

GIANNI CESINI
GIOVANNI LATINI
FABIO POLONARA

Fisica tecnica

seconda edizione



EDIZIONE DIGITALE SU
PANDORA
CAMPUS



CittaStudi
EDIZIONI

APPROFONDIMENTI

Capitolo 10

a cura di:
Gianni Cesini
Giovanni Latini
Fabio Polonara

CICLI INVERSI

10.3

ALTRE TECNOLOGIE

Se la tecnologia del ciclo a compressione di vapore è attualmente impiegata nella gran parte delle applicazioni esistono innumerevoli alternative che, per ragioni storiche o di prospettiva, può essere interessante esaminare, anche se in maniera puramente qualitativa.

La ragione per la quale il ciclo a compressione di vapore è padrone delle applicazioni è che a oggi esso garantisce le migliori prestazioni energetiche, economiche e di affidabilità rispetto alla totalità delle altre tecnologie. Ciò non toglie che, per alcune nicchie applicative, le alternative siano già oggi più convenienti e che, in prospettiva, qualche tecnologia alternativa riuscirà a soppiantare la compressione di vapore come tecnologia più utilizzata.

A oggi non è così, ma vale comunque la pena analizzare alcune di queste tecnologie, almeno quelle già oggi interessanti per le nicchie applicative e quelle con maggiori prospettive per il futuro.

Esistono molti modi per classificare le tecnologie non tradizionali, che nella letteratura anglosassone sono definite come “not-in-kind technologies”. Quella che sembra più pertinente è la classificazione basata sul tipo di tecnologia; si hanno allora:

1. cicli alimentati con energia termica,
2. tecnologie elettromeccaniche,
3. tecnologie allo stato solido,

Delle innumerevoli tecnologie alternative presenti nel panorama attuale se ne introdurranno solo alcune, in particolare quelle che, per ragioni diverse, hanno prospettive applicative più interessanti delle altre.

Il taglio della trattazione sarà più che altro qualitativo, essendo lo scopo di questo Capitolo solo quello di introdurre il lettore all'esistenza delle tecnologie, senza voler affrontare la loro analisi per la quale occorrono ulteriori specifici approfondimenti.

10.3.1

CICLI ALIMENTATI CON ENERGIA TERMICA

Introducendo i cicli inversi si è detto che il rispetto del 2° principio della Termodinamica richiede che al sistema venga fornita potenza meccanica dall'esterno affinché

esso possa trasferire calore da una sorgente a temperatura più bassa verso una sorgente a temperatura più alta.

Questa affermazione è vera, a rigore, solo per i cicli a compressione di vapore. L'affermazione più generale, vera sempre e comunque, è che per trasferire calore da una sorgente a temperatura più bassa verso una sorgente a temperatura più alta occorre fornire energia dall'esterno, in modo da rispettare il 2° principio.

L'energia che deve essere fornita dall'esterno non è necessariamente energia meccanica, può essere anche di altro tipo, per esempio energia termica.

Quando si trattano i cicli inversi si parla sempre di energia meccanica da fornire per la semplice ragione che i cicli a compressione di vapore costituiscono la grande maggioranza delle applicazioni e quindi si preferisce fornire informazioni più specifiche per questa particolare tecnologia.

In realtà esistono tecnologie che accettano in ingresso energia termica anziché energia meccanica. Essendo l'energia termica di qualità inferiore all'energia meccanica è lecito attendersi una diminuzione dell'efficienza, cosa che accade effettivamente.

L'interesse per questo tipo di tecnologie deriva soprattutto dal fatto che l'energia termica che alimenta il ciclo può essere costituita da cascami di calore, cioè energia termica di scarto proveniente da processi industriali, oppure da energia solare, risultando in entrambi i casi praticamente gratuita.

Un ulteriore aspetto di grande importanza è che l'energia termica necessaria al ciclo inverso potrebbe essere l'energia termica di scarto di un ciclo diretto per la conversione di energia termica in energia meccanica. In questo modo un impianto di **cogenerazione**, di cui si è discusso al § 9.3.5, può diventare un impianto di **trigenerazione**, capace di produrre, con un input di energia termica ad alta temperatura, energia elettrica ed energia termica da utilizzare per il riscaldamento in inverno e per un ciclo inverso, cioè una macchina frigorifera, in estate. Con la trigenerazione si producono pertanto energia elettrica, caldo in inverno e freddo in estate per il condizionamento degli ambienti abitati o per processi industriali come quelli dell'industria alimentare.

Le tecnologie che usano energia termica in input anziché energia meccanica operano secondo cicli che prevedono uno schema operativo molto simile a quello della compressione di vapore per 3 parti su 4: si vedrà che condensatore, valvola di laminazione ed evaporatore mantengono la medesima funzione e la medesima posizione anche qui.

La differenza sostanziale risiede nella mancanza del compressore, il quale viene sostituito da un insieme di componenti che hanno lo scopo di realizzare la stessa funzione del compressore nel mettere il refrigerante in condizioni di evolvere negli altri componenti, ma utilizzano in input energia termica anziché energia meccanica. All'interno dei cicli alimentati con energia termica operano due sostanze: la coppia di sostanze può essere costituita da un fluido e da un solido, e allora si parla di cicli ad **adsorbimento** (adsorption in inglese), oppure può essere costituita da una coppia di fluidi, e allora si parla di cicli ad **assorbimento** (absorption in inglese). Le due tecnologie hanno molti punti in comune; quella più consolidata è sicuramente la tecnologia dell'assorbimento, che verrà introdotta nel prossimo Paragrafo.

10.3.1.1

CICLO AD ASSORBIMENTO

Lo schema di una macchina operante secondo un ciclo ad assorbimento è presentato in Figura 10.15.

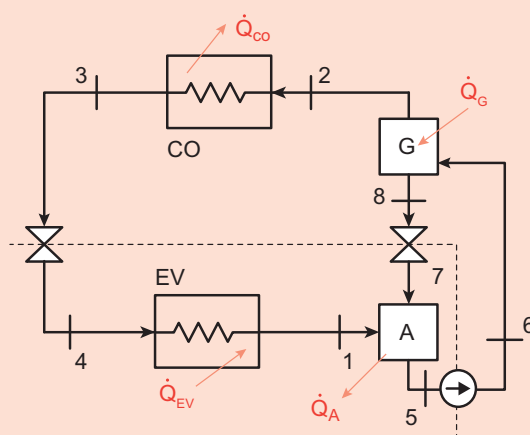


Figura 10.15
Schema di
principio di
un ciclo ad
assorbimento

Dal punto (2) al punto (1) lo schema è identico a quello del ciclo a compressione di vapore e il sistema è percorso da un fluido di lavoro (refrigerante) che subisce le stesse trasformazioni subite nel ciclo a compressione di vapore. La differenza sostanziale si ha nel gruppo di componenti sulla destra dello schema, tra i punti (1) e (2), che sostituiscono il compressore del ciclo a compressione di vapore.

Il refrigerante in uscita dall'evaporatore, punto (1), è in condizioni di vapore saturo secco o surriscaldato ed entra nell'assorbitore (A) in cui viene "assorbito" dal secondo componente, che si trova allo stato liquido e agisce da solvente. Il refrigerante, comportandosi da soluto, entra in soluzione con il solvente e quindi nell'assorbitore si crea una soluzione in fase liquida uniforme, "ricca" di refrigerante. Perché ciò avvenga il liquido assorbente deve avere un'elevata affinità con il refrigerante. Il processo di assorbimento avviene a una temperatura di poco superiore a quella dell'ambiente ed è un processo esotermico, cioè comporta la cessione di calore all'ambiente.

All'uscita dall'assorbitore, punto (5), si ha una fase liquida omogenea alla stessa pressione dell'evaporatore. Con l'uso di una pompa la fase liquida può essere portata alla pressione del condensatore. Come è ormai ben noto (cfr. § 6.5.2.2) innalzare la pressione di un liquido è un processo energeticamente molto meno dispendioso dell'innalzamento di pressione di un vapore (cosa che avviene nel ciclo a compressione di vapore).

La soluzione ricca di refrigerante, a pressione elevata, finisce nel generatore (G) dove viene riscaldata in modo da far evaporare il refrigerante. Questa fase è quella in cui si trasferisce calore dall'ambiente esterno al sistema ed è quindi quella in cui c'è la spesa di energia necessaria a rendere fattibile il ciclo inverso.

Nel generatore (G), alimentato con calore a temperature usualmente intorno a 120-130 °C, il refrigerante, più volatile del solvente, evapora, si separa dalla soluzione liquida e viene inviato verso il condensatore dove comincia la parte di ciclo del tutto simile alla compressione di vapore.

Il generatore, in buona sostanza, funziona come un distillatore nel quale, attraverso l'apporto di calore, il componente volatile (refrigerante) si separa dalla soluzione proveniente dall'assorbitore. La soluzione liquida che rimane nel generatore, "povera" del componente volatile (il refrigerante), viene fatta passare attraverso una valvola di laminazione (7-8) per abbassare la sua pressione e

riportarla, alla pressione di evaporazione, all'assorbitore (A) dove è pronta ad assorbire nuovo refrigerante proveniente dall'evaporatore.

L'insieme costituito da: generatore, assorbitore, valvola di laminazione e pompa sostituisce dunque il compressore e ne realizza la stessa funzione di portare il refrigerante dalla pressione dell'evaporatore a quella del condensatore. Questa funzione viene realizzata attraverso l'impiego del liquido assorbitore e la somministrazione di calore al generatore.

L'analisi termodinamica sul sistema chiuso di Figura 10.15 si realizza applicando il bilancio di energia e di entropia, dopo aver introdotto le seguenti ipotesi (in aggiunta a quelle già esposte al § 10.1):

1. tempo di osservazione comprendente un numero finito di cicli, il che comporta ($\Delta U=0$),
2. macchina a fluido adiabatica,
3. variazioni di energia cinetica e potenziale trascurabili rispetto ai flussi energetici in gioco,
4. flussi considerati in valore assoluto.

Bilancio di energia:

$$\left| \dot{Q}_G \right| + \left| \dot{Q}_{EV} \right| + \left| \dot{L}_P \right| = \left| \dot{Q}_A \right| + \left| \dot{Q}_{CO} \right| \quad [\text{W}] \quad (10.38)$$

Il lavoro assorbito dalla pompa può essere tranquillamente trascurato per quanto più volte asserito riguardo al lavoro necessario a comprimere un liquido (cfr. § 6.5.2.2), per cui il bilancio di energia si riduce alla:

$$\left| \dot{Q}_G \right| + \left| \dot{Q}_{EV} \right| = \left| \dot{Q}_A \right| + \left| \dot{Q}_{CO} \right| \quad [\text{W}] \quad (10.39)$$

Bilancio di entropia:

$$\frac{\left| \dot{Q}_G \right|}{T_G} + \frac{\left| \dot{Q}_{EV} \right|}{T_{EV}} + \dot{S}_{gen} = \frac{\left| \dot{Q}_A \right|}{T_A} + \frac{\left| \dot{Q}_{CO} \right|}{T_{CO}} \quad [\text{W K}^{-1}] \quad (10.40)$$

assumendo di operare con:

- ciclo ideale, quindi con trasformazioni reversibili,
- temperatura di condensazione (T_{CO}) uguale alla temperatura di assorbimento (T_A),

dalla manipolazione dei due bilanci di energia e di entropia si ha:

$$\frac{\left| \dot{Q}_G \right|}{T_G} + \frac{\left| \dot{Q}_{EV} \right|}{T_{EV}} = \frac{\left| \dot{Q}_G \right| + \left| \dot{Q}_{EV} \right|}{T_{CO}} \quad [\text{W K}^{-1}] \quad (10.41)$$

manipolando opportunamente questo risultato si ottiene:

$$\frac{1}{T_G} + \frac{|\dot{Q}_{EV}|}{|\dot{Q}_G| \cdot T_{EV}} = \frac{1}{T_{CO}} + \frac{|\dot{Q}_{EV}|}{|\dot{Q}_G| \cdot T_{CO}} \quad [K^{-1}] \quad (10.42)$$

e poi:

$$\frac{|\dot{Q}_{EV}|}{|\dot{Q}_G|} \cdot \left(\frac{1}{T_{EV}} - \frac{1}{T_{CO}} \right) = \frac{1}{T_{CO}} - \frac{1}{T_G} \quad [K^{-1}] \quad (10.43)$$

Il risultato ottenuto è molto utile per la valutazione del COP della macchina frigorifera ad assorbimento reversibile.

Per come è stato definito il COP della macchina frigorifera, infatti, la sua declinazione nel caso del ciclo ad assorbimento, ritenendo ancora trascurabile il lavoro assorbito dalla pompa, è:

$$COP_{f, \text{assorb}} = \frac{|\dot{Q}_{EV}|}{|\dot{Q}_G|} \quad (10.44)$$

$$COP_{f, \text{rev, assorb}} = \frac{|\dot{Q}_{EV}|}{|\dot{Q}_G|} = \frac{\frac{1}{T_{CO}} - \frac{1}{T_G}}{\frac{1}{T_{EV}} - \frac{1}{T_{CO}}} \quad (10.45)$$

È interessante confrontare questa espressione con quella ricavata, in maniera del tutto generale, per il ciclo inverso reversibile al Capitolo 7 (cfr. eq. 7.47).

Esempio 10.6

Si valutino le prestazioni di un ciclo reversibile ad assorbimento operante tra un SET a temperatura $T_{EV} = -10^\circ\text{C}$ e un SET a $T_{CO} = 40^\circ\text{C}$.

L'energia termica sia disponibile al generatore alla temperatura di $T_G = 120^\circ\text{C}$.

Si confronti il risultato con l'efficienza di un ciclo di Carnot inverso operante tra le stesse temperature e poi si valuti la differenza tra i rendimenti in termini di energia primaria di un ciclo a compressione di vapore e un ciclo ad assorbimento.

In definitiva, si calcoli:

- il COP del ciclo reversibile ad assorbimento
- il COP del ciclo di Carnot e lo si confronti con quello del ciclo ad assorbimento
- il rendimento in termini di energia primaria tra i due cicli

Analisi

Con riferimento alla Figura 10.15 il COP della macchina reversibile ad assorbimento si calcola con l'eq. (10.45), mentre il COP di Carnot si calcola con l'eq. (7.47)

Soluzione

Il COP della macchina reversibile ad assorbimento vale:

$$COP_{f,rev,assorb} = \frac{\frac{1}{T_{CO}} - \frac{1}{T_G}}{\frac{1}{T_{EV}} - \frac{1}{T_{CO}}} = \frac{\frac{1}{(273,15 + 40)} - \frac{1}{(273,15 + 120)}}{\frac{1}{(273,15 - 10)} - \frac{1}{(273,15 + 40)}} = 1,07$$

Il COP della macchina di Carnot reversibile vale:

$$COP_{f,rev} = \frac{T_{EV}}{T_{CO} - T_{EV}} = \frac{(273,15 - 10)}{(40 - (-10))} = 5,26$$

La differenza sostanziale tra le due tecnologie è che il ciclo ad assorbimento è alimentato con energia termica a 120 °C e il ciclo a compressione di vapore con energia meccanica (energia elettrica nelle applicazioni).

È ormai ben nota al lettore quale sia la differenza tra le due forme di energia in termini di qualità.

Per ricondurre il confronto tra le due tecnologie in termini simili (almeno in prima approssimazione) si può valutare con quale rendimento sia possibile produrre energia partendo dalla stessa energia termica. Si può usare a questo proposito il rendimento del ciclo di Carnot diretto che opera tra 120 °C e 40 °C (cfr. eq. 7.18):

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{(273,15 + 40)}{(273,15 + 120)} = 0,20$$

A questo punto è possibile riferire anche il COP della macchina a compressione di vapore a un input di energia della stessa qualità di quello della macchina ad assorbimento. Si ottiene:

$$COP_{compr_vap} = 5,26 \cdot 0,2 = 1,07$$

Discussione

L'efficienza delle macchine frigorifere ad assorbimento è sempre inferiore a quella delle macchine a compressione di vapore a parità di altre condizioni.

Se però si riporta la valutazione delle efficienze a parità di input di partenza le due macchine si equivalgono.

In termini operativi le macchine ad assorbimento sono un'opzione interessante tutte le volte in cui si ha a disposizione calore di scarto a bassa temperatura.

La macchina ad assorbimento si presta anche bene per la produzione di freddo sfruttando l'energia solare.

Il COP del ciclo reversibile ad assorbimento tende al COP del ciclo di Carnot quando (T_g) tende a infinito.

Il confronto realizzato nell'Esempio 10.7, che mette in evidenza una notevole inefficienza del ciclo reversibile ad assorbimento rispetto al ciclo di Carnot, in realtà non è completamente corretto, in quanto paragona forme di energia di natura diversa.

Se infatti si confrontassero i due cicli reversibili a partire da energia termica disponibile alla stessa temperatura, si otterrebbe il medesimo risultato.

Rimanendo ai casi concreti, invece, il ciclo ad assorbimento reale è effettivamente meno efficiente del ciclo a compressione di vapore.

Al di là dei valori di efficienza il ciclo ad assorbimento si caratterizza per i seguenti aspetti positivi:

1. possibilità di usare scarti di calore (altrimenti inutilizzabili, ad esempio con la trigenerazione) e anche l'energia solare. In effetti l'efficienza aumenta all'aumentare della (T_g) (cfr. eq. 10.45) però è possibile ottenere macchine con efficienza accettabile anche con temperature al generatore nell'intorno dei 100 °C, compatibili con lo sfruttamento dell'energia solare;
2. elevata staticità con maggiore affidabilità e minori livelli di rumorosità;
3. buone prestazioni anche a basse pressioni di evaporazione (importanti quando il refrigerante è l'acqua) in quanto non esiste il problema dell'elevato volume specifico in aspirazione o degli elevati rapporti di compressione (penalizzanti con il ciclo a compressione);
4. efficace parzializzazione della capacità frigorifera.

Gli aspetti negativi sono invece, oltre alle basse efficienze, la complessità costruttiva e i costi più elevati, a parità di altre condizioni, rispetto alle macchine a compressione di vapore.

Per ciò che attiene ai fluidi di lavoro utilizzati nelle applicazioni, si tratta sostanzialmente di due coppie:

- acqua-ammoniaca, in cui l'ammoniaca (NH_3) è il refrigerante/soluto mentre l'acqua (H_2O) è il solvente,
- acqua-bromuro di litio, in cui l'acqua (H_2O) è il refrigerante/soluto e il bromuro di litio (LiBr) è il solvente.

La prima coppia viene usata nelle applicazioni frigorifere che necessitano di temperature di evaporazione inferiori a 0 °C. Il principale problema tecnico di questa coppia è dato dalla vicinanza delle curve di saturazione dei due fluidi che ne rende problematica la separazione al generatore, tanto che di solito è necessario ricorrere a una sezione di rettificazione.

La seconda coppia è invece usata negli impianti di condizionamento dell'aria, quando la temperatura di evaporazione può essere mantenuta a livelli superiori a 0 °C, al di sotto dei quali l'acqua non può lavorare come refrigerante visto che la temperatura del punto triplo è pari a 0,01 °C.

A pressione e temperatura ambiente il bromuro di litio è solido. Quando però viene miscelato con un'opportuna quantità di acqua realizza una soluzione liquida omogenea che può essere impiegata nei sistemi ad assorbimento.

Questo fatto torna utile quando, al generatore, l'acqua (refrigerante/soluto) deve essere separata e inviata al condensatore. La non volatilità del bromuro

di litio (solvente), infatti, rende facile la separazione dei due componenti e quindi non è necessaria la presenza del rettificatore, il che rende la macchina più semplice e affidabile di quella ad acqua/ammoniaca.

10.3.2

TECNOLOGIE ELETTROMECCANICHE

C'è un gruppo assai importante di applicazioni, che passa sotto il nome di “**criogenia**”, per il quale si usano gli stessi componenti dei cicli a compressione di vapore ma risulta spesso difficile usare il ciclo stesso anche in ragione delle temperature molto basse che si vogliono raggiungere.

In prima approssimazione si parla di applicazioni “criogeniche” quando l'obiettivo è quello di liquefare i gas che a temperatura ambiente si trovano a temperatura superiore a quella critica (gas naturale, azoto, ossigeno, idrogeno, elio ecc.) oppure quello di raggiungere, di solito per ragioni di ricerca, temperature vicine a 0 K.

In molte applicazioni di liquefazione dei gas si adottano dei cicli nei quali il gas da liquefare è anche il fluido di lavoro che viene dapprima compresso, poi preraffreddato per mezzo di una macchina frigorifera esterna (di solito a compressione di vapore), e infine ulteriormente raffreddato fino alla temperatura desiderata con una valvola di laminazione o con un'espansione in turbina.

Questo tipo di processi, noti come **refrigerazione di Joule-Thomson** o **ciclo di Linde** o **ciclo di Claude** a seconda delle loro peculiarità, sono processi noti e consolidati fin dai primi decenni del XX secolo.

In applicazioni criogeniche, ma di piccola e piccolissima taglia, viene anche usato il **ciclo di Stirling inverso** (cfr. § 9.3.4) che permette di raggiungere temperature molto basse ma per potenze frigorifere molto piccole.

Una interessante nicchia applicativa, per applicazioni più vicine alla temperatura ambiente come il condizionamento dell'aria, spetta anche al **ciclo di Joule inverso** (cfr. § 9.3.1) utilizzato per il condizionamento dell'aria negli aeromobili e anche nei treni.

10.3.3

TECNOLOGIE ALLO STATO SOLIDO

Con il termine “allo stato solido” si intendono quelle tecnologie caratterizzate dalla mancanza di parti meccaniche e quindi dalla presenza di soli componenti elettronici e digitali.

10.3.3.1

REFRIGERAZIONE TERMOELETTRICA

La tecnologia di questo tipo più nota e consolidata è la cosiddetta “refrigerazione termoelettrica” la quale opera in accordo con il cosiddetto effetto Peltier.

Se in un circuito chiuso formato da due materiali termoelettrici (A) e (B), le cui giunzioni sono mantenute a temperature diverse, si realizza una circolazione di corrente elettrica (I), a causa dell'effetto Peltier si ottiene sviluppo di calore su una giunzione (quella calda) e assorbimento di calore sull'altra giunzione (quella fredda).

Il calore che viene scambiato tra le due giunzioni è dato dalla:

$$|q_P| = |\pi_{AB} \cdot I| = |q_0| + |q_i| \quad [W] \quad (10.45)$$

in cui (π_{AB}) è il cosiddetto “coefficiente relativo di Peltier” tra i due materiali (A) e (B), misurato in $[W/A=V]$.

L'effetto Peltier può essere sfruttato per realizzare un refrigeratore termoelettrico come quello schematizzato in Figura 10.16.

Se nel circuito costituito dai due materiali termoelettrici (A) e (B) viene fatta passare una corrente continua (I), si realizza sottrazione di calore (q_0) alla giunzione fredda (che si trova a temperatura T_0 , inferiore alla temperatura ambiente). Il calore sottratto a T_0 viene ceduto, insieme al calore (q_i) in cui degrada la potenza elettrica necessaria ad alimentare il circuito, alla giunzione calda a temperatura T_1 .

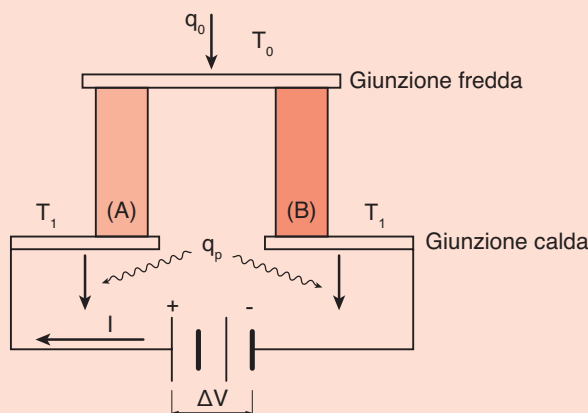


Figura 10.16
Schema di un
refrigeratore
termoelettrico

Le prestazioni del sistema dipendono dalla sua geometria e dalle proprietà intrinseche dei materiali termoelettrici utilizzati.

L'efficienza realizzabile con un refrigeratore termoelettrico è assai inferiore a quella che si può ottenere con una macchina a compressione di vapore operante alle stesse condizioni.

Le peculiarità del refrigeratore termoelettrico lo rendono però utile (e a volte insostituibile) in molte applicazioni nelle quali l'efficienza non è parametro fondamentale e sono più importanti le caratteristiche operative (ad esempio nei veicoli spaziali). Tali peculiarità sono così riassumibili:

- assenza di parti in movimento, con ridotta usura e funzionamento silenzioso,
- semplicità di miniaturizzazione per piccole capacità frigorifere,
- affidabilità operativa anche in condizioni di bassa gravità o forte accelerazione,
- semplicità di regolazione della potenza frigorifera,
- possibilità di operare nella stessa giunzione in modalità raffreddamento e in modalità riscaldamento solo invertendo la polarità della tensione applicata.

10.3.3.2

REFRIGERAZIONE MAGNETICA

La refrigerazione magnetica si basa sul cosiddetto “effetto magnetocalorico” (MCE, Magneto Caloric Effect), un fenomeno per il quale un materiale paramagnetico (caratterizzato a livello atomico da dipoli magnetici che si allineano con

un eventuale campo magnetico applicato) manifesta variazioni di temperatura se viene sottoposto a variazioni di campo magnetico.

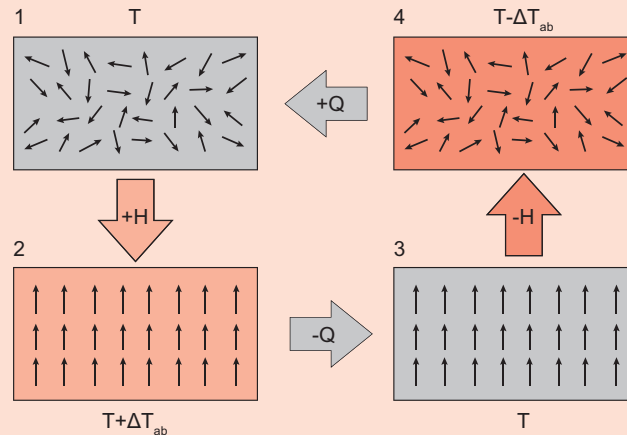
L'effetto magnetocalorico è stato scoperto da Emil Warburg (1846-1931) alla fine del XIX secolo ed è stato applicato nella prima metà del secolo scorso in applicazioni criogeniche.

I tentativi di utilizzo della tecnologia nelle applicazioni più diffuse della refrigerazione (come la refrigerazione domestica e il condizionamento dell'aria) risalgono invece agli ultimi decenni e non hanno ancora portato ad alcuna applicazione commerciale, anche se le prospettive a medio termine sembrano assai promettenti e questa è la ragione per cui la refrigerazione magnetica viene citata qui.

Se si applica un campo magnetico a un materiale paramagnetico i dipoli elettronici del materiale paramagnetico, prima orientati in modo casuale, si allineano (trasformazione 1→2 in Figura 10.17). Il processo è esotermico per cui il materiale aumenta la sua temperatura e del calore viene ceduto all'ambiente esterno (trasformazione 2→3 in Figura 10.17).

Se ora si rimuove il campo magnetico i dipoli elettronici tornano al loro orientamento casuale che provoca il raffreddamento del materiale paramagnetico (trasformazione 3→4 in Figura 10.17). Il materiale raffreddato può quindi assorbire calore dal fluido che deve essere raffreddato (trasformazione 4→1 in Figura 10.17). Durante quest'ultima trasformazione il materiale paramagnetico ritorna al suo stato originale e il ciclo può ricominciare.

Figura 10.17
Refrigerazione
magnetica



Il ciclo risulta quindi dalla successione delle quattro trasformazioni realizzate con la magnetizzazione e la demagnetizzazione del materiale paramagnetico, alternate con la cessione di calore all'ambiente a temperatura maggiore e la sottrazione di calore all'ambiente a temperatura minore.

Su un piano (Ts) il ciclo reversibile risulta come quello disegnato in Figura 10.18 dove le curve a campo magnetico costante sono analoghe alle isobare del ciclo di Joule e sono le trasformazioni lungo le quali avvengono gli scambi di calore.

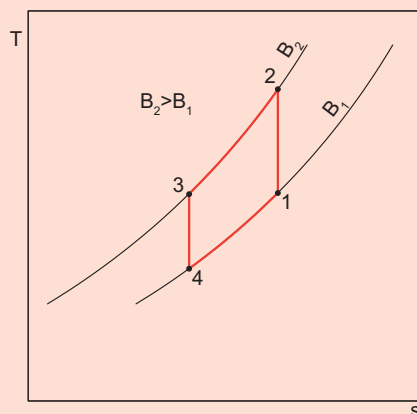


Figura 10.18
Ciclo di
refrigerazione
magnetica sul
piano (Ts)

In dettaglio, le quattro trasformazioni di sono le seguenti:

(1-2) MAGNETIZZAZIONE

applicazione del campo magnetico al materiale paramagnetico, trasformazione adiabatica e reversibile, quindi anche isoentropica, analoga alla compressione nel ciclo di Joule inverso;

(2-3) TRASFORMAZIONE A CAMPO MAGNETICO (B) COSTANTE

cessione di calore alla sorgente a temperatura più alta, normalmente l'ambiente esterno, analoga all'isobara nel ciclo di Joule inverso;

(3-4) DEMAGNETIZZAZIONE

il campo magnetico viene rimosso dal materiale paramagnetico con una trasformazione adiabatica e reversibile, quindi anche isoentropica, analoga all'espansione nel ciclo di Joule inverso;

(4-1) TRASFORMAZIONE A CAMPO MAGNETICO (B) NULLO

sottrazione di calore alla sorgente a temperatura più bassa, cioè la sostanza o l'ambiente da raffreddare, analoga all'isobara nel ciclo di Joule inverso.

Il gradiente di temperatura che si stabilisce nel ciclo dipende dall'entità del campo magnetico applicato e dal tipo di materiale paramagnetico. A oggi, le variazioni di temperatura sono troppo modeste per la maggior parte dei materiali ($\Delta T = 10$ K/tesla) e i campi magnetici massimi per le configurazioni a magneti permanenti sono $B = 2$ tesla.

Per ottenere campi magnetici più elevati occorrerebbe usare materiali superconduttori con un aumento significativo dell'energia associata, il che penalizzerebbe troppo l'efficienza in raffreddamento.

Per aumentare il ΔT su cui opera la macchina frigorifera magnetica si ricorre allora a un ciclo rigenerativo, del tipo di quello adottato nel ciclo di Stirling (cfr. § 9.3.4).

Il materiale paramagnetico di riferimento è il Gadolinio (Gd, elemento chimico di numero atomico 64, una delle terre rare).

Gli sviluppi della tecnologia sono stati finora realizzati avendo appunto il Gadolinio come materiale paramagnetico di riferimento ma una reale affermazione della refrigerazione magnetica come tecnologia che possa sostituire la compressione di vapore passa attraverso lo sviluppo di materiali paramagnetici che abbiano una disponibilità maggiore di quella attuale del Gadolinio.

L'individuazione di un materiale paramagnetico di buone prestazioni e ampia disponibilità è allo stato attuale la più grossa barriera tecnica alla diffusione della tecnologia della refrigerazione magnetica, ma non l'unica.

Gli altri problemi tecnologici riguardano i magneti permanenti in grado di realizzare un campo magnetico significativo, realizzando il massimo (ΔB) possibile tra successive magnetizzazioni e smagnetizzazioni, minimizzando peso e ingombri.

Ulteriori problemi tecnologici irrisolti riguardano la termofluidodinamica dei sistemi di scambio termico incaricati dei trasferimenti di calore negli intervalli tra magnetizzazione e demagnetizzazione.

I problemi tecnologici limitano molto, anche in prospettiva, le potenze frigorifere delle applicazioni futuribili della refrigerazione magnetica. Al momento non si prevede di riuscire a realizzare macchine di potenza frigorifera superiore a qualche centinaio di (W). Ecco perché gli sforzi di ricerca e sviluppo sono rivolti soprattutto alle applicazioni che richiedono macchine di piccola taglia, come la refrigerazione domestica e la refrigerazione commerciale per il segmento produttivo dei banchi frigoriferi autonomi per negozi e supermercati.

I vantaggi che, invece, decretano le prospettive molto promettenti per questa tecnologia sono:

1. la possibilità di ottenere un processo completamente reversibile (nessuna dissipazione di energia nelle successive magnetizzazioni e smagnetizzazioni) che assicura, almeno a livello teorico, COP reali pari circa al doppio di quelli ottenibili con le macchine a compressione di vapore, a parità di altre condizioni;
2. la mancanza di un fluido refrigerante, con tutte le problematiche relative alla sua identificazione già introdotte al § 10.2.4;
3. l'assenza di usura che promette maggiore affidabilità;
4. la silenziosità di funzionamento.