

Enrico Casali

Pompe di calore

Tipologie, progettazione e benefici nell'utilizzo

Principali regole applicative
e quadro generale sugli incentivi

Enrico Casali

Pompe di calore

TIPOLOGIE, PROGETTAZIONE E BENEFICI NELL'UTILIZZO



Dario Flaccovio Editore

Enrico Casali
POMPE DI CALORE

ISBN 9788857904917

© 2015 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686
www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: luglio 2015

Casali, Enrico <1963->

Pompe di calore / Enrico Casali. - Palermo : D. Flaccovio, 2015.

ISBN 978-88-579-0491-7

1. Pompe di calore.

621.402 CDD-22

SBN PAL0282016

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, luglio 2015

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

<i>Introduzione</i>	pag.	9
1. Principio di funzionamento delle pompe di calore	»	11
1.1. Introduzione	»	11
1.2. Ciclo inverso di Carnot	»	14
1.3. Ciclo ad assorbimento a gas	»	17
1.4. Ciclo ad assorbimento a gas acqua-ammoniaca ($H_2O - NH_3$).....	»	19
2. Classificazione delle pompe di calore	»	21
2.1. Introduzione	»	21
2.2. Classificazione in base alla modalità di compressione del fluido di lavoro.....	»	21
2.3. Classificazione in base al fluido di scambio del calore	»	22
2.3.1. Vantaggi e limiti della sorgente aria	»	24
2.3.2. Vantaggi e limiti della sorgente acqua	»	25
2.3.3. Vantaggi e limiti della sorgente terreno	»	25
2.4. Classificazione in base al sistema di distribuzione del calore nell'ambiente riscaldato	»	26
2.4.1. Sistemi a espansione diretta	»	27
2.4.2. Sistemi idronici	»	27
2.5. Classificazione in base alla temperatura di mandata del fluido per il riscaldamento ambiente.....	»	29
3. Efficienza delle pompe di calore	»	31
3.1. Introduzione	»	31
3.2. Coefficienti COP e GUE	»	34
3.3. COP.....	»	34
3.3.1. Miglioramento del COP	»	35
3.4. EER.....	»	36
3.5. GUE	»	37
3.6. Comparazione tra COP e GUE.....	»	38
3.7. SCOP, SGUE e SPF	»	41
4. Fenomeno del brinamento e strategie di defrosting	»	43
4.1. Introduzione	»	43
4.2. Defrosting nelle pompe di calore a compressione di vapore	»	45
4.3. Defrosting nelle pompe di calore ad assorbimento a gas	»	48
5. Fluidi refrigeranti	»	49
5.1. Introduzione	»	49
5.2. ODP	»	49
5.3. GWP	»	50
5.4. TEWI	»	51
6. Pompe di calore a CO_2	»	55
6.1. Introduzione	»	55
6.2. Pompe di calore a CO_2 disponibili.....	»	57

7. Terminali di scambio	»	61
7.1. Introduzione	»	61
7.2. Terminali a espansione diretta	»	61
7.3. Terminali idronici	»	61
7.4. Influenza dei terminali idronici sulle prestazioni termiche	»	62
7.4.1. Radiatori statici (termosifoni)	»	62
7.4.2. Impianto radiante a bassa temperatura	»	66
7.4.3. Ventilconvettori (fan-coils)	»	69
7.4.4. Unità di trattamento d'aria	»	71
8. Produzione di acqua calda sanitaria	»	73
8.1. Introduzione	»	73
8.2. Soluzione con bollitore a serpentino	»	75
8.3. Soluzione con accumulo di acqua tecnica e produzione istantanea di ACS	»	76
8.4. Questione antilegionella	»	78
9. Scaldacqua in pompa di calore	»	81
9.1. Introduzione	»	81
9.2. Scelta dello scaldacqua	»	83
10. Criteri di progettazione	»	85
10.1. Introduzione	»	85
10.2. Scelta del rapporto di potenza installata pompa di calore-generatore ausiliario	»	89
11. UNI/TS 11300	»	103
11.1. Introduzione	»	103
11.2. UNI/TS 11300-4	»	103
11.3. Bin method	»	106
11.4. Prestazioni a pieno carico in condizioni diverse da quelle nominali	»	107
11.5. Funzionamento a carico ridotto	»	110
11.5.1. Calcolo del COP ai carichi parziali per le pompe di calore elettriche con funzionamento on-off	»	112
11.5.2. Calcolo del COP ai carichi parziali per le pompe di calore elettriche con funzionamento a gradini e modulanti	»	113
11.5.3. Calcolo del GUE ai carichi parziali per le pompe di calore ad assorbimento a gas	»	113
11.6. Variazione del coefficiente C_d in presenza di vaso inerziale	»	114
12. Aspetti di convenienza economica	»	115
12.1. Introduzione	»	115
12.2. Costi di investimento	»	115
12.3. Costi per la continuità di servizio e back-up	»	116
12.4. Costi di esercizio e tariffe energetiche	»	116
12.5. Tariffa elettrica sperimentale D1 per gli utenti domestici	»	117
12.6. Costi di manutenzione	»	118
12.7. Valutazione dell'investimento	»	120
12.7.1. Pay back semplice	»	120
12.7.2. ROI (return of investment)	»	121
12.7.3. Valutazione del ciclo di vita	»	121
12.7.4. VAN (valore attualizzato netto)	»	123
12.8. Confronti economici tra diverse tecnologie	»	123

13. Criteri di dimensionamento e installazione delle pompe di calore	» 133
13.1. Introduzione	» 133
13.2. Condizioni operative da considerare	» 133
13.3. Influenza delle temperature di funzionamento sull'efficienza e sul comfort	» 135
13.4. Volume inerziale di accumulo	» 140
13.5. Altri fattori impiantistici nella scelta delle pompe di calore	» 144
13.5.1. Vettore energetico	» 144
13.5.2. Sorgente fredda disponibile	» 145
13.5.3. Impianto interno di distribuzione del calore	» 146
13.5.4. Aspetti ambientali ed ecologici	» 147
13.6. Regole di installazione delle pompe di calore	» 147
13.6.1. Posizionamento all'esterno	» 147
13.6.2. Protezione contro il gelo	» 149
13.6.3. Posizionamento all'interno	» 150
13.6.4. Ghiacciamento della batteria e defrosting	» 150
13.6.5. Componenti di corredo dell'impianto idronico	» 150
14. Cenni di acustica	» 153
14.1. Introduzione	» 153
14.2. Potenza sonora (intensità)	» 153
14.3. Pressione sonora	» 154
14.4. Decibel	» 155
14.5. Relazione tra potenza e pressione sonora	» 155
14.6. Fattori di direzionalità	» 156
14.7. Somma dei livelli sonori	» 157
14.8. Attenuazione della pressione sonora degli impianti	» 158
14.9. Provvedimenti per la riduzione del rumore	» 158
15. Campi applicativi delle pompe di calore	» 161
15.1. Introduzione	» 161
15.2. Applicazioni residenziali	» 162
15.2.1. Bisogni del cliente residenziale e vantaggi offerti dalle pompe di calore	» 164
15.3. Applicazioni nel settore commerciale	» 164
15.3.1. Bisogni del cliente commerciale e vantaggi offerti dalle pompe di calore	» 165
15.4. Applicazioni nell'alberghiero	» 166
15.4.1. Bisogni dell'utenza commerciale e vantaggi offerti dalle pompe di calore	» 168
15.5. Applicazioni nell'industria	» 168
16. Manutenzione degli impianti dotati di pompe di calore	» 171
16.1. Introduzione	» 171
16.2. DPR n. 43/2012 sugli HFC	» 171
16.2.1. Obbligatorietà della certificazione per le persone e le imprese	» 173
16.3. DPR n. 74/2013	» 176
17. Incentivi e agevolazioni per le pompe di calore	» 179
17.1. Introduzione	» 179
17.2. Conto Termico	» 182

17.2.1. Pompe di calore	»	182
17.2.1.1. Tipologia di interventi incentivabili	»	182
17.2.1.2. Soggetti ammessi agli incentivi	»	183
17.2.1.3. Modalità di accesso al meccanismo di incentivazione	»	183
17.2.1.4. Requisiti tecnici per accedere agli incentivi di sostituzione di impianti termici esistenti con pompe di calore	»	184
17.2.1.5. Durata degli incentivi	»	186
17.2.1.6. Spese ammissibili	»	186
17.2.1.7. Calcolo degli incentivi	»	187
17.2.1.8. Esempio di calcolo degli incentivi	»	189
17.2.1.9. Documentazione necessaria per l'accesso agli incentivi	»	190
17.2.2. Scaldacqua in pompa di calore	»	191
17.2.2.1. Tipologia di interventi e soggetti ammessi.....	»	191
17.2.2.2. Calcolo dell'incentivo e documentazione necessaria	»	192
17.2.3. Cumulabilità degli incentivi	»	193
17.2.4. Interventi con sistemi "ibridi"	»	193
17.2.5. Considerazioni in merito all'accesso agli incentivi del Conto Termico	»	194
17.3. Interventi di risparmio energetico.....	»	195
17.3.1. Beneficiari delle detrazioni fiscali.....	»	196
17.3.2. Interventi ammessi alla detrazione e requisiti tecnici	»	197
17.3.3. Spese detraibili e calcolo della detrazione fiscale.....	»	199
17.3.4. Documentazione necessaria	»	200
17.3.5. Considerazioni in merito all'accesso alle detrazioni fiscali per il risparmio energetico.....	»	201
17.4. Detrazioni fiscali per le ristrutturazioni edilizie	»	201
17.4.1. Beneficiari delle detrazioni fiscali.....	»	202
17.4.2. Interventi ammessi alla detrazione	»	202
17.4.3. Documentazione necessaria	»	203
17.4.4. Considerazioni sulle detrazioni fiscali per le ristrutturazioni edilizie	»	203
17.5. Titoli di efficienza energetica (TEE)	»	204
17.5.1. Come si ottengono i TEE	»	205
17.5.2. Chi può gestire i TEE e dimensione minima dei progetti	»	206
17.5.3. Quanto valgono i TEE.....	»	207
17.5.4. Schede utili per i TEE per le pompe di calore.....	»	208
17.5.5. Cumulabilità con altri incentivi e agevolazioni	»	209
17.5.6. Considerazioni sul meccanismo dei TEE.....	»	209
17.6. Sintesi delle agevolazioni	»	209
18. Prestazioni delle pompe di calore secondo la progettazione ecocompatibile europea	»	215
18.1. Introduzione	»	215
18.2. Pompe di calore idroniche	»	216
18.3. Insiemi di apparecchiature.....	»	219
18.4. Scaldacqua in pompa di calore	»	220
19. Impatto ambientale	»	221

Introduzione

Le pompe di calore, siano esse elettriche o a gas, ad aria o ad acqua, sono, tra le tecnologie per la produzione del calore per il riscaldamento, quelle più promettenti ed efficienti oggi disponibili sul mercato. Negli anni, queste apparecchiature hanno subito un notevole sviluppo tecnologico e prestazionale, spinto anche dal crescente interesse che il mercato ha dedicato a esse, per via della loro capacità di utilizzare, nel funzionamento, una buona quantità di energia estratta dall'ambiente (energia rinnovabile); così sono in particolare le pompe di calore aerotermiche, quelle cioè in grado di assorbire calore dall'aria esterna, oltre che dall'acqua (idrotermia) o dal terreno (geotermia).

Le pompe di calore, inizialmente installate principalmente per il condizionamento estivo (come refrigeratori) e solo per qualche breve periodo mite nell'inverno, oggi possono essere applicate ai soli impianti termici, offrendo una serie di vantaggi non trascurabili:

- utilizzano energia rinnovabile, garantendo in questo modo elevate prestazioni, con una positiva riduzione dei consumi e del costo della bolletta energetica;
- svolgono funzioni di riscaldamento ambiente (e anche condizionamento nei modelli reversibili) e di produzione dell'acqua calda sanitaria (compatibilmente con i limiti applicativi che si vedranno in questo volume);
- utilizzano diverse fonti di energia rinnovabile (contenuta in aria, acqua o terreno), applicandosi al meglio al contesto e alle specificità dell'impianto;
- richiedono un allestimento dell'impianto limitato (in particolare le pompe di calore aerotermiche);
- sono disponibili in molte taglie di potenza, di alimentazione energetica e di temperatura operativa;
- possono essere allacciate a diversi impianti e terminali di distribuzione, a bassa (impianti radianti), media (*fan-coils*) e alta temperatura (radiatori);
- possono integrare impianti di riscaldamento esistenti aumentandone l'efficienza termica stagionale complessiva;
- possono essere vantaggiosamente utilizzate in diverse tipologie di utenza, non solo quindi nel domestico di piccola taglia, ma anche nel residenziale centralizzato, nel commerciale, nel terziario e nell'industria;
- grazie alla loro efficienza, hanno tempi di ammortamento dell'investimento di pochissimi anni.

In questo volume si vuole fornire una serie di informazioni di base sul funzionamento e sulle caratteristiche tecniche di queste apparecchiature e sui vantaggi ottenibili dal loro utilizzo. Verranno inoltre trattati alcuni aspetti tecnici legati al loro dimensionamento, al fine di ottenere le migliori prestazioni possibili e delle agevolazioni fiscali ed economiche legate al loro utilizzo, con un particolare focus sulle pompe di calore aerotermiche, a oggi decisamente le più utilizzate, in Italia, negli impianti di climatizzazione.

1. Principio di funzionamento delle pompe di calore

1.1. Introduzione

La pompa di calore è una particolare macchina in grado di trasferire il calore presente in una sorgente a bassa temperatura verso un punto a temperatura maggiore. Per capire questo principio bisogna innanzitutto avere chiari alcuni semplici concetti fondamentali della fisica.

A noi tutti è noto che il calore tende a spostarsi da un corpo caldo verso uno a temperatura minore (meno caldo). Se tocchiamo un corpo riscaldato su una fiamma o esposto a una fonte di calore, sentiamo che questo è caldo, perché il calore del corpo si trasferisce da questo alla nostra mano. Se invece tocchiamo un cubetto di ghiaccio, lo percepiamo immediatamente freddo perché il calore della nostra mano tende a trasferirsi al cubetto di ghiaccio. Questo principio fisico ci fa quindi capire che un locale chiuso e riscaldato in inverno (cioè con una bassa temperatura esterna) tenderà a raffreddarsi, in quanto cederà progressivamente il proprio calore all'ambiente esterno, attraverso la migrazione del calore interno verso l'esterno tramite le pareti, il soffitto, le finestre, ecc.

Per mantenere caldo il locale sarà quindi necessario fornire continuamente del calore che compensi questa continua "perdita" verso l'esterno. Bisognerà fornire al locale del calore, sotto forma, ad esempio, di un flusso di acqua o di aria che abbia una temperatura maggiore del locale, in modo che il fluido ceda il proprio calore al locale. Negli impianti di riscaldamento di tipo tradizionale, molto in uso nelle nostre abitazioni e nei nostri luoghi di lavoro, il calore viene erogato ai locali da acqua calda o aria calda prodotta da un generatore di calore (caldaia) che scalda un flusso di acqua o aria che lambisce uno scambiatore alimentato dalla combustione di un combustibile (gas metano, GPL o gasolio nella maggior parte dei casi). Per produrre calore, i sistemi tradizionali usano un combustibile di provenienza fossile, quindi energia non rinnovabile.

Le pompe di calore sono macchine che possiamo definire in grado di invertire il flusso di calore: prelevano il calore da un ambiente a bassa temperatura per trasferirlo a un ambiente a temperatura più alta. Questo processo non può avvenire in modo naturale, come abbiamo detto, perché in natura il calore si sposta da un

corpo caldo a uno meno caldo. Per compiere questo processo inverso, la pompa di calore deve effettuare un lavoro, quindi richiede dell'energia per poter generare questo fenomeno (figura 1.1).

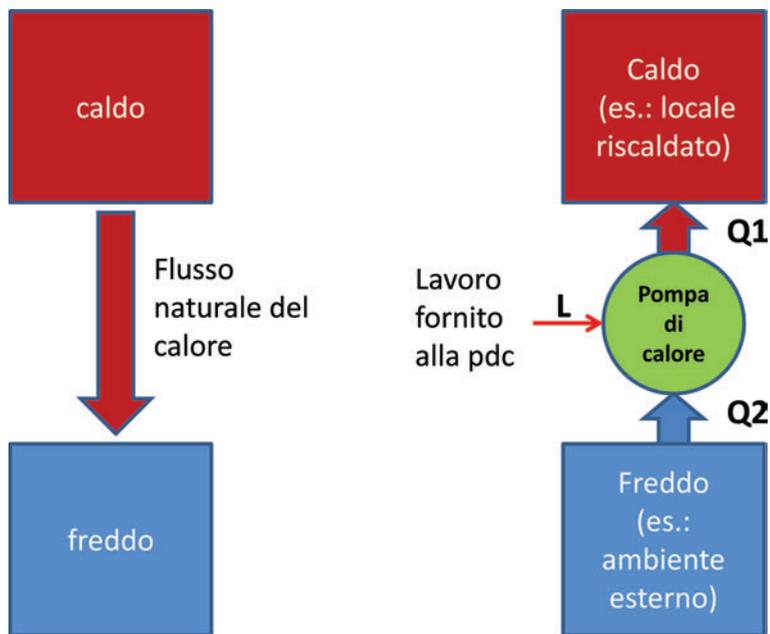


Figura 1.1. Lavoro di trasferimento del calore svolto dalla pompa di calore

Questa macchina, quindi, è in grado di mantenere caldo un ambiente, trasferendo a questo il calore presente in un ambiente a una temperatura inferiore.

Una pompa di calore è quindi una macchina in grado di trasferire del calore da fornire a un ambiente caldo, definito *pozzo caldo* prelevando questo calore da un ambiente più freddo, chiamato *sorgente fredda*, fornendo a questa macchina una determinata energia.

Macchine che si basano su questo principio sono molto diffuse anche nella nostra vita quotidiana, come ad esempio il frigorifero. Questo, infatti, si basa sul processo di raffreddamento di un piccolo vano (quello frigorifero), continuando a prelevare del calore da esso e trasferendolo all'ambiente esterno (la cucina dove il frigorifero è installato). Il calore prelevato dal vano frigo è dissipato nella cucina per mezzo, solitamente, di una griglia alettata posta nella parte posteriore del frigorifero che è sempre più calda del locale.

Ma come è possibile prelevare calore da un ambiente già freddo e trasferirlo in uno più caldo, vincendo il principio della termodinamica che, come abbiamo detto, fa fluire il calore da un corpo caldo a uno freddo e non viceversa?

Proviamo a spiegarlo partendo da un semplice esempio (figura 1.2). Immaginiamo di avere a disposizione un pallone con un certo volume, pieno di molecole. Per mezzo di una forza esterna (lavoro), comprimiamo questo pallone, fino a farlo diventare come una pallina da tennis. Le molecole all'interno sono sempre le stesse, ma molto più compresse. La loro strettissima vicinanza genera, all'interno di quello che era un pallone, un aumento di temperatura: la pallina da tennis diventa calda. Ora spostiamo la pallina dal primo ambiente (ad esempio quello esterno) a un ambiente più caldo (ad esempio un locale interno). La pallina, avendo una temperatura superiore a quella dell'ambiente interno, gli cede parte del suo calore interno, possiamo dire che rilascia un certo numero di calorie nell'ambiente interno. La sua pressione interna quindi tende a diminuire, perché la sua temperatura è diminuita.

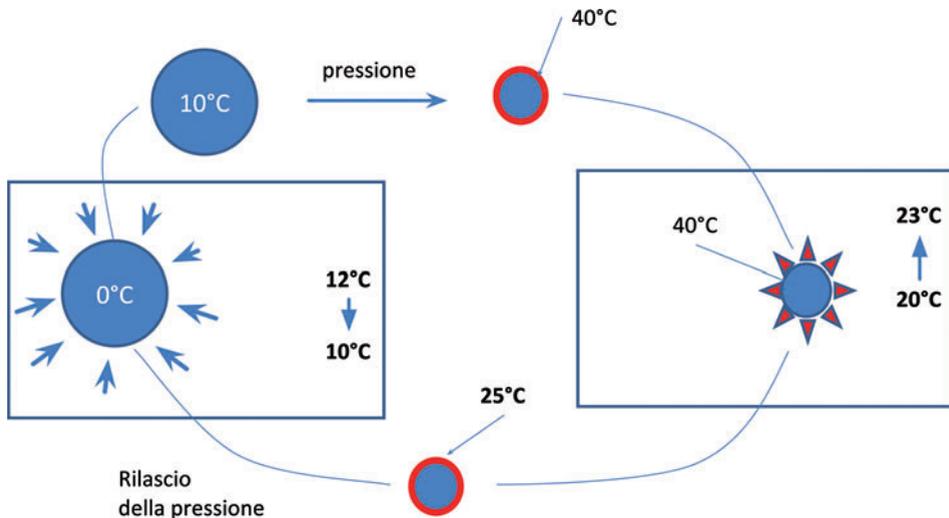


Figura 1.2. Esempio di trasferimento del calore da un ambiente a bassa temperatura a un altro a temperatura più elevata

Ora prendiamo nuovamente la pallina e la riportiamo all'esterno e la lasciamo ridiventare della dimensione di un pallone: il volume aumenterà, le molecole si allargheranno tra loro, riducendo quindi ulteriormente la loro temperatura. Ma siccome il numero di calorie è inferiore a quello iniziale, la sua temperatura diminuirà al di sotto di quella esterna originale. Quest'abbassamento di temperatura richiamerà all'interno del pallone un'altra certa quantità di calore, che sarà prelevato dall'ambiente esterno, fino a quando la temperatura del pallone sarà uguale a quella, appunto, dell'ambiente esterno. Abbiamo quindi visto che il calore che il pallone ha rilasciato nel locale interno è stato rimpiazzato da altro calore assorbito dall'ambiente esterno per riportarsi alle condizioni normali. Il pallone pre-

leva quindi calore dall'ambiente esterno e lo trasferisce all'ambiente interno per mezzo di un processo di riscaldamento e compressione di un fluido (cioè l'aria contenuta nel pallone).

Una pompa di calore è ovviamente molto più complessa e sofisticata, ma basa il suo principio proprio sul trasferimento di calore per differenza di temperatura e pressione, utilizzando un particolare fluido in grado di potersi trasformare come descritto. Esistono più tipi di fluidi frigorigeni e più cicli termodinamici utilizzati dalle pompe di calore, ma possiamo limitarci alla descrizione dei due più noti e utilizzati: il ciclo inverso di Carnot e il ciclo ad assorbimento.

Prima però di entrare nel merito dei cicli, è opportuna un'altra piccola dissertazione su un altro principio fisico legato ai fluidi: l'evaporazione e la condensazione di un fluido. A noi basti sapere che esistono fluidi che, in funzione della temperatura e della pressione alle quali sono sottoposti, possono cambiare di stato: da gassoso a liquido e viceversa (in realtà possono anche assumere lo stato solido, ma nel caso dei fluidi utilizzati nelle pompe di calore non si arriva mai a questo stato).

Questa caratteristica è molto importante perché il passaggio di stato di un fluido richiede solitamente una grande quantità di energia (calore) da fornire, se vogliamo trasformare un liquido in un gas, oppure da sottrarre se vogliamo trasformare un gas in liquido. Il caso tipico è quello dell'acqua: se mettiamo a bollire (forniamo calore) una pentola di acqua, questa si riscalda fino a una determinata temperatura (che dipende dalla pressione esercitata sul fluido) dopodiché inizia a bollire, cioè a trasformarsi in vapore. È importante sapere che per portare il litro (un chilo) di acqua da zero a 100 °C occorrono 100 kcal, ma per trasformare il litro d'acqua in vapore occorrono circa 540 kcal, oltre 5 volte più energia (calore). Lo stesso vale al contrario: se vogliamo trasformare del vapore in liquido, occorre sottrarre molta più energia che per fare abbassare la sua temperatura. Ecco perché i passaggi di stato tra evaporazione e condensazione sono molto importanti: immagazzinano o rilasciano una notevole quantità di calore, e questo è utile per svolgere al meglio quel lavoro di trasferimento del calore che abbiamo spiegato con l'esempio del pallone e della pallina da tennis.

1.2. Ciclo inverso di Carnot

Le pompe di calore sono macchine che utilizzano il ciclo inverso di Carnot. Il ciclo diretto è un importantissimo ciclo teorico, con il quale si dimostra come sia possibile produrre del lavoro utilizzando due sorgenti di calore a temperature diverse. Il ciclo inverso di Carnot è invece applicato per spostare del calore da una sorgente a temperatura inferiore a una a temperatura superiore, a scapito della richiesta di un lavoro proveniente dall'esterno.

Nella figura 1.3 è riportato lo schema semplificato del principio di funzionamento di una pompa di calore a compressione di vapore (ciclo utilizzato tipicamente nelle pompe di calore elettriche).

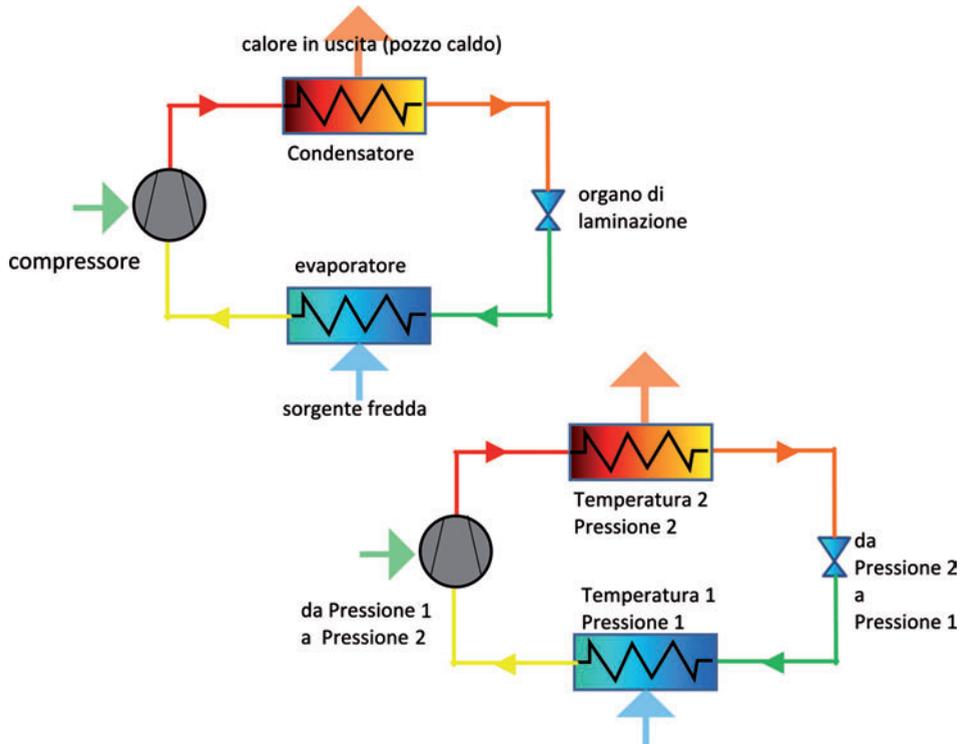


Figura 1.3. Schema semplificato del principio di funzionamento di una pompa di calore a compressione di vapore

Il compressore (mosso da un motore alimentato a energia elettrica) comprime il fluido refrigerante (che è allo stato gassoso) che aumenta di pressione e di temperatura e viene inviato al condensatore. Lo scopo del condensatore è quello di cedere il calore del vapore caldo all'ambiente da riscaldare: questo quindi è composto da una batteria di scambio al cui interno circola il vapore caldo e all'esterno di essa un fluido di scambio (l'aria o l'acqua di riscaldamento). Siccome il vapore è molto più caldo dell'aria o dell'acqua, il vapore rilascia calore al fluido di scambio, fino a condensare, trasformandosi in liquido. Dal condensatore quindi il refrigerante esce liquido e viene inviato all'organo di laminazione nel quale subisce un brusco e repentino calo di pressione. Il calo di pressione comporta come conseguenza un drastico calo della temperatura del refrigerante, che viene quindi inviato all'evaporatore. Questo componente è del tutto simile al condensatore,

ma le condizioni di lavoro sono esattamente opposte: all'interno della batteria di scambio circola inizialmente un liquido molto freddo (anche di parecchi gradi sotto zero), che viene messo a contatto con la sorgente fredda, che può essere l'aria esterna oppure l'acqua di un pozzo o che circola all'interno delle sonde geotermiche. Siccome il refrigerante è molto freddo, acquisisce calore dall'aria o dall'acqua della sorgente fredda e si riscalda, fino a evaporare nuovamente. Il refrigerante nuovamente sotto forma di vapore entra nel compressore che lo comprime per iniziare un nuovo ciclo.

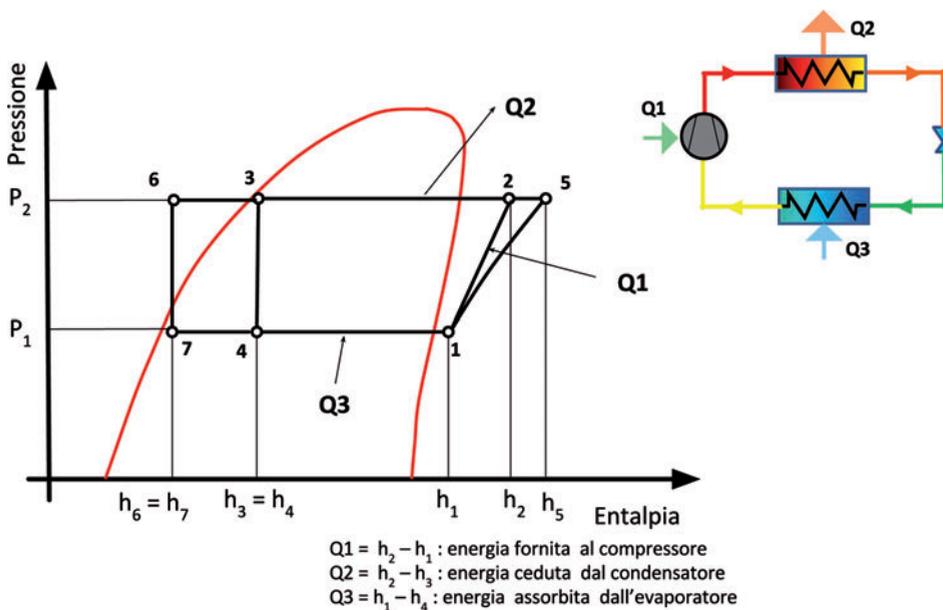


Figura 1.4. Diagramma pressione-entalpia di un refrigerante utilizzato nelle pompe di calore a compressione di vapore

Come abbiamo visto il ciclo si basa sui cambiamenti di stato, di pressione e di temperatura che è possibile apprezzare anche attraverso il diagramma pressione-entalpia di figura 1.4, che riproduce la classica forma di “campana” di un tipico refrigerante: a sinistra di questa il refrigerante è totalmente liquido, all'interno della campana il refrigerante è sempre più saturo di vapore da sinistra verso destra, a destra della campana il refrigerante è totalmente sotto forma di vapore. Il ciclo di una pompa di calore si svolge, come detto, nei diversi stati fisici del refrigerante, utilizzando vantaggiosamente il suo calore latente di condensazione e di evaporazione:

- tratto 1-2 (1-5): il compressore comprime il refrigerante (allo stato di vapore) aumentandone la pressione e la temperatura, grazie all'energia fornita (Q_1) per il suo lavoro;

- tratto 2-3 (5-6): il fluido entra nel condensatore e viene raffreddato dal fluido di scambio con l'ambiente da riscaldare, (solitamente aria o acqua) cedendo a esso il calore (Q_2); il fluido si raffredda (o si sottoraffredda) e condensa;
- tratto 3-4 (6-7): l'organo di laminazione riduce drasticamente la pressione del fluido, mantenendolo liquido; la temperatura del refrigerante scende a valori molto bassi a causa della caduta della pressione;
- tratto 4-1 (7-1): il refrigerante entra nell'evaporatore e assorbe calore (Q_3) dal fluido di scambio con la sorgente fredda (solitamente l'aria esterna oppure l'acqua che circola nelle sonde geotermiche o in una falda acquifera); nonostante la sorgente fredda sia a bassa temperatura, il fluido si trova a una temperatura inferiore, quindi assorbe calore e cambia nuovamente di stato, passando nuovamente allo stato gassoso e rientrando nel compressore per un nuovo ciclo.

Nella tabella 1.1 sono riassunte le varie fasi del ciclo termodinamico tipico di una pompa di calore a compressione di vapore, rappresentate nella figura 1.4.

Tabella 1.1. Fasi del ciclo termodinamico di una pompa di calore come rappresentato nella figura 1.4

Fasi		Descrizione
1-2 (1-5)	Compressione	Fornitura di energia Q_1 per il funzionamento del compressore (con surriscaldamento)
2-3 (5-6)	Condensazione	Cessione del calore Q_2 al pozzo caldo (con sottoraffreddamento)
3-4	Laminazione	Riduzione della pressione
4-1	Evaporazione	Assorbimento di calore Q_3 dalla sorgente fredda
2-5	Surriscaldamento	Maggiore temperatura del refrigerante
3-6	Sottoraffreddamento	Riduzione della temperatura del refrigerante
Q_1	Tratto 1-2 (5)	Energia fornita al compressore
Q_2	Tratto 2-3 (5-6)	Energia fornita al circuito di riscaldamento
Q_3	Tratto (7) 4-1	Energia assorbita dalla sorgente fredda

1.3. Ciclo ad assorbimento a gas

Sul mercato sono oggi disponibili anche pompe di calore che si basano su un differente ciclo termodinamico rispetto a quello di Carnot, largamente utilizzato sulle pompe di calore a compressione di vapore dotate di uno o più compressori alimentati elettricamente. Si tratta delle pompe di calore ad assorbimento, che hanno come più evidente e importante differenza quella di utilizzare come vettore energetico per il funzionamento un combustibile gassoso, quale il gas metano o il GPL al posto dell'energia elettrica. I principi fisici di trasformazione all'interno

del ciclo ad assorbimento sono pressoché uguali a quello inverso di Carnot, con la differenza che in questo ciclo il compressore è sostituito da un generatore termico alimentato da un bruciatore a gas, del tutto simile a quello che viene utilizzato nelle più tradizionali e note caldaie a condensazione. Un'altra importante variante di questo ciclo è che il refrigerante, l'ammoniaca, è utilizzato assieme a un altro fluido, l'acqua, che all'interno del ciclo funge da assorbitore dell'ammoniaca, facendola condensare ed evitando quindi il grosso lavoro svolto dal compressore.

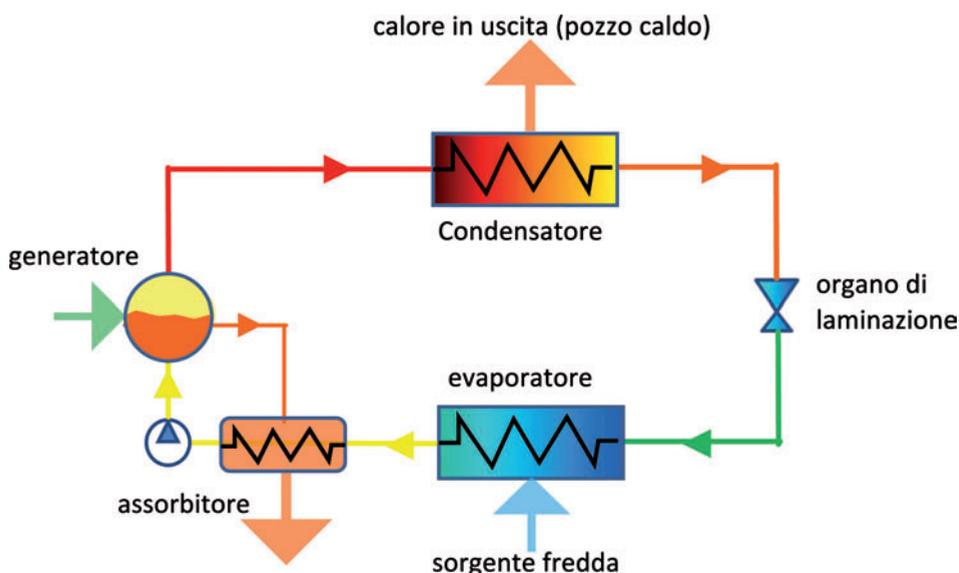


Figura 1.5. Schema di principio del ciclo ad assorbimento di una pompa di calore a gas

Lo schema di principio del ciclo ad assorbimento è riportato nella figura 1.5, nella quale si può notare che questo è simile per i tre quarti a quello di una pompa di calore a compressione di vapore, ma si differenzia da esso nella parte di produzione del refrigerante ad alta pressione e temperatura. In questo ciclo il refrigerante (l'ammoniaca) si comporta come un normale refrigerante, visto nel ciclo inverso di Carnot e utilizzato dalle pompe di calore elettriche. L'ammoniaca che torna dall'evaporatore però in questo ciclo viene a trovarsi in una particolare parte del circuito, l'assorbitore, nel quale vengono a trovarsi il vapore di ammoniaca e una soluzione povera, composta prevalentemente di acqua. Quest'ultima ha la caratteristica chimica di assorbire con estrema facilità i vapori di ammoniaca, sviluppando una grande quantità di calore (chiamato *calore di assorbimento*). Questo calore viene ceduto anch'esso, assieme a quello di condensazione, al fluido di riscaldamento dell'ambiente. L'acqua incorpora quindi in sé tutto il vapore di ammoniaca che torna allo stato liquido. Una piccola pompa a membrana (chiamata *pompa della soluzione*) preleva il liquido dall'assorbitore e lo immette

nel generatore, il quale è scaldato da un bruciatore a gas. Nel generatore l'ammoniaca si separa nuovamente dall'acqua: la prima inizia il suo ciclo all'interno del condensatore, mentre l'acqua, impoverita dall'ammoniaca, viene rimandata nell'assorbitore per espletare nuovamente la sua funzione di assorbimento dei vapori di ammoniaca.

1.4. Ciclo ad assorbimento a gas acqua-ammoniaca ($H_2O - NH_3$)

Il ciclo ad assorbimento è ovviamente più complesso nella sua composizione reale, comprendendo anche una serie di scambi e recuperi termici, utili ad aumentarne l'efficienza complessiva. Nella figura 1.6 è rappresentato un ciclo ad assorbimento più dettagliato che, utilizzato in una pompa di calore ad assorbimento a gas, consente di produrre energia termica per il riscaldamento utilizzando un combustibile gassoso anziché energia elettrica.

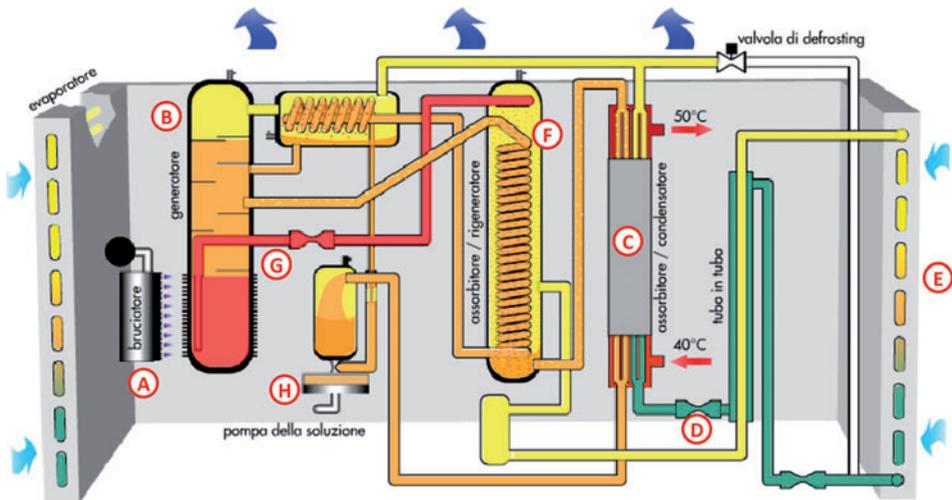


Figura 1.6. Rappresentazione di dettaglio del ciclo ad assorbimento di una pompa di calore a gas

Il ciclo termodinamico si innesca grazie all'apporto di calore prodotto dalla combustione del gas per mezzo del bruciatore (figura 1.6, componente A). Nel generatore (B), nel quale è contenuta una soluzione ricca di acqua e ammoniaca riscaldata dai fumi di combustione del bruciatore, l'ammoniaca si separa dall'acqua trasformandosi in vapore, e viene inviata nel condensatore, composto da uno scambiatore in acciaio al titanio (C). I vapori di ammoniaca cedono calore all'acqua che circola all'esterno dello scambiatore (l'acqua di ritorno dall'impianto di riscaldamento), che si riscalda. L'ammoniaca, cedendo calore, si condensa ed esce liquida dal condensatore verso l'organo di laminazione (D), che ne riduce la pressione e la temperatura. L'ammoniaca liquida fredda entra nell'evaporatore (nel caso

3. Efficienza delle pompe di calore

3.1. Introduzione

Per proseguire con la comprensione del funzionamento delle pompe di calore è importante chiarire la differenza tra rendimento ed efficienza. Il rendimento termico di un dispositivo si può definire come rapporto tra l'energia uscente dalla trasformazione dell'energia fornita al dispositivo e l'energia fornita. In altre parole, è la capacità di trasformare tutta l'energia entrante in una determinata forma in energia uscente in un'altra forma. Siccome la trasformazione svolta dal dispositivo richiede un lavoro, il rendimento non può mai essere superiore a 1, ma al massimo prossimo a 1.

Facciamo un esempio: una caldaia viene alimentata con gas combustibile pari a 3,0 m³ di metano e produce 30 kW di potenza termica, cioè di calore sotto forma di acqua calda. Il suo rendimento sarà:

$$\eta = \frac{Q_t}{Q_c}$$

dove

Q_t energia termica fornita all'acqua

Q_c energia contenuta nel combustibile bruciato dalla caldaia.

Il calcolo quindi deve tenere conto dell'energia in ingresso, che nel caso del gas è definita con due distinti coefficienti:

- il PCS
- il PCI.

PCS

È il potere calorifico superiore, ovvero l'energia che si rende disponibile dalla combustione completa del gas combustibile a pressione costante, riportando anche i prodotti della combustione alla temperatura iniziale del combustibile (gas)

e del comburente (aria). Ciò significa, di fatto, che il vapore acqueo contenuto nei fumi combusti è fatto condensare e quindi questo ha ceduto sia calore sensibile (temperatura) che calore latente di condensazione (trasformazione del vapore acqueo contenuto nei fumi in condensa).

PCI

È il potere calorifico inferiore, ovvero l'energia che si rende disponibile dalla combustione completa di un gas combustibile a pressione costante, ma senza riportare i gas alla temperatura iniziale del comburente e del combustibile. In questo modo non si sfrutta quindi completamente l'energia immagazzinata nel combustibile, in quanto i fumi scaricati rimangono caldi e contenenti ancora la loro quantità di vapore acqueo (quindi non viene sfruttato tutto il loro calore sensibile e nulla del calore latente).

Per il gas metano:

- il PCS è pari a circa 10,65 kW/m³
- il PCI è pari a circa 9,45 kW/m³.

Applicando la formula suddetta avremo:

$$\eta = 30/10,65 \cdot 3,0 = 0,94 = 94\%$$

Ciò significa che la caldaia ha un rendimento del 94% (riferito al PCS), cioè ha utilizzato il 94% dell'energia entrante, mentre il restante calore è stato dissipato nei fumi di combustione. Avrebbe raggiunto un rendimento del 100% se avesse prodotto calore pari a:

$$10,65 \text{ (kW/m}^3\text{)} \cdot 3 \text{ (m}^3\text{)} = 31,95 \text{ kW} \quad \text{anziché 30 kW}$$

In Europa per convenzione si è finora utilizzato, per questi calcoli, il PCI.

Applicando la stessa formula sopra, otteniamo un altro valore di rendimento:

$$\eta = 30/9,45 \cdot 3,0 = 1,06 = 106\%$$

Questo risultato sembra violare il secondo principio della termodinamica, che prevede che il rendimento non possa mai essere superiore a 1, cioè al 100% (infatti in quel caso si avrebbe una generazione di energia dal nulla). Invece, come visto nel calcolo sopra, una caldaia a condensazione che viene dichiarata con rendimento pari al 106% (calcolato sul PCI) è una caldaia che ha un rendimento termodinamico del 94% circa (calcolato sul PCS).

L'altra definizione, che meglio si abbina invece alle pompe di calore, è quella di efficienza termica.

L'efficienza termica la si può definire come rapporto tra l'energia prodotta dal dispositivo e l'energia fornita a questo. Come si intuisce in questo caso l'energia uscente non è solo quella di alimentazione entrante e trasformata, ma anche quella che la pompa di calore riesce ad assorbire dall'ambiente esterno e portare all'interno del suo ciclo di "trasferimento" del calore dalla sorgente fredda al pozzo caldo. In questo caso l'efficienza può risultare anche maggiore di 1, perché oltre all'energia che entra nel ciclo per l'alimentazione della pompa di calore (sotto forma di energia elettrica o di gas combustibile) entra anche il calore a bassa temperatura che la pompa di calore è in grado di assorbire e fornire all'ambiente da riscaldare: l'energia rinnovabile.

L'efficienza quindi può avere un valore anche molto superiore a 1, non perché la pompa di calore può "generare" dell'energia, ma perché somma l'energia entrante per l'alimentazione del suo ciclo a quella prelevata dall'ambiente esterno. È utile osservare fin da ora come l'efficienza sarà tanto maggiore quanto minore sarà la differenza di temperatura tra la sorgente fredda (l'ambiente esterno) e il pozzo caldo (l'edificio o l'acqua da riscaldare), perché la pompa di calore sprecherà meno energia nel lavoro di pompaggio del calore da un livello di temperatura inferiore a quello superiore.

Per chiarire questo concetto prendiamo l'esempio di una pompa di calore a gas, alimentata quindi dallo stesso combustibile di una tradizionale caldaia (figura 3.1).

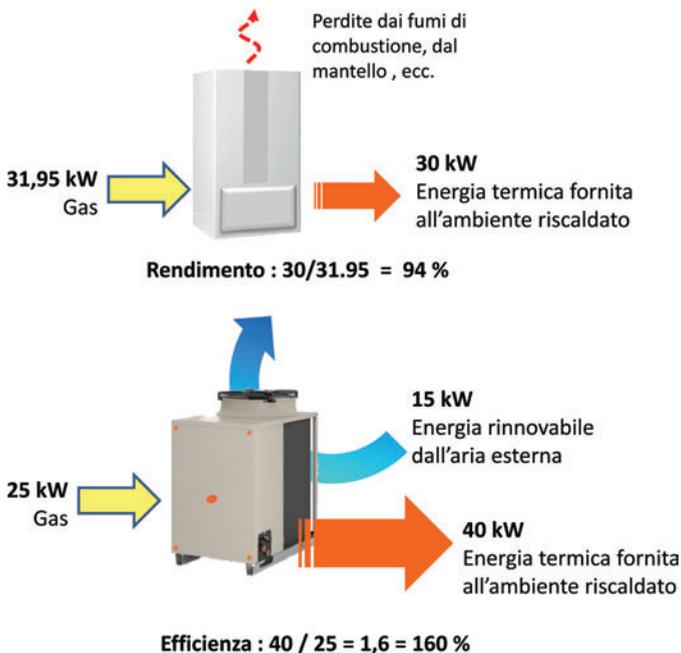


Figura 3.1. Confronto delle efficienze tra una caldaia e una pompa di calore a gas

L'apparecchiatura riceve energia sotto forma di gas (25 kW termici) utile per il suo funzionamento. Quest'energia viene immessa nel ciclo termodinamico, che consente alla pompa di calore di assorbire dall'ambiente esterno (aria) 15 kW termici, mettendola a disposizione del condensatore. La potenza termica della pompa di calore è quindi la somma dell'energia entrante della combustione del gas e di quella rinnovabile assorbita dall'ambiente:

$$\text{potenza termica} = 25 + 15 = 40 \text{ kW termici}$$

$$\text{efficienza termica} = 40/25 = 1,6 = 160\%$$

3.2. Coefficienti *COP* e *GUE*

L'efficienza di una pompa di calore si può esprimere quindi sotto forma di un valore che viene definito:

- *COP* (*coefficient of performance*, coefficiente di prestazione) per le pompe di calore a compressione di vapore mosse da motore elettrico, cioè alimentate da energia elettrica;
- *GUE* (*gas utilization efficiency*, efficienza di utilizzazione del gas) per le pompe di calore ad assorbimento a gas e per quelle a motore endotermico a gas, cioè per quelle unità che utilizzano come fonte di alimentazione principale il gas combustibile (metano o GPL).

3.3. *COP*

Il *COP* di una pompa di calore è calcolato come rapporto tra la potenza erogata dalla pompa di calore (a compressione di vapore, quindi elettrica) e l'energia utilizzata dalla pompa stessa per compiere il lavoro di "pompaggio" dell'energia, dalla sorgente fredda al pozzo caldo:

$$COP = \frac{P_t}{P_{ec}}$$

dove

P_t potenza termica della pompa di calore, dichiarata a una data condizione di funzionamento (cioè con determinate temperature della sorgente fredda e del pozzo caldo)

P_{ec} potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore per il suo funzionamento, nelle condizioni di P_t .

Il consumo elettrico della pompa di calore a compressione di vapore si riferisce sia al motore del compressore elettrico, che attiva il ciclo termodinamico, sia a quello dell'eventuale ventilatore (che, nelle pompe di calore aerotermitiche, richiama sulla batteria alettata dell'evaporatore l'aria dalla quale estrarre calore) e di eventuali altri ausiliari necessari per il funzionamento dell'apparecchiatura. Se riprendiamo la figura 1.4, il *COP* può essere definito come:

$$COP = \frac{Q_2}{Q_1}$$

Le norme di prodotto europee EN 14511 e PR EN 14825 precisano che il calcolo del *COP* delle pompe di calore elettriche deriva dalla formula:

$$COP_{EHP} = \frac{Q_2}{E_{elet}}$$

La recente norma UNI/TS 11300-4, oltre a prendere in considerazione il *COP*, definisce anche un altro indice di prestazione: il *REP* (rapporto di energia primaria), rapporto energetico più corretto, perché tiene conto dell'utilizzo, al denominatore nella formula, dell'energia primaria e non dell'energia elettrica:

$$REP_{EHP} = \frac{Q_2}{E_{elet}} \cdot \eta$$

$$REP_{EHP} = COP_{EHP} \cdot \eta$$

dove η è il rendimento di produzione dell'energia elettrica, indicato dai regolamenti europei recentemente emanati, pari a 0,40. Ciò in quanto l'energia elettrica non è un'energia primaria, ma secondaria, cioè derivata dalla trasformazione di un'energia primaria in ingresso alla centrale di produzione dell'energia elettrica (centrale termo-elettrica).

3.3.1. Miglioramento del *COP*

Facendo sempre riferimento alla figura 1.4, è possibile pensare di aumentare il *COP* aumentando l'energia in uscita dal condensatore Q_2 , per mezzo di un opportuno surriscaldamento del fluido in uscita dal compressore (tratto 1-5). In questo modo la resa termica del condensatore aumenta (tratto 5-3), a scapito però di una maggiore temperatura del fluido, che si lega a possibili rischi di sovratemperatura del compressore.

In sostanza il *COP*, a prescindere dalla bontà costruttiva della pompa di calore, è fortemente legato alla differenza di temperatura tra la sorgente fredda e il pozzo caldo, tra l'ambiente esterno e quello da riscaldare. Minore è questa differenza di temperatura, maggiore sarà il *COP* della pompa di calore, in quanto minore sarà il lavoro che questa dovrà compiere per trasferire il calore da un livello energetico all'altro.

3.4. *EER*

A volte il *COP* viene confuso o impropriamente utilizzato per indicare l'efficienza della pompa di calore in funzionamento estivo (condizionamento). In questo caso il ciclo funziona allo stesso modo ma, siccome l'obiettivo dell'apparecchio non è quello di scaldare un ambiente, ma di raffreddarlo, la prestazione in condizionamento viene espressa come *EER* (*energy efficiency ratio* – rapporto di efficienza energetica).

L'*EER* viene calcolato, seguendo sempre la figura 1.4, come:

$$EER = \frac{Q_3}{Q_1}$$

cioè come rapporto tra il calore asportato dal locale da condizionare (calore assorbito dall'evaporatore, chiamato *potenza frigorifera*) e l'energia assorbita dalla pompa di calore per il suo funzionamento.

I due valori (*COP* e *EER*) sono simili ma non uguali, perché parte del lavoro svolto dal compressore si trasforma in calore: questo viene conteggiato come apporto termico nel condensatore durante il funzionamento invernale (cioè contribuisce ad aumentare il *COP*), mentre nel condizionamento questo calore viene dissipato dal condensatore verso l'ambiente esterno e quindi non entra nel calcolo dell'*EER*, che solitamente ha un valore inferiore rispetto al *COP*.

Prendiamo, come esempio, una pompa di calore dalle seguenti caratteristiche:

- potenza termica: 35 kWt con assorbimento elettrico totale pari a 10 kWe
- potenza frigorifera: 32 kWf con assorbimento elettrico totale pari a 10 kWe
- $COP = 35/10 = 3,5$
- $EER = 32/10 = 3,2$.

I valori dell'assorbimento elettrico tra il funzionamento in riscaldamento e in condizionamento potrebbero nella realtà essere leggermente diversi, in quanto

cambiano le condizioni termiche e fisiche del fluido refrigerante, che determina una leggera differenza di rendimento del compressore.

Inoltre ricordiamo sempre che i valori di *COP* (e di *EER*), a differenza delle caldaie, non sono valori fissi, ma variano in funzione delle condizioni operative di funzionamento della pompa di calore: minore è la differenza di temperatura tra la sorgente fredda e il pozzo caldo, maggiore sarà il *COP* (e l'*EER*) e viceversa.

3.5. *GUE*

Il *GUE* lo possiamo considerare il corrispondente del *COP*, ma riferito alle pompe di calore alimentate da un combustibile gassoso. Il *gas utilization efficiency*, infatti, è il rapporto tra la potenza erogata dalla pompa di calore (ad assorbimento, oppure dotata di motore endotermico, entrambe a gas) e l'energia utilizzata dalla pompa stessa per compire il lavoro di trasferimento di calore, che nel caso specifico è sotto forma di gas (metano o GPL):

$$GUE = \frac{P_t}{P_{comb}}$$

dove

P_t potenza termica della pompa di calore, dichiarata a una data condizione di funzionamento (cioè con determinate temperature della sorgente fredda e del pozzo caldo)

P_{comb} consumo di combustibile gassoso della pompa di calore per il suo funzionamento, nelle condizioni di P_t .

Il *GUE* indica l'efficienza delle pompe di calore ad assorbimento a gas, in modo del tutto analogo alle pompe di calore elettriche, ma con due importanti differenze:

- il *GUE* viene calcolato sul gas in ingresso alla pompa di calore (cioè quello consumato dal bruciatore interno), che quindi è un'energia primaria, cioè un'energia che si trova in natura e non deriva dalla trasformazione di un altro tipo di energia, a differenza per esempio dell'energia elettrica, che è il risultato della trasformazione che avviene tipicamente in una centrale termoelettrica. L'energia elettrica infatti non è disponibile in natura, ma viene prodotta nelle centrali attraverso l'energia prodotta dalla combustione di un combustibile che può essere gas metano, gasolio o carbone;
- il *GUE* viene calcolato come rapporto tra l'energia uscente dalla pompa di calore ad assorbimento e l'energia, sotto forma di gas, che la alimenta. Non tiene quindi conto dei consumi di energia elettrica degli ausiliari necessari al

suo funzionamento, come ad esempio il ventilatore per la movimentazione dell'aria esterna sulla batteria dell'evaporatore (nel caso di una pompa di calore aerotermica), o la pompa della soluzione.

È però da considerare che i consumi elettrici per queste apparecchiature sono molto marginali, rispetto al consumo del combustibile gassoso necessario per l'attivazione del ciclo termodinamico. Vedremo comunque più avanti il raffronto delle efficienze di una pompa di calore elettrica e di una a gas, effettuato sull'energia primaria in ingresso alle due apparecchiature.

Le pompe di calore ad assorbimento utilizzano un sistema termodinamico tri-termico, che prevede la relazione fra tre temperature: quella del generatore T_3 , quella dell'evaporatore T_1 e quella del condensatore T_2 :

$$GUE_{comb} = \frac{\frac{T_3 - T_1}{T_3 \cdot T_1}}{\frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1}}$$

Dalla formula sopra esposta si intuisce come le pompe di calore ad assorbimento siano molto meno soggette a un calo di prestazioni all'abbassarsi della temperatura della sorgente fredda, essendo prevalente il fattore T_3 . Quest'aspetto è importante nella scelta della potenza termica erogata da una pompa di calore alle condizioni di progetto dell'impianto, specialmente se si decide di utilizzare una pompa di calore aerotermica. Infatti è necessario tenere conto dell'effettiva efficienza, e quindi della potenza termica erogata, anche nelle condizioni più critiche di basse temperature esterne, per non incorrere in sottodimensionamenti che potrebbero portare a un abbassamento del comfort interno.

3.6. Comparazione tra COP e GUE

Come abbiamo appena spiegato, la differenza sostanziale tra il COP (di una pompa di calore elettrica) e il GUE (di una pompa di calore a gas) è che il primo viene calcolato considerando come energia di alimentazione dell'apparecchiatura l'energia elettrica, che non è un'energia primaria, mentre il secondo viene calcolato considerando come energia di alimentazione il gas (metano o GPL), che invece è un'energia primaria.

Questo concetto è molto importante, perché significa che l'utilizzo di 1 kWh di energia elettrica da parte di un'apparecchiatura elettrica presuppone che a monte

(cioè nella centrale termo-elettrica) è avvenuta una generazione di energia per mezzo di un sistema che ha un proprio rendimento, che allo stato attuale è molto inferiore al 100%, quindi richiede più energia in ingresso di quella in uscita (sotto forma di energia elettrica). Per quantificare il rendimento di questa trasformazione, possiamo prendere a riferimento il coefficiente di trasformazione dell'energia elettrica in energia primaria stabilito a livello europeo dai recenti Regolamenti n. 811/2013 e 813/2013 sull'EcoDesign ed Energy Label degli apparecchi idronici termici, che indicano questo fattore pari a 2,5 (cioè un rendimento di produzione pari a 0,40). In altre parole, significa che ogni kWh elettrico consumato da un'apparecchiatura elettrica in realtà ha richiesto il consumo di 2,5 kWh a monte, sotto forma di altra energia (come detto gas, gasolio, carbone) per produrre quel kWh. Per poter confrontare i valori di *COP* e di *GUE* e apprezzare le differenze di efficienza delle diverse tipologie di pompe di calore, è necessario riportare entrambi i valori a un'unica "unità di misura", l'energia primaria, cioè l'effettivo consumo di energia occorso per alimentare le pompe di calore.

Il *GUE*, come più volte detto, considera già come fonte di alimentazione della pompa di calore il gas, quindi un'energia primaria, mentre il *COP*, essendo calcolato sull'energia elettrica, deve essere ricondotto all'energia primaria, dividendo il consumo elettrico per il rendimento del sistema di produzione, pari a 0,40 (valore che si riferisce al rendimento di produzione dell'energia elettrica stabilito a livello europeo). Come sopra accennato, il comportamento di una pompa di calore ad assorbimento rispetto a una a compressione di vapore è sensibilmente diverso, in quanto essa utilizza un ciclo termodinamico e un fluido refrigerante diversi.

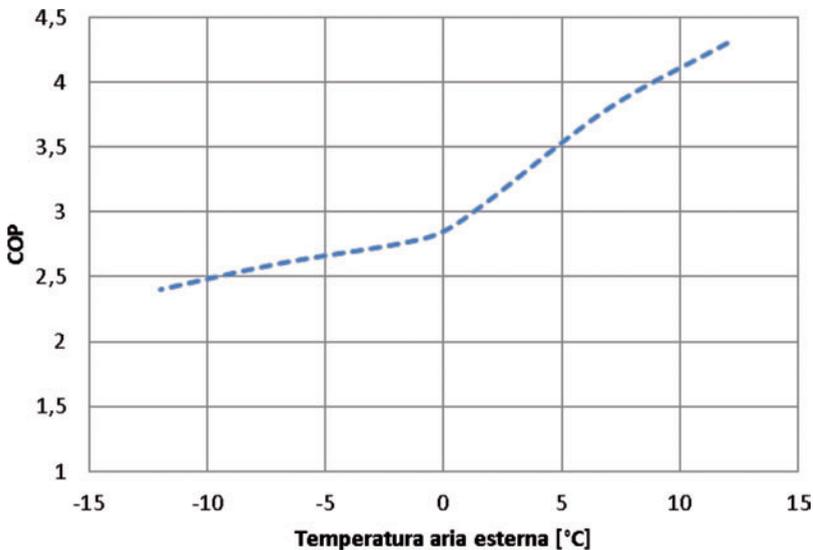


Figura 3.2. Andamento del *COP* di una pompa di calore elettrica

Nei grafici delle figure 3.2 e 3.3 sono riportati gli andamenti del COP di una pompa di calore elettrica e del GUE di un pompa di calore a gas, entrambe aerotermitiche, mentre nella figura 3.4 sono messi a confronto gli stessi valori di efficienza, riparametrati sul rapporto di energia primaria (REP), per renderli confrontabili.

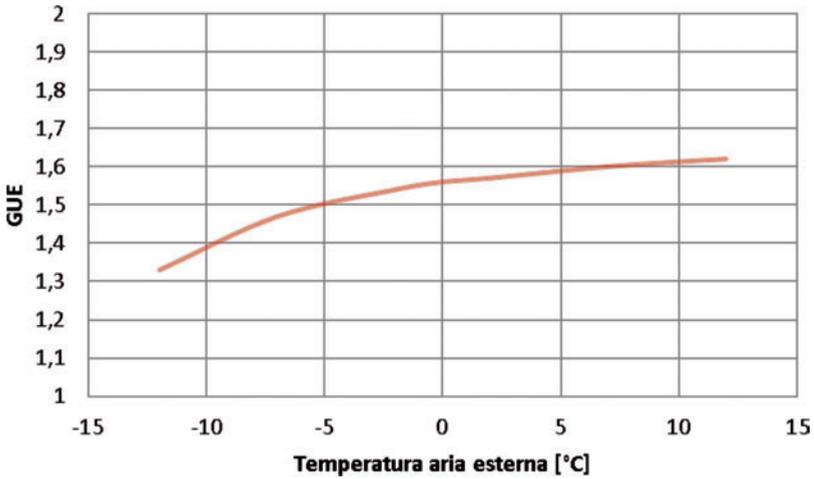


Figura 3.3. Andamento del GUE di una pompa di calore ad assorbimento

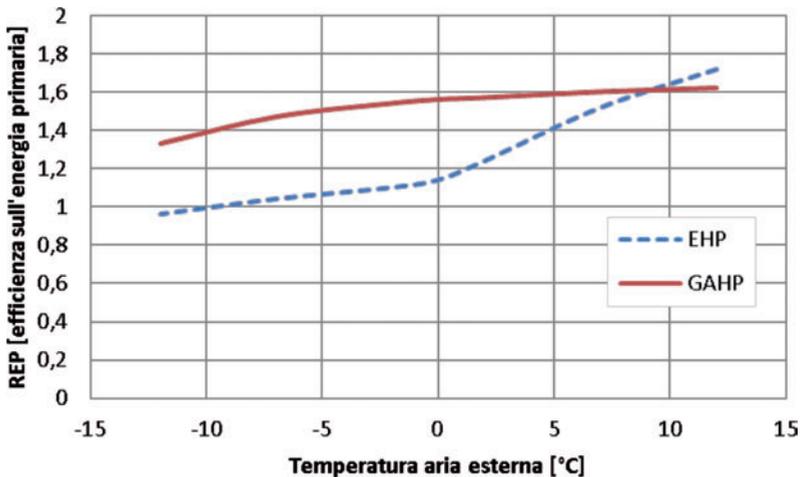


Figura 3.4. Confronto dell'efficienza delle pompe di calore, parametrata sull'energia primaria

ovviamente presenta alcune caratteristiche che la rendono meglio utilizzabile, in termini di prestazioni energetiche, per la produzione di acqua calda sanitaria, o meglio per funzionamenti con elevato delta di temperatura e basse temperature di ingresso nel condensatore.

La CO_2 è caratterizzata da un punto critico relativamente basso come temperatura (circa 31°C), ma elevata pressione (circa 77 bar), quindi le pompe di calore con questo fluido, per funzionare con elevate prestazioni, necessitano di aumentare in modo importante la pressione operativa oltre il punto critico, cioè il punto più alto della caratteristica forma a “campana” del diagramma pressione/entalpia, che identifica i passaggi di stato dei fluidi. Nella figura 6.1 sono messi a confronto un ciclo transcritico di una pompa di calore a CO_2 e un ciclo subcritico di una pompa di calore a R134A che, come si nota nella figura, lavora a pressioni inferiori a quella che determina il punto critico del fluido.

Nel ciclo transcritico il refrigerante uscito dal compressore non viene condensato come nelle pompe di calore tradizionali, ma viene raffreddato solo per temperatura sensibile all'interno di uno scambiatore di calore (*gas cooler*), per poi essere laminato per mezzo di una valvola di espansione, che lo porta allo stato liquido e infine all'espansione nell'evaporatore. Questa caratteristica permette di ottenere temperature dell'acqua di riscaldamento (fatta fluire in controcorrente all'esterno del *gas cooler*) molto aderenti alla temperatura del gas refrigerante, riducendo in questo modo le perdite energetiche del ciclo termodinamico.

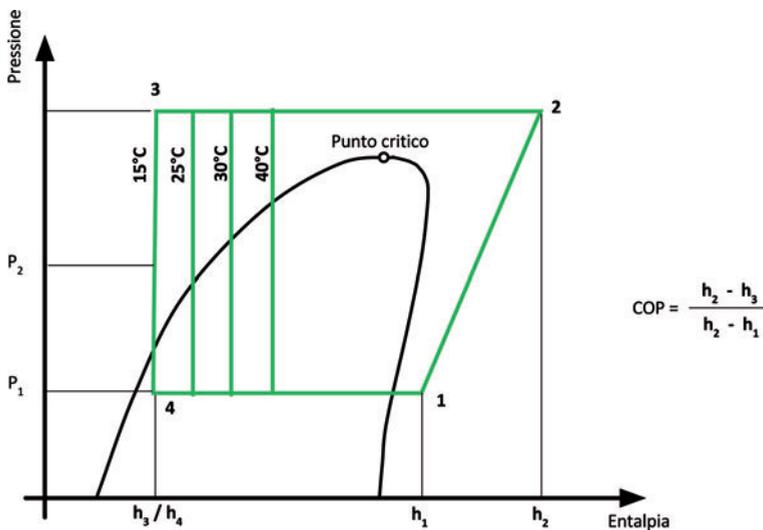


Figura 6.2. Variazione dell'efficienza sul diagramma $p-h$ al variare della temperatura di ritorno del pozzo caldo

Per questa caratteristica, l'efficienza delle pompe di calore a CO₂ è particolarmente influenzata dalla temperatura in ingresso del pozzo caldo, mentre lo è molto meno dalla temperatura della sorgente fredda, com'è evidenziato dallo schema di figura 6.2.

Con queste condizioni di funzionamento, è evidente che l'efficienza è particolarmente elevata con salti di temperatura molto ampi, da questo è comprensibile il motivo per cui le pompe di calore a CO₂ trovano il loro ottimale impiego nella produzione di acqua calda sanitaria, dove la temperatura di ingresso dell'acqua nel *gas cooler* (che corrisponde alla temperatura di ingresso dell'acqua di acquedotto) è molto bassa.

L'utilizzo dell'anidride carbonica e del ciclo transcritico implica ovviamente anche condizioni di progettazione e di funzionamento che devono essere tenute in considerazione:

- le pressioni di esercizio di queste unità sono molto elevate, nell'ordine dei 100 bar;
- l'efficienza tende a decrescere rapidamente con l'innalzarsi della temperatura del pozzo caldo, quindi avere acqua di ritorno a temperatura elevata significa ridurre l'efficienza, mentre questa è molto meno influenzata dalla temperatura di mandata, situazione che invece penalizza le macchine con ciclo subcritico a causa della pressione di condensazione richiesta al compressore, influenzandone quindi l'assorbimento elettrico.

6.2. Pompe di calore a CO₂ disponibili

Sul mercato esistono già da alcuni anni modelli di pompe di calore a CO₂, sia del tipo aerotermico (aria-acqua) che geotermico o idrotermico (acqua-acqua), ottimizzate per la produzione di acqua calda sanitaria, caratterizzate da elevati *COP* anche per la produzione di acqua fino a 90 °C (si è detto infatti che il *COP* è molto più influenzato dalla temperatura di ingresso che da quella di mandata). Le taglie di queste variano da circa 20 kW termici nominali, capaci di produrre acqua calda istantanea fino a circa 12 l/min (700 l/h, come il modello mostrato in figura 6.3), fino a circa 100 kW per le versioni acqua-acqua.

Queste ultime, che necessitano di un secondo circuito idronico con il quale prelevare energia termica dalla sorgente fredda (acqua o terreno), possono anche alimentare un impianto di condizionamento, ad esempio durante la stagione estiva, considerando però che l'erogazione dell'energia frigorifera avviene solo quando la pompa di calore è attiva per la produzione di acqua calda (cioè per un utilizzo contemporaneo di acqua fredda e calda).

8. Produzione di acqua calda sanitaria

8.1. Introduzione

A differenza di quanto è avvenuto e sta avvenendo per il fabbisogno termico di riscaldamento degli edifici, che è in continuo calo a seguito del miglioramento degli isolamenti termici delle pareti che li costituiscono, il fabbisogno per la produzione dell'acqua calda sanitaria (ACS) invece è rimasto pressoché costante, se non addirittura aumentato, in quanto le persone tendono a farne un uso sempre maggiore e con maggiore continuità.

Se negli scorsi decenni il peso dell'energia termica necessaria per l'ACS era nell'ordine del 15% del fabbisogno termico complessivo di un edificio residenziale, con la netta riduzione del fabbisogno per il riscaldamento la quota di ACS si sta attestando oggi nei nuovi edifici a ben oltre il 30%, fino a raggiungere, negli edifici di classe più elevata, anche il 50% del totale dell'energia termica necessaria.

Le caratteristiche peculiari di questo fabbisogno, a differenza di quello per il riscaldamento, sono la sua forte concentrazione, nel tempo, l'estrema saltuarietà e la necessità di una temperatura di produzione medio alta. Se infatti prendiamo ad esempio l'energia termica necessaria per alimentare l'utilizzo di una doccia, possiamo assumere quanto segue:

- consumo di acqua calda per la doccia: 12 litri/min
- durata della doccia: 5 minuti
- temperatura dell'acqua alla doccia e dell'acquedotto: rispettivamente 40 °C e 15 °C.

Per determinare l'energia occorrente basta effettuare un semplice calcolo, moltiplicando la quantità di acqua calda necessaria per il ΔT (consideriamo il calore specifico dell'acqua pari a 1):

$$(12 \cdot 5) \cdot (40 - 15) = 1.500 \text{ kcal} = 1.745 \text{ Wh}$$

Produrre questa quantità di calore istantaneamente, cioè scaldare in 5 minuti 60

litri di acqua portandola da 15 a 40 °C significa avere a disposizione un generatore termico che abbia una potenza termica definita nel seguente modo:

$$1.745/5 \cdot 60 = 20.940 \text{ W} = \text{circa } 21 \text{ kW}$$

Da questi semplici calcoli si deduce con facilità il perché le caldaie domestiche, che producono l'acqua calda sanitaria in modo istantaneo, da sempre hanno una potenza termica intorno ai 20/25 kW. La loro potenza è quindi prevalentemente necessaria per la produzione di acqua calda sanitaria, più che per il fabbisogno termico di riscaldamento.

È opportuno fare solo una sottolineatura in merito a questo concetto. La produzione di ACS realizzata in questo modo consente di ottenere con il minor costo impiantistico il risultato voluto, a scapito dell'efficienza, che è fortemente penalizzata, in particolar modo durante i continui piccoli prelievi di acqua calda sanitaria, che impegnano una caldaia di grossa taglia (rispetto all'energia richiesta) per pochissimi istanti, costringendola a continue accensioni e spegnimenti, che ne penalizzano le prestazioni nel complesso e soprattutto nel tempo.

Per le pompe di calore, l'approccio della produzione di ACS in modo istantaneo come avviene nelle caldaie, a prescindere dalla diseconomia energetica suddetta, non può essere adottato, per due principali motivazioni:

- la pompa di calore non ha una potenza termica fissa ma, come già spiegato nei capitoli precedenti, questa dipende dai fattori esterni, cioè dalle temperature della sorgente fredda (aria, acqua o terreno) e da quella del pozzo caldo (temperatura di mandata dell'acqua all'impianto). L'escursione di potenza nelle varie condizioni è notevole, quindi la produzione di acqua calda istantanea sarebbe molto variabile;
- l'inerzia dei cicli termodinamici della pompa di calore (sia essa a compressione di vapore o ad assorbimento a gas) non consente un'immediata risposta alla richiesta di calore da parte dell'utente, provocando quindi un periodo iniziale più o meno lungo di flusso d'acqua fredda, sgradevole come comfort e poco sostenibile, se vogliamo, anche dal punto di vista ambientale (per lo spreco di acqua che se ne ottiene in attesa delle condizioni idonee all'utilizzo).

Il corretto approccio alla produzione di ACS con pompe di calore, che può certamente valere, in termini di maggiore efficienza, anche per le caldaie, è quello dell'accumulo termico. In pratica si tratta di realizzare un serbatoio di idonee dimensioni nel quale accumulare l'acqua calda sanitaria, pronta per essere utilizzata alla prima richiesta di prelievo.

Gli approcci impiantistici per realizzare l'accumulo termico per l'ACS possono essere almeno due:



Acquistalo