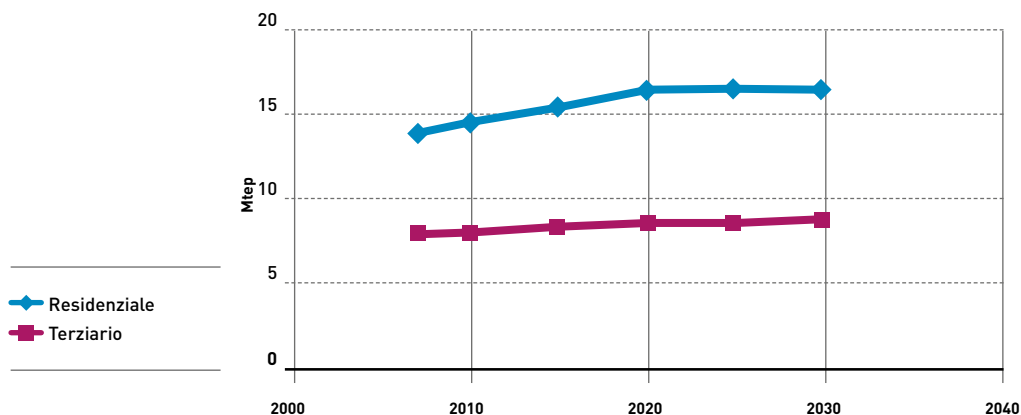
Banca d'Italia, dal 2014 al 2018 dal Fondo Monetario Internazionale, dal 2019 al 2030 da valutazioni RSE di raccordo con le assunzioni PRIMES.

Gli indicatori socio-economici elencati in precedenza sono stati utilizzati per il settore residenziale e terziario per stimare l'evoluzione del fabbisogno per riscaldamento degli ambienti (Figura 9.2).

Riguardo le pompe di calore, tenendo in conto sia la continua evoluzione delle tecnologie per i nuovi impianti (si ipotizza un mi-

FIGURA 9.2

Evoluzione del fabbisogno di riscaldamento del settore civile per entrambi gli scenari.



glioramento annuo del COP di 0,05) sia la vita attesa degli impianti installati, si stima che il rendimento medio stagionale del parco esistente al 2020 potrà raggiungere un valore medio di quasi 3,5. Mantenendo costante questa ipotesi di crescita si arriva a un rendimento medio stagionale pari a 4 nel 2030.

Nello scenario BAU si ipotizza che il fabbisogno di riscaldamento (residenziale e terziario) servito da pompe di calore ammonti a quasi 2,1 Mtep al 2020, rimanendo percentualmente sui valori del 2010 (8 per cento). Il corrispondente consumo di energia termica rinnovabile è di circa 1,5 Mtep [26]. Per il 2030 si ipotizza che il contributo delle pompe di calore per la copertura della domanda di riscaldamento del settore civile (residenziale e terziario) cresca lievemente dall'8 al 10 per cento. Tenendo conto di queste ipotesi l'ammontare del consumo di energia termica rinnovabile da pompe di calore elettriche valutato per l'anno 2030 è di 1,8 Mtep [26].

Nello scenario PAN al 2020, coerentemente con un consumo di energia rinnovabile previsto di 2,9 Mtep, si valuta che il fabbisogno di riscaldamento (residenziale e terziario) servito da pompe di calore salga a poco più di 4 Mtep. A parità di evoluzione tecnologica è necessario quindi un raddoppio del contributo delle pompe di calore rispetto allo scenario di riferimento. In questo scenario lo sviluppo potenziale delle pompe di calore dal 2020 al 2030 è basato sulle due seguenti ipotesi:

- **settore residenziale.** Il 13 per cento della domanda di riscaldamento delle abitazioni nuove e ristrutturate è soddisfatto dalle pompe di calore;
- **settore terziario.** Al 2020 le pompe di calore soddisfano circa il 33 per cento della domanda di riscaldamento del settore; il rapporto rimane costante anche nel 2030.

Tenendo conto di queste ipotesi l'ammontare del consumo di energia termica rinnovabile da pompe di calore elettriche per lo scenario PAN all'anno 2030 è di 3,1 Mtep (corrispondente ad una domanda termica servita di 4,1 Mtep).

9.4

ANALISI DI SCENARIO

Come anticipato in precedenza lo scopo dell'analisi è di valutare, in termini di consumi finali, risparmi di energia primaria ed emissioni di CO₂, le conseguenze di uno sviluppo sostenuto delle pompe di calore elettriche per il riscaldamento del settore civile sul sistema energetico nazionale.

Scenari di sviluppo delle pompe di calore

TABELLA 9.3

Consumi elettrici delle pompe di calore nei due scenari BAU e PAN (TWh).

Scenario	2010	2020	2030
Residenziale – BAU	1,4	1,2	1,3
Terziario – BAU	5,2	5,8	5,9
Totale – BAU	6,6	7,0	7,2
Residenziale – PAN	1,4	3,9	3,8
Terziario – PAN	5,2	9,1	8,4
Totale – PAN	6,6	13,0	12,2
Residenziale - Delta PAN-BAU	0,0	2,7	2,5
Terziario - Delta PAN-BAU	0,0	3,3	2,5
Totale - Delta PAN-BAU	0,0	6,0	5,0

TABELLA 9.4

Consumi finali elettrici complessivi nello scenario BAU e PAN (TWh).

Scenario	2020	2030
BAU	347	393
PAN	353	398
PAN-BAU	6	5

L'elevato sviluppo delle pompe di calore nello scenario PAN comporta un consumo netto aggiuntivo di 6,0 TWh/anno di energia elettrica nel 2020 e di 5,0 TWh/anno nel 2030 rispetto allo scenario di riferimento BAU. La Tabella 9.3 riporta i consumi elettrici delle pompe di calore nei due scenari mostrando anche il dettaglio settoriale; la Tabella 9.4 riporta, infine, i consumi elettrici nazionali nei due scenari.

Analizzando in dettaglio i consumi finali di energia del settore residenziale riportati in Tabella 9.5 si nota come l'incremento dei consumi di energia elettrica nello scenario PAN sia compensato da una riduzione dei consumi degli altri vettori energetici. Principalmente si assiste a una sostituzione del riscaldamento a gas naturale e a GPL. Si osserva che la porzione della domanda di riscaldamento coperta nello scenario BAU dal GPL è sostituita nello scenario PAN dalle pompe di calore è limitata dal fatto che una quota importante delle utenze civili che utilizzano il GPL si trova in comuni di montagna non raggiunti dalla rete del gas, nei quali l'utilizzo delle pompe di calore elettriche non è vantaggioso da un punto di vista energetico. Complessivamente al 2020 nello scenario PAN si riscontra nel settore residenziale una riduzione dei consumi finali di combustibili

ed energia elettrica di circa 0,8 Mtep mentre al 2030 la riduzione è pari a 0,7 Mtep. In modo analogo al settore residenziale la Tabella 9.5 analizza in dettaglio anche i consumi finali di energia del settore terziario. Complessivamente al 2020 nel settore terziario dello scenario PAN si riscontra una riduzione degli stessi consumi finali di quasi 1,1 Mtep, mentre al 2030 questa quota scende a 0,8 Mtep.

Per quanto riguarda il sistema elettrico, il modello MONET è in grado di tenere conto delle perdite di rete e degli scambi di import-export per determinare la produzione di energia elettrica nazionale (Tabella 9.6).

La crescita dei consumi elettrici che si registra nello scenario PAN (Tabella 9.3) è bilanciata da una corrispettiva crescita della produzione elettrica nazionale.

La Tabella 9.7 mostra la produzione elettrica nei due scenari dettagliata per tipologia di impianto. Mentre nello scenario PAN si veri-

TABELLA 9.5

**Consumi finali di energia nel settore residenziale e terziario
(valori in ktep).**

Scenario	Consumi finali	Residenziale		Terziario	
		2020	2030	2020	2030
BAU	Energia elettrica	6.468	8.266	9.036	11.111
	Gas naturale	16.251	15.891	9.961	9.281
	GPL	3.384	3.088	1.162	1.419
	Biomassa	3.354	3.354	35	46
	Altri Vettori	1.065	1.610	700	1.064
	Calore ambientale E_{RES}	267	335	1.208	1.517
	Totale	30.789	32.544	22.102	24.438
PAN	Energia elettrica	6.701	8.464	9.326	11.325
	Gas naturale	15.572	15.219	8.921	8.656
	GPL	3.060	2.869	928	1.097
	Biomassa	3.354	3.354	29	37
	Altri Vettori	1.042	1.577	628,0	1.013
	Calore ambientale E_{RES}	890	942	2.010	2.161
	Totale	30.619	32.425	21.841	24.288
Delta PAN-BAU	Energia elettrica	233	198	289	213
	Gas naturale	- 679	- 672	- 1.040	- 625
	GPL	- 325	- 219	- 234	- 321
	Biomassa	0	0	- 6	- 10
	Altri Vettori	- 23	- 33	- 72	- 51
	Calore ambientale E_{RES}	623	607	802	644
	Totale	- 171	- 119	- 262	- 150

Scenari di sviluppo delle pompe di calore

TABELLA 9.6

Bilancio elettrico (valori in TWh).

Bilancio elettrico	BAU		PAN	
	2020	2030	2020	2030
Consumi finali	347	393	353	398
Perdite di rete	21	25	22	25
Saldo import-export	48	55	48	55
Produzione	320	363	327	368

fica un incremento della produzione elettrica negli impianti CCGT (ciclo combinato a gas naturale), per entrambi gli scenari la capacità degli impianti di generazione complessivamente installata al 2020 è di 138 GW.

Il sistema elettrico è quindi in grado di assorbire l'incremento di domanda elettrica dovuto alle pompe di calore (obiettivo del PAN) senza ricorrere all'installazione di nuova capacità rispetto allo scenario di riferimento ma sfruttando maggiormente impianti efficienti che sono attualmente sottoutilizzati. Solo dal 2030 comincia a emergere la necessità di incrementare la capacità di generazione termoelettrica con l'installazione di circa 1 GW di nuovi impianti.

Il risparmio di combustibili fossili nel settore civile (Tabella 9.5) deve essere confrontato con i maggiori consumi di combustibile fossile dovuti alla maggiore produzione elettrica determinata dalla crescita dei consumi delle pompe di calore elettriche. La Tabella 9.8 riporta il bilancio complessivo di combustibili fossili primari nello scenario PAN e nello scenario BAU (escluso il settore dei trasporti). Il bilancio complessivo dei consumi primari di combustibili fossili risulta favorevole allo scenario PAN con un risparmio di quasi 1,3 Mtep al 2020 mentre al 2030 questa quota scende a 1,1 Mtep.

Il risparmio di combustibili fossili nello scenario PAN trova ri-

TABELLA 9.7

Produzione elettrica nazionale (valori in GWh).

Impianti	Scenario BAU		Scenario PAN		Differenza PAN-BAU	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Impianti a gas naturale	103.506	149.378	109.816	154.596	6.310	5.218
Impianti a carbone	63.649	65.473	63.649	65.473	-	-
Impianti rinnovabili	125.292	129.448	125.292	129.448	-	-
Altri impianti	27.950	18.688	27.950	18.688	-	-
Totale	320.396	362.987	326.706	368.205	6.310	5.218

TABELLA 9.8

Consumi primari di combustibili fossili nei due scenari BAU e PAN, escluso il settore dei trasporti (valori in ktep).

	Scenario BAU		Scenario PAN		Differenza PAN-BAU	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Fonte Energetica						
Gas naturale	53.598	57.360	52.881	56.764	-717	-595
GPL	4.928	4.899	4.369	4.358	-559	-540
Altri combustibili fossili	23.762	20.797	23.767	20.797	5	0
<i>Elettricità importata</i>	<i>4.098</i>	<i>4.768</i>	<i>4.098</i>	<i>4.768</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Totale	86.385	87.824	85.115	86.688	-1.271	-1.136

scontro anche nella riduzione delle emissioni di CO₂. Quelle dovute alla maggiore produzione elettrica sono infatti inferiori a quelle evitate nel settore civile sostituendo il riscaldamento a gas con quello a pompe di calore.

La Tabella 9.9 riporta le emissioni di CO₂ nei due scenari analizzati: complessivamente al 2020 e 2030 si ha una riduzione di circa 3 Mt di CO₂ all'anno nello scenario PAN rispetto allo scenario BAU.

In termini economici, con riferimento alla bolletta energetica nazionale, si devono dunque contabilizzare due differenti termini: riduzione della dipendenza da combustibili fossili importati, variazione della spesa per i permessi di emissione di CO₂ nell'ambito dell'Emissions Trading System.

In Tabella 9.10 sono riportati l'ammontare complessivo dei due valori e i relativi risparmi specifici per ogni MWh di domanda di calore servita mediante pompe di calore per l'anno 2020. Per questa valutazione sono stati utilizzati i prezzi dei combustibili fossili all'im-

TABELLA 9.9

Emissioni di CO₂ nello scenario BAU e PAN (valori in milioni di tonnellate).

Settore	Scenario BAU		Scenario PAN		Differenza PAN-BAU	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Agricoltura	9,2	10,0	9,2	10,0	-	-
Terziario	26,5	25,5	23,5	23,2	-3,1	-2,3
Generazione	121,8	117,6	124,2	119,3	2,4	1,6
Industria	34,6	32,4	34,6	32,4	-	-
Residenziale	47,2	45,5	44,7	43,3	-2,5	-2,2
Trasporti	104,6	109,0	104,6	109,0	-	-
Totale	343,9	340,0	340,8	337,2	-3,2	-2,8

Scenari di sviluppo delle pompe di calore

TABELLA 9.10

Risparmi per la bolletta energetica nazionale relativamente all'import di combustibili fossili e all'acquisto di permessi per le emissioni di CO₂ per l'anno 2020.

Riduzione della bolletta energetica nazionale al 2020	Combustibili fossili	Permessi di emissione di CO ₂ [*]	Totale
Risparmio complessivo (Milioni di euro)	702	-39	663
Risparmio per MWh di calore servito da PdC (euro/MWh termico)	30,5	-1,6	29

^[]I permessi di emissione non coinvolgono le emissioni dei settori residenziale e terziario; ne consegue, pertanto, un aggravio della spesa per permessi di emissione pur in presenza di una riduzione netta delle emissioni complessive.*

port derivati dallo scenario Reference WEO 2009 [35] sono, pertanto, differenti dai risparmi visti dall'utente finale che si confronta, invece, con tariffe gravate di oneri ed accise. Per i permessi delle emissioni di CO₂, invece, è stato utilizzato il valore di 16,5 euro/tonnellata al 2020 [34].

9.5

SINTESI

I risultati dello scenario PAN hanno mostrato che l'incremento del consumo di energia elettrica determinato dal maggior utilizzo delle pompe di calore per il riscaldamento è coperto esclusivamente dalla produzione di cicli combinati a gas naturale efficienti (con un'efficienza media del 53,5 per cento) e non richiede di installare una maggiore capacità di generazione almeno fino al 2020.

Complessivamente l'utilizzo delle pompe di calore previsto dallo scenario PAN comporterebbe rispetto allo scenario di riferimento un risparmio netto di combustibili fossili primari, pari a 1,2 Mtep per l'anno 2020 e a 1,1 Mtep per il 2030. Si determina, inoltre, una riduzione delle emissioni di CO₂ di circa 3 milioni di tonnellate all'anno.

Questi risparmi si traducono in una minor spesa per l'importazione di combustibili fossili, per l'anno 2020, stimata in circa 700 milioni di euro; analizzando l'impatto economico dovuto al meccanismo ETS, si ottiene al 2020 un incremento della spesa di permessi di emissione di CO₂ di circa 40 milioni di euro.

In termini specifici, ogni MWh_t di domanda di riscaldamento servita da pompe di calore nel settore civile comporta un risparmio di quasi 29 euro sulla spesa complessiva per l'importazione di combustibili e l'acquisto di permessi di emissione.

Le barriere alla diffusione

Malgrado i numerosi aspetti positivi di cui si è parlato finora, la diffusione di pompe di calore presso gli edifici residenziali è oggi largamente inferiore a quanto atteso e necessario per il raggiungimento degli obiettivi previsti dal Piano d'Azione Nazionale (PAN) sulle energie rinnovabili. Il problema accomuna tutti i tipi di pompa di calore, sia ad alimentazione elettrica sia a gas, le quali faticano ad affermarsi rispetto alle tecnologie concorrenti anche nelle condizioni di utilizzo a loro più favorevoli.

La Figura 10.1 (a pagina 112) riporta un quadro qualitativo inerente la diffusione stimata e potenziale di pompe di calore in Italia. Vi si riscontra - schema A - che nelle località in cui esiste solo domanda di riscaldamento (area con sfondo giallo), prevale l'uso quasi esclusivo di caldaie a combustibile fossile, con una presenza solo marginale di pompe di calore a gas, anche se queste - schema B - meriterebbero maggiore considerazione e di rappresentare razionalmente la scelta consigliabile per lo meno dove i fabbisogni termici sono più elevati.

Con domanda invece di climatizzazione a ciclo annuo, cioè di riscaldamento invernale e condizionamento estivo (area con sfondo azzurro), l'uso di pompe di calore elettriche reversibili, ancorché non trascurabile, è confinato alle regioni meridionali con gli inverni più miti, mentre nel resto del Paese prevale la doppia installazione di una caldaia per il riscaldamento e di un condizionatore per il raffreddamento (schema A).

La logica suggerirebbe invece un uso più esteso della pompa di calore (schema B), con l'eventuale ricorso alla caldaia limitato alle località più fredde, come generatore di calore integrativo nei giorni invernali più rigidi¹.

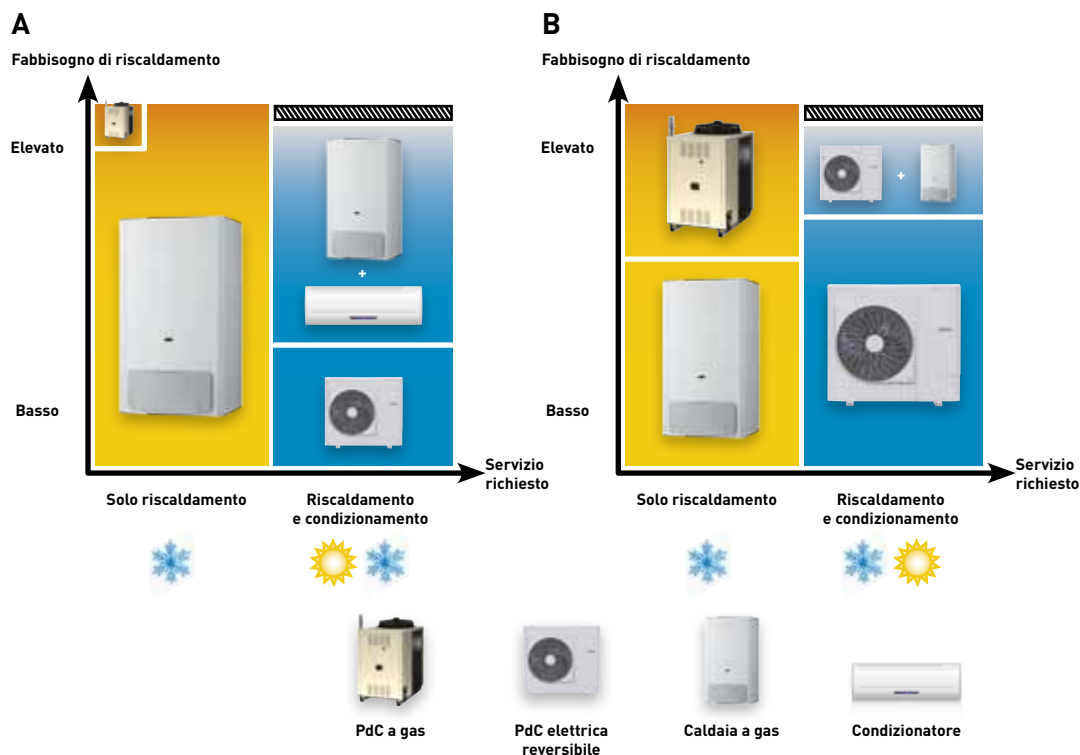
Le ragioni della mancata diffusione sono molteplici e qui proveremo a riassumerle in due categorie: quella delle barriere informative e quella riguardante le barriere economiche. Le prime dipendono dall'insufficiente conoscenza di questo tipo di macchina, con particolare riguardo alle potenzialità operative, alle prestazioni effettive in campo e al rischio temuto di possibili malfunzionamenti per la presunta immaturità di una tecnologia ancora percepita da molti come emergente.

Le seconde, in parte correlate alle prime, dipendono dall'incer-

¹ *Estese sperimentazioni condotte in campo da RSE [16] hanno comunque dimostrato l'idoneità di pompe di calore aerotermiche installate in Zona Climatica E ad erogare il servizio di riscaldamento invernale e la contestuale produzione di acqua calda sanitaria.*

FIGURA 10.1

Diffusione di pompe di calore in Italia: a sinistra (A) come può essere stimata attualmente, a destra (B) come invece potrebbe essere.



tezza sui costi energetici (figlia dei dubbi sulle prestazioni effettive), da un regime tariffario non proprio incentivante e da un costo di installazione relativamente elevato.

Cominciando l'esame dalle barriere informative, osserviamo che queste non si limitano al solo mondo degli utilizzatori, per i quali potrebbe anche giustificarsi, ma riguardano purtroppo anche frange di tecnici che ci si aspetta dispongano invece di informazioni aggiornate, certe e indipendenti⁹. È noto, infatti, che il settore dell'impiantistica per il riscaldamento degli edifici annovera in prevalenza installatori e progettisti aventi conoscenza approfondita di generatori di calore a combustione e delle loro integrazioni impiantistiche mentre la necessaria familiarità con le pompe di calore (anche ad azionamento termico) risiede in genere presso coloro che hanno maturato esperienza anche con le macchine frigorifere.

Le barriere alla diffusione

Va da sé che questo impedisce un approccio progettuale integrato, in grado di massimizzare l'efficienza anche rispetto ai costi che prenda in esame l'insieme dei servizi di climatizzazione richiesti e delle tecnologie meglio adatte a soddisfarli.

Avviene dunque che all'avvio dello studio del sistema di climatizzazione di un edificio ci si focalizzi non di rado sul solo riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, procedendo direttamente al progetto e installazione di un sistema con caldaia e relativi radiatori, senza considerare altre opzioni. Salvo poi rendersi conto in un secondo tempo, quando in maniera disgiunta si considera l'impianto di raffrescamento, che la gamma completa dei servizi richiesti avrebbe potuto essere meglio soddisfatta con un unico impianto a pompa di calore reversibile. Purtroppo però le scelte impiantistiche già fatte per il riscaldamento risultano spesso incompatibili con il funzionamento di una pompa di calore e a questo punto non rimane altra soluzione che prevedere un impianto aggiuntivo dedicato al solo condizionamento.

Ciò spiega in sintesi il motivo di tante occasioni mancate per migliorare l'efficienza energetica degli edifici ed è proprio per colmare questa lacuna informativa che RSE conduce e dissemina i risultati del programma di diagnosi energetiche di cui si è dato conto nella sezione 3.2.

Passando ora agli ostacoli economici, è già stato detto che l'uso di una pompa di calore si giustifica quando, rispetto alle tecnologie concorrenti, presenta costi di funzionamento minori, intesi come somma degli oneri di impianto e di esercizio estesi al ciclo di vita. Vedremo fra poco come il superamento di questi ostacoli interseca anche questioni di politica energetica.

Nel caso di sola domanda di riscaldamento il confronto è, come si è visto, fra la pompa di calore a gas e la caldaia: la prima è una

-
- 2 *Già oggi le normative sempre più esigenti in tema di isolamento termico degli edifici stanno enfatizzando l'importanza relativa dei requisiti energetici per il trattamento dei ricambi d'aria che in prospettiva potranno prevalere su quelli relativi alle dispersioni attraverso l'involucro, come avviene da tempo per alcuni tipi di edificio. Ciò sta stimolando l'avvio di una rivisitazione impiantistica importante che pone in grande evidenza il problema del recupero sistematico di calore (sensibile e latente) eseguito con macchine sviluppate ad hoc. È anche questa ovviamente materia di conoscenza ed aggiornamento, specialmente da parte degli operatori. I suoi contenuti specialistici esulano tuttavia dallo scopo di questo lavoro, che affronta il problema dalla climatizzazione da un'angolatura più tradizionale.*

macchina piuttosto sofisticata e prodotta in serie relativamente ridotta, il cui costo di acquisto rappresenta un esborso non trascurabile e certamente superiore a quello di una caldaia di pari potenza: una tecnologia matura e realizzata in volumi produttivi elevatissimi.

Perché raggiunga la convenienza economica, il maggior costo iniziale dovrà essere ripagato con i futuri risparmi in bolletta³. Poiché entrambe le macchine consumano lo stesso combustibile, si può ritenere che i risparmi siano direttamente proporzionali alla differenza fra i rispettivi consumi, il che è vero nel caso largamente diffuso di tariffazione del gas a prezzo costante.

Ne consegue che la convenienza sarà tanto maggiore quanto più il fabbisogno termico dell'edificio da riscaldare sarà elevato, vuoi perché ci si trova in una località particolarmente fredda, vuoi perché l'involucro isolante dell'edificio è inadeguato⁴ o in entrambi i casi.

Ma la pompa di calore è una macchina più efficiente di una caldaia, lo è anche nelle località con inverni meno rigidi (anzi, lo è di più) anche quando l'edificio è ben isolato. In questi casi, però, il vantaggio energetico non sempre trova riscontro nella convenienza economica a causa della limitata possibilità di realizzare risparmi consistenti su un costo dell'energia che è già contenuto per i bassi consumi dovuti al clima favorevole e alla coibentazione.

Affinché la pompa di calore possa affermarsi anche in tali situazioni di scarso o nullo interesse per l'investitore privato è allora necessario pensare a strumenti di sostegno mirati, proporzionali all'efficienza complessiva del sistema edificio-impianto e che scoraggino la produzione *opportunistica* di calore in esubero per il riscaldamento di edifici male isolati, come potrebbe invece capitare nel caso di sussidi direttamente legati all'energia termica erogata.

Uno strumento di tale genere potrebbe ad esempio consistere in incentivi economici crescenti al migliorare della prestazione energetica dell'edificio con una soglia minima di ammissibilità rappresentata da una classe di efficienza adeguatamente *sfidante*. Questo meccanismo porterebbe a premiare di più chi meno consuma, mettendo a disposizione risorse economiche in grado di rendere convenienti anche misure costose di miglioramento dell'efficienza. Ciò rappresenterebbe un segnale perché i consumatori più energivori valutino

³ A fronte di un costo da tre a quattro volte maggiore di quello di una caldaia a condensazione di pari potenza termica, una pompa di calore a gas presenta un'efficienza superiore del 25-30 per cento [17].

⁴ L'utilizzo di un generatore di calore efficiente è tanto più giustificato quanto meno isolato è l'edificio.

l'opportunità di razionalizzare opportunamente i propri consumi.

Quando poi si tratta di soddisfare sia la domanda di riscaldamento sia di condizionamento, la pompa di calore elettrica reversibile si confronta con il sistema bicomponente costituito da una caldaia a gas e da un condizionatore rispetto al quale può anche presentare un costo di installazione più contenuto⁵. In questo caso, si ha ovviamente un vantaggio economico immediato ma è sempre opportuno assicurarsi che i costi energetici non ribaltino la convenienza in favore della soluzione meno efficiente. Nel caso opposto di maggiori costi iniziali è invece necessario verificare che i risparmi in bolletta ne consentano il recupero in tempi ragionevoli comunque entro la vita della macchina.

Ora, a fronte di una manifesta maggiore efficienza, ci si chiederà il motivo di tanta cautela sul fatto che essa si rifletta effettivamente in costi energetici ridotti. Questo è dovuto alla progressività delle tariffe elettriche applicate alle utenze domestiche che, con un costo del kWh che aumenta al crescere del livello di consumo, si dimostra purtroppo poco favorevole all'utilizzo di pompe di calore.

Tale forma tariffaria, intesa evidentemente a contenere i consumi attraverso segnali di prezzo, non si rivela però priva di importanti controindicazioni, la prima delle quali attiene alla sua scarsa equità sociale a causa dei maggiori costi a cui espone le famiglie numerose, conseguenza del fatto che il consumo di un'utenza domestica è direttamente correlato al numero di componenti il nucleo familiare.

In secondo luogo - ma più rilevante per il tema qui affrontato - la tariffa progressiva risulta penalizzante per il vettore energetico a cui si applica quando questo è in competizione con altri vettori che sono invece soggetti a tariffa costante. Essa, in particolare, attenua la convenienza o addirittura rende controproducenti le operazioni di *fuel switching*, ancorché motivate dal risparmio di energia primaria.

Infatti, se da un lato per effetto della progressività il maggior consumo di energia elettrica (responsabile del miglioramento di efficienza) si trasforma in un onere più che proporzionale al consumo stesso, dall'altro con tariffa costante il consumo evitato di gas riduce i costi solo in misura proporzionale allo stesso.

A crescere in maniera *esplosiva* sono le componenti della tariffa

⁵ Le numerose varianti impiantistiche possibili, dovute alle diverse sorgenti termiche, ai fluidi termovettori, alle architetture di macchina e a quelle di sistema, fanno sì che il costo di installazione di una pompa di calore reversibile possa eccedere o meno quello del binomio caldaia-condizionatore.

elettrica poste a copertura dei servizi di rete, oneri e imposte⁶, le quali passano complessivamente da 7,3 centesimi di euro/kWh nel caso di un consumo familiare di 2.700 kWh/anno, a ben 17,3 centesimi di euro/kWh quando al precedente si aggiungono 3.000 kWh/anno di consumo della pompa di calore, per un totale di 5.700 kWh/anno [36].

Il problema è noto da tempo. È infatti previsto che l'utente domestico possa richiedere l'installazione di un secondo contatore dedicato a contabilizzare separatamente ed esclusivamente i consumi della pompa di calore⁷, senza che si sommino al resto dei consumi dell'utenza provocando il passaggio a scaglioni tariffari più elevati. Ma se lo scopo del provvedimento è quello di contenere i costi, non vanno trascurati alcuni aspetti collaterali, aventi natura sia tecnica sia economica, che rendono il ricorso al secondo contatore meno risolutivo di quanto possa sembrare. Vediamo i più importanti.

Allo stato attuale il contatore aggiuntivo può essere installato solo in corrispondenza del cosiddetto *punto di consegna*, che separa la rete di proprietà (nonché la responsabilità) dell'azienda di distribuzione (a monte) da quella dell'utente (a valle) e cioè, in pratica, a fianco o nelle vicinanze del contatore principale.

In un edificio esistente, specie se di tipo condominiale, questo vincolo pone evidentemente un problema tecnico dal momento che è necessario disporre dello spazio adeguato nello scomparto contatori esistente, oppure predisporre uno scomparto dedicato. Si deve poi realizzare una canalizzazione *ad hoc* che collega il secondo contatore (spesso nel seminterrato) alla pompa di calore (quindi, fin dentro l'appartamento) entro la quale far scorrere i cavi di alimentazione della macchina. Anche in questo caso si può incorrere in onerosi lavori di impiantistica, in funzione della distanza fra contatore e pompa di calore e dell'esistenza o meno nell'edificio di vani e cunicoli tecnici sfruttabili.

In aggiunta vanno anche considerati altri oneri economici che la regolazione prevede siano versati al distributore; se per l'installazione del nuovo contatore è dovuto il pagamento del contributo di allacciamento, che si configura come un costo *una tantum* per larga

⁶ Si tratta di costi definiti dall'organismo di regolazione che pertanto rimangono invariati rispetto al mercato di riferimento del cliente (maggior tutela oppure mercato libero).

⁷ La tariffa applicata è quella prevista per gli Usi Diversi dalle Abitazioni, quindi di tipo binomio non progressivo, con aliquota IVA pari al 10 per cento.

Le barriere alla diffusione

parte commisurato alla maggiore potenza disponibile, la sua gestione implica uno specifico contratto di fornitura che prevede - oltre al costo per l'energia consumata dalla pompa di calore (calcolato a tariffa costante) - anche i costi di misura e fatturazione.

Dal momento che tali costi sono fissi per cliente servito e indipendenti dal livello di consumo, il loro impatto è proporzionalmente maggiore per le utenze che consumano meno (per via delle condizioni climatiche, delle dimensioni dell'abitazione e/o per l'elevata qualità energetica dell'involucro) e che risulteranno inevitabilmente meno motivate a ricorrere alla pompa di calore a causa del limitato risparmio nei costi energetici rispetto al gas.

Allo scopo pertanto di rimuovere gli ostacoli economici che si frappongono a ogni possibile miglioramento di efficienza, anche in questo caso potrebbe essere studiato un meccanismo di incentivazione svincolato dall'energia termica prodotta che, come ipotizzato per le pompe di calore a gas, vada a premiare l'efficienza complessiva attraverso una maggiore incidenza dove più bassi sono i consumi specifici.

Prima di questo è però opportuno agire dal lato regolatorio così da consentire una maggiore flessibilità di installazione e trasferire all'utenza le economie di esercizio rese possibili dalla telegestione dei contatori elettronici, ormai adottati pressoché ovunque in Italia.

A tale scopo la nostra proposta è che sia ammessa, in alternativa alla prassi vigente, l'installazione del secondo contatore a valle del primo e in prossimità della pompa di calore (possibilmente a ridosso della stessa) superando il principio che ogni contatore sia posizionato nel cosiddetto *punto di consegna*.

In questo modo non solo si eviterebbe la difficoltà di reperire spazio nel quadro contatori esistente o di prevederne uno nuovo ma si ridurrebbe fino ad annullarsi la lunghezza della connessione dedicata fra il contatore e la pompa di calore.

Va da sé che, in seguito all'aumento di potenza assorbita, sarebbe comunque necessaria la verifica di adeguatezza (e l'eventuale sostituzione) dei cavi di alimentazione e degli apparecchi di protezione⁸. La contabilizzazione dei consumi della pompa di calore continuerebbe ad avere luogo attraverso la misura diretta mentre quella dell'u-

⁸ È anche necessario l'adeguamento del limitatore di potenza del contatore a monte impostandolo in corrispondenza della potenza cumulativamente sottoscritta dal cliente. L'operazione può essere eseguita in remoto grazie alla telegestione del contatore elettronico.

tenza vera e propria si otterrebbe per differenza fra la lettura del contatore principale e quella del secondo contatore⁹.

Grazie al sistema di telegestione entrambi i contatori verrebbero letti elettronicamente a distanza e con oneri ridotti; questo giustificherebbe l'emissione di un'unica bolletta per entrambi i punti di misura con l'addebito di un solo corrispettivo di misura.

Si osservi che quest'ultima facilitazione potrebbe fra l'altro essere concessa indipendentemente dal posizionamento del contatore e quindi, nel caso di edifici nuovi o di rifacimento radicale dell'impianto elettrico, anche per le installazioni che consentono il posizionamento del secondo contatore nel *punto di consegna*.

La Figura 10.2 schematizza le due configurazioni a confronto per un edificio con quattro unità abitative, una delle quali con pompa di calore. Nel riquadro di sinistra (A) è riportata la situazione attuale, dove sono messi in evidenza il contatore dedicato alla pompa di calore, installato nel quadro misure dell'immobile e le nuove connessioni (in rosso) fra la stessa e il contatore.

La lettura a distanza dei consumi è effettuata tramite la comunicazione con onde convogliate fra i contatori elettronici e il concentratore delle misure, posto in cabina, da dove ha luogo la loro trasmissione al centro di fatturazione per il calcolo dei corrispettivi e l'emissione delle bollette (una per ciascun cliente più una per la pompa di calore).

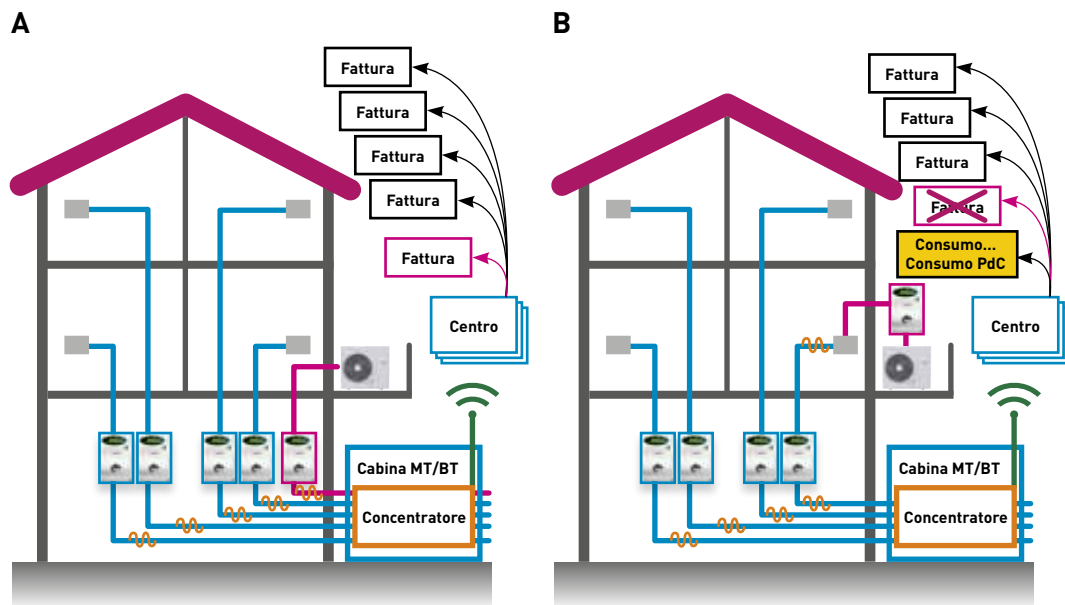
Nel riquadro di destra (B) il contatore aggiuntivo è installato in prossimità della pompa di calore, direttamente inserito sul cavo che la alimenta. Ogni contatore continua a essere letto a distanza e tutte le misure sono teletrasmesse al centro di fatturazione, la bolletta relativa alla fornitura specifica per la pompa di calore non è più necessaria, poiché tutti i consumi di una stessa utenza, distinti per tipo di tariffazione, sono riportati in una sola bolletta.

È opinione degli autori che la proposta formulata, oltre alle semplificazioni e ai risparmi di costo di cui si è detto, possa in futuro dare luogo anche a interessanti sviluppi tecnologici che renderebbero la pompa di calore un'apparecchiatura idonea alla rendicontazione oggettiva sia del risparmio energetico sia dell'uso di energia rinnovabile nonché integrabile nelle logiche di gestione della domanda tipiche delle reti intelligenti.

⁹ Si osservi che tale modalità di computo è oggi già adottata per la contabilizzazione della produzione fotovoltaica presso l'utenza diffusa.

FIGURA 10.2

Installazione di contatore dedicato per pompa di calore in edificio condominiale: a sinistra (A) la situazione attuale; a destra (B) la configurazione proposta.



Nel seguito si riportano alcuni degli sviluppi intravisti che - se attuabili - avrebbero il merito di accrescere l'utilità e il valore commerciale di questo apparecchio. Si tratta di idee pensate nella loro generalità e ritenute fattibili in linea di principio che vengono offerte come spunto per una riflessione sul possibile futuro tecnologico della pompa di calore intesa non solo come un'apparecchiatura orientata al comfort ma anche come strumento di *policy* per l'adempimento degli impegni assunti in ambito internazionale sull'efficienza energetica e l'uso di fonti rinnovabili.

Di proposito le indicazioni non sono state del tutto finalizzate. Si ritiene infatti che sia compito delle aziende interessate studiare i dettagli tecnici per la loro eventuale industrializzazione dopo aver preventivamente analizzato gli aspetti regolatori e commerciali con enti e organismi di riferimento. Vediamo di che cosa si tratta.

Innanzitutto e fatte ovviamente salve le necessarie verifiche e certificazioni di affidabilità e accuratezza anche a fini fiscali, il contatore potrebbe essere posizionato *a bordo macchina* già in fabbrica

durante la costruzione¹⁰; un accorgimento che faciliterebbe l'installazione nel caso di retrofit in spazi angusti.

Inoltre, il montaggio, sempre *a bordo macchina*, anche di un contatore certificato dell'energia termica prodotta aprirebbe il campo a una serie di interessanti funzionalità di *submetering* (fra l'altro automatizzabili) con importanti ripercussioni sulla contabilizzazione dei consumi e sulla diagnostica di funzionamento.

Infatti, la contestuale disponibilità di valori certi di energia prodotta e consumata renderebbe immediatamente possibile l'applicazione del metodo di calcolo del risparmio di energia primaria previsto dal meccanismo dei Certificati Bianchi nel caso di centrali termofrigorifere con pompa di calore¹¹. Per rapporto fra le due energie si otterrebbe l'efficienza della macchina; con riferimento a una stagione di esercizio questo parametro corrisponde al cosiddetto *Seasonal Performance Factor (SPF)* previsto per la verifica di ammissibilità della pompa di calore ai requisiti fissati dall'Allegato VII della Direttiva 2009/28/CE. Per le macchine che soddisfano tali requisiti tramite i valori misurati di energia termica erogata (Q_{usable}) e di efficienza stagionale (*SPF*) si giungerebbe quindi alla determinazione oggettiva dell'energia rinnovabile utilizzata (vedi Capitolo 8) senza ricorrere alle stime e alle ricostruzioni approssimate dei valori di calore utile e di efficienza stagionale oggi necessari per l'assenza di informazioni.

Tutti i dati rilevanti a fini commerciali, fiscali e di rendicontazione energetica (sia per il risparmio di energia primaria sia per la contabilità dell'energia rinnovabile) potrebbero quindi confluire¹² ed essere conservati nella memoria del contatore elettrico che fungerebbe pertanto da *archivio certificato* e resi disponibili, anche con interrogazione a distanza, agli operatori autorizzati e all'utente titolare del contratto di fornitura.

Il sistema di diagnostica e supervisione della macchina potrebbe utilizzare i valori delle due energie - prodotta e consumata - per determinare l'efficienza con cadenza più breve (ad esempio oraria). Con tale informazione, abbinata alla misura contestuale della tem-

¹⁰ In alternativa potrebbe essere previsto un apposito scomparto sull'armadio della macchina per l'alloggiamento del contatore qualora venisse installato all'atto dell'allacciamento alla rete.

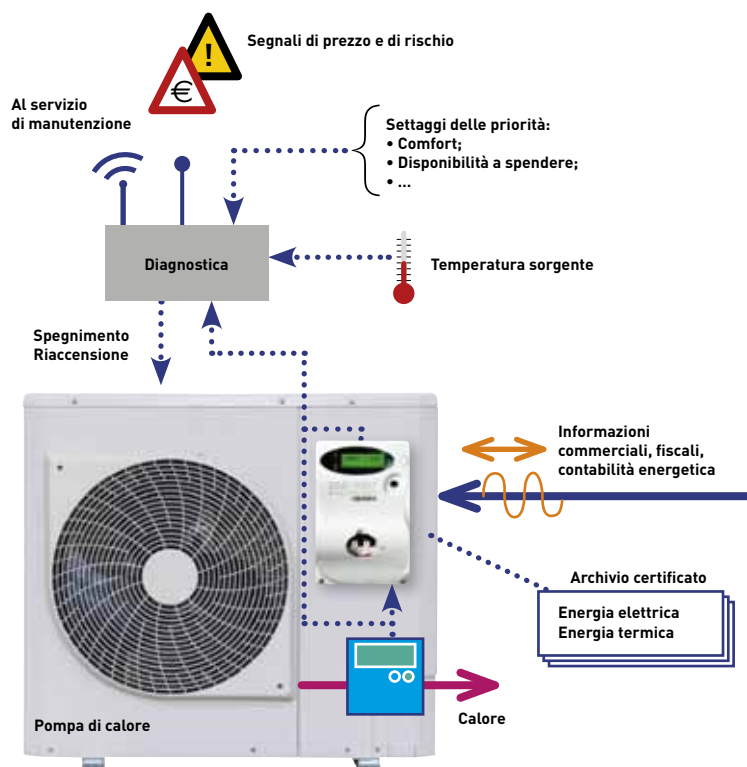
¹¹ Scheda tecnica n. 26T - Installazione di sistemi centralizzati per la climatizzazione invernale e/o estiva di edifici ad uso civile. http://www.autorita.energia.it/allegati/ee/scheda_26.pdf

¹² Allo scopo dovranno essere previste idonee modalità di dialogo (wired/wireless) fra i due contatori.

Le barriere alla diffusione

FIGURA 10.3

Installazioni a bordo macchina proposte per i contatori della pompa di calore.



peratura della sorgente, sarebbe possibile monitorare in linea e con continuità le prestazioni energetiche.

Il rilievo di scostamenti dai valori normalmente attesi permetterebbe in tal modo di anticipare eventuali situazioni di progressivo degrado del funzionamento segnalando anche la necessità di manutenzione, prima che questo si manifesti con la diminuzione del comfort oppure dia luogo al blocco dell'impianto o - peggio ancora - produca danni irreversibili.

Lo stesso sistema di supervisione, infine, potrebbe essere equipaggiato per ricevere dalla telegestione di rete segnali di prezzo e di rischio che una volta integrati con le priorità di comfort e la disponibilità a spendere dell'utilizzatore permetterebbero di determinare

le *modalità di risposta* agli stati di criticità del mercato o del sistema elettrici tramite spegnimenti e riaccensioni automatici.

Questo consentirebbe, come già oggi avviene in alcuni Paesi europei, di applicare tariffe specifiche per le forniture alle pompe di calore che prevedano uno sconto sul prezzo base in cambio della disponibilità ad essere interrotte per periodi aventi durata e numerosità predefinite. Si tratterebbe in sostanza di trasformare l'attuale pompa di calore in un vero e proprio apparecchio *smart grid ready* in grado di adattarsi alle esigenze e di cogliere le opportunità offerte dalle future reti elettriche intelligenti che sono oggi diffusamente studiate in forma prototipale come infrastrutture capaci di massimizzare lo sfruttamento efficiente di risorse energetiche rinnovabili ma per loro natura intermittenti e distribuite sul territorio.

La Figura 10.3 (pubblicata nella pagina precedente) illustra le modalità di installazione a bordo macchina proposte per i contatori della pompa di calore.

Abbiamo visto come la pompa di calore consenta di climatizzare gli edifici, fornendo il comfort desiderato dagli occupanti, con utilizzo di energia rinnovabile, minori emissioni e consumi primari ridotti rispetto alle tecnologie concorrenti. È un settore produttivo che annovera l'industria nazionale fra i leader mondiali; la sua diffusione rappresenta quindi un'importante opportunità di crescita per le aziende e le maestranze italiane.

Inoltre, lo scenario energetico che si prefigura per il raggiungimento degli obiettivi previsti dal Piano d'Azione Nazionale per l'energia rinnovabile non contempla necessità di impianti di generazione elettrica aggiuntivi, si segnala invece una possibile riduzione della bolletta energetica complessiva.

Ma abbiamo anche visto che le ampie potenzialità di diffusione rimangono in larga parte disattese a causa di barriere, informative e di mercato, che fanno scemare l'interesse per questa tecnologia da parte dell'investitore privato. La mancanza di convenienza da parte del cittadino si traduce in un'occasione perduta per la collettività stante l'impossibilità di conseguire i benefici sociali di cui si è discusso.

È cruciale quindi la rimozione prioritaria degli ostacoli alla diffusione che, se nel caso delle pompe di calore ad azionamento elettrico sono principalmente di tipo tariffario, per tutti i tipi di macchina risiedono nella difficoltà ad affermarsi tipica delle tecnologie emergenti: ridotta informazione degli utilizzatori e di formazione degli operatori, scarsa confidenza nell'innovazione, luoghi comuni da scalfire, limitata disponibilità di dati sulle prestazioni reali.

RSE è impegnata a diffondere la conoscenza delle pompe di calore e il modo migliore per integrarle nei sistemi di climatizzazione degli edifici. Questo avviene attraverso indagini tecnologiche, studi di sistema e l'accertamento delle prestazioni energetiche di impianti esemplari, su finanziamento del Fondo per la Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico. Negli anni, questa attività ha portato alla costituzione di un vero e proprio centro di competenza che si prefigge appunto di promuovere l'uso corretto ed efficiente delle pompe di calore, basato sull'elaborazione e la diffusione di informazioni sulle prestazioni reali degli impianti nonché dei criteri per il loro dimensionamento, scelta ed esercizio. È noto, infatti, che solo la libera disponibilità di dati, aggiornati, verificati e indipendenti, permette di superare la barriera culturale alla diffusione delle nuove tecnologie. Ed è altrettanto noto che un utilizzatore informato è anche (o lo di-

venterà presto) un consumatore esigente che sa scegliere, in grado cioè di condizionare il livello di qualità energetica dei prodotti offerti e di stimolare l'industria a realizzare macchine sempre più efficienti. Inoltre, la conoscenza delle prestazioni in campo permette di individuare la sorgente termica più conveniente (ad esempio fra aria e terreno), in funzione del clima e del fabbisogno energetico dell'edificio, evitando di sostenere extra costi che non siano recuperabili attraverso la riduzione della bolletta energetica.

Va da sé che una siffatta opera di disseminazione ha bisogno di alimentarsi di informazioni e criteri originali, disponibili solo attraverso un lavoro di ricerca sistematico e continuo, i cui beneficiari sono già stati, oltre alla cittadinanza in generale, anche Istituzioni Pubbliche, centrali e locali. La presenza frequente di RSE ai tavoli di lavoro governativi e regolatori, nonché gli interventi a incontri pubblici e convegni inerenti sia le pompe di calore sia più in generale l'efficienza energetica degli edifici, testimonia anche il ruolo di attore svolto a livello nazionale e internazionale, in grado di articolare proposte tecnologiche, analisi di sistema e politiche di sostegno dell'efficienza.

Questa pubblicazione ne è un esempio.

Bibliografia

- [1] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell'edilizia.
- [2] Dlgs 192/2005 e successive modificazioni, per l'attuazione della Direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.
- [3] F. Bazzocchi, A. Capozza, W. Grattieri, F. Madonna, S. Maggiore, *Rapporto sul supporto scientifico alle politiche energetiche nazionali*, 2010.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/2618>
- [4] *Piano di azione nazionale per le energie rinnovabili dell'Italia*. Ministero dello sviluppo economico, 30/6/2010.
- [5] HVAC Systems and Equipment, 2008 ASHRAE Handbook, SI Edition.
- [6] E. Macchi, S. Campanari, P. Silva, *La climatizzazione a gas e ad azionamento termico*, Polipress, 2012.
- [7] F. Cattaneo, *Applicazione della tecnologia a pompa di calore nei principali settori industriali*, 2001.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/274665>
- [8] E. Fornasieri, *Refrigerazione*, Manuale d'uso alla progettazione termotecnica, Miniguide AICARR 2010.
- [9] H.I. Henderson, D. Parker, Y.J. Huang, *Improving DOE-2's RESYS routine: user defined functions to provide more accurate part load energy use and humidity predictions*, in: 2000 ACEEE Summer Study Proceedings, 2000.
http://www.eceee.org/Eco_design/products/boilers/WD_Energy_Labelling_Space_and_Combi_Heater-2-2-12.pdf
- [10] L. Croci, G. Lapini, S. Viani: *Monitoraggio delle prestazioni energetiche "in campo" di elettrotecnologie efficienti per la climatizzazione degli edifici*, 2006.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/19>
- [11] A. Capozza, L. Croci, G. Lapini: *Attività sperimentali di monitoraggio ed accertamento delle prestazioni di apparecchiature*, 2009.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/1772>
- [12] F. Bazzocchi, L. Croci *Raccolta dati sperimentali sulle prestazioni in campo di impianti di climatizzazione*, 2010.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/2624>
- [13] F. Bazzocchi, L. Croci *Monitoraggio delle prestazioni energetiche di impianti di climatizzazione*, 2011.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314002>
- [14] F. Bazzocchi, L. Croci *Monitoraggio delle prestazioni energetiche di impianti di climatizzazione*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314843>
- [15] A. Capozza, *Studi modellistici e sperimentali sull'interazione tra le pompe di calore geotermiche e il terreno circostante*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314725>
- [16]

-
- [17] A. Capozza, M. De Carli, A. Galgaro, A. Zarrella, *Linee Guida per la progettazione dei campi geotermici per pompe di calore*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314717>
- [18] F. Madonna, *Indicatori di consumo per la climatizzazione degli edifici*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314724>
- [19] ASHRAE, International Weather for Energy Calculations (IWECC Weather Files), Users Manual and CD-ROM, Atlanta, 2001.
- [20] S. Maggiore, *Analisi di profittabilità dell'investimento di acquisto di Tecnologie Efficienti nel settore Residenziale, Industriale e dei Trasporti*, 2010.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/2626>
- [21] S. Maggiore, *Analisi costi-benefici dell'installazione di un sistema di climatizzazione a pompa di calore*, Rapporto tecnico RSE 12004505, 2012.
- [22] www.heat4u.eu/it/
- [23] CRESME RICERCHE, *Il mercato delle costruzioni e le prospettive degli impianti termici e di condizionamento – Settore Residenziale*, 2011.
- [24] European Commission – EUROSTAT - Directorate E: Sectoral and regional statistics - Unit E5: Energy, Working Group *Renewable Energy Statistics*, Meeting 08/12/2010, Luxembourg.
- [25] *Prima relazione dell'Italia in merito ai progressi ai sensi della direttiva 2009/28/CE*, www.buildup.eu/system/files/content/article_22_italy_report_it.pdf, dicembre 2011
- [26] S. Vitale, *Uno scenario di evoluzione dei consumi elettrici in Italia con anno orizzonte 2050*, L'Energia Elettrica – Ottobre-Novembre 2012.
- [27] M. Borgarello, *Metodologia per la ripartizione regionale dello sviluppo delle fonti rinnovabili termiche nel settore residenziale al 2020*, 2011.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314088>
- [28] M. Borgarello et alii, *Regionalizzazione degli obiettivi di sviluppo delle fonti rinnovabili: analisi tecnica al decreto di burden sharing*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314729>
- [29] F. Lanati, et alii, *Scenari energetici di domanda e offerta*, Rapporto RSE n. 12004545, 2013.
- [30] A. Gelmini, F. Lanati, R. De Miglio, M. Gargiulo, *Il modello energetico multiregionale MONET*, 2012.
<http://www.rse-web.it/documenti/documento/314728>
- [31] R. De Miglio, M. Gargiulo, A. Gelmini, F. Lanati, *The Multiregional Energy System Model – MONET. A comprehensive tool for energy-environmental analysis at both regional and national level in Italy*, Paper, Conferenza AIEE 2012, Settembre 2012.
- [31] IEA-ETSAP (The Energy Technology Systems Analysis Program), *The model generator TIMES*. Available from: <http://www.iea-etsap.org>.

Bibliografia

- [33] Bilancio Energetico Nazionale (BEN), Ministero dello sviluppo economico (MSE), Anno 2010.
- [34] P. Capros, L. Mantzos, V. Papandreou, N. Tasios, *Model-based Analysis of the 2008 EU Policy Package on Climate Change and Renewables*; – Primes Model – E3MLab/NTUA, Gennaio 2010.
- [35] Rapporto *World Energy Outlook 2009 Edition*, IEA, 2009.
www.worldenergyoutlook.org.
- [36] L. Marchisio, *Il contributo dell'energia elettrica alla climatizzazione efficiente degli edifici*, Amici della Terra, Terza Conferenza Nazionale sulle rinnovabili termiche, Roma 31 maggio 2012.
http://www.amicidellaterra.it/adt/images/stories/File/downloads/pdf/campagna%20EE/terza_conf_rinn_termiche_interventi/31_maggio_MATTINA/MARCHISIO.pdf



RSE SpA - Ricerca sul Sistema Energetico - sviluppa attività di ricerca nel settore elettro-energetico, con particolare riferimento ai progetti strategici nazionali, di interesse pubblico generale, finanziati con il Fondo per la Ricerca di Sistema. Fa parte del Gruppo GSE SpA, interamente a capitale pubblico.

RSE implementa attività congiunte con il sistema della pubblica amministrazione centrale e locale, con il sistema produttivo, nella sua più ampia articolazione, con le associazioni e i raggruppamenti delle piccole e medie imprese e le associazioni dei consumatori.

RSE promuove e favorisce lo sviluppo delle professionalità di domani promuovendo tutte le occasioni di supporto allo svolgimento di attività di formazione e divulgazione legate ai temi di ricerca svolti. L'attività di ricerca e sviluppo è realizzata per l'intera filiera elettro-energetica in un'ottica essenzialmente applicativa e sperimentale, assicurando la prosecuzione coerente delle attività di ricerca in corso e lo sviluppo di nuove iniziative, sia per linee interne sia in risposta a sollecitazioni esterne.

RSE dispone di un capitale umano che rappresenta un patrimonio unico di competenze ed esperienze, la cui difesa e sostegno rappresenta una condizione necessaria per consentire lo sviluppo di politiche di innovazione in un settore di enorme rilevanza per il Sistema Paese come quello energetico.

ISBN 978-88-907527-2-8



9 788890 752728