

# Compressione e verità\*

---

*Roberto Hilfiker*



**Life cycle cost: we always win.**



# Compressione e verità\*

Roberto Hilfiker

*In occasione dei 75 anni Pneumofore, il titolare senior formula alcune considerazioni tecniche, frutto di 40 anni di esperienze personali e ricerche nel settore. Esponendo infatti miti e falsità sul mondo dei compressori d'aria, Roberto Hilfiker discute anche dell'importanza e delle implicazioni pratiche inerenti la progettazione e la produzione di compressori d'aria per un futuro sostenibile. Questo articolo è apparso su pubblicazioni industriali in varie lingue ed è corredato di immagini e diagrammi.*

## Lo sviluppo dei vari tipi di compressori

I primi compressori erano monostadio con compressione pressoché isentropica. Questi furono sostituiti da compressori bistadio con raffreddamento intermedio e con migliore rendimento isotermico (vedi Fig. 1 Diagramma entropico in cui le superfici corrispondono al lavoro svolto), tuttavia con una costruzione meccanica complessa. Problemi, vibrazioni di bassa frequenza, costosa manutenzione. Per queste ragioni i compressori bistadio vengono ora costruiti unicamente per applicazioni speciali.

In tutti i paesi industrializzati vi furono molti costruttori di compressori a pistoni, altrettanto avviene nei paesi emergenti.

I compressori rotativi erano a suo tempo sinonimo di compressore a palette. I primi rotativi erano bistadio con palette in acciaio, contagocce e raffreddamento intermedio. In seguito venne sviluppato il compressore rotativo monostadio con lubrificazione a ciclo chiuso.

Pochi produttori svilupparono i compressori rotativi e li portarono a maturità industriale.

Da circa 35 anni sono apparsi i compressori a vite monostadio ad iniezione d'olio, quali successori dei compressori a pistoni. Dal punto di vista energetico questo cambiamento ha significato non uno, ma due passi indietro.

Il compressore alternativo dispone di fasce elastiche di tenuta, come tutti i motori a scoppio, cioè di una tenuta attiva verso il cilindro, per contro le viti dei compressori a vite non possono toccare la parete del cilindro - una tenuta passiva con perdite e reflussi. La problematica aumenta appena il gioco radiale dei 6 cuscinetti aumenta per usura.

Il ciclo di vita prefissato di un blocco vite definito in 25.000 ore rappresenta uno svantaggio notevole.

È stato più semplice acquistare blocchi vite piuttosto che sviluppare ulteriormente il rotativo. Ne deriva che la maggioranza di chi "produce" compressori a vite è effettivamente assemblatore di componenti. L'utente dovrà successivamente a proprie spese individuare la provenienza dei vari blocchi vite nei suoi compressori.

Gli unici a sopravvivere sono stati i compressori rotativi a palette, i quali sono stati continuamente rinnovati e migliorati negli anni.

In Europa, oltre Pneumofore, figurano, in ordine alfabetico, quali produttori di successo di compressori a palette, la Hydrovane, la Mattei e la Wittig.

## Lo sviluppo del compressore rotativo a palette

All'inizio del secolo scorso Wittig realizzò il compressore rotativo a palette a 7 ate con raffreddamento intermedio. Una dozzina di aziende in Europa e oltreoceano adottarono il sistema e produssero per decenni compressori rotativi bistadio con contagocce e 24 palette in acciaio.

Nel 1927, cioè 80 anni or sono, la Pneumofore ha sviluppato e messo a punto il primo compressore, a livello mondiale, rotativo monostadio con iniezione d'olio dotato di 15 palette in alluminio (Fig. 2 Compressore A12, 156 m<sup>3</sup>/h, 7 bar, 25 PS).

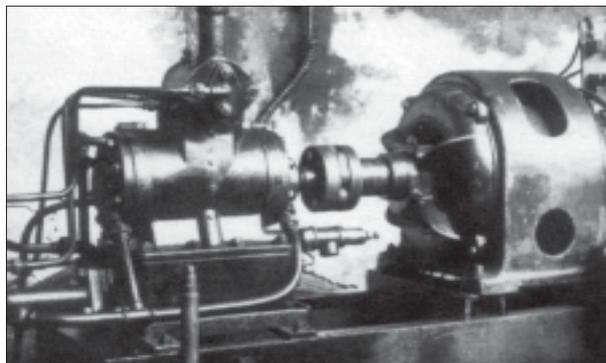


Fig. 2 - Il primo compressore rotativo monostadio ad iniezione d'olio dell'anno 1927. Pneumofore mod. A12, 25 CV, 7 bar.

Già nel 1930 Pneumofore ottenne il suo primo brevetto internazionale per il sistema di separazione dell'olio. Negli anni successivi furono sviluppati continuamente modelli maggiori con unità fino a 400 kW, che lavorano tuttora da decenni e sopravvivono vita e morte dei compressori alternativi bistadio.

Oltre 60 anni fa in Inghilterra fu sviluppato ad uso bellico un nuovo compressore rotativo raffreddato ad aria con 8 palette in ghisa e con modulazione di portata.

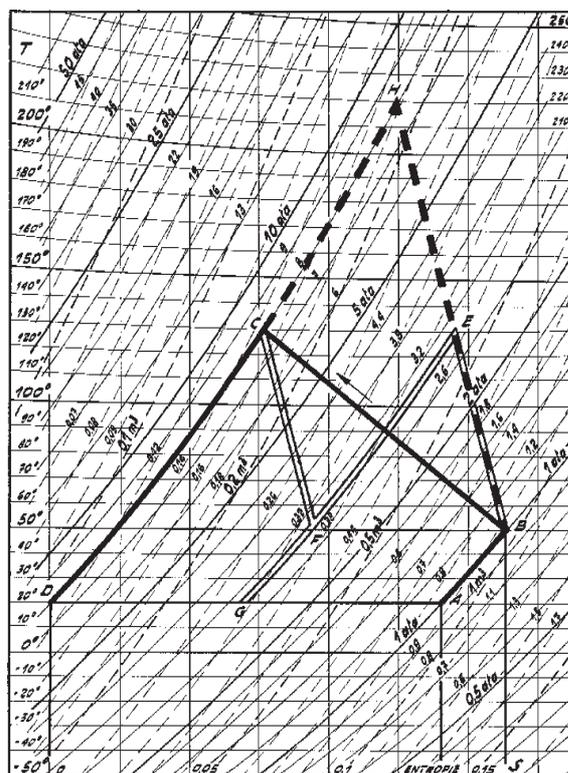


Fig. 1 - Diagramma entropico con ciclo di compressione di compressore monostadio e bistadio con raffreddamento intermedio e del compressore monostadio ad iniezione d'olio.

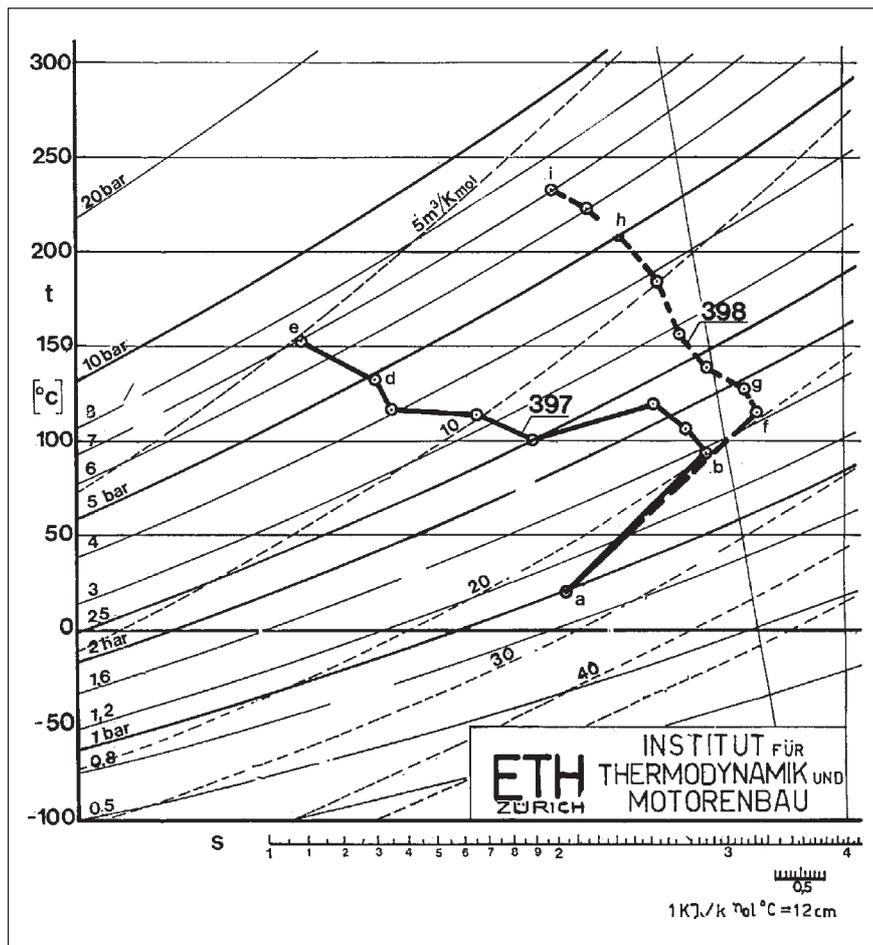


Fig. 3 - Diagramma entropico. Misurazione con piezoquarzi; 398 iniezione olio tradizionale; 397 iniezione olio intensiva

La collaborazione della Pneumofore con politecnici stranieri per un'approfondita ricerca di base comportò un'innovazione rivoluzionaria nell'ambito dei compressori d'aria. Il sistema di iniezione intensiva di olio è l'unica innovazione degli ultimi decenni, che interviene positivamente nel ciclo termodinamico di compressione (Fig. 3 Diagramma entropico). Il raffreddamento per iniezione intensiva è ben spiegato dalla definizione di iniezione a spazzola: numerosi e finissimi getti di olio raffreddano l'aria nella zona di massimo aumento di pressione.

Nei compressori a vite l'iniezione d'olio avviene normalmente con fori assiali di 6-8 mm. Contrariamente ad altre affermazioni, in questo caso non avviene alcuna polverizzazione dell'olio, in quanto il rapporto delle pressioni è troppo esiguo.

L'olio serve quindi principalmente alla tenuta ed alla lubrificazione tra le viti e minimamente al raffreddamento dell'aria in fase di compressione.

Ulteriori ricerche di base portarono alla constatazione che grandi unità di compressione rotative a palette sono più affidabili rispetto a grossi gruppi vite. La spiegazione è da ritrovarsi nelle correlazioni geometriche-termiche: nel compressore a palette infatti, l'aria aspirata e compressa attraverso il cilindro perpendicolarmente rispetto all'asse di rotazione e le deri-

vanti deformazioni termiche lineari sono facilmente compensate dalle palette a tenuta attiva. Nel compressore a vite invece, l'aspirazione avviene ad una estremità del cilindro e la mandata diagonalmente sul lato opposto. Il percorso diagonale dell'aria compressa riscalda e deforma il cilindro irregolarmente, per cui le viti subiscono perdite radiali aggiuntive.

### Il contributo della Pneumofore allo sviluppo dei compressori rotativi

Il confronto energetico relativo al consumo di energia elettrica fra i compressori monostadio ed i compressori alternativi bistadio significò una grande sfida per Pneumofore. Questa sfociò dopo anni di ricerca di base in stretta collaborazione con l'ETH di Zurigo nello sviluppo e nella realizzazione del raffreddamento ad iniezione intensiva (Fig. 5).

Ripetute misure confermarono che nella zona dell'iniezione intensiva la compressione è isoterma. Anche con limitate conoscenze termodinamiche, risulta evidente il notevole risparmio di energia. Inoltre basse temperature dell'aria compressa all'uscita dal cilindro, radiatori olio di notevole superficie che assicurano un raffreddamento straordinario dell'olio, nonché gli eccezionali risultati nella preseparazione, sono le basilari premesse per una disoleazione ottimale. Basse temperature comportano

grandi gocce d'olio facilmente recuperabili.

L'andamento di compressione pressochè isoterma nella zona di intervento dell'iniezione "a spazzola" dimostra chiaramente il risparmio di energia che ne deriva.

Pneumofore produce oggi unicamente compressori rotativi a palette monostadio raffreddati ad aria con unità fino 250 kW e pompe per vuoto con tecnologia d'avanguardia. Abbondanti scambiatori di calore permettono il normale esercizio continuo a pieno carico anche oltre 40°C di temperatura ambiente (Fig. 6). In pratica il sistema Pneumofore a tenuta attiva sostiene bene il confronto con i compressori a vite, soprattutto se si considera un esercizio per un periodo di alcune decine di migliaia di ore.

Anche la disposizione verticale applicata dal 1970 fino ad oggi con unità raffreddate ad aria rappresenta una soluzione pionieristica. Oltre al minor ingombro, qualità che negli anni aumenta di importanza, la disposizione ad asse verticale permette l'uso di estesi radiatori olio e aria, mantenendo la marcia a vuoto al 12% di potenza assoluta a carico.

### Annebbiamento anziché informazione

I primi blocchi cilindro vite con profilo asimmetrico vennero decantati per un aumento di rendimento del 16%. Effettivamente si trattava di un aumento di volume aspirato, ben distante da un aumento del rendimento globale in questa percentuale.

Un secondo, intenzionale, annebbiamento avviene con l'indicazione della portata effettiva tramite il sistema in uso da decenni, attraverso la misura del volume all'uscita del compressore. Questo sistema era giustificato per i compressori alternativi a causa del flusso d'aria pulsante. La norma tedesca DIN 1952 stabilisce chiaramente che la portata effettiva è uguale al volume aspirato.

La misurazione prescritta dalle norme Pneurop e ISO all'uscita del blocco cilindro rispettivamente all'uscita dell'unità compressori comporta una valutazione con molti coefficienti, moltiplicatori, divisori ecc., ecc. Dov'è il problema? La pressione si distribuisce

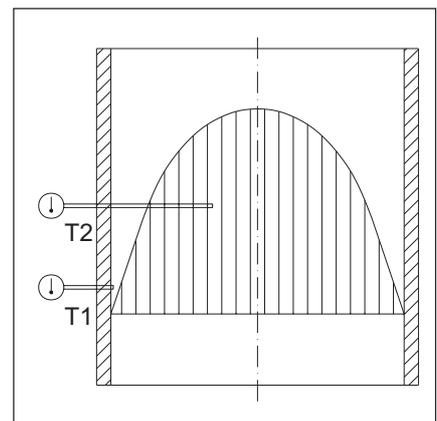


Fig. 4 - Flusso laminare in tubo rotondo. T1 misura sulla periferia; T2 misura nel flusso principale



Fig. 5 - Sezione del compressore UR26; è visibile il sistema d'iniezione intensiva

uniformemente sulla sezione del tubo ed è misurabile con precisione, cioè analogamente alla pressione barometrica. Per contro, la temperatura si distribuisce nel tubo parabolicamente in maniera analoga alla velocità (Fig. 4). Vicino alla parete vengono misurate p.e. 40°C (T1), ma all'interno del tubo la temperatura supera facilmente 70-80°C (T2). In condizioni isobariche il volume dell'aria varia dell'1% ogni 3 gradi di variazione di temperatura. Quindi, se la temperatura dell'aria compressa viene misurata in 40°C, ma l'effettiva temperatura ammonta a 70°C, vengono - liberamente secondo le norme - simulati 10% in più di portata.

I dati misurati devono essere successivamente riportati con formule e coefficienti alle condizioni atmosferiche per cui, strada facendo, è possibile aggiungere altri coefficienti per un ulteriore "make-up".

### Boom dei compressori ad inverter

Nel dimensionamento di ogni macchina che vuole contenere i consumi, i parametri vengono adattati in modo che nel punto di utilizzo si ottenga un rendimento specifico ottimale. Con numero di giri o con pressione d'esercizio superiori od inferiori, la potenza specifica aumenta.

Per quale ragione i compressori ad inverter vengono tanto glorificati?

L'inverter risolve per i compressori a vite due problemi in una volta sola:

- la limitazione costruttiva a 6-8 avviamenti/ora.
- la potenza assorbita a vuoto raggiunge, nella maggioranza delle viti ed in alcuni rotativi a palette, dal 30% e oltre il 40% della potenza a pieno carico.

In merito ad a) - Nei compressori a vite ad iniezione d'olio, la vite principale spinge la vite secondaria per attrito. Dato che il numero dei denti è disuguale, si forma fra le viti un

movimento assiale. Ad ogni avviamento la vite principale dà un brusco colpo alla vite secondaria, attutita in parte dal velo d'olio.

L'esigenza di limitare gli on/off a 6-8 volte/ora si basa sull'esigenza di somministrare alle viti, ed ai cuscinetti, un numero contenuto di colpi. Anche con limitate conoscenze tecniche risulta evidente che questi colpi col tempo hanno pesanti conseguenze meccaniche.

In merito a b) - La gestione della marcia a vuoto distingue chiaramente i "newcomer" (viti) dai moderni "oldtimer" (palette). Grazie alla ridotta velocità di rotazione a vuoto dei viti con inverter, la potenza a vuoto scende da 40% a 25% della potenza a carico. Moderni compressori rotativi a palette si accontentano della metà: 12%.

Un'ulteriore soluzione della problematica a) e b) è la "turnvalve". Questa riduce gradualmente la portata, limita il numero di on/off, ma abbassa il rendimento specifico.

Le pompe a vuoto sono normalmente del tipo a palette in quanto dispongono di una tenuta attiva. I compressori rotativi a palette, girando a vuoto, diventano infatti delle pompe a vuoto e quindi realizzano la necessaria circolazione d'olio. Anche su questo punto la Pneumofore dispone di una preziosa pluridecennale esperienza.

I compressori a vite, ed alcuni a palette, non vanno mai a vuoto, ma continuano a comprimere a circa 2 bar per assicurare la lubrificazione delle parti rotanti: ne deriva l'elevata potenza assorbita a vuoto. Durante la marcia a vuoto la pressione dell'olio deve anche lubrificare i cuscinetti assiali.

Modificando il numero di giri la circolazione dell'olio resta costante per cui affluisce al cilindro olio in quantità insufficiente oppure sovrabbondante. Troppo olio comporta il suo schiacciamento, cioè più potenza specifica assorbita, mentre olio insufficiente comporta temperature di compressione più alte.

Evidentemente sia teleruttori che motori elettrici, p.e. a 20 avviamenti/h, si guastano. In queste condizioni il compressore rotativo a palette non subisce guasti meccanici.

La regolazione del numero di giri permette di mantenere costante la pressione nell'impianto, condizione in alcuni casi importante.

Un notevole risparmio di energia resta comunque anche in questo caso un desiderio, purtroppo molto distante dalla realtà.

### Cosa significa ecologia

Molti ne parlano, ma pochissimi operano in tal senso.

Questa valutazione vale anche per i costruttori ed assemblatori di compressori a vite. Un chiaro esempio è stata la Fiera di Hannover nel 1994, dove furono presentati numerosi compressori a vite con iniezione d'acqua.

Perché Pneumofore non ha seguito la stessa strada? Perché l'iniezione ad acqua è un'idea vecchia, senza possibilità di futuro, e secondariamente perché l'acqua, superando i 100°C,

assorbe 80 Kcal/lit per l'evaporazione. Di conseguenza, questa novità alla fiera di Hannover 1997 sparì. Presentare innovazioni insufficientemente testate è meno faticoso che applicare in modo ottimale le leggi della fluidodinamica, della termodinamica ed applicare una specifica esperienza.

Compressori troppo compatti ottengono scarsi risultati nella disoleazione: la qualità richiede più dispendio e maggiori costi.

Oggi la maggior parte dei compressori industriali sono raffreddati ad olio. A questo punto inizia l'arte di rimuovere l'olio dall'aria compressa con pochi e semplici accorgimenti.

L'olio si presenta quale flusso di gocce grandi e piccole di aerosol. L'aerosol si forma nei compressori con scarso raffreddamento, piccoli radiatori olio e con l'aumento del gioco radiale delle viti rispetto al cilindro (aumento dell'aerosol da 2 a 3 ordini di grandezza). Basse temperature di compressione richiedono una perfetta tenuta nel vano di compressione, p.e. con iniezione d'olio ottimizzata durante il ciclo di compressione, oppure con compressione bi-stadio con efficiente raffreddamento intermedio. Occorre tenere presente che il termometro piazzato nell'uscita del cilindro non misura la temperatura dell'aria compressa, bensì quella dell'olio, in quanto questo aderisce al sensore mentre l'aria calda passa oltre.

Come già accennato, la Pneumofore si occupava intensamente già nel 1930 della separazione dell'olio nei compressori ad iniezione d'olio: un cumulo di esperienze che permise alla Pneumofore di mantenere una posizione di prestigio unico fin dal 1930. Il raffreddamento ad iniezione intensiva comportò un notevole salto in avanti nella separazione dell'olio. Temperature inferiori di 50°C comportano gocce d'olio più grandi che possono essere trattenute, mentre l'aerosol, dovuto alle alte temperature delle viti, non sono trattenibili dagli usuali disoleatori.

Gocce d'olio di diametro superiore possono essere trattenute per centrifugazione e forze gravitazionali. Per disporre di grosse superfici di scambio calore si è scelta in alcuni casi la costruzione verticale: contemporaneamente si è potuta agevolare la preseparazione dell'olio.

L'ecologia richiede inoltre il risparmio di energia e questo non solo sulla carta, fin troppo paziente. Il raffreddamento ad iniezione d'olio intensiva è l'unico ed il più semplice sistema per influenzare termodinamicamente il ciclo di compressione. È visibile sul diagramma entropico (Fig. 3) che nella zona di intervento dell'iniezione intensiva la compressione ha un percorso praticamente isoteramico.

L'accoppiamento diretto coassiale elastico tra motore e compressore rende l'unità più costosa e la gamma più ristretta, in quanto ogni blocco cilindro può utilizzare un'unica grandezza/motore. Positivo è comunque l'accoppiamento diretto senza perdite e senza manutenzione.

L'azionamento a cinghie applicato nei compressori a vite fino ad unità da 400 kW permet-

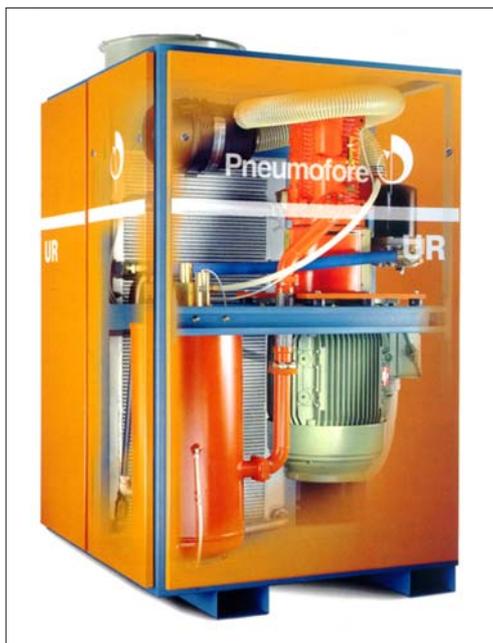


Fig. 6 - Compressore UR9, 35 - 55 kW

te all'assemblatore di produrre unità con portate differenti utilizzando lo stesso blocco cilindro e cambiando solo il diametro delle pulegge. Tuttavia, la perdita dell'azionamento a cinghie è del 2-4%, valore che incide maggiormente per grandi potenze e che comporta la sostituzione periodica delle cinghie stesse.

Utilizzando lo stesso blocco cilindro da 3000 fino a oltre 6000 giri/min si dimentica che anche il blocco cilindro, questo divoratore di energia, ha una sua velocità di rotazione ottimale, con la minima potenza specifica.

Azionamenti a cinghie offrono alla produzione notevole flessibilità, in quanto, variando il diametro delle pulegge, lo stesso blocco cilindro può essere utilizzato per una serie di compressori con una gamma di portata da 1 a 3. Con sistemi a cinghia perfezionati si può ridurre lo slittamento. Questo perché lo slittamento, seppur ridotto, comunque resta, e, poiché le cinghie trapezoidali non sono tutte della stessa identica lunghezza, permane mediamente una perdita del 3% della potenza totale.

Chi non dovesse crederci, può accertarsi toccando le cinghie dopo una marcia prolungata: se queste sono calde, è confermata la perdita di energia.

Queste valutazioni sono di poco peso per unità da 4 kW, ma incidono molto con unità da 250 kW: 4% di 250 kW sono 10 kW!

### Il risparmio energetico

Costruttori di compressori attenti ai problemi energetici utilizzano unicamente motori elettrici con accoppiamento diretto, costruiscono solo unità raffreddate ad aria ed usano una regolazione di pressione "risparmiosa". In questo contesto la Pneumofore è decisamente orientata verso la soluzione di problemi ecologici e di risparmio energetico.

Pochissimi costruttori sono oggi in grado di soddisfare questa serie di esigenze.

### Raffreddamento ad aria o ad acqua?

"Viene dal cielo, risale al cielo". Viviamo sempre con la stessa acqua, che si è formata milioni di anni fa. Gli abitanti della terra sono aumentati decine di migliaia di volte, l'acqua è sempre la stessa, ma sempre più inquinata. Depurare acqua inquinata richiede procedure ed impianti molto costosi. L'umanità ha il dovere di essere parsimoniosa nell'uso dell'acqua e dell'energia.

Troppo sovente sentiamo l'osservazione poco intelligente: "Perché risparmiare energia? Disponiamo di prese di corrente..."

Da oltre un decennio Pneumofore si è prefissata di produrre unicamente compressori industriali e pompe a vuoto raffreddati ad aria. Evidentemente il sistema di raffreddamento ad aria di compressori industriali concepiti per l'esercizio a pieno carico comporta costi maggiori per i

radiatori rispetto ai piccoli scambiatori acqua/olio.

Occorre aggiungere i non trascurabili costi di smaltimento dell'acqua di raffreddamento e di spurgo, che spesso contiene tracce di olio e di metalli.

Acqua calcarea comporta depositi calcarei e sovratemperature; i filtri decalcificatori possono sprigionare ioni liberi che provocano minuscole perforazioni. Torri evaporative operano anche da distillatori (depositi calcarei). Con acqua marina salmastra avviene corrosione ecc. Per di più il costo/mq di acqua, già elevato, aumenterà notevolmente.

Tutto questo depono a favore del raffreddamento ad aria, soluzione che però richiede ampi radiatori olio.

Per ragioni di costo vengono spesso utilizzati radiatori olio troppo piccoli. In estate e nei climi caldi questi compressori lavorano sovente a porte aperte. Compressori raffreddati ad aria moderni sono più facili da gestire in quanto le temperature vengono gestite termostaticamente in modo autonomo (Fig. 6 Compressore UR9, 35 - 55 kW).

### Sistemi di regolazione

Con svariati sistemi di regolazione si tenta in vario modo di risparmiare energia, p.e. con tempi di marcia a vuoto ridotti, "turnvalve", pressione d'esercizio ridotta ed inserimento del più piccolo compressore in grado di fornire il volume d'aria richiesto. Tutte queste soluzioni sono di ordine secondario, non risolvono il problema alla radice. Perché non studiare a fondo il ciclo di compressione primario ed influenzare termodinamicamente il ciclo di compressione? Una costosa e lunga ricerca di base non conduce necessariamente ad immediati successi: è indispensabile infatti una collaborazione armoniosa fra teoria ed esperienza pratica decennale. Si fa presto a dirlo, ma

risulta molto difficile da realizzare nella pratica (Fig. 5 Sezione cilindro UR26).

Gli oltre 85 anni di Pneumofore non sono un traguardo, ma un solido punto di lancio per lo sviluppo dei prodotti, l'ulteriore riduzione effettiva del consumo energetico ed il raggiungimento di un'aria erogata sempre più pura. Lo sviluppo tecnico continuo e l'orientamento verso le esigenze dei clienti saranno anche negli anni futuri una sfida ed una missione per la prossima generazione Pneumofore.

*Roberto Hilfiker ha studiato ingegneria all'ETHZ (Istituto Federale Svizzero di Tecnologia) di Zurigo e ha completato la sua preparazione lavorando presso aziende all'estero, prima di entrare alla Pneumofore, l'azienda fondata da suo padre a Torino. In qualità di Amministratore Delegato della Pneumofore, l'Ing. Hilfiker ha portato la società alla crescita ed al conseguente successo per oltre 50 anni.*

\* Nota dell'autore: Il titolo originale dell'articolo "Verdichten und Wahrheit" è il riferimento all'opera letteraria *Dichtung und Wahrheit* [Poesia e Verità] di Johann Wolfgang von Goethe.



---

fondata nel 1923

**Pneumofore Aria**

**Pneumofore Vacuum**

**Pneumofore Service**

**Plant Engineering**

Azienda certificata ISO 9001 e ISO 14001

---

