

## **Refrigeratori ad assorbimento "compound"**

(ottobre 1998)

### **RIASSUNTO**

Dopo avere ricordato i principi di funzionamento dei refrigeratori ad assorbimento, l'A. analizza in dettaglio il refrigeratore d'acqua prodotto dalla Robur (raro esempio di impresa italiana che ha acquistato uno Stabilimento pienamente produttivo negli USA).

Si tratta di un refrigeratore il cui ciclo termodinamico completo è riconducibile in parte al Ciclo di Carnot ed in parte ad un ciclo ad assorbimento classico (per questo si propone di chiamare questa sequenza "Ciclo Compound").

Il punto più importante da capire sta nei vantaggi ottenibili con l'uso dei due cicli in sequenza che, per l'utenza, realizzano l'effetto frigorifero utile in un normale evaporatore ad Ammoniaca.

L'A. dimostra, tra l'altro, che proprio la sequenza dei due cicli consente di ottenere una data resa frigorifera con un modesto uso di potenza primaria elettrica.

### **ABSTRACT**

This work shows the general absorption principles and enter the details of the special water-chiller GA (produced by the italian firm Robur in his USA factory).

The thermodynamics of running cycle is a combination of Carnot Cycle and a classic Absorption Cycle (for this reason the writer proposes to call this combination "Compound Cycle").

The most significative property of the GA chiller consists in using this two cycles to obtain the cooling effect by Ammonia evaporation.

The writer demonstrates, also, this special sequence allows to obtain a certain cooling power by means of a little primary electrical power consumption.

## **1. Il fenomeno dell'assorbimento.**

Il fenomeno su cui si basano le più diffuse macchine per la produzione del freddo è, generalmente, l'evaporazione di un fluido allo stato condensato (liquido).

Nel caso delle macchine ad assorbimento l'evaporazione del fluido frigorifero addirittura può non richiedere l'uso di compressori né di organi di laminazione (p. es.: cicli con soluzioni saline).

In Figura 1 abbiamo schematizzato un apparato dimostrativo da laboratorio, adattabile al caso Acqua/Ammoniaca, costituito da due recipienti comunicanti tramite una valvola a due vie e due posizioni (questa può essere, quindi, o chiusa come in Figura 1, o aperta come in Figura 2).

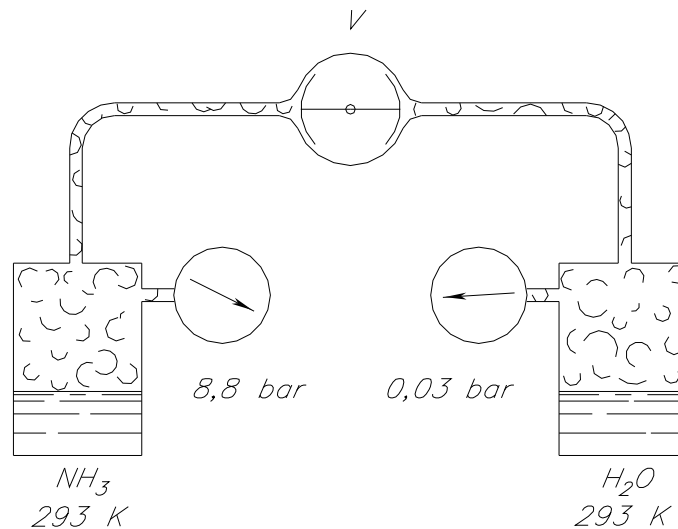


Figura 1

*Dispositivo sperimentale per l'assorbimento*

Per fissare le idee supponiamo che la temperatura dei componenti (per comodità in equilibrio termico tra di loro e con il laboratorio) sia di 293 K; nel recipiente di sinistra è contenuta Ammoniaca ed in quello di destra Acqua, entrambe in equilibrio con il proprio vapore (le sostanze sono state introdotte nei recipienti dopo avere tolto l'aria).

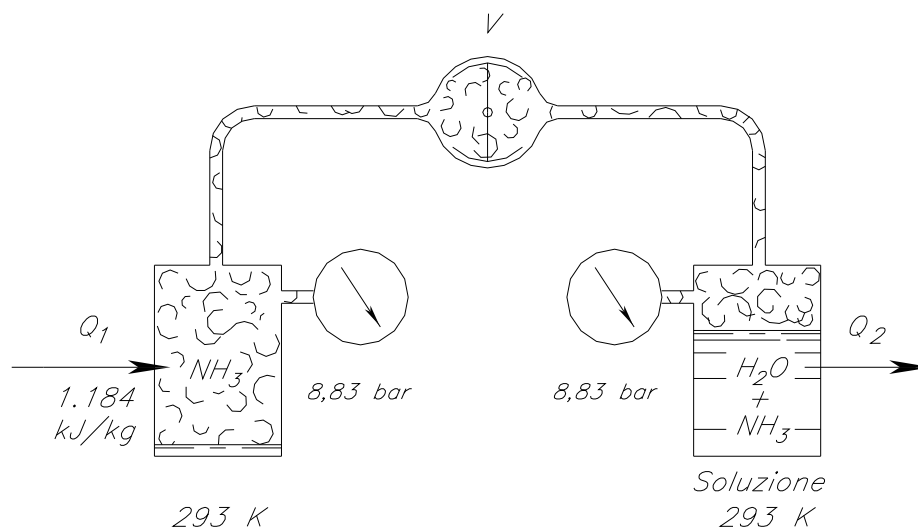


Figura 2

*Flussi termici associabili all'assorbimento*

Alla detta temperatura l'Ammoniaca assume una pressione assoluta di 8,8 bar, mentre l'acqua si trova ad una pressione assoluta di 1,03 bar.

Quando la valvola d'intercettazione tra i due recipienti viene aperta (Figura 2) i vapori dell'Ammoniaca, a causa della grande affinità di questa per l'acqua e della maggiore pressione a cui si trovano, "usano" il volume liquido dell'Acqua come un recipiente in grado di contenerli assumendo, contemporaneamente, lo stato condensato.

In Figura 2 si suppone di avere mantenuto l'equilibrio termico fornendo il calore  $Q_1$  di evaporazione all'Ammoniaca, dall'esterno, e sottraendo alla soluzione il corrispondente calore  $Q_2$  di condensazione (si tratta della trasformazione MN di Figura 5).

Nella nuova condizione di equilibrio, grazie agli scambi termici effettuati, si avranno temperature uguali a quelle iniziali (273 K) ed una pressione data dalla somma delle pressioni parziali dei vapori, d'accordo con la Legge di Dalton.

## 2 La realizzazione di un ciclo.

Per rendere sfruttabile con continuità il freddo prodotto dall'evaporazione dell'Ammoniaca è necessaria la ripetizione controllata e continua dell'evaporazione stessa.

In Figura 3 mostriamo un modo per realizzare tale condizione: si tratta di introdurre un insieme di dispositivi in grado di separare con continuità l'Ammoniaca dall'Acqua, riportandola nel primo recipiente e mantenendo delle concentrazioni di equilibrio dinamico nelle varie parti realizzando, così, un ciclo.

Osserviamo tale figura: introducendo la quantità di calore  $Q_2$ , nel Generatore contenente la soluzione Acqua/Ammoniaca, si ottiene una distillazione frazionata con prevalente separazione di vapori d'Ammoniaca (la tensione del suo vapore è notevole: alla temperatura critica, 132,4 °C, è di circa 130 bar ass.) e tracce di vapori d'Acqua.

I vapori sono facilmente condensabili, se la loro pressione è adeguata (p. es. 19 bar, cui corrisponde una temperatura di 48 °C come si deduce dalla Figura 5), sottraendo il calore  $Q_3$ , con scambiatori di tipo atmosferico (con aria mediante batterie a tubi alettati, oppure con scambiatori a mantello e fascio tubiero e torri evaporative) fino alla liquefazione: tale pressione, nella Figura 3, è mantenuta dal Restrictor 1 a 4,5 bar.

L'evaporazione, per nostra ipotesi, avviene a 273 K (0 °C): è determinata dallo scambiatore che rappresenta il carico dell'impianto (l'acqua da refrigerare) e che introduce il calore  $Q_1$  necessario a tale cambiamento di stato: classicamente una pompa sarà in grado, con la giusta portata, di far entrare acqua a 12 °C ottenendo all'uscita 6,5 °C.

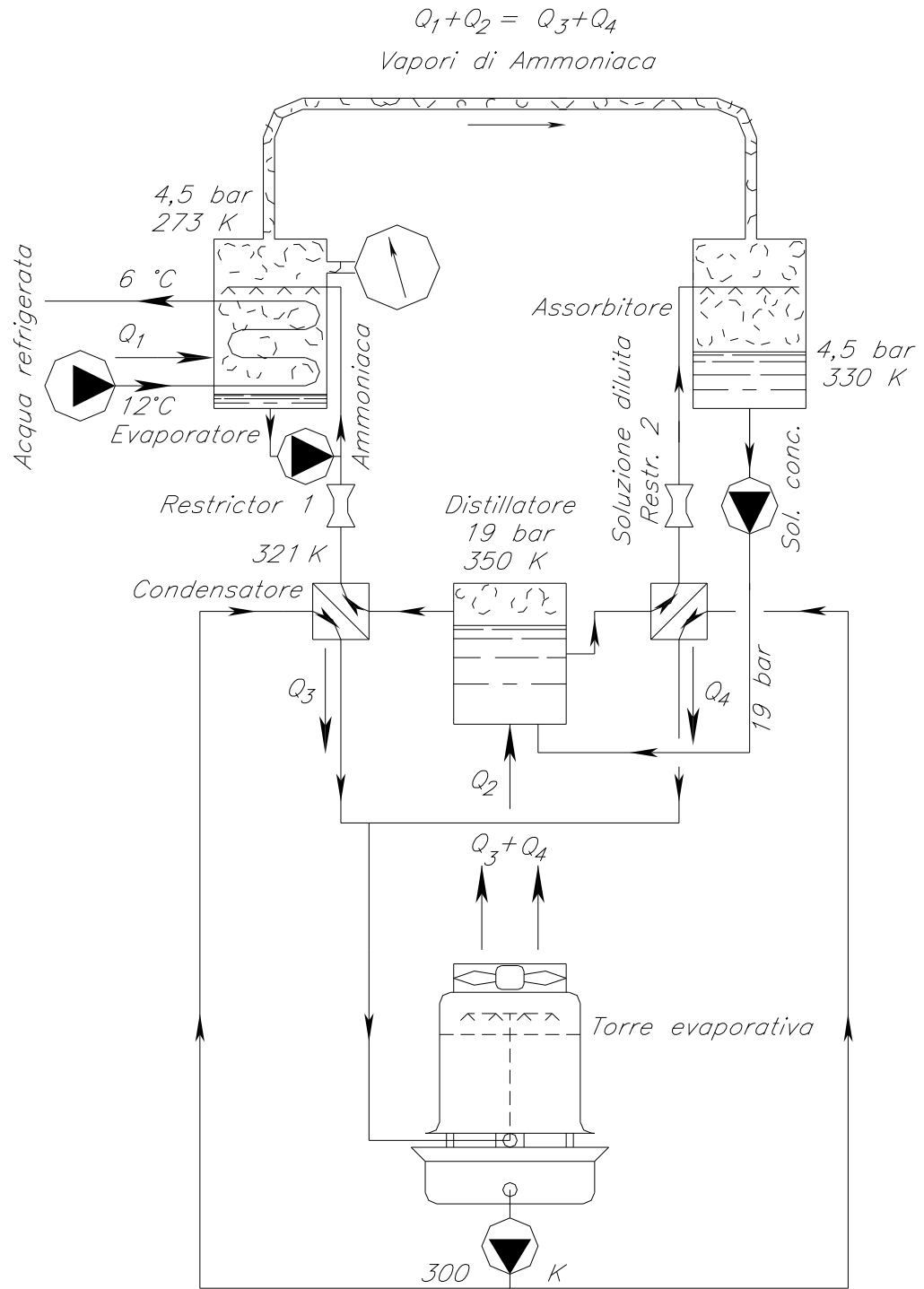


Figura 3

Esempio di un ciclo completo ad assorbimento  
Acqua/Ammoniaca

I vapori d'Ammoniaca verranno assorbiti dalla soluzione diluita gorgogliante nell'Assorbitore, d'accordo col principio visto in Figura 1, dopodichè passeranno nel Distillatore ove ricomincia il ciclo; la funzione del Restrictor 2 è ovvia.

I flussi termici sono, quindi, i seguenti: la soluzione concentrata ha incorporato il calore di assorbimento (che, come risulta ovvio dalla figura, non conviene smaltire prima del Distillatore) e solo dopo essersi diluita viene raffreddata con la cessione del calore  $Q_4$  (generalmente con mezzi atmosferici: questo secondo passaggio nello smaltitore, batteria ventilata o torre, è tipico dei sistemi ad assorbimento).

Il bilancio termico sarà il seguente:  $Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4$ .

### 3 Osservazioni particolari sul ciclo ad assorbimento.

Come si è visto, la realizzazione del ciclo ad assorbimento Acqua/Ammoniaca, richiede un controllo "termostatico" della pressione di condensazione del refrigerante a seconda del fluido disponibile per lo smaltimento del calore.

Ma utilizzando soluzioni di sali fortemente igroscopici, ove il refrigerante è l'Acqua e dove il calore  $Q_2$  può essere ottenuto sfruttando cascami termici a bassa temperatura (vapore d'acqua, oppure acqua surriscaldata o anche, semplicemente, acqua calda) si lavora con pressioni inferiori all'atmosferica (vuoto spinto) e si ottiene l'evaporazione a temperature intorno ai 275 K e la condensazione intorno ai 318 K (45 °C).

In questo caso sono in gioco modeste variazioni di pressione statica corrispondenti alle resistenze delle tubazioni e delle eventuali valvole modulanti la potenza frigorifera prodotta, differenze di pressione geodetica dovute al dislivello tra i serbatoi, di pressione dinamica dovute ai diversi valori di sezione trasversale nelle tubazioni di passaggio, di pressione totale per effetto delle pompe di circolazione delle soluzioni (diluita e concentrata) sufficienti, peraltro, alla ricondensazione dell'acqua nel Condensatore senza bisogno di restrictors.

Almeno in prima approssimazione il calore assorbito dal Distillatore è uguale a quello ceduto dal fluido da refrigerare (il che, sempre in prima approssimazione, significa che un assorbitore può lavorare con un COP intorno all'unità) mentre la torre evaporativa (o l'eventuale altro dissipatore atmosferico) deve smaltire una potenza ben maggiore ( $Q_3 + Q_4$ ) di quella frigorifera utilizzata.

Oggi vi è una grande offerta di gas combustibile naturale (per esempio Metano) anche a prezzi convenzionati in funzione dei consumi annui, tanto che si sta diffondendo l'assorbitore a fiamma diretta (cioè con il Generatore riscaldato da un bruciatore a gas), specialmente se è critica la disponibilità di potenza elettrica.

Un esempio di refrigeratore in grado di ridurre drasticamente la potenza elettrica necessaria, rispetto ai classici refrigeratori a compressione, è il GA (Gas Absorption) della Robur che utilizza il fenomeno dell'assorbimento in

abbinamento ad un ciclo frigorifero a compressione, in modo assolutamente originale (che definiremmo "Compound").

#### 4 Il ciclo frigorifero "compound" del Robur GA

Nella soluzione tecnologica GA l'unico organo meccanico in movimento, essenziale alla realizzazione del ciclo, è costituito da una pompa, azionata da un motore elettrico (sulla cui potenza necessaria faremo un interessante confronto con il compressore classico), che aspira la soluzione concentrata Acqua-Ammoniaca alla pressione di circa 4,5 bar (parleremo sempre in termini di pressioni assolute) portandola a circa 19 bar: si realizza, quindi, un circuito a due pressioni del tutto analogo ad un circuito frigorifero a compressione meccanica.

Come già mostrato negli schemi di principio, un Generatore a fiamma diretta provvede alla separazione dell'Ammoniaca dall'Acqua (Figura 4): il lettore tenga presente che nella realizzazione pratica della macchina le quantità di calore scambiate all'interno del ciclo (quali preriscaldamenti, di zone da riscaldare col bruciatore, per mezzo dei fluidi in ciclo caldi e destinati ad essere raffreddati) servono a rendere più "efficiente" il ciclo stesso.

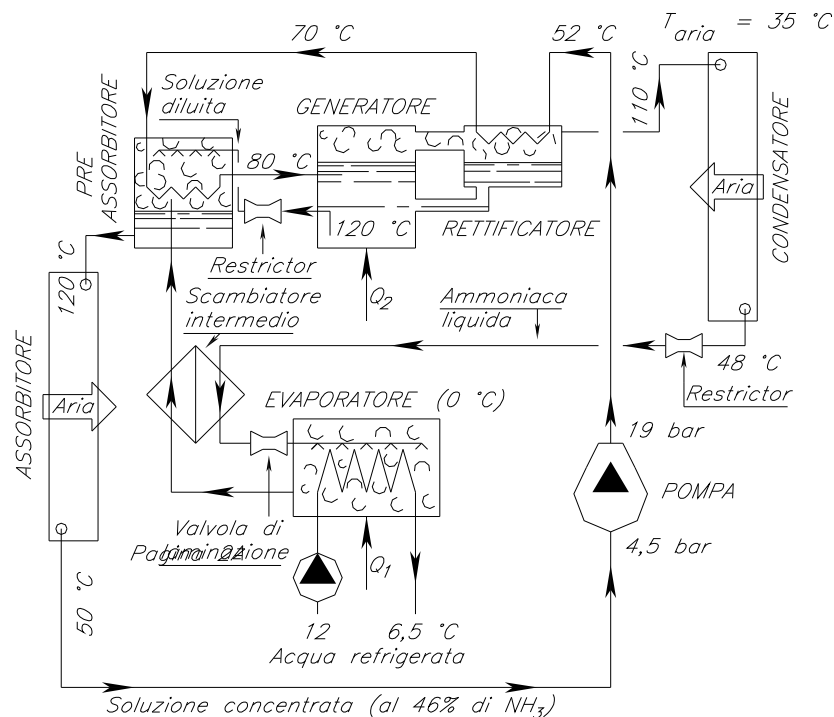


Figura 4

Schema funzionale del ciclo ad assorbimento "Compound"

L'Ammoniaca allo stato di vapore viene "rettificata" in modo da separarsi più completamente dall'Acqua presente prima di essere introdotta nel Condensatore raffreddato dall'aria atmosferica; l'acqua che il Rettificatore riesce a separare ritorna nel Generatore aiutando la formazione della Soluzione Diluita.

Questa sarà introdotta nell'Assorbitore (che si trova nel ramo di bassa pressione) tramite un apposito riduttore di pressione ("restrictor").

Seguiamo, però, il percorso dell'Ammoniaca: inizia a raffreddarsi nel Rettificatore (preriscaldando la soluzione pompata destinata al Generatore), viene introdotta nel Condensatore, la cui temperatura è regolata anche per mezzo di un altro restrictor (il Condensatore ha il pacco alettato in comune con il secondo dissipatore ed un corretto funzionamento dell'insieme deve prevedere temperature superficiali primarie (dei tubi) e secondarie (delle alette) vicine, se non identiche, altrimenti si realizzano scambi interni al ciclo di nessuna utilità).

L'Ammoniaca condensata viene sottoposta al noto fenomeno della laminazione (Joule-Thompson) realizzando, come si diceva, un ciclo frigorifero "classico" evaporando a circa 4,5 bar (corrispondenti, come già visto, a 273 K) ed assorbendo il calore uguale alla potenza frigorifera utile.

Sul piano pressioni-entalpia tale ciclo è rappresentato in Figura 5 ove sono riportati anche i valori più salienti delle grandezze in gioco.

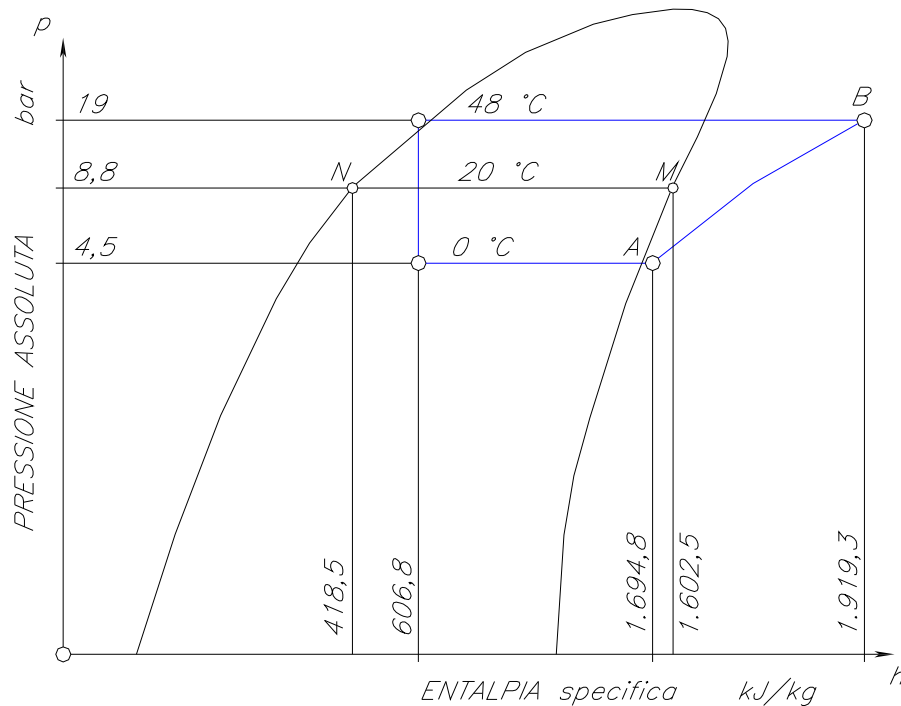


Figura 5

Dal diagramma di stato dell'Ammoniaca

L'originalità della macchina, che consente i sostanziosi risparmi di potenza elettrica cui ci riferivamo all'inizio, comincia dove le classiche macchine a compressione finiscono: i vapori di Ammoniaca vengono ora assorbiti dalla soluzione diluita nel Pre-Assorbitore (ramo di bassa pressione) e dissipano il calore di assorbimento nel secondo dissipatore (dianzi citato) che è il vero e proprio Assorbitore.

A questo punto abbiamo realizzato la condizione caratteristica della macchina Robur: il fluido frigorifero ha cambiato nuovamente stato ed è "pompabile" allo stato condensato, in una soluzione, veicolata dall'Acqua solvente. Il fatto di "comprimere" il frigorifero allo stato condensato, anziché allo stato di vapore, *ha un'importanza essenziale*: infatti la potenza teorica  $P$  assorbita da una pompa o da un compressore (o anche da un ventilatore) è data da

$$P = \int_{p_1}^{p_2} \dot{v} (p) dp \quad (1)$$

dove  $\dot{v}$  è la portata in volume e  $p$  è la pressione del fluido pompato dalla pressione  $p_1$  alla pressione  $p_2$ , e non vi compare la portata di massa.

Anche una verifica dimensionale ci permette di controllare che tale prodotto rappresenta una potenza: la (1) ci dice che la potenza assorbita in ogni istante da un compressore è data dal prodotto della portata volumica (istantanea) per la differenza di pressione (istantanea, mentre va sottolineato con vigore che l'effetto frigorifero dipende essenzialmente dalla portata massica di frigorifero).

Se il frigorifero è allo stato condensato con "poca" potenza di pompaggio si può ottenere una "grande" potenza frigorifera.

Per fissare le idee facciamo un esempio numerico: si abbia una soluzione di Acqua con il 46% di Ammoniaca cui compete una densità (stato liquido) di 880 kg/m<sup>3</sup>.

Per ottenere una potenza frigorifera di 18.000 W (potenza del Robur GA modulo base) evaporando Ammoniaca a 273 K (ovvero 0 °C) occorre una portata della stessa di 18.000:1.088.000 = 0,01654 kg/s, contenuta in 0,036 kg/s della soluzione al 46% (il calore latente di evaporazione a 0 °C è di 1.088 kJ/kg).

Essendo il fluido pompato incompressibile (come si suol dire per significare che il liquido, pur sottoposto a pressione, non cambia apprezzabilmente di volume) l'integrale (1) si riduce a:

$$P = \dot{v} \Delta p, \quad (2)$$

e, quindi, la potenza teorica necessaria sarà:



$$P = \frac{0,036}{880} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \cdot 14,5 \cdot 10^5 \left[ \frac{N}{m^2} \right] = 59,3 \text{ W.} \quad (3)$$

Con soli 59,3 W elettrici alimentiamo un refrigeratore da 16.000 W resi all'acqua! Tenendo conto della potenza assorbita dal ventilatore per il raffreddamento delle batterie di scambio termico, dei rendimenti di pompaggio (attriti, rendimento volumetrico, tenute meccaniche, perdite termodinamiche del fluido reale, coefficienti di sicurezza etc.) arriviamo ad una potenza installata effettiva di 820 W: è quanto troviamo sulle tabelle tecniche del Robur GA (ACF 60-00).

Per fare un efficace confronto rispondiamo alla seguente domanda: applicando la (1) quale sarebbe stata la potenza teoricamente necessaria per la compressione della stessa portata massica in forma di vapore a 4,5 bar?

E' noto che la compressione di un aeriforme segue una trasformazione, che in Termodinamica si chiama politropica; la cui forma tipica è:

$$p v^k = \text{cost.} \quad (4)$$

Se la compressione è adiabatica (o isoentropica che dir si voglia) come in prima approssimazione si ritiene nello studio dei cicli teorici, l'esponente assume il valore

$$k = c_p/c_v,$$

rapporto tra i calori specifici a pressione e volume costante. Pertanto la (1) ci permette di scrivere:

$$P dt = \int p v^k dp. \quad (5)$$

A qualche lettore non dispiacerà se riportiamo il classico sviluppo dell'integrale a secondo membro della (5) calcolato tra le pressioni  $p_1$  e  $p_2$  di inizio e fine compressione.

La trasformazione adiabatica, tra uno stato  $I$  ed uno stato generico, soddisfa la seguente relazione:

$$p_1 v_1^k = p v^k, \quad (6)$$

da cui si può dedurre:

$$v = \left( \frac{p_1 v_1^k}{p} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

e, quindi, il lavoro per unità di massa compiuto da tale trasformazione sarà:

$$\begin{aligned} L &= \int_{p_1}^{p_2} v dp = p_1^{\frac{1}{k}} v_1 \int_{p_1}^{p_2} p^{\frac{1}{k}} dp = p_1^{\frac{1}{k}} v_1 \left[ \frac{p_2^{\frac{-1}{k}+1}}{-\frac{1}{k}+1} - \frac{p_1^{\frac{-1}{k}+1}}{-\frac{1}{k}+1} \right] = \\ &= p_1 v_1 \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \left[ \frac{J}{kg} \right]. \quad (8) \end{aligned}$$

Poiché l'Ammoniaca è caratterizzata da:

$$\begin{aligned} k &= 1,312; \\ R &= 489 \text{ J/kg K}, \end{aligned}$$

e, per analogia con il caso in confronto, manteniamo:

$$\begin{aligned} T_1 &= 273 \text{ K}, \\ p_1 &= 4,5 \text{ bar}, \\ p_2 &= 19 \text{ bar}, \end{aligned}$$

sostituiti i numeri alle lettere si ottiene il lavoro per unità di massa che risulta di 224.549 J/kg.

Poiché i 18.000 W frigoriferi del nostro confronto si ottengono, come già visto, con 0,01654 kg/s di Ammoniaca, la potenza assorbita dal compressore sarà:

$$P = 224.549 \times 0,01654 = 3.714 \text{ W}. \quad (9)$$

Facendo il rapporto tra la (9) e la (3) si ottiene:

$$\rho = 3.714 : 59,3 = 62,6. \quad (10)$$

La (10) ci dice che la potenza teorica necessaria al compressore frigorifero classico, a parità di resa frigorifera, è 62,6 volte maggiore di quella della pompa del sistema GA della Robur.

Il lettore si sarà accorto che il valore del lavoro di compressione per unità di massa (224.549 J/kg) era leggibile, con buona approssimazione, sulla parte di grafico pressione-entalpia riportato in Figura 5.

Infatti la differenza di entalpia tra il punto A ed il punto B di inizio e fine compressione è proprio di  $1.919,3 - 1.694,8 = 224,5$  kJ/kg (la qual verifica ci ripaga della fatica tutta scolastica, ma salutare, di avere calcolato per via teorica lo stesso valore).

## 5. Conclusione.

Abbiamo descritto i principi fisici e le peculiarità dei cicli ad assorbimento dedicando particolare attenzione al Ciclo Compound realizzato dal Robur GA.

Ci premeva spiegare in modo chiaro, ma anche rigoroso, le caratteristiche salienti ed originali di tale ciclo spiegando il perché della modesta potenza elettrica necessaria.

Abbiamo visto che l'accorgimento fondamentale consiste nell'adottare il fenomeno dell'assorbimento per condensare una seconda volta il fluido frigorifero e, quindi, pomparlo allo stato condensato.

In generale, posto che sia disponibile qualunque forma di energia primaria (elettrica o da combustibile), il criterio di scelta di una macchina frigorifera si baserà sia sul tempo di ritorno dell'investimento (ROI) che su criteri propriamente ecologici, a cominciare dall'impatto ambientale: ci sembra che il GA offra prospettive veramente originali ed interessanti sotto tutti gli aspetti.

L'ultimo modello (GAX), dotato di dispositivi meccanici che ne semplificano l'installazione, di accorgimenti termici che ne aumentano il COP e di un efficiente microprocessore di controllo, regolazione e diagnosi, è degno di ricevere le attenzioni dei progettisti più attenti e sensibili capaci di sfruttare appieno le particolarità del sistema ad assorbimento "Compound".

*Dedica: Questo lavoro è dedicato all'imperitura memoria del Prof. William Zussino, emerito professore di Meccanica e Macchine all'I:T:I: Arturo Malignani di Udine (anni 1950!...).*