Appunti di Fisica Tecnica

Capitolo 18 - Sistemi ad assorbimento

Introduzione 1
Funzionamento di una macchina frigorifera ad assorbimento 2
Macchina ad acqua-bromuro di litio 4
Macchina ad acqua-ammoniaca 5
Prestazioni 6
Miglioramenti *7*

INTRODUZIONE

Abbiamo in precedenza già osservato che una macchina che opera secondo un ciclo inverso è caratterizzata da un bilancio negativo di energia meccanica: ciò significa che la macchina, complessivamente[1], assorbe lavoro dall'esterno e lo utilizza per determinati scopi. Le **macchine ad assorbimento** fanno proprio parte della famiglia di macchine che operano secondo un ciclo inverso: *il lavoro assorbito dall'esterno viene in questo caso utilizzato per trasferire calore da una sorgente a temperatura più bassa verso una sorgente a temperatura più alta.*

Il motivo per cui questo trasferimento di calore richiede un dispendio di energia (meccanica) è noto: il secondo principio della termodinamica (nonché l'esperienza comune) dice infatti che non può avvenire spontaneamente il passaggio calore da una sorgente fredda ad una calda.

In generale, data una macchina che opera secondo un ciclo inverso, sappiamo già che essa può svolgere due distinte funzioni:

- essa si comporta da **macchina frigorifero** quando è finalizzato alla sottrazione di calore da una sorgente a bassa temperatura;
- si comporta invece da **pompa di calore** quando è finalizzata alla somministrazione di calore ad una sorgente ad alta temperatura.

Possiamo però osservare due cose:

- la prima riguarda le pompe di calore: nel campo della somministrazione di calore ad alta temperatura, le pompe di calore sono sicuramente delle macchine molto sofisticate ed spesso economiche, ma devono comunque confrontarsi con le caldaie di tipo tradizionale, concepite per bruciare nel modo migliore il combustibile al fine di sviluppare calore;
- per quanto riguarda, invece, la sottrazione di calore a bassa temperatura, le macchine frigorifere sono l'unica alternativa possibile.

[1] Diciamo "complessivamente" in quanto non è detto che tutte le trasformazioni di cui il ciclo si compone comportino assorbimento di lavoro dall'esterno: possono esserci anche trasformazioni a lavoro nullo (ad esempio quelle a volume costante e senza lavoro di elica) oppure a lavoro positivo (ad esempio l'espansione di un gas in un sistema cilindro-pistone), ma l'importante è che la somma algebrica delle varie quantità di lavoro risulti negativa.

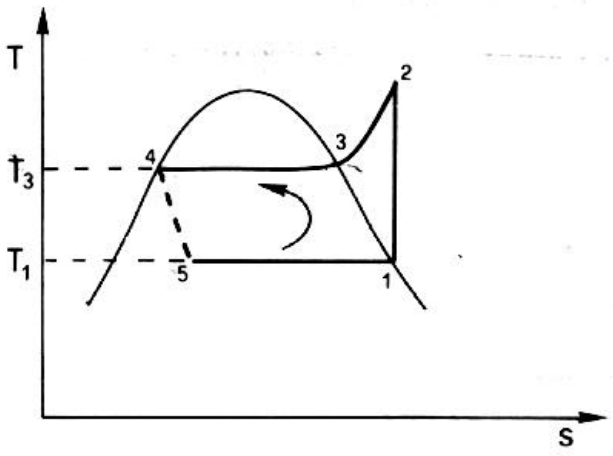
Consideriamo allora una macchina frigorifera: l'esempio classico di questo tipo di macchina è il **frigorifero domestico**, collegato alla rete di distribuzione elettrica. Il frigorifero domestico è una macchina a compressione di vapore, le cui caratteristiche sono state già in precedenza descritta: l'energia meccanica necessaria alla compressione del vapore viene in questo caso fornita da un motore elettrico.

Ci sono però almeno altri due modi per produrre freddo:

- un primo modo consiste nell'utilizzare il calore proveniente direttamente da un processo di combustione;
- un secondo modo consiste invece nell'usare il calore fornito da un fluido caldo: in questo caso, si impiega una **macchina ad assorbimento**.

FUNZIONAMENTO DI UNA MACCHINA FRIGORIFERA AD ASSORBIMENTO

La **macchina frigorifera ad assorbimento**[2] sfrutta le caratteristiche termodinamiche delle miscele binarie (formate cioè da due componenti). Per descriverne il funzionamento, partiamo dal ciclo a compressione di vapore descritto precedentemente. Nella figura seguente è riportato tale ciclo nel diagramma *T,s*:

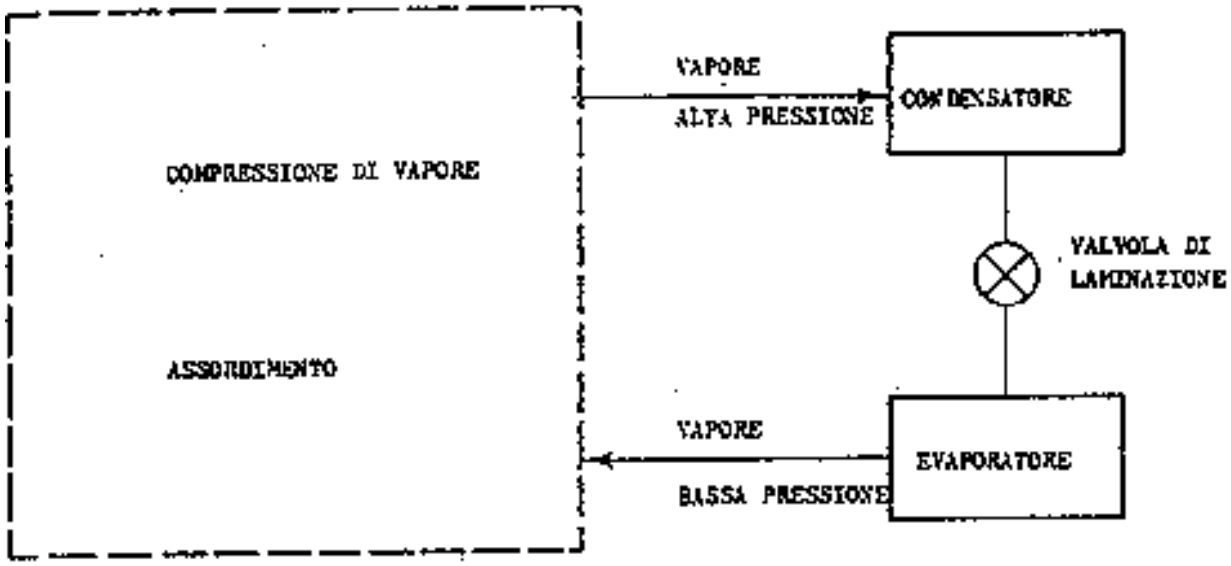


Ripetiamo velocemente la descrizione del ciclo:

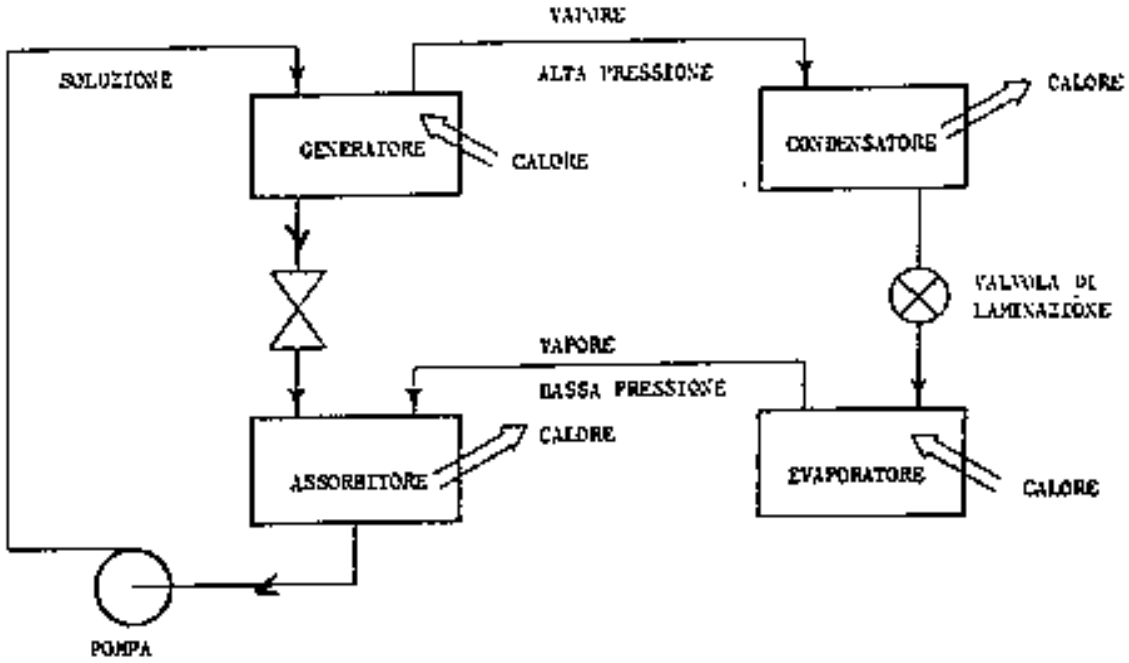
- il fluido evolvente viene inizialmente prelevato dall'**evaporatore**, E, nello stato di vapore saturo e secco alla pressione p_1 ed alla temperatura T_1 (stato 1);
- esso passa quindi nel **compressore**, C, che lo comprime (elevando la sua temperatura da T_1 a T_2) fino alla pressione p_2; il vapore è diventato adesso vapore surriscaldato (stato 2);
- tale vapore surriscaldato passa nello **scambiatore**, Co, dove subisce due distinte trasformazioni: prima viene desurriscaldato (2→3) fino alla temperatura T_3 e poi viene condensato (3→4) a temperatura costante; a questo punto il fluido è un liquido saturo (stato 4);
- tale liquido saturo viene laminato (cioè subisce un abbassamento di pressione) nella **valvola di laminazione**, V, fino a diventare vapore saturo (stato 5) da ri-inviare all'evaporatore (che deve eliminare tutta la fase liquida, cioè aumentare quanto più è possibile il titolo della miscela) per riprendere il ciclo

[2] Fu brevettata per la prima volta nel 1860

Ora, la macchina frigorifera ad assorbimento opera conservando, di tale ciclo, i processi di condensazione (che avviene nello scambiatore), laminazione (nella valvola di laminazione) ed evaporazione (nell'evaporatore); al compressore viene invece sostituito un particolare complesso costituito da un **assorbitore** e da un **generatore**, come mostrato nella figura seguente:



Il complesso appena mostrato serve a trasformare il vapore a bassa pressione in ingresso in vapore ad alta pressione in uscita. Nel dettaglio, lo schema a blocchi di questa trasformazione è il seguente:



Come si nota, il vapore a bassa pressione proveniente dall'evaporatore non viene più compresso meccanicamente, come avveniva nel *ciclo a compressione di vapore*, ma viene inviato al cosiddetto **assorbitore**: questo dispositivo sottrae calore al vapore e fa si che quest'ultimo venga immagazzinato in una miscela inizialmente povera. Una volta che è stata arricchita, la miscela viene prelevata da una pompa e inviata ad un **generatore**: questo si comporta inversamente all'assorbitore, in quanto richiede calore per produrre vapore ad alta pressione, che fluisce nel

condensatore, e soluzione nuovamente povera, che viene rinviata nell'assorbitore mediante una valvola di laminazione.

Il resto del ciclo (condensazione nel condensatore ed evaporazione nell'evaporatore) è identico a quello della macchina a compressione di vapore.

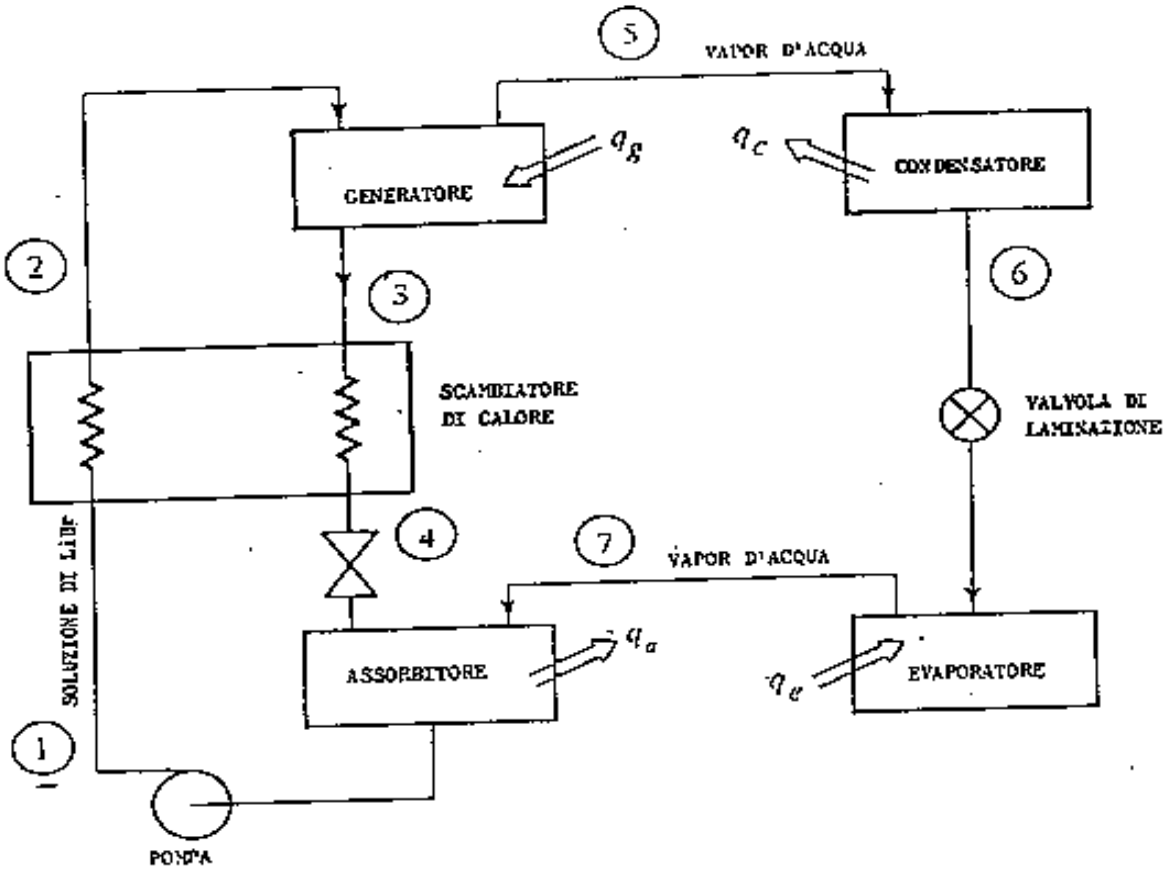
MACCHINA AD ACQUA-BROMURO DI LITIO

Per quanto riguarda le soluzioni impiegate in questo tipo di macchine, le principali sono acqua-ammoniaca e, soprattutto, **acqua-bromuro di litio**. Cominciamo da quest'ultimo tipo.

Il fluido refrigerante (cioè il soluto) è l'**acqua distillata**[3], che ha una serie di pregi: è stabile, non è tossica, è facilmente reperibile ed ha un alto calore latente di evaporazione (pari a 2256 kJ/kg). Ci si potrebbe meravigliare del fatto che l'acqua sia usata come fluido frigorigeno, dato che si è abituati ad osservarne l'ebollizione a circa 100°C; in realtà, questo avviene sono ala pressione atmosferica, mentre invece, a basse pressioni, la temperatura di ebollizione si avvicina a 0°C (ricordiamo che il punto triplo dell'acqua corrispondente a T=0.01°C e p=611 Pa).

La sostanza assorbente, che si comporta cioè da solvente, è invece il **bromuro di litio** (LiBr): si tratta di un sale cristallino con grande affinità per l'acqua, con alto punto di ebollizione e non tossico.

Vediamo adesso lo schema dettagliato di una macchina frigorifera ad assorbimento operante con miscela di acqua (soluto) e bromuro di litio (solvente):



[3] Il fatto che l'acqua venga utilizzata come fluido refrigerante suggerisce una osservazione importante: dato che l'acqua cristallizza quando la temperatura scende al di sotto degli 0°C, queste macchine non possono lavorare a temperature inferiori appunto agli **0°C**. Si tratta di una limitazione tutto sommato piccola: infatti, negli impianti di condizionamento dell'aria, non si lavora mai al di sotto degli 0°C, per cui le macchine ad assorbimento trovano ampia applicazione in questo campo.

In questo schema si può subito notare una differenza rispetto allo schema della figura precedente: lo scambiatore di calore. Esso preriscalda il fluido freddo (sarebbe la miscela arricchita) proveniente dall'assorbitore e lo fa per un motivo ben preciso: dato che riduce la quantità di calore necessaria al funzionamento del generatore, esso aumenta l'efficienza frigorifera[4] della macchina.

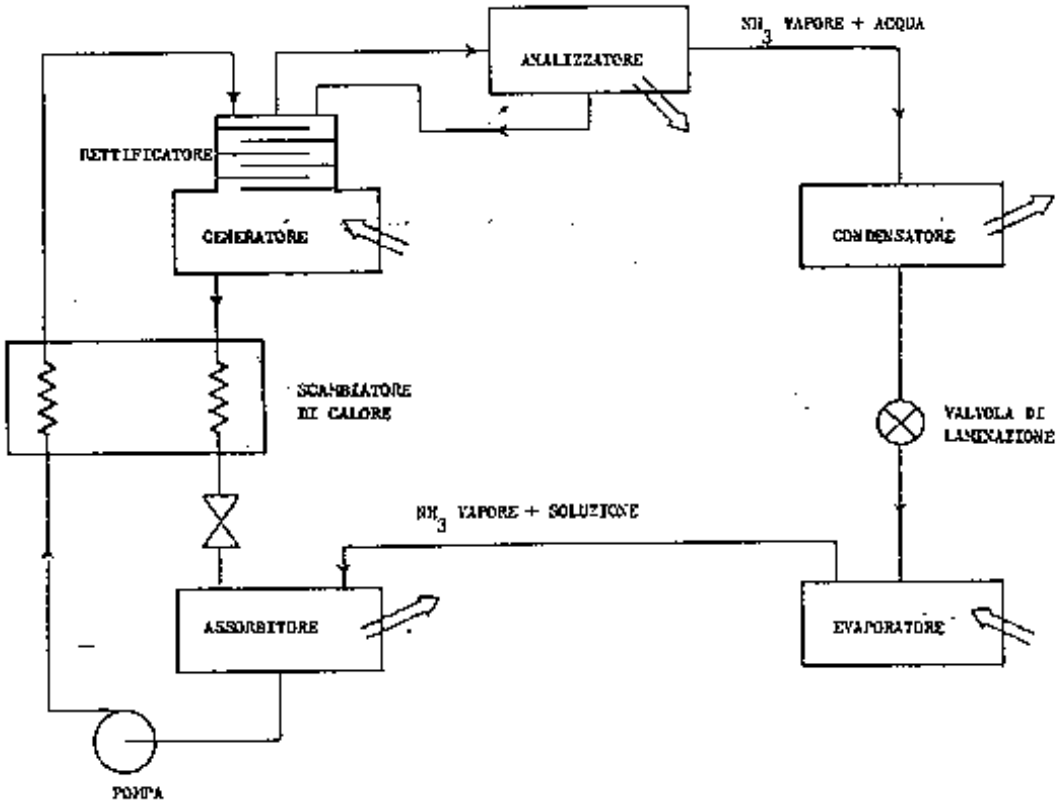
Nel generatore entra una miscela ricca di acqua e bromuro di litio, mentre in uscita abbiamo la miscela impoverita, che ritorna verso l'assorbitore, e vapor d'acqua che va verso il condensatore.

Da un punto di vista realizzativo, è interessante osservare che, nelle macchine costruite commercialmente, spesso il condensatore ed il generatore sono riuniti in un unico recipiente: questo è possibile in quanto i due dispositivi lavorano alla stessa pressione. Per lo stesso motivo, sarebbe anche possibile riunire evaporatore ed assorbitore. Ci sono addirittura delle macchine compatte che riuniscono tutti i componenti in un unico recipiente, ove naturalmente è presente una separazione tra alta e bassa pressione.

MACCHINA AD ACQUA-AMMONIACA

Prima che si diffondesse l'uso della soluzione acqua-bromuro di litio, nelle macchine ad assorbimento veniva impiegata una soluzione di **acqua e ammoniaca**. In queste macchine, l'acqua diventa il fluido assorbente, mentre l'ammoniaca fa da fluido refrigerante[5].

Lo schema di funzionamento è il seguente:



[4] Ricordiamo che l'efficienza ε di un ciclo frigorifero è il rapporto tra la somma di tutte le quantità di calore assorbite ed il valore assoluto del lavoro complessivo del ciclo.

[5] Al contrario delle macchine in cui era l'acqua a comportarsi da fluido refrigerante, in questo caso la temperatura di funzionamento può scendere anche al di sotto di 0°C, dato che l'ammoniaca cristallizza per temperature inferiori.

Rispetto allo schema precedente si evidenziano due nuovi componenti: il rettificatore e l'analizzatore. Il problema è nel fatto che il generatore produce in uscita vapori di ammoniaca misti a vapor d'acqua. Allora, per poter separare quanta più acqua è possibile, si procede nel modo seguente: i vapori provenienti dal generatore vengono inviati nel **rettificatore**, dove incontrano (in controcorrente) la soluzione proveniente dall'assorbitore; dopo di che, essi vengono inviati nell'**analizzatore**, il quale li raffredda, facendo in modo che essi cedano acqua sotto forma di soluzione, che viene inviata nuovamente al rettificatore.

Ad ogni modo, nonostante questi accorgimenti, una certa quantità di acqua sfugge anche all'analizzatore e rimane perciò in circolo.

Possiamo dunque osservare che le macchine ad acqua-ammoniaca presentano più componenti rispetto alle macchine acqua-LiBr, ma hanno il vantaggio di operare a pressione superiore a quella atmosferica.

PRESTAZIONI

Per esaminare le prestazioni di una macchina ad assorbimento, a prescindere dalla miscela usata[6], possiamo cominciare a considerare i flussi di energia termica:

- in primo luogo, c'è del calore ad alta temperatura fornito al generatore;
- c'è poi calore fornito anche all'evaporatore;
- inoltre, per il buon funzionamento della macchina è anche necessario prevedere un raffreddamento sia per condensatore sia per l'assorbitore, che saranno fatti funzionare ad una temperatura tale da poter dissipare il calore nell'atmosfera.

Da queste considerazioni deduciamo che *una macchina ad assorbimento ha bisogno di almeno 3 sorgenti a temperature differenti:* una per il generatore, una per l'evaporatore ed una per il raffreddamento di condensatore ed assorbitore. Rispetto al ciclo a compressione di vapore (dove ne serviva una per il condensatore ed una per l'evaporatore), ce ne vuole dunque una in più.

Premesso questo, per calcolare l'efficienza di una macchina ad assorbimento possiamo schematizzare il sistema con un motore che fornisce energia meccanica ad una macchina frigorifera a compressione di vapore. Con questa schematizzazione, *l'efficienza della macchina ad assorbimento è data semplicemente dal prodotto tra il rendimento del motore e l'efficienza della macchina frigorifera a compressione:*

$$\varepsilon_{\substack{\text{macch}\\\text{assorb}}} = \eta_{\text{motore}} \cdot \varepsilon_{\substack{\text{macch}\\\text{com pr}}}$$

Mediamente, si trova che l'efficienza è dell'ordine di 0.5÷0.7 %.

[6] Possiamo dire sin da ora che i sistemi ad acqua-ammoniaca e quelli ad acqua-LiBr sono generalmente comparabili dal punto di vista dell'efficienza

Miglioramenti

E' possibile migliorare le prestazioni di una macchina frigorifera ad assorbimento, usando sistemi più complessi in cui sia prevista una molteplice generazione di vapore frigorigeno. Consideriamo, per esempio, uno schema con due successive generazioni di vapore, a livelli decrescenti di temperatura: in questo caso, il calore necessario al funzionamento del secondo generatore è fornito dal vapore che inizia a condensarsi prodotto nel primo generatore. In questo modo, si ottiene una maggior produzione di refrigerante, con la stessa somministrazione di calore, il che migliora chiaramente l'efficienza.

Enciclopedia - Il caso più frequente e anche tecnicamente più importante di assorbimento è quello di un gas in un liquido. Non tutti i gas si sciolgono nello stesso modo in un liquido: ad esempio, 1 litro d'acqua, in condizioni normali, può sciogliere 710 litri di ammoniaca, 8 litri di anidride solforosa, 28 cm^3 di ossigeno.

Esiste la **legge di Henry**: la quantità di gas assorbito, a temperatura costante, è direttamente proporzionale alla pressione parziale del gas in equilibrio con la soluzione, purché esso, passando in soluzione, conservi lo stesso stato molecolare (cioè non si associ, non si combini col solvente, non si ionizzi e così via). Questa legge è un caso particolare della cosiddetta **legge di ripartizione**: dati due liquidi insolubili l'uno nell'altro[7], ai quali si aggiunge una sostanza in grado sciogliersi, sia pure parzialmente, in entrambi, il rapporto tra le concentrazioni della sostanza nei due solventi rimane costante al variare della quantità complessiva di sostanza disciolta.

Al fenomeno dell'assorbimento spesso se ne sovrappongono altri: ad esempio, la solubilità eccezionalmente alta presentata dall'ammoniaca si spiega con la reazione che ha luogo tra l'acqua e l'ammoniaca stessa:

$$NH_3 + H_2O \longrightarrow NH_4OH$$

La reazione dà origine a idrato d'ammonio.

Dal punto di vista pratico, l'assorbimento di un gas o di un vapore in un liquido si sfrutta nella depurazione di gas, nel recupero di piccole quantità di solventi presenti nell'aria allo stato di vapore, nella separazione di alcuni componenti di miscele gassose, ecc.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: http://users.iol.it/sandry
succursale: http://digilander.iol.it/sandry1

[7] Dire che due liquidi sono insolubili l'uno nell'altro significa dire che, ponendo i due liquidi in uno stesso recipiente, essi danno luogo ad un sistema bifasico. Questo accade, per esempio, tra l'acqua ed un solvente organico non contenente gruppi idrofili (come il cloroformio, la trielina, gli oli e le benzine).