

CONDIZIONAMENTO E GAS NATURALE: I VANTAGGI DELLE POMPE DI CALORE CON MOTORE A COMBUSTIONE INTERNA

Gian Luca Morini, Sandro Salvigni

DIENCA, Università degli Studi di Bologna, Viale Risorgimento 2 40136 Bologna

SOMMARIO

Le pompe di calore a gas con motore endotermico (GHP) rappresentano una interessante applicazione di “microgenerazione”. Tali pompe hanno trovato una larga diffusione soprattutto nei paesi orientali ma le loro prestazioni fanno prevedere che in futuro possano trovare una fetta di mercato notevole anche in ambito europeo. . Nel presente articolo viene dimostrato, sulla base di un’analisi di primo principio, che le prestazioni offerte dalle pompe di calore GHP in termini di efficienza di conversione energetica sono estremamente interessanti se paragonate con quelle delle pompe di calore elettriche (EHP). I dati presentati in questa memoria sottolineano come le pompe di calore a gas GHP possano in un futuro prossimo candidarsi a sostituire i generatori di calore ad alto rendimento per il riscaldamento invernale ed i condizionatori elettrici per la produzione del freddo. Le prestazioni delle pompe di calore a gas potranno essere ulteriormente migliorate proseguendo nello sviluppo di motori “*ad hoc*” ottimizzati per operare a bassi regimi di rotazione con elevati valori del rendimento meccanico e con ridotte perdite di calore in ambiente.

1- INTRODUZIONE

Negli ultimi anni il mercato dei condizionatori in Italia ha fatto registrare un incremento notevolissimo. Considerando solo i condizionatori autonomi da appartamento con potenza frigorifera inferiore a 12 kW (*split*), si è passati dalle 300.000 unità vendute nel 1998 alle 950.000 unità vendute nel 2003, con un incremento del 216 % [1]. Tuttavia esistono ancora nel nostro paese notevoli margini di sviluppo nel settore del condizionamento come può essere evidenziato se si confrontano i dati sulla percentuale di aree climatizzate in Italia con i dati medi europei (si veda Figura 1) [1]. L’Italia, per la sua collocazione geografica, dovrebbe avere una penetrazione della climatizzazione superiore alla media europea. Dal confronto con il dato medio europeo si evince, al contrario, che in molti settori la penetrazione della climatizzazione in Italia è molto inferiore alla media europea.

Nel futuro si possono attendere importanti incrementi della climatizzazione nel nostro paese soprattutto negli uffici, negli ospedali e nel settore alberghiero.

La maggior parte dei condizionatori installati sono basati su cicli frigoriferi a compressione in cui il compressore è alimentato da energia elettrica. Il notevole incremento della domanda di condizionamento estivo nel nostro paese negli ultimi 6 anni ha quindi portato ad un deciso incremento dei consumi di energia elettrica nei mesi estivi. Sempre più decisamente in futuro il funzionamento in contemporanea di milioni di condizionatori autonomi incrementeranno il picco di potenza elettrica richiesta in rete, spostando le punte massime di carico elettrico nella stagione estiva e mettendo in crisi un sistema caratterizzato “cronicamente” da una modesta riserva di potenza.

Le interruzioni programmate a zone della fornitura elettrica possono essere un rimedio temporaneo, come è accaduto nel 2004, ma non possono essere considerate come la soluzione finale di tale problema.

In questa memoria si andranno ad analizzare i vantaggi che possono essere conseguiti perseguendo una politica di gestione energetica nazionale in cui venga incentivato il ricorso alle pompe di calore a gas per il condizionamento estivo e invernale. Il ricorso al gas naturale permette di ridurre drasticamente l’incremento dei consumi elettrici nella stagione estiva e nello stesso tempo di riequilibrare la domanda di gas nei mesi estivi. Da quest’ultimo punto di vista, l’incremento dei consumi di gas in estate permetterebbe di risolvere i problemi connessi allo stoccaggio del gas naturale a cui odiernamente si ricorre in estate (quando il consumo di gas crolla rispetto all’inverno) per avviare al funzionamento a portata costante dei gasdotti. In particolare, in questa memoria verrà dimostrato come le attuali pompe di calore a gas, corredate di motore alternativo a combustione interna, si

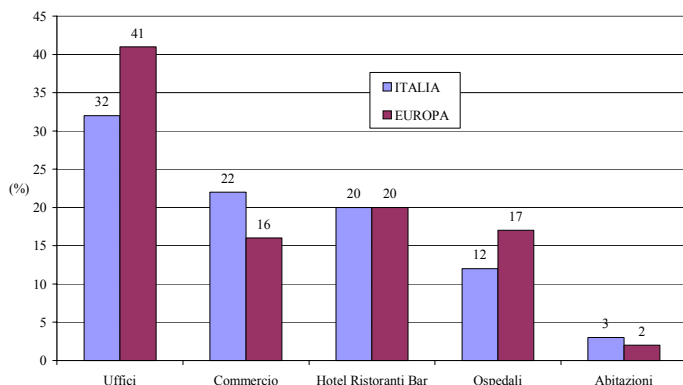


Figura 1 – Percentuale di aree climatizzate in Italia e in Europa [1,2].

prestano ad accoppiare la produzione di caldo in inverno alla produzione del freddo durante la stagione estiva. Come verrà dimostrato in questa relazione, le pompe di calore a gas sono infatti in grado di garantire prestazioni superiori in inverno a quelle dei generatori di calore di ultima generazione (generatori a condensazione o a bassa temperatura) e in estate hanno prestazioni in linea con quelle offerte dai gruppi frigoriferi elettrici tradizionali basati su macchine frigorifere a compressione.

2- LE POMPE DI CALORE AZIONATE DA MOTORE ENDOTERMICO

Le pompe di calore basate su un ciclo frigorifero a compressione in cui il compressore è attivato da un motore endotermico alimentato a gas o a gasolio (GHP) hanno trovato una larga diffusione nel mercato orientale, soprattutto in Giappone in cui sono presenti dal 1987. In questi ultimi anni il loro mercato si è espanso notevolmente [1-3]; in Giappone e nel resto del mondo le GHP sono ormai da considerare una realtà consolidata nel mercato delle unità per il condizionamento dell'aria ad uso civile ed industriale. Ad oggi, solamente nel mercato giapponese sono in funzione circa 40000 unità e le previsioni danno questa tecnologia in rapida ascesa nei prossimi anni. Si stima che nel 2007 in Giappone il numero di unità installate sarà pari a circa 70000. Le GHP di ultima generazione sono dotate di motori endotermici, funzionanti a metano o a GPL o a gasolio, progettati specificatamente per questo uso e che quindi non sono da considerarsi degli "adattamenti" di motori d'auto esistenti come avveniva nei primi esemplari di GHP immessi nel mercato alla fine degli anni '80. In particolare, al fine di allungare l'intervallo di tempo tra due manutenzioni successive, questi motori sono dotati di una coppa dell'olio maggiorata e sono progettati per lavorare ad un basso numero di giri. I regimi di rotazione dei motori impiegati nelle GHP possono variare tra i 1500 e i 3000 giri/minuto risultando notevolmente inferiori rispetto a quelli dei motori automobilistici. Il rendimento meccanico dei motori endotermici impiegati nelle GHP è in genere più elevato di quello tipico dei motori automobilistici e può raggiungere il 30% nei motori di taglia più piccola e superare il 35% nelle taglie più grandi. La particolare progettazione e l'alta tecnologia dei motori impiegati nelle GHP consentono oggi lunghi periodi di funzionamento senza manutenzione, arrivando a garantire fino a 10.000 ore di funzionamento della pompa di calore tra due manutenzioni successive. In questa memoria verranno analizzate le prospettive di utilizzo delle GHP per la produzione combinata del caldo e del freddo nelle applicazioni civili e industriali.

2.1 – Principio di funzionamento di una GHP

Le pompe di calore a motore endotermico alimentato a gas (GHP) sono concettualmente del tutto simili alle pompe di calore elettriche (EHP); la sola differenza sta nell'alimentazione del compressore che, nel caso delle GHP, è effettuata accoppiando, in modo diretto o meno, un motore endotermico al compressore. L'uso del motore endotermico rende inoltre disponibile, in estate come in inverno, una quantità notevole di calore recuperabile dal circuito di raffreddamento del motore [4-6].

In Fig. 2 viene rappresentato lo schema di funzionamento estivo (in raffrescamento) di una pompa di calore GHP. Come si può vedere, il compressore (1) è accoppiato direttamente ad un motore endotermico (2); il circuito percorso dal fluido

frigorifero (linea in grassetto in Fig.2) a valle del compressore è del tutto tradizionale e si compone di una valvola di inversione (3), uno scambiatore esterno che funge da condensatore (4) e uno scambiatore interno che funge da evaporatore (5). Si può osservare in Fig.2 come il motore venga raffreddato mediante un circuito di raffreddamento percorso da acqua e glicole (linea sottile in Fig. 2). L'acqua di raffreddamento in uscita dal motore attraversa uno scambiatore (7) di post-riscaldamento in cui preleva calore dai gas esausti di scarico raffreddandoli. In questo modo il calore recuperato raffreddando il motore e i gas di scarico viene impiegato per la produzione di acqua calda ad uso sanitario mediante il bollitore (8).

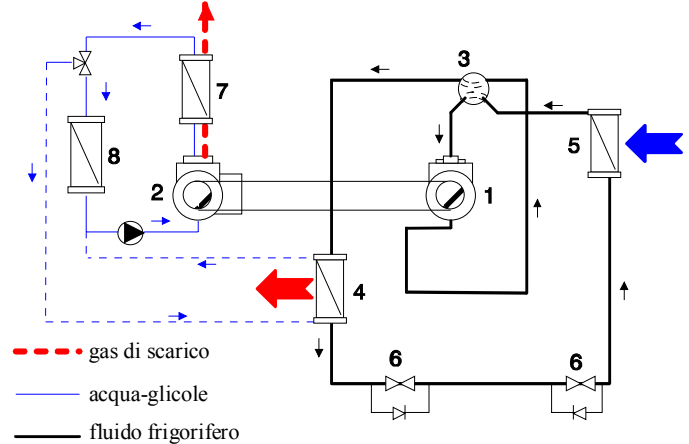


Figura 2 – Schema di funzionamento estivo di una GHP.

Lo schema di funzionamento di una GHP si modifica in inverno secondo quanto indicato in Fig. 3. In inverno il calore sottratto al motore può essere in parte utilizzato per innalzare la temperatura di evaporazione del refrigerante (4) onde consentire una diminuzione del lavoro di compressione e quindi migliorare il COP della pompa di calore [5,6].

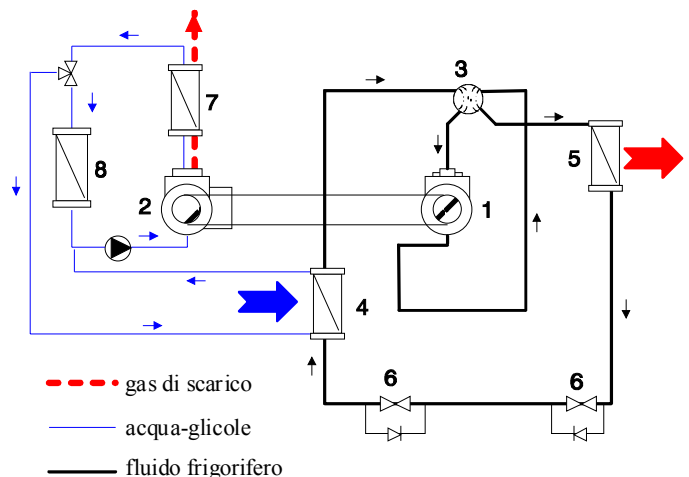


Figura 3 – Schema di funzionamento invernale di una GHP.

La valvola di inversione scambia di ruolo lo scambiatore esterno (4) e lo scambiatore interno (5). In questo caso lo scambiatore esterno agisce da evaporatore (4) prelevando calore dall'esterno e lo scambiatore interno (3) agisce da condensatore riscaldando l'acqua del circuito di riscaldamento. Come si può notare, in inverno come in estate il circuito di raffreddamento del motore continua a produrre energia termica sfruttata per la produzione di acqua sanitaria. Lo scambiatore di calore sulla linea di evacuazione

dei fumi di scarico del motore (7) permette di raffreddare i fumi in uscita prelevando ulteriore calore da fornire al circuito di produzione dell'acqua calda sanitaria durante tutto l'anno, indipendentemente dal valore assunto dalla temperatura esterna. Poiché nelle pompe di calore GHP una parte rilevante dell'energia termica proviene dal circuito di raffreddamento del motore, la quota parte di calore recuperato dall'acqua di raffreddamento è del tutto indipendente dalla temperatura esterna, in quanto il motore garantisce la produzione di acqua calda a circa 70-80°C indipendentemente dalle condizioni esterne. Per questo motivo le prestazioni della pompa di calore GHP subiscono limitate variazioni al variare della temperatura esterna [5,6].

In Fig. 4 è graficata la potenza termica fornita da una pompa di calore GHP commerciale al variare della temperatura esterna, per fissato numero di giri del compressore. Si può osservare come alla temperatura esterna di -15°C (peraltro estremamente improbabile alle nostre latitudini) la pompa di calore GHP vede ridotta solo del 30% la potenza termica erogabile rispetto a quella che la macchina garantisce con una temperatura esterna di 7°C (valore di temperatura esterna preso a riferimento per fornire i dati nominali della pompa di calore in funzionamento invernale). Dalla Fig. 4 si nota come per una temperatura esterna pari a -5°C la riduzione rispetto alla potenza termica erogabile con una temperatura esterna di 7°C è pari al 7%, quindi estremamente contenuta.

Questa caratteristica costituisce una peculiarità interessante delle pompe di calore GHP che non trova riscontro nelle pompe di calore elettriche tradizionali che hanno una efficienza molto sensibile alla variazione della temperatura esterna. Incrociando la curva che fornisce la potenza termica fornita dalla pompa di calore al variare della temperatura esterna con la curva della potenza termica richiesta dall'impianto si ottiene il grafico di Fig.5.

In Fig. 5 la richiesta di potenza termica dell'impianto è riportata in linea continua. La potenza termica fornita dalla GHP è riportata in linea tratteggiata. Si vede come le due curve si incrocino in un unico punto, detto punto di balance point. Il balance point individua il valore di temperatura esterna in corrispondenza del quale la potenza fornita dalla pompa di calore eguaglia la potenza richiesta dall'impianto (temperatura di balance point). Quando la temperatura esterna è inferiore a quella di balance point l'impianto richiede una potenza superiore a quella che la pompa di calore è in grado di fornire; al fine di soddisfare la richiesta di energia termica dell'impianto, in questo caso occorre integrare la potenza fornita dalla pompa di calore mediante una caldaia o un riscaldatore elettrico [6].

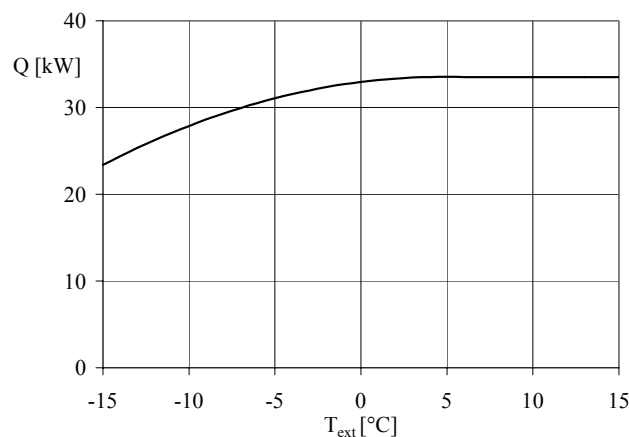


Figura 4 – Potenza termica prodotta da una GHP commerciale al variare della temperatura esterna.

Al contrario quando la temperatura esterna è maggiore di quella di balance point la pompa di calore fornisce una potenza termica superiore a quella richiesta dall'impianto. In questa zona la pompa di calore modula la potenza termica fornita all'impianto mediante un funzionamento on-off.

Come evidenziato in Fig. 5, la pompa GHP può rispondere alla variazione della potenza termica richiesta quando varia la temperatura esterna cambiando il numero di giri del motore; in questo modo il sistema si comporta in maniera simile a quanto effettuato dalle pompe di calore elettriche EHP dotate di inverter. In Fig. 5 si vede che la curva della potenza termica prodotta dalla GHP può essere alzata o abbassata giocando sul numero di giri del motore. In questo modo si riesce ad ottenere una diminuzione della zona di funzionamento on/off alle alte temperature esterne, e a coprire il fabbisogno energetico dell'impianto anche a temperature esterne molto basse [5,6].

Un ulteriore miglioramento delle prestazioni si può ottenere sostituendo lo scambiatore che funge da evaporatore in inverno e che di solito è del tipo fluido refrigerante/aria con uno scambiatore fluido refrigerante/acqua di falda. L'acqua di falda ha infatti la caratteristica di avere una temperatura pressoché costante durante tutto l'anno e in genere con valori superiori rispetto a quelli dell'aria esterna nei periodi più rigidi della stagione invernale.

Un notevole vantaggio presentato dalle pompe di calore a gas GHP è legato ai consumi elettrici estremamente ridotti che le caratterizzano. A parità di potenza termica/frigo prodotta, i consumi elettrici di una pompa GHP ammontano a circa il 10% di quelli delle pompe di calore elettriche tradizionali; ciò consiglia l'utilizzo delle GHP in tutte quelle applicazioni dove si desidera limitare la potenza elettrica impegnata pur non rinunciando al condizionamento estivo. Infatti, soprattutto nelle attività del terziario, è in genere il rilevante fabbisogno di energia elettrica legato al funzionamento dell'impianto di climatizzazione in estate a determinare i maggiori oneri contrattuali per impegni di potenza.

Un ulteriore vantaggio che le pompe di calore GHP hanno se paragonate alle pompe di calore elettriche tradizionali è legato al fatto che le GHP non necessitano di cicli di sbrinamento in inverno anche in presenza di bassi valori della temperatura esterna; ciò consente una erogazione dell'energia termica senza soluzione di continuità. Il motore endotermico garantisce una produzione continua di acqua calda che permette di eliminare gli shut-down per sbrinamento e di ridurre i tempi di messa a regime nel caso di partenza a freddo dell'impianto.

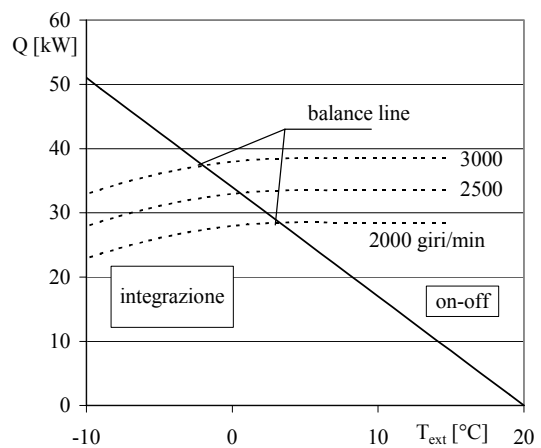


Figura 5 – Confronto tra la potenza richiesta dall'impianto e quella fornita da una GHP.

Le pompe di calore GHP presentano inoltre il vantaggio di essere assemblate in unità estremamente compatte e di immediata installazione; l'unità esterna, composta da motore, compressore e condensatore viene pre-assemblata in fabbrica e questo riduce il rischio di malfunzionamenti e perdite di refrigerante. Inoltre, con l'aggiunta di semplici moduli idronici completi di serbatoio di accumulo, interfacciare la pompa GHP con impianti tradizionali diventa estremamente semplice. Inoltre, le pompe GHP non richiedono l'alloggiamento in locali tecnici con requisiti particolari in quanto in termini di norme antincendio sono considerate alla stregua di un normale gruppo elettrogeno. Anche l'evacuazione dei fumi di scarico del motore può essere diretta in ambiente e non richiede particolari accorgimenti.

Occorre tuttavia mettere in evidenza come le pompe di calore GHP utilizzino compressori di tipo aperto in quanto l'albero del compressore è accoppiato al motore. I compressori aperti possono presentare problemi di tenuta localizzati. Questi problemi possono essere amplificati nelle macchine che lavorano stagionalmente, richiedendo il controllo delle guarnizioni ad ogni avvio. Inoltre, le pompe di calore GHP presentano una rumorosità superiore a quella delle EHP o dei gruppi ad assorbimento; tuttavia i progressi fatti in questi ultimi anni hanno permesso una riduzione dell'emissione di rumore dal motore adottando sistemi di silenziamento e di smorzamento delle vibrazioni.

Le pompe di calore GHP richiedono interventi manutentivi di frequenza superiore alle pompe EHP e ai gruppi ad assorbimento (dove l'assenza di parti in movimento azzera o quasi i costi di manutenzione). E' per questo che si può affermare che il successo delle GHP è legato al livello di affidabilità che si riesce a garantire per il motore endotermico. In caso di guasto, è indispensabile che il motore possa essere riparato velocemente senza necessitare di personale particolarmente specializzato e che le parti di ricambio siano disponibili con immediatezza. Per questo motivo, i produttori di GHP propongono ai clienti particolari contratti di manutenzione programmata che prevedono un certo numero di operazioni standard da effettuarsi sul motore sistematicamente (ad es, sostituzione dell'olio motore, del filtro olio, candele, filtro aria, cinghia di accoppiamento col compressore) e di controlli preventivi (livello olio, carica di refrigerante, tenuta albero motore etc.).

3 – VALUTAZIONI ENERGETICHE

In questa sezione la pompa di calore GHP viene comparata alle pompe di calore elettriche tradizionali mediante una analisi di primo principio. La prima difficoltà che occorre rimuovere, al fine di rendere confrontabili tra loro i diversi tipi di macchina (GHP, EHP) è quella legata alla diversa natura dell'energia che alimenta le due tipologie di pompe di calore; infatti mentre le GHP vengono alimentate con gas o gasolio le pompe EHP consumano energia elettrica.

L'energia elettrica consumata dalle pompe di calore tradizionali è tuttavia prodotta utilizzando l'energia sviluppata da fonti primarie. Al fine di porre a confronto queste due macchine è bene riferirsi per entrambe ad una assegnata quantità di energia primaria in ingresso.

Indicata con Q_c l'energia primaria consumata e con Q il calore (in inverno) o il freddo (in estate) prodotto dalla generica pompa di calore, si definisce *coefficiente di utilizzazione del combustibile* (CUC) il seguente rapporto:

$$CUC = \frac{Q}{Q_c} \quad (1)$$

Tale indice permette di individuare il tasso di sfruttamento di energia primaria da parte della macchina in esame. Il CUC associato ad una pompa di calore elettrica tradizionale (EHP) e quello di una pompa di calore con motore endotermico (GHP) sono indici energetici omogenei e confrontabili che permettono una oggettiva valutazione dell'efficienza di conversione energetica delle due macchine.

3.1 Calcolo del CUC di una GHP

Si definisce *rendimento meccanico* del motore che trascina il compressore della pompa GHP il rapporto tra l'energia meccanica resa disponibile all'albero (L) e l'energia termica sviluppata nella combustione (Q_c):

$$\eta_M = \frac{L}{Q_c} \quad (2)$$

Il rendimento meccanico del motore varia notevolmente da motore a motore. In particolare, i motori a ciclo Otto (gas, benzina) sono caratterizzati da valori del rendimento meccanico che possono assumere valori compresi tra il 25% (per i motori di piccola cilindrata) e il 35-38% (per i motori di grande cilindrata). I motori a ciclo Diesel hanno in genere rendimenti più elevati (30% per le piccole taglie fino a 40% per le grandi cilindrata). In genere si può ragionevolmente accettare che il rendimento meccanico vari linearmente con la potenza del motore.

Una parte dell'energia termica prodotta nella combustione viene dispersa verso l'esterno per irraggiamento.

Si definisce *coefficiente di perdita* il rapporto tra la potenza termica dissipata verso l'esterno (Q_p) e la potenza termica prodotta nella combustione (Q_c):

$$\eta_p = \frac{Q_p}{Q_c} \quad (3)$$

Il valore assunto da tale coefficiente dipende dalla conformazione del motore; i motori automobilistici di piccola taglia hanno in genere una elevata superficie disperdente e per tale motivo il valore del coefficiente di perdita η_p è grande (dell'ordine del 25-40%)

L'energia termica che può essere recuperata dai gas di scarico e dall'acqua del circuito di raffreddamento si ottiene da un bilancio di energia al motore:

$$Q_T = Q_c - Q_p - L \quad (4)$$

Dividendo ambo i membri per l'energia termica sviluppata nella combustione (Q_c) si ottiene che:

$$\eta_T = 1 - \eta_p - \eta_M \quad (5)$$

dove si è definito con η_T il *rendimento termico* del motore pari a:

$$\eta_T = \frac{Q_T}{Q} \quad (6)$$

A titolo di esempio, se si considera un motore Otto di piccola cilindrata depotenziato ad uso di una GHP e si assume un rendimento meccanico del 30% e un coefficiente di perdita pari al 35% il rendimento termico del motore (ovvero la percentuale di calore che si riesce a recuperare attraverso i fumi di scarico e l'acqua di raffreddamento) risulta pari al 35% del calore prodotto nella combustione.

Il lavoro prodotto dal motore e messo a disposizione del compressore viene trasformato in estate in calore sottratto all'ambiente da condizionare e in inverno in calore ceduto all'ambiente.

Il COP associato alla macchina a compressione è definito come segue:

$$COP = \frac{Q_e}{L} \text{ (estate)} \quad COP_{HP} = \frac{Q_{cd}}{L} \text{ (inverno)} \quad (7)$$

in cui si è indicato con Q_e il calore scambiato all'evaporatore (4 in Fig.1) e con Q_{cd} il calore scambiato al condensatore (5 in Fig. 2).

In funzionamento invernale il prodotto della pompa GHP è costituito dal calore scambiato al condensatore del frigorifero (Q_{cd}) e dal calore recuperato dal motore (Q_T)

Utilizzando le Eq.(1-7) il CUC della GHP in funzionamento invernale si esprime come indicato:

$$CUC = \frac{Q_T + Q_{cd}}{Q_c} = 1 + \eta_M COP - \eta_p \quad (8)$$

A titolo di esempio, una GHP caratterizzata da un motore con un coefficiente di perdita pari a 35% ed un rendimento meccanico pari al 30%, accoppiato ad una macchina frigorifera con un COP pari a 3, risulta caratterizzata da un CUC pari a 1.55. Questo risultato evidenzia le elevate prestazioni di una pompa di calore GHP rispetto ai più efficienti sistemi di generazione del calore contraddistinti da CUC comunque inferiori a 1.11 (valore massimo teorico del CUC di una caldaia a condensazione a gas).

In funzionamento estivo il prodotto della pompa GHP è costituito dal solo calore sottratto a livello di evaporatore. E' tuttavia da sottolineare che la GHP permette, anche in estate, di produrre acqua calda che potrebbe essere appetibile per particolari applicazioni (produzione acqua calda sanitaria etc.). Al fine di rendere conservativo il calcolo, non si terrà conto in queste valutazioni di questa produzione di energia termica e quindi si calcolerà il CUC della GHP considerando la sola produzione di freddo (Q_e):

$$CUC = \frac{Q_e}{Q_c} = \eta_M COP \quad (9)$$

Considerando lo stesso esempio di prima, il CUC della GHP in funzionamento estivo risulta pari a 0.9.

Le Eq.(8,9) permettono di osservare come, al fine di migliorare il tasso di sfruttamento del combustibile da parte di una pompa di calore GHP occorre utilizzare motori aventi un rendimento meccanico elevato, riuscire a limitare le perdite di energia termica verso l'esterno, riuscire a massimizzare il COP della macchina a compressione.

In Tabella 1 vengono riportati i valori teorici del CUC per GHP con motori di piccola, media, grossa taglia alimentati a gas e a gasolio calcolati utilizzando le Eq.(8,9).

Tabella 1 – Valori teorici del CUC per GHP a gas e a gasolio

Otto		
Cilindrata	Inverno	Estate
Piccola	1.25	0.84
Media	1.62	1.02
Grande	1.79	1.14
Diesel		
Cilindrata	Inverno	Estate
Piccola	1.43	0.93
Media	1.77	1.17
Grande	1.88	1.23

3.2 Calcolo del CUC di una EHP

Le pompe di calore elettriche trasformano in calore l'energia elettrica che alimenta il compressore. Al fine di calcolare il CUC da associare a questa tipologia di pompe di calore occorre tenere in conto le caratteristiche di conversione tipiche delle centrali elettriche della rete nazionale italiana.

In Italia il valore del *rendimento medio di conversione* del parco di centrali elettriche, definito come rapporto tra l'energia elettrica immessa in rete e l'energia termica sviluppata dal combustibile utilizzato è stimabile utilizzando i dati forniti dal GRTN (Gestore Rete Trasmissione Nazionale):

$$\eta_c = \frac{L_r}{Q_c} = 0.364 \quad (10)$$

Sempre dai dati del GRTN si può dedurre che dell'energia elettrica immessa in rete circa il 6.4% viene dissipata (η_d) durante la fase di trasmissione; il rapporto tra l'energia elettrica disponibile per le utenze e l'energia termica utilizzata per produrla si può calcolare come segue:

$$\frac{L}{Q_c} = \eta_c(1 - \eta_d) = 0.341 \quad (11)$$

In Italia, ogni kWh termico prodotto consumando energia primaria permette di realizzare 0.341 kWh di energia elettrica realmente utilizzabile dagli acquirenti.

In funzionamento invernale una pompa di calore elettrica EHP ha un CUC associato pari a:

$$CUC = COP_{HP} \eta_c (1 - \eta_d) \quad (12)$$

Se la pompa di calore in funzionamento invernale ha un COP_{HP} pari a 4, il CUC associato alla EHP risulta pari a 1.36.

Confrontando l'espressione del CUC per una pompa di calore GHP con quello di una EHP, si può dedurre un criterio che permetta di calcolare in quali condizioni la pompa di calore GHP offra prestazioni superiori alla pompa di calore elettrica:

$$\eta_M \geq \frac{\eta_p - 1}{COP} + \frac{COP_{HP}}{COP} \eta_c (1 - \eta_d) \quad (13)$$

La disequazione (13) fornisce una condizione sul rendimento meccanico del motore endotermico al fine di garantire che il CUC di una GHP sia superiore a quello di una EHP.

Assumendo un coefficiente di perdita del motore pari al 35%, un COP della macchina a compressione pari a 3 e i dati del GRTN italiano sulla produzione di energia elettrica in Italia ($\eta_c=36.4\%$, $\eta_d=6.4\%$) si può osservare come la pompa di calore GHP è in grado di offrire un CUC superiore a quello delle pompe elettriche tradizionali se il rendimento meccanico del motore endotermico risulta superiore al 24%.

Visto che anche i motori a ciclo Otto di piccola cilindrata garantiscono rendimenti meccanici superiori al 24%, il risultato ottenuto equivale ad affermare che nel funzionamento invernale le pompe di calore con motore endotermico GHP offrono sempre prestazioni superiori a quelle delle pompe tradizionali dal punto di vista dell'efficienza di conversione energetica.

In funzionamento estivo, il CUC di una pompa di calore elettrica si calcola come segue:

$$CUC = COP \eta_c (1 - \eta_d) \quad (14)$$

Se il ciclo frigo ha un COP pari a 3, si ha che il valore assunto dal CUC associato alla EHP risulta pari a 1.02.

Confrontando l'espressione del CUC per una pompa di calore GHP (Eq.(9)) con quella del CUC per una pompa di calore elettrica EHP, si può osservare che la pompa di calore GHP offre prestazioni superiori ad una EHP se risulta soddisfatta la seguente disequazione:

$$\eta_M \geq \eta_c (1 - \eta_d) \quad (15)$$

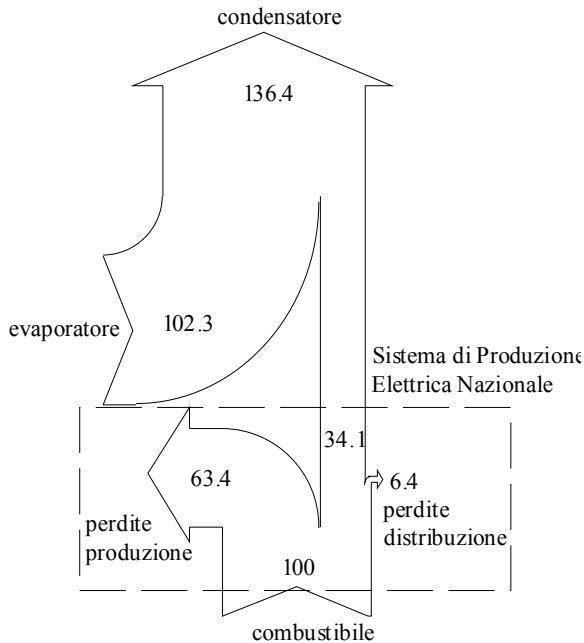


Figura 6 – Pompa di calore elettrica EHP: flussi energetici.

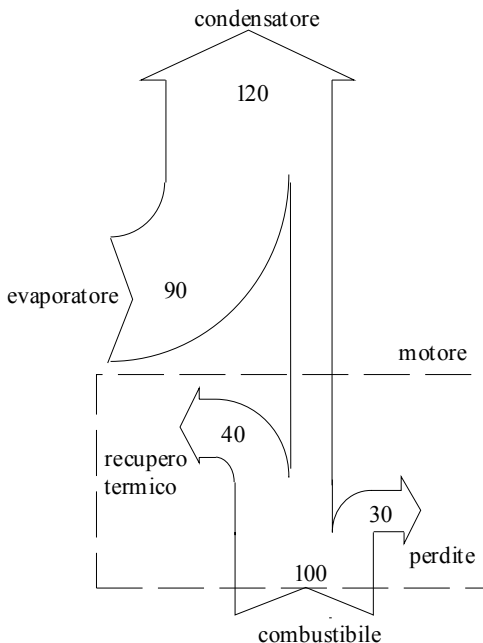


Figura 7 – Pompa di calore a gas GHP: flussi energetici.

L'Eq.(14) sottolinea come i dati non entusiasmanti del sistema di produzione elettrica italiano ($\eta_c=36.4\%$, $\eta_d=6.4\%$) favoriscono l'uso delle pompe di calore GHP; si può infatti osservare come la pompa di calore GHP è in grado di offrire un CUC superiore a quello delle pompe elettriche tradizionali in estate se il rendimento meccanico del motore endotermico risulta superiore al 34.1%.

Si può notare che in questo confronto non si tiene in alcun conto la produzione di acqua calda che la pompa di calore GHP è in grado di garantire nel periodo estivo.

I flussi energetici per una pompa di calore elettrica sono riportati in Fig.6 mentre quelli di una pompa di calore GHP sono riportati in Fig.7. Si può osservare come, in regime di funzionamento invernale, i recuperi termici diretti permettono alla pompa GHP di avere un CUC molto elevato e comunque superiore a quello associato ad una EHP.

4- CONCLUSIONI

Le pompe di calore a gas con motore endotermico (GHP) rappresentano una interessante applicazione di "microgenerazione". Tali pompe hanno trovato una larga diffusione soprattutto nei paesi orientali ma le loro prestazioni fanno prevedere che in futuro possano trovare una fetta di mercato notevole anche in ambito europeo. Al momento attuale i principali produttori di gruppi GHP sono giapponesi e italiani. In questa memoria è stato dimostrato come le prestazioni delle pompe di calore GHP, in termini di consumo di energia primaria per unità di prodotto (CUC), risultano estremamente interessanti se paragonate con quelle delle pompe di calore elettriche (EHP) e con i gruppi ad assorbimento ad acqua-ammoniaca e a bromuro di litio-acqua. I principali vantaggi offerti dalle pompe di calore a gas GHP possono così essere riassunti:

- ridotti consumi elettrici (10% di quelli delle EHP a parità di potenza);
- possibilità di generare contemporaneamente acqua calda e fredda in estate;
- elevati valori di CUC quindi bassi costi di funzionamento, migliore sfruttamento del combustibile primario, ridotte emissioni in atmosfera di gas climalteranti;
- invarianza delle prestazioni delle pompe GHP al variare della temperatura esterna e assenza di cicli di sbrinamento;
- regolazione multipla della potenza erogata;

Si è inoltre dimostrato come il valore del CUC dipenda dalle caratteristiche del motore a combustione interna utilizzato per azionare il compressore della pompa di calore; i valori di rendimento meccanico dei motori dell'ultima generazione permettono alle pompe di calore a gas in funzionamento invernale di avere prestazioni superiori a quelle delle pompe di calore elettriche tradizionali e delle caldaie a condensazione e a bassa temperatura, anche per bassi valori della temperatura esterna. Per quanto concerne il funzionamento estivo, le prestazioni delle GHP risultano in linea con quelle degli attuali condizionatori elettrici ma notevoli margini di miglioramento sono ipotizzabili proseguendo lo sviluppo di motori a combustione "ottimizzati" per l'utilizzo nelle GHP.

5- RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. *Il condizionamento dell'aria: problematiche tecniche e ambientali*, a cura di R. Lazzarin, Collana AICARR, n°1, 2003.
2. BSRIA, *European market reports*, 2000.
3. J. Wurm, J.A. Kinast, History and status of engine-driven heat pumps developments in U.S., *ASHRAE Trans.*, 93, pp.997-1005, 1987.
4. R. Lazzarin, *Il condizionamento dell'aria e il gas naturale*, Ed. PEG, 1993.
5. M. Dentice d'Accadia, M. Sasso, S. Sibilio, Optimum performance of heat engine-driven heat pump: a finite-time approach, *Energy Conversion & Mgm*, 38, pp. 401-413, 1997.
6. M. Dentice d'Accadia, M. Sasso, S. Sibilio, R. Vanoli, *Applicazioni di Energetica: introduzione all'analisi tecnico-economica di sistemi per il risparmio energetico*, Liguori Ed., 1999.