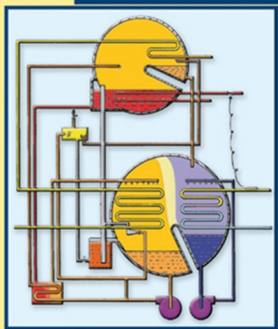


REFRIGERAZIONE AD ASSORBIMENTO

*Fondamenti teorici, modelli,
applicazioni e tecniche*



INDICE

1. Introduzione	1
1.1 Obiettivo del volume	1
1.2 Cenni storici sui sistemi ad assorbimento	2
1.3 Tecnologie ad assorbimento per la refrigerazione	3
1.4 Processo fisico dell'assorbimento	5
1.5 Realizzazione del processo di assorbimento	7
1.6 Fondamenti termodinamici del ciclo ad assorbimento	9
2. Fluidi di lavoro	12
2.1 Proprietà desiderabili per una coppia di fluidi di lavoro	12
2.2 Soluzione acqua/ammoniaca	13
2.3 Soluzione acqua/bromuro di litio	16
2.4 Soluzioni con refrigeranti a base fluorocarburaica	20
2.5 Nuove soluzioni contenenti ammoniaca	24
2.6 Altri tipi di soluzione	27
2.7 Confronto tra le miscele	28
2.8 Diagrammi di stato delle soluzioni di lavoro	29
3. Trasformazioni nel ciclo ad assorbimento	33
3.1 Considerazioni introduttive	33
3.2 Separazione	36
3.3 Assorbimento	40
3.4 Evaporazione e condensazione	43
3.5 Laminazione	45
3.6 Pompaggio meccanico	47
3.7 Pompaggio termico	49
3.8 Compressione meccanica	52
3.9 Purificazione dell'ammoniaca	54

3.9.1	Condensazione parziale	54	7.3	Modelli di refrigeratori ad acqua/bromuro di litio	162
3.9.2	Rettificazione	57	7.3.1	Refrigeratori LS Cable	162
3.10	Processo di scambio termico tra due fluidi in assenza di mescolamento	64	7.3.2	Refrigeratori Ebara	167
4.	Cicli ad assorbimento a singolo stadio	67	7.3.3	Refrigeratori Yazaki	169
4.1	Sistemi a singolo stadio	67	7.3.4	Refrigeratori Broad	173
4.1.1	Calcolo analitico del ciclo a singolo stadio	69	7.3.5	Refrigeratori York	174
4.2	Trasformatori di calore	75	7.3.6	Refrigeratori Trane, Carrier e Thermofrigo	176
4.3	Metodi e le soluzioni tecniche per migliorare l'efficienza energetica del ciclo	77	8.	Alcune applicazioni dei gruppi frigoriferi ad assorbimento	179
4.3.1	Scambiatore di preraffreddamento del refrigerante liquido	78	8.1	Refrigeratori ad assorbimento alimentati a gas per la climatizzazione ambientale	179
4.3.2	Scambiatore integrato al rettificatore	79	8.2	Refrigeratori ad assorbimento alimentati da fonti rinnovabili per la climatizzazione ambientale	181
4.3.3	Scambiatore di ricircolo nell'assorbitore	80	8.3	Trigenerazione	186
4.4	Confronto tra refrigeratori ad acqua/ammoniaca e ad acqua/bromuro di litio	82	8.4	Altre applicazioni dei frigoriferi ad assorbimento	196
5.	Cicli ad assorbimento multistadio e GAX	83	9.	Controllo, regolazione e manutenzione	203
5.1	Sistemi a doppio stadio	83	9.1	Soluzioni tecniche per il controllo della corrosione	203
5.2	Sistemi a triplo stadio	87	9.2	Sistemi di controllo e prevenzione dalla cristallizzazione del bromuro di litio	207
5.3	Sistema GAX	88	9.2.1	Soluzioni tecniche per il miglioramento degli scambi di calore e massa	209
5.3.1	Calcolo analitico semplificato del ciclo GAX	92	9.2.2	Modifiche di tipo chimico alla composizione della miscela di lavoro	215
5.4	Sistema GAX ramificato	97	9.2.3	Modifiche del ciclo termodinamico compiuto dalla miscela di lavoro	216
6.	Cicli ad assorbimento complessi	101	9.2.4	Sistemi ad assorbimento/compressione di vapore in cascata	219
6.1	Sistema a mezzo effetto	101	9.2.5	Controllo della cristallizzazione	221
6.2	Sistema ad assorbimento-risorbimento	103	9.3	Unità di spurgo degli incondensabili nei sistemi ad acqua/bromuro di litio	225
6.3	Sistema a doppio ciclo	106	9.4	Scelte tecniche relative ai gruppi di pompaggio	230
6.4	Sistemi combinati ad assorbimento/compressione di vapore	107	9.5	Regolazione e gestione del refrigeratore	232
6.4.1	Sistemi GAX ibridi ad assorbimento/compressione di vapore (GAXAC o HGAX)	110	9.6	Principali operazioni di manutenzione	236
6.5	Sistemi a eiettore	116	9.7	Direttive e normative a cui sono soggetti i refrigeratori ad assorbimento	241
6.5.1	Il modello termodinamico di Keenan <i>et al.</i> per un eiettore	120	10.	Cenni sui sistemi frigoriferi ad adsorbimento	243
6.6	Sistema a membrana semipermeabile	125	10.1	Ciclo frigorifero semplice ad assorbimento solido (o adsorbimento)	243
6.7	Sistema a circolazione naturale	132	10.2	Coppie refrigerante/adsorbente	247
6.8	Sistema a diffusione (DAR)	133	10.3	Caratterizzazione termodinamica del ciclo semplice ad adsorbimento	250
6.8.1	Calcolo analitico semplificato del ciclo DAR	138	10.4	Sistemi ad adsorbimento bistadio	252
7.	Scelte dei costruttori	150			
7.1	Introduzione	150			
7.2	Modelli di refrigeratori ad acqua/ammoniaca	151			
7.2.1	Refrigeratori Robur	151			
7.2.2	Refrigeratori Colibrì	154			
7.2.3	Refrigeratori Norcold e Dometic	159			

10.5 Alcune considerazioni sulla progettazione e la realizzazione dei sistemi ad adsorbimento	257
10.6 Mercato degli adsorbitori	258
Bibliografia	263
Appendice	279
A.1 Diagramma entalpia-concentrazione della soluzione acqua/bromuro di litio in fase liquida	279
A.2 Diagramma pressione-temperatura-concentrazione della soluzione acqua/bromuro di litio in fase liquida	280
A.3 Diagramma entalpia-concentrazione della soluzione acqua/ammoniaca	281
A.4 Diagramma pressione-temperatura-concentrazione della soluzione acqua/ammoniaca	282
A.5 Diagramma entalpia-concentrazione della soluzione R134a-DMETEG allo stato liquido	283
A.6 Diagramma semilogaritmico pressione-entalpia per l'ammoniaca	284
A.7 Diagramma semilogaritmico pressione-entalpia per l'acqua	285
A.8 Diagramma semilogaritmico pressione-entalpia per il refrigerante R22	286
A.9 Diagramma semilogaritmico pressione-entalpia per il refrigerante R134a	287

PREFAZIONE

La tecnologia della refrigerazione ad assorbimento è, attualmente, ad uno stadio di sviluppo consolidato; ciononostante, nel panorama manualistico italiano manca una trattazione sistematica a riguardo.

In verità, sono anche ridotte le trattazioni sistematiche di origine anglosassone, pur in presenza di una letteratura tecnica molto diffusa e articolata di rilievo anche quantitativo.

Traendo nuova linfa dalla sempre maggiore necessità del ricorso alle fonti rinnovabili per le note questioni ambientali e dal contestuale rinnovato interesse per l'utilizzo dei cascami termici originati dai cicli alimentati da fonte tradizionale, nonché dall'aumentata complessità delle realtà industriali, sempre più bisognose di realizzare processi produttivi articolati e risparmi consistenti, pare naturale che la tecnologia dell'assorbimento possa vivere un periodo fortunato di diffusione su larga scala.

L'opportunità è data dalla flessibilità delle sue varie forme applicative, in dipendenza delle necessità di processo, dovuta alla disponibilità di molteplici, nuove e tradizionali, miscele e modalità di realizzazione dei cicli che in questo testo trovano sistematica descrizione.

Il lavoro degli autori muove dalle considerazioni fondamentali di carattere termodinamico per poi proporre l'insieme delle problematiche del settore in maniera ordinata e consequenziale, fino a descrivere i cicli ancora allo stadio dell'applicazione sperimentale. Ogni descrizione si fonda su di una chiara esposizione di prerogative e limiti nel confronto con le altre.

Nel suo ampio sguardo sulla realtà dell'assorbimento, il testo propone anche una panoramica di alcune delle più significative realizzazioni di macchine e

impianti a livello dei costruttori italiani e internazionali. Inoltre, l'ultimo cenno al fenomeno dell'adsorbimento completa e rifinisce un lavoro la cui sistematicità incontrerà certo favore nell'ambiente scientifico come in quello industriale di settore.

Lecce, 26 Aprile 2010

Prof. Ing. Domenico Laforgia
Professore Ordinario di Sistemi per l'Energia e l'Ambiente
 Rettore dell'Università del Salento

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 - Obiettivo del volume

Nella maggior parte dei processi industriali l'energia termica sprigionatasi dalla combustione di idrocarburi di origine fossile viene trasformata in altra forma di energia per gli usi più diversi. Una parte consistente di questa energia termica è ceduta all'ambiente, senza che se ne sfrutti per nulla il potenziale. Ciò è, invece, in molti casi possibile e conveniente e consente di ottenere un effetto utile aggiuntivo. Lo sfruttamento dei cascami termici per soddisfare esigenze di riscaldamento e/o di raffrescamento è, ad esempio, una pratica vantaggiosa e molto spesso risulta agevole con il ricorso ad apparati di semplice recupero per il primo caso e di sistemi di refrigerazione ad assorbimento per il secondo. Mediante i sistemi ad assorbimento a recupero viene, inoltre, a ridursi l'impatto ambientale, per la diminuzione della CO₂ e degli inquinanti emessi in atmosfera e poiché si evita l'uso di sistemi a compressione di vapore più tradizionali (macchine frigorifere o pompe di calore).

I vantaggi di carattere ambientale non si limitano esclusivamente a quelli ricordati, ma si estendono all'eliminazione dei fluidi di lavoro impiegati dai più tradizionali sistemi a compressione di vapore (refrigeranti a base clorofluorocarbureica (CFC), i quali determinano una riduzione dello strato di ozono stratosferico, o a base idrofluorocarbureica (HCFC) – come l'R407C – e idrocarbureica (HFC) – come l'R410a – che, assieme ai CFC, contribuiscono all'effetto serra) e alla loro sostituzione con fluidi per la massima parte di origine naturale.

Accanto a questi vantaggi, tuttavia, si deve considerare come i sistemi ad assorbimento scontino in generale efficienze energetiche minori rispetto alle macchine tradizionali. Questo aspetto spesso induce gli attori del mercato della refrigerazione a preferire a questa tecnologia quelle più tradizionali; d'altro canto ciò rappresenta uno stimolo per molti ricercatori a studiare e proporre sviluppi in grado di ovviare a questo deficit prestazionale.

Qui ci si pone l'obiettivo di fornire informazioni organizzate sulle numerose possibilità di "produrre freddo", alcune non ancora sperimentate nella pratica impiantistica, che sfruttano il fenomeno dell'assorbimento di un fluido in un altro.

1.2 - Cenni storici sui sistemi ad assorbimento

Lo sviluppo della teoria della refrigerazione ad assorbimento compie i primi passi già nel 1777 e sin dal 1810 si è a conoscenza di come sia possibile ottenere del ghiaccio facendo evaporare dell'acqua pura da un recipiente posto all'interno di un contenitore sottovuoto in presenza di acido solforico [1, 2]. Nel 1824 Michel Faraday conduce i suoi primi studi sperimentali sul processo. La riduzione di temperatura causata dall'assorbimento di vapore acqueo da parte dell'acido consente la formazione di strati di ghiaccio sulla superficie dell'acqua liquida. Il primo sistema di refrigerazione ad assorbimento ad acqua e acido solforico viene sviluppato in Francia nel 1850 da Edmond Carre. Il problema principale della macchina, legato alla forte corrosione dell'involucro, viene superato nel 1859 da Ferdinand Carre, fratello di Edmond, che introduce un'innovativa macchina frigorifera ad acqua e ammoniacale. Brevettata negli Stati Uniti nell'anno successivo, essa produceva ghiaccio e consentiva la conservazione del cibo. Il brevetto, oltre a costituire la base per gli sviluppi di tutti i sistemi ad assorbimento, fu sfruttato nel 1877 quando, a bordo del battello americano "Paraguay", fu installato un refrigeratore ad acqua/ammoniaca per la conservazione della carne congelata.

La tecnologia di refrigerazione ad assorbimento raggiunge una posizione di predominio sui più giovani sistemi a compressione di vapore intorno al 1875, mantenendola anche per i primi decenni del XX secolo. Con lo sviluppo della produzione centralizzata di energia elettrica e dell'affidabilità dei motori elettrici, tuttavia, il frigorifero a compressione riprende via via posizioni, sino agli inizi degli anni '30, quando, con l'avvento dei primi fluidi frigoriferi sintetici a base cloro-fluorocarburea, diviene la tecnologia predominante.

Nonostante questa battuta d'arresto, negli anni '50 in USA e Giappone viene introdotta la coppia acqua/bromuro di litio per applicazioni di refrigerazione in ambito industriale. I problemi di tossicità di ammoniacale e acido solforico che a partire dai primi anni del 1900 avevano condotto alla morte molti utilizzatori del sistema vengono così superati con l'utilizzo di acqua come refrigerante. Qualche anno dopo viene creato il primo ciclo a doppio stadio, con il risultato di ottenere un deciso incremento di efficienza del refrigeratore ad assorbimento.

In seguito, il frenetico sviluppo della tecnologia a compressione di vapore relega il frigorifero ad assorbimento in una posizione marginale sia sul mercato, sia per ciò che concerne lo studio di nuove soluzioni tecniche. Negli anni tra il 1970 ed il 1990, anche se in Giappone i costruttori riscontrano buoni tassi di crescita delle vendite, negli Stati Uniti il mercato cala drasticamente sino quasi a scomparire.

Superato il periodo di crisi, la ritrovata sensibilità verso gli aspetti di natura ecologica e di riduzione dei consumi energetici ridona linfa allo sviluppo di nuove applicazioni nel settore dell'assorbimento.

Ai giorni nostri, pur essendo destinato ad impieghi particolari, il ciclo ad assorbimento non è tramontato e altrettanto può dirsi per la ricerca su di esso. Ad esempio, frigoriferi domestici a circolazione naturale trovano oggi largo utilizzo in strutture alberghiere e campeggi per la loro silenziosità dovuta alla mancanza di parti meccaniche in movimento.

Grossi gruppi ad assorbimento vengono, inoltre, impiegati nella produzione di acqua refrigerata dove vi è la possibilità di utilizzare eccedenze di calore che altrimenti andrebbero disperse o nelle zone in cui manca, o risulta limitata, la disponibilità di energia elettrica.

1.3 - Tecnologie ad assorbimento per la refrigerazione

Con il termine *sistema frigorifero* ci si riferisce ad un dispositivo o ad una macchina in grado di consentire il trasferimento di energia termica da una sorgente a più bassa temperatura ad una a più alta, ricorrendo all'uso di una fonte energetica esterna.

Una prima grande classificazione delle macchine frigorifere è quella basata sulla forma di energia utilizzata. Se infatti i refrigeratori con ciclo a compressione di vapore sfruttano il lavoro meccanico di un compressore per realizzare il salto di pressione necessario al corretto scambio termico con le sorgenti, i sistemi ad assorbimento utilizzano energia termica a elevata temperatura per riscaldare una miscela contenuta in un bollitore, generalmente detto *generatore* o *separatore*, e dare luogo al ciclo termodinamico.

La presenza di questa sorgente di energia termica ad alta temperatura fa sì che, nel caso di una macchina ad assorbimento, per funzionare il sistema si interfaccia con tre livelli termici. Una prima importante differenza tra i sistemi frigoriferi ad assorbimento e quelli a compressione di vapore è, allora, la presenza di una ulteriore sorgente termica. In fig. 1.1 sono schematicamente illustrate le interazioni che un refrigeratore ad assorbimento, senza riguardo al verso dei flussi termici, realizza con una sorgente ad alta T_H , una a media T_I e una a bassa T_L temperatura.

Una seconda classificazione delle macchine ad assorbimento, forse quella più diffusa, è basata sui fluidi di lavoro impiegati e vede la seguente suddivisione:

- refrigeratori ad acqua/bromuro di litio;
- refrigeratori ad acqua/ammoniaca;
- refrigeratori ad acqua/ammoniaca/gas ausiliario.

Sicuramente queste macchine frigorifere non coprono l'intero quadro delle tecnologie esistenti; ne esistono altre, ad esempio i sistemi ibridi descritti nel seguito, ben comprese solo a livello sperimentale. Esse non hanno trovato ancora



Fig. 1.1 - I tre serbatoi termici interfacciati ai sistemi ad assorbimento.

applicazione a causa della loro ridotta efficienza oppure del basso grado di ottimizzazione, dei costi eccessivi o di altro ancora.

Per definire a grandi linee alcune caratteristiche essenziali dei sistemi più diffusi, è possibile, per esempio, osservare come un assorbitore ad acqua/bromuro di litio, utilizzando acqua come refrigerante, non consenta di ottenere temperature di refrigerazione T_L inferiori a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura alla quale l'acqua solidifica. Per questo motivo, questa tipologia di refrigeratore è stata ed è generalmente destinata ad assolvere compiti di condizionamento dell'aria. L'impiego, allora, giustifica le taglie commercialmente disponibili per questo tipo di refrigeratore (tra 35 kW e 5 MW di potenza frigorifera). Le sue efficienze si aggirano tra le 0,70 e le 1,35 unità di energia termica sottratta alla sorgente a bassa temperatura per ogni unità di energia termica fornita dall'esterno ad alta temperatura.

Il refrigeratore ad acqua/ammoniaca, a differenza del precedente, utilizza ammoniaca come refrigerante. L'ammoniaca presenta una temperatura di solidificazione di $-77,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ciò chiarisce l'impiego di questa macchina soprattutto come frigorifero e/o congelatore industriale. I valori di potenza frigorifera si aggirano tra i 10 kW e i molti MW e le efficienze raggiunte si attestano attorno alle 0,40-0,70 unità di energia frigorifera sottratta a bassa temperatura per ogni unità di energia termica fornita dall'esterno. Uno degli svantaggi principali è la tossicità dell'ammoniaca, che limita ad ambienti aperti (per sistemi contenenti più di 10 kg di refrigerante) o a locali adeguatamente ventilati (per quantità comprese tra 2,5 e 10 kg) l'installazione delle macchine.

Una variante del sistema ad acqua/ammoniaca è quella che opera anche con un gas ausiliario, molto spesso idrogeno molecolare o elio. Refrigeratori basati su questa tecnologia, diretta discendente del brevetto svedese di Platen e Munters, permettono di realizzare efficienze di conversione energetica molto ridotte. D'altro canto essi non dispongono di alcun componente meccanico rotante o mobile e producono impatti acustici ridottissimi. Il loro più esteso impiego è nella refrigerazione alimentare in ambito domestico, ricreativo ed alberghiero.

1.4 - Processo fisico dell'assorbimento

In un sistema frigorifero ad assorbimento il fluido di lavoro consiste nella soluzione binaria di un componente detto *refrigerante* e di uno detto *assorbente*.

In fig.1.2(a) sono rappresentati due recipienti sottovuoto messi in comunicazione da un condotto su cui è installato un rubinetto del tipo "tutto aperto/tutto chiuso". Il recipiente sulla sinistra contiene un fluido refrigerante; quello a destra, la soluzione tra lo stesso refrigerante e il fluido assorbente. All'apertura del rubinetto, il refrigerante allo stato di vapore proveniente dal recipiente di sinistra attraversa il condotto e viene assorbito dalla soluzione. Ciò causa una riduzione di pressione nello stesso recipiente, subito compensata da una nuova evaporazione di refrigerante. Durante il processo di vaporizzazione, migrazione e assorbimento, la temperatura del refrigerante liquido che rimane nel contenitore di sinistra si riduce a causa della vaporizzazione di una sua parte (il calore latente d'evaporazione è sottratto alla massa liquida). Nello stesso tempo, la soluzione presente nel recipiente a destra diventa più

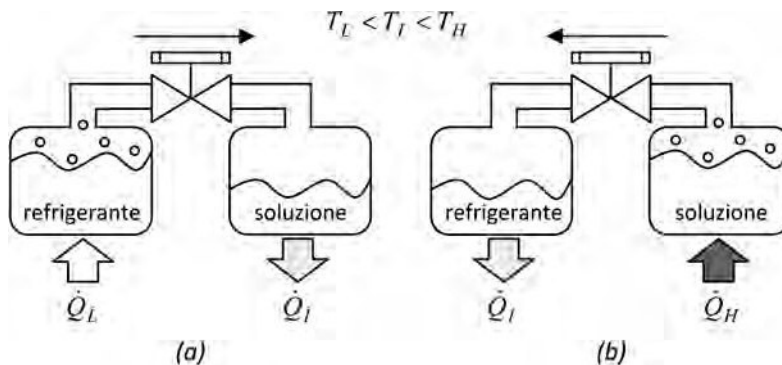


Fig. 1.2 - Il processo di assorbimento (a) e il processo di separazione (b). Gli scambi termici sono indicati in termini di potenza [W].

diluata per il maggior contenuto di refrigerante pervenuto dal contenitore a sinistra. Questo fenomeno, detto propriamente *processo di assorbimento*, è generalmente esotermico. La sola comunicazione tra due recipienti a diversa concentrazione di refrigerante può allora produrre un effetto frigorifero Q_L da una parte ed una cessione di energia termica Q_I dall'altra.

Quando la soluzione nel contenitore di destra non può più continuare ad assorbire ulteriori quantità di refrigerante, poiché è giunta alla concentrazione di saturazione, il sistema può dirsi in equilibrio. A questo punto la chiusura del rubinetto non provoca nessuna ulteriore trasformazione.

Nel caso si intenda attivare il *processo di separazione* tra i componenti, il processo, cioè, inverso, occorre riscaldare la soluzione satura. In fig. 1.2(b) si nota come la fornitura di energia termica Q_H alla soluzione contenuta nel serbatoio di destra, in concomitanza di una nuova apertura della valvola di intercettazione, consenta l'inversione del processo e, quindi, il trasferimento di una quantità di refrigerante allo stato di vapore al serbatoio di sinistra attraverso il condotto di collegamento. A contatto con il liquido a temperatura ambiente, il vapore condensa cedendogli il calore Q_I . Per mantenere costante la temperatura della soluzione del serbatoio a sinistra è necessario, allora, sottrarre proprio Q_I .

Con il sistema illustrato in fig. 1.2 è impossibile realizzare contemporaneamente i processi di assorbimento e separazione, visto che, per innescarli, ad una stessa soluzione bisognerebbe fornire e sottrarre calore contemporaneamente. Per questo è necessario porre in connessione non due, ma quattro recipienti, nei quali fare avvenire convenientemente le singole trasformazioni. Il risultato è illustrato in fig. 1.3, in cui, poiché il processo di separazione avviene a pressione maggiore rispetto a quella che regna nel contenitore dove avviene il processo di assorbimento, per garantire i due diversi livelli di pressione è necessario prevedere una pompa e due valvole di laminazione.

A seguito della fornitura della potenza termica $\dot{Q}_H$ al generatore, dalla soluzione in 1, detta *ricca in refrigerante* e proveniente dalla pompa, si separa il vapore di refrigerante che procede in 3 verso il condensatore. La soluzione che rimane in 2, detta *povera in refrigerante*, fluisce verso la valvola di laminazione, di modo

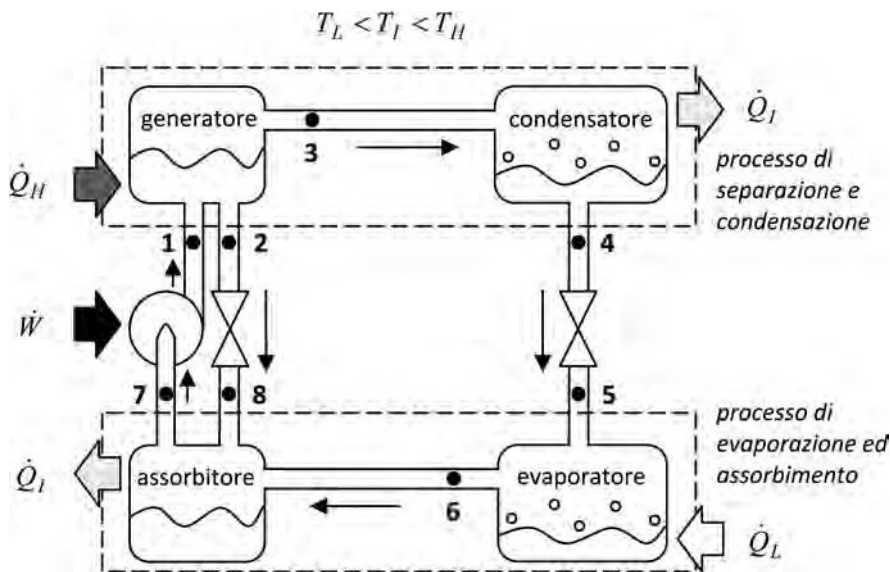


Fig. 1.3 - Il ciclo ad assorbimento a sottrazione continua di potenza termica $\dot{Q}_L$ all'utenza.

che possa portarsi alla pressione dell'assorbitore e dell'evaporatore. Il refrigerante, invece, dopo aver attraversato il condensatore e aver ceduto all'ambiente la potenza termica $\dot{Q}_I$, si trova nello stato di liquido saturo in 4 e si dirige verso la seconda valvola di laminazione per raggiungere il punto 5. La trasformazione 5-6 è quella d'evaporazione. Essa avviene a basse temperatura e pressione e consente di sottrarre la potenza termica $\dot{Q}_L$ all'ambiente entro il quale è contenuto l'evaporatore. Nell'assorbitore, infine, si incontrano i flussi di refrigerante (punto 6) e di soluzione povera (punto 8). Qui avviene la reazione esotermica di assorbimento, che si conclude con la produzione della soluzione ricca in 7 diretta nuovamente verso la pompa. Al fine di mantenere il più possibile in equilibrio il processo di assorbimento, per le ragioni appena dette, è necessario sottrarre all'assorbitore la potenza termica $\dot{Q}_I$ [3].

1.5 - Realizzazione del processo di assorbimento

Il rapporto, detto propriamente *fattore di ricircolo*, tra la portata in massa del refrigerante vaporizzatasi nel generatore e quella della soluzione circolante tra assorbitore e generatore, composta da fluido assorbente e fluido refrigerante, risulta in genere da 2 a 5 volte maggiore rispetto al valore calcolato teoricamente. Ciò è dovuto al mancato raggiungimento delle condizioni di equilibrio della soluzione all'interno dell'assorbitore. Quest'ultimo si presenta, dunque, come il componente più critico di una macchina frigorifera ad assorbimento [4]. Numerosi studi sono stati nel tempo condotti per meglio comprendere e ottimizzare il processo di assorbimento del refrigerante compiuto dalla soluzione. Alcuni di questi sono esposti qui di seguito.

La tipologia di assorbitore più comune utilizzata per l'acqua/bromuro di litio

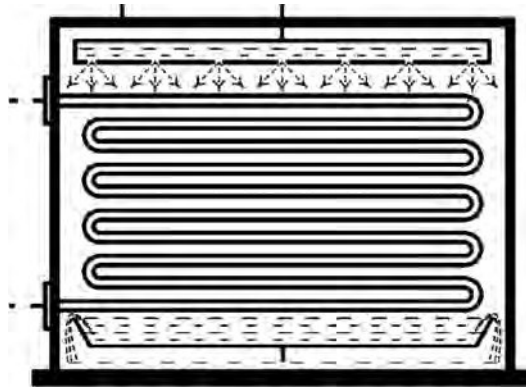


Fig. 1.4 - Schema di un assorbitore a tubi orizzontali bagnati.

consiste in un recipiente in cui la soluzione allo stato liquido viene fatta cadere per gravità su tubi orizzontali raffreddati (fig. 1.4). Il vapore di refrigerante viene assorbito dal film liquido creatosi sui tubi [5 – 12] e il calore prodotto dal processo viene rimosso istantaneamente. Il tasso di assorbimento di refrigerante risulta elevato; il sistema tuttavia necessita di un alto fattore di ricircolo.

Un approccio differente è utilizzato per il refrigeratore prodotto da Interotex [13] (fig. 1.5): il processo di assorbimento avviene in questo caso, non più su tubi orizzontali, ma su dischi rotanti raffreddati esternamente [14]. A parità di superficie di liquido esposta al vapore di refrigerante, questo sistema consente un completamento del fenomeno dell'assorbimento superiore a quanto avviene nel modello tradizionale. Ciò consente di ridurre gli ingombri del dispositivo.

Variante del sistema appena descritto è quella a tamburi rotanti [15]. Per la soluzione acqua/ammoniaca, sono riportate in letteratura [16 – 18] numerose tipologie di assorbitori basate sui modelli descritti o su loro varianti.

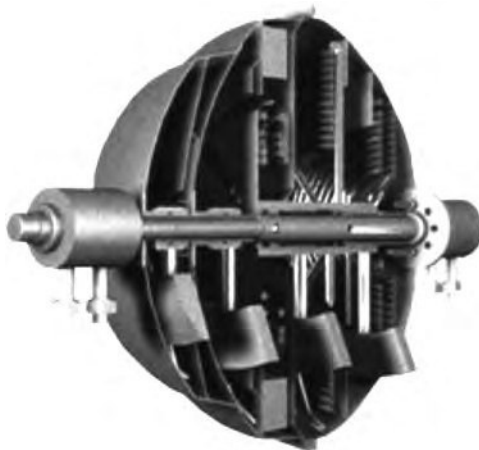


Fig. 1.5 - Sistema frigorifero a dischi rotanti Interotex.

1.6 - Fondamenti termodinamici del ciclo ad assorbimento

Un ciclo frigorifero ad assorbimento ideale può essere visto come l'accoppiamento di due cicli di Carnot, di cui uno motore e uno operatore. Più specificatamente, le trasformazioni termodinamiche che subisce il fluido termovettore secondo ognuno dei cicli menzionati devono avvenire entro i confini fisici di un solo impianto. Imponendo, come in precedenza, un livello termico ad alta T_H , uno a media T_I e uno a bassa T_L temperatura, sarà necessario far operare il ciclo di Carnot motore tra T_H e T_I , mentre quello operatore tra T_I e T_L . Così, se le sorgenti ad alta e bassa temperatura sono destinate a cedere energia termica, rispettivamente Q_H e Q_L , al fluido termovettore, il pozzo termico a temperatura intermedia sottrae calore, Q'_I e Q''_I , ad esso. Infine, il lavoro W prodotto dal ciclo motore è completamente utilizzato dal ciclo operatore così che quest'ultimo possa consentire il trasferimento di energia termica dal livello termico più basso a quello intermedio [19]. In fig. 1.6 quanto finora descritto è illustrato sul piano T - s .

Assumendo Q_H come l'energia termica spesa per azionare il ciclo frigorifero ad assorbimento, generalmente viene considerata come effetto utile l'energia termica ricavata a temperatura intermedia $Q'_I + Q''_I$ (cioè si utilizza la macchina come pompa di calore per il riscaldamento di un'utenza) oppure l'energia termica Q_L sottratta alla sorgente a bassa temperatura (in questo caso il sistema diviene un vero e proprio refrigeratore).

Nel caso di funzionamento in pompa di calore è possibile determinare l'efficienza del ciclo calcolando il *coefficiente di prestazione* (COP_{PdC}) come:

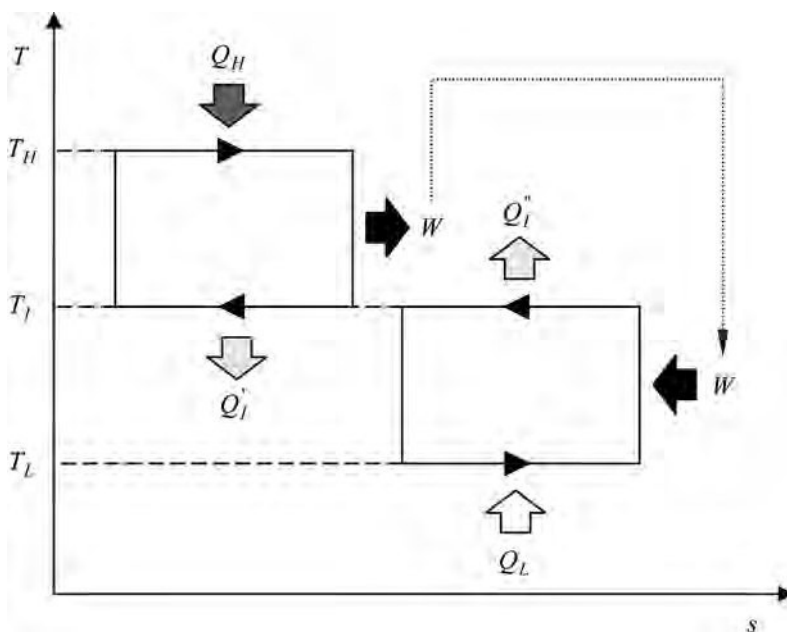


Fig. 1.6 - Ciclo ad assorbimento a partire da due cicli di Carnot.

$$COP_{PdC} = \frac{Q'_I + Q''_I}{Q_H} \quad [1.1]$$

o, equivalentemente in termini di potenza,

$$COP_{PdC} = \frac{\dot{Q}'_I + \dot{Q}''_I}{\dot{Q}_H} \quad [1.2]$$

Nel caso, viceversa, di funzionamento della macchina come refrigeratore, l'efficienza si determina calcolando un secondo coefficiente di prestazione (COP_F) come:

$$COP_F = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} \quad [1.3]$$

ed equivalentemente in termini di potenza

$$COP_F = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} \quad [1.4]$$

Da qui in seguito, nella trattazione si farà riferimento sempre al funzionamento della macchina come refrigeratore e la grandezza COP_F sarà identificata con COP .

Nel Capitolo 3 verrà poi chiarito come, nella quasi totalità dei casi, risulti necessario introdurre un contributo, di entità comunque estremamente ridotta, di energia meccanica esterna per consentire alla pompa illustrata in fig. 1.3 di far circolare la soluzione dei fluidi di lavoro tra assorbitore e generatore. Il valore di questo contributo deve considerarsi energia spesa e quindi nelle definizioni dalla [1.1] alla [1.4] dovrebbe sommarsi al denominatore. Tuttavia, in tutte le applicazioni pratiche si riscontra come tale potenza meccanica $\dot{W}$ necessaria alla pompa sia trascurabile rispetto ai valori di potenza termica in gioco [20].

La necessità di fornire energia meccanica al sistema costituisce un primo fattore di allontanamento del ciclo ad assorbimento reale da quello ideale finora descritto. Accanto a questo, tuttavia, ne esistono numerosi altri, tra i quali:

- l'attrito viscoso in seno al fluido di lavoro (si verifica in presenza di un flusso di qualsiasi tipo, sia esso liquido o gassoso);
- l'attrito meccanico tra i confini del sistema e il fluido in esso contenuto (insieme al precedente costituisce la perdita di carico);
- il mescolamento tra le portate di refrigerante e soluzione di fluidi di lavoro che si incontrano nell'assorbitore;
- l'imperfetta adiabaticità del sistema (ogni componente della macchina frigorifera è destinato a scambiare calore con l'esterno);
- l'espansione incontrollata del fluido liquido che si verifica attraverso ogni valvola di laminazione.

Tali fattori di irreversibilità, incrementando la produzione entropica del sistema, sono causa delle minori efficienze energetiche del ciclo termodinamico reale rispetto all'ideale [21 – 26].

GENERIAMO IDEE PER UN'ENERGIA SOSTENIBILE

AiCARR, Associazione italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, contribuendo al progresso delle tecnologie impiantistiche e alla definizione delle normative relative alla produzione, alla distribuzione e all'utilizzo dell'energia termica. Nata nel 1960 come costola italiana della prestigiosa associazione statunitense ASHRAE, AiCARR riunisce oggi circa 2000 associati di varia estrazione: progettisti, docenti, installatori e manutentori, aziende produttrici, funzionari di Enti e Agenzie governative, istituzioni territoriali, nazionali e internazionali, studenti e ricercatori. La presenza nelle sedi accademiche e istituzionali dove si progetta il futuro energetico del nostro Paese fa di AiCARR un punto di riferimento essenziale per la definizione delle strategie e delle politiche energetiche e un interlocutore insostituibile per chiunque si occupi di efficienza energetica, qualità ambientale, fonti rinnovabili e uso consapevole dell'energia.

LE COMPETENZE CONDIVISE SONO ALLA BASE DI OGNI PROGRESSO

Accrescere la cultura tecnica del settore e la professionalità dei Soci, condividere know-how, redigere e diffondere linee guida di supporto nella pratica professionale, dare un appoggio concreto al mondo imprenditoriale che si occupa di temi energetici, fornire il proprio contributo in ambito normativo sono i principali impegni che AiCARR svolge attraverso:

- Convegni nazionali e internazionali, webinar, seminari, workshop, tavole rotonde
- Incontri tecnici e visite a impianti e realizzazioni d'avanguardia
- Commissioni di studio e coordinamento di attività tecniche, culturali e normative
- Comitati Tecnici attivi su tematiche specifiche
- Attività congiunte con Associazioni, Università ed Enti italiani ed europei, pubblici e privati

- Gruppi di lavoro creati per dare un supporto operativo alle Istituzioni
- Partecipazione alla definizione di regolamenti, leggi, linee guida e collaborazione alla redazione di normativa tecnica con UNI, CEN e CTI, grazie alla Commissione Tecnica e Normativa.

AGGIORNAMENTO E FORMAZIONE: UN MUST

L'aggiornamento tecnologico e normativo è oggi imprescindibile per professionisti e aziende: in quest'ottica AiCARR offre formazione di alto standard teorico e applicativo attraverso AiCARR Formazione, business unit di AiCARR Educational srl, società certificata ISO 9001:2015.

AiCARR Formazione è provider di CNI e CNPI per i crediti formativi professionali e i suoi corsi, condotti da accademici e professionisti selezionati fra i migliori esperti del settore HVAC&R, sono rivolti a progettisti, tecnici, manutentori, personale tecnico e commerciale di Enti e industrie, studenti e ricercatori.

SE LE IDEE CIRCOLANO, ACQUISTANO PIÙ FORZA

AiCARR pubblica gli atti dei convegni, cura l'edizione delle collane dei volumi tecnici, delle guide e dei vademecum, invia la newsletter quindicinale con le notizie sulle novità associative, editoriali, normative, legislative e di formazione; è distributore esclusivo per l'Italia delle pubblicazioni e norme ASHRAE e applica ai Soci condizioni favorevoli per l'acquisto delle norme CEI e sconti sulle pubblicazioni di importanti editori tecnici.

La biblioteca propone un'ampia selezione di titoli tecnico-scientifici in libera consultazione.

Sul sito www.aicarr.org e attraverso la App, scaricabile da Google Play, è anche possibile consultare articoli tecnici e la rassegna news. Inoltre, i Soci ricevono gratuitamente il periodico AiCARR Journal, organo ufficiale dell'Associazione.

Nel caso di impianti in cui si disponga di cascami termici o di calore a basso costo, nel caso in cui vi siano ostacoli all'utilizzo delle macchine frigorifere tradizionali e in numerose altre situazioni, la tecnologia ad assorbimento può giocare un ruolo decisivo nel soddisfare la richiesta delle potenze frigorifere più differenti. La possibilità per le macchine ad assorbimento di alimentarsi alla fonte solare o con il calore di combustione della biomassa lascia, inoltre, intravedere per l'assorbimento un'applicazione di interesse molto attuale e con beneficio sia nei termini del risparmio dei consumi di combustibile fossile, sia nei termini di riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera. Il testo, partendo da una descrizione dettagliata dei fondamenti teorici, dei modelli di calcolo analitico delle prestazioni dei componenti delle macchine e dei sistemi esistenti, si pone l'obiettivo di riassumere lo stato dell'arte del settore, muovendo dalle soluzioni più semplici e comuni a quelle non ancora sperimentate nella pratica impiantistica. Brevetti, schemi funzionali delle macchine prodotte dai vari costruttori mondiali, accorgimenti tecnici adottati, controlli del ciclo termodinamico, operazioni di gestione e manutenzione, approfondimenti sulle numerose applicazioni dei refrigeratori e così via trovano qui una trattazione sistematica. L'ultimo capitolo è dedicato alla tecnologia cugina della refrigerazione ad assorbimento: quella per adsorbimento. Molto simile alla prima nelle sue basi teoriche, essa presenta differenze quanto alla sua applicazione a livello impiantistico e realizzativo.

Giuseppe Starace Ingegnere meccanico e dottore di ricerca in Sistemi Energetici e Ambiente presso l'Università di Lecce, dal 2000 è ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale e attualmente professore aggregato di Fisica Tecnica e Tecnica del Freddo presso l'Università del Salento. Afferisce al Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione ed è attivo sulle tematiche di produzione di energia, di scambio termico, di ottimizzazione e modellazione delle refrigeratori tradizionali e ad assorbimento. È autore di più di 40 pubblicazioni nazionali e internazionali e partecipa a progetti di ricerca pubblici e privati. Ha esperienze negli USA (ERC di Madison-WI) e in Germania (BOSCH-Stuttgart). Svolge attività professionale nel settore dell'energia per diverse PMI pugliesi.
Lorenzo De Pascalis Ingegnere meccanico, dal 2009 è dottorando di ricerca in Sistemi Energetici e Ambiente presso il Dipartimento di ingegneria dell'innovazione dell'Università del Salento. Si occupa di refrigerazione civile e industriale, di acustica e di energia. È autore di pubblicazioni nazionali e internazionali. Ha collaborato con enti pubblici e privati per la progettazione e la valutazione di interventi di risparmio energetico e di sistemi a basso impatto ambientale, anche alimentati da fonti rinnovabili. È stato docente per corsi di perfezionamento sullo sfruttamento delle energie rinnovabili.

AiCARR, Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione, è un'associazione culturale no profit. Dal 1960 crea e promuove cultura e tecnica per il benessere sostenibile, occupandosi di uso consapevole dell'energia e delle risorse naturali e di innovazione delle infrastrutture energetiche, sia nel settore impiantistico che in quello edilizio. AiCARR conta oltre 2.600 Soci fra progettisti, costruttori di macchine, instal-

latori, manutentori, accademici, ricercatori, studenti, funzionari di Enti e Agenzie governative e di istituzioni nazionali e internazionali.

La Collana AiCARR propone testi tecnici elaborati da Soci e selezionati dalla Commissione Editoria AiCARR, traduzioni di Linee Guida pubblicate da associazioni internazionali quali REHVA e ASHRAE e le Guide AiCARR realizzate dai Comitati Tecnici dell'Associazione.

AiCARR - Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento e Refrigerazione - www.aicarr.org

CODICE REF

www.editorialedelfino.it

ISBN 978-88-97323-04-4



Euro 39,00

Questo volume approvato dal Ministero
 è da considerarsi copia OASIS. CAMPIONE GRATUITO (non commerciabile)
 (verifica e altri atti di disposizione vietati art. 17, c. 2, L. 633/1941).
 Esente da IVA (DPR 26/10/1972 n. 633 art. 2, lett. d).
 Esente da bolli di accompagnamento (DPR 6/10/1978 n. 627 art. 4, n. 6).

GIUSEPPE STARACE - LORENZO DE PASCALIS
 REFRIGERAZIONE
 AD ASSORBIMENTO
 ISBN 978-88-97323-04-4