

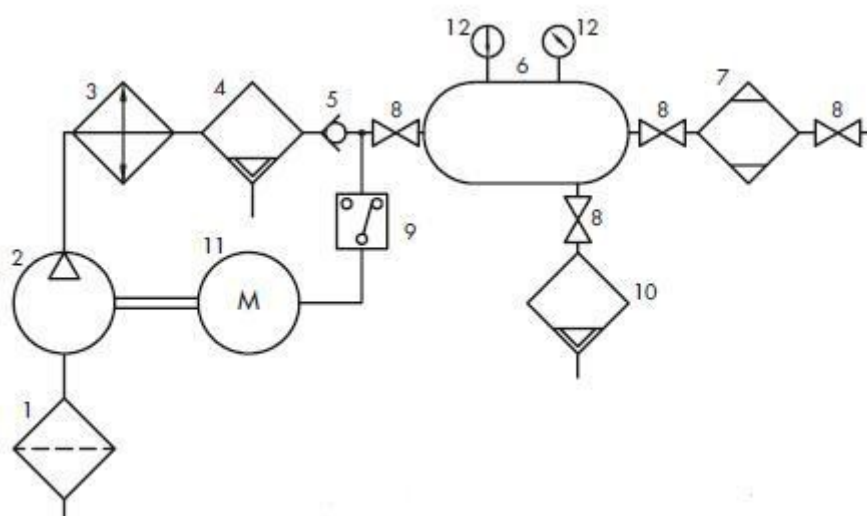
Produzione e trattamento dell'aria compressa

I processi industriali possono venire automatizzati utilizzando aria compressa (sistemi pneumatici), olio in pressione (sistemi oleodinamici) oppure da energia elettrica; tutti questi sistemi permettono il trasporto di energia meccanica ad una certa distanza dalla macchina che la produce. La scelta della tecnologia più adatta dipende dall'entità delle forze in gioco e da molti altri parametri.

Lo studio della *tecnologia pneumatica* comprende lo studio dei sistemi di produzione e trattamento dell'aria compressa; la presenza di polvere e vapore acqueo nell'aria richiede infatti la presenza di un sistema di filtraggio in aspirazione per eliminare le polveri e di uno o più sistemi per eliminare la condensa che viene generata quando si comprime aria contenente una certa percentuale di vapore acqueo; la quantità di vapore acqueo contenuta si può calcolare conoscendo la temperatura e l'umidità relativa dell'aria aspirata (vedere appendice 1).

L'aria compressa viene usata nei processi produttivi nei processi di verniciatura, per la movimentazione di oggetti o per l'azionamento di macchine o loro parti; i vantaggi di tale tecnologia sono dovuti alla disponibilità del fluido e all'affidabilità e scarsa manutenzione richiesta dai dispositivi. L'unico svantaggio evidente consiste nell'impossibilità di generare forze notevoli a causa delle problematiche che si generano quando si superano certi livelli di pressione¹.

Nella figura seguente è rappresentato lo schema di un impianto per la produzione ed il trattamento dell'aria compressa



01	filtro	07	essiccatore
02	compressore	08	valvola di intercettazione
03	scambiatore di calore	09	pressostato
04	scarico di condensa	10	scarico di condensa
05	valvola di non ritorno	11	motore
06	serbatoio	12	manometro e termometro

¹ La pressione viene misurata in pascal (Pa), 1 Pa=1N/m²; nelle applicazioni pratiche viene in genere utilizzato il bar (1bar=10⁵ Pa); in passato si utilizzava l'atmosfera (1atm=1,013bar)

Filtri: vengono utilizzati per eliminare la polvere e le particelle solide che sono sospese nell'aria. Tali elementi sono infatti dannosi per i componenti dell'impianto perchè aumentano l'usura delle parti in movimento e possono intasare i condotti.

I filtri possono essere:

- in carta
- in feltro
- a bagno d'olio
- a labirinto

La scelta del tipo di filtro dipende dalle caratteristiche del sistema e dalle condizioni operative. È importante sottolineare che i filtri a bagno d'olio non devono essere utilizzati nei sistemi in cui non è presente la lubrificazione a olio.

Compressori: i compressori sono macchine operatrici che comprimono l'aria in modo da aumentarne la pressione.

Fra le caratteristiche dei compressori evidenziamo:

- rapporto di compressione: rapporto tra la pressione assoluta² di mandata p_{a1} e la pressione assoluta di aspirazione p_{a0}

$$\beta = \frac{p_{a1}}{p_{a0}}$$

- portata teorica: prodotto della cilindrata per il numero di giri al minuto dell'albero motore. Può essere espressa in m³/min, m³/h, l/min, ecc.
- portata effettiva: è la portata che il compressore fornisce in funzione del rendimento volumetrico
- pressione: viene distinta in pressione di esercizio e pressione di lavoro; la pressione di esercizio è la pressione dell'aria nel serbatoio che dovrà alimentare le tubazioni della rete di distribuzione (7-14 bar); la pressione di lavoro è invece quella fornita agli utilizzatori (in genere 6 bar)

I parametri necessari per la scelta di un compressore sono β (rapporto di compressione), la portata e pressione dell'impianto.

I compressori possono essere classificati in volumetrici (aumentano la pressione di una certa quantità di aria riducendone il volume) e dinamici (impartiscono all'aria velocità e pressione).

I compressori volumetrici si dividono a loro volta in alternativi e rotativi.

Compressori alternativi a stantuffo: sono costituiti da uno stantuffo che, collegato ad un meccanismo biella-manovella mosso da un motore elettrico od a scoppio, compie un moto alternato all'interno di un cilindro. Nella parte superiore del cilindro sono presenti delle valvole automatiche di aspirazione e di mandata collegate ai rispettivi condotti (di aspirazione e di mandata). I compressori alternativi per funzionare correttamente necessitano di essere collegati ad un serbatoio

² La pressione assoluta si ottiene sommando alla pressione relativa la pressione atmosferica (in genere $p_{atm}=1,013\text{bar}$)

dato che il loro funzionamento è intermittente. Questi compressori sono i più utilizzati nelle applicazioni pneumatiche.

Se la compressione è realizzata soltanto su una faccia del pistone il sistema viene definito *a singolo effetto*, se è realizzata su entrambe le facce del pistone viene definito *a doppio effetto*.

Se la compressione è realizzata in un solo stadio il sistema viene definito *monostadio*, se è realizzata in più stadi viene definito *multistadio*; nei compressori multistadio tra uno stadio e l'altro l'aria passa attraverso un refrigeratore che può essere ad aria o ad acqua.

Nella figura seguente è rappresentato il ciclo di lavoro ideale di compressione di un compressore alternativo.



Supponendo uno spazio morto non nullo avremo:

- Aspirazione (A-B): durante il movimento del pistone da sinistra verso destra nel punto A la valvola di aspirazione si apre permettendo all'aria a pressione assoluta p_{a0} di entrare. Al termine della corsa di aspirazione il cilindro è pieno di aria alla pressione assoluta p_{a0} (equivalente alla pressione atmosferica) e la valvole di aspirazione si chiude.
- Compressione (B-C): il pistone ora si muove verso sinistra con entrambe le valvole chiuse. L'aria contenuta nel cilindro viene ridotta di volume con un aumento sia della pressione che della temperatura.
- Mandata (C-D): nel punto C viene raggiunta la pressione assoluta p_{a1} e si apre la valvola di mandata; il pistone continua a muoversi verso sinistra e l'aria viene trasferita nel serbatoio di accumulo fino al termine della corsa (punto D).
- Espansione (D-A): all'inversione del moto inizia la fase di espansione con la chiusura della valvola di mandata e la diminuzione della pressione che scende dal valore p_{a1} al valore p_{a0} che viene raggiunto nel punto A dove riprende il ciclo.

Il ciclo reale differisce da quello ideale appena visto a causa della resistenza all'apertura delle molle delle valvole, delle perdite di carico, dell'inerzia delle valvole e del gas in movimento.

Nei compressori ad solo stadio la temperatura finale nella fase di compressione va rapidamente crescendo al crescere della pressione massima; poichè con l'aumento della temperatura diminuisce il rendimento volumetrico è bene non superare pressioni di 8-10 bar.

Approfondimento: se per motivi tecnici è necessario raggiungere pressioni elevate è necessaria una compressione a più stadi, con un raffreddamento intermedio del fluido che permette di ridurre l'entità del lavoro speso per la compressione stessa. Per una pressione finale nell'intervallo 7-10 bar la compressione si ripartisce in due stadi, al di sopra di tale valore si effettua la compressione in tre ed anche quattro stadi.

Nella compressione in più stadi, il lavoro diventa minimo se ripartito in parti uguali nei singoli stadi; tale scopo si raggiunge quando considerati n stadi, il rapporto di compressione per singolo stadio è costante e pari a

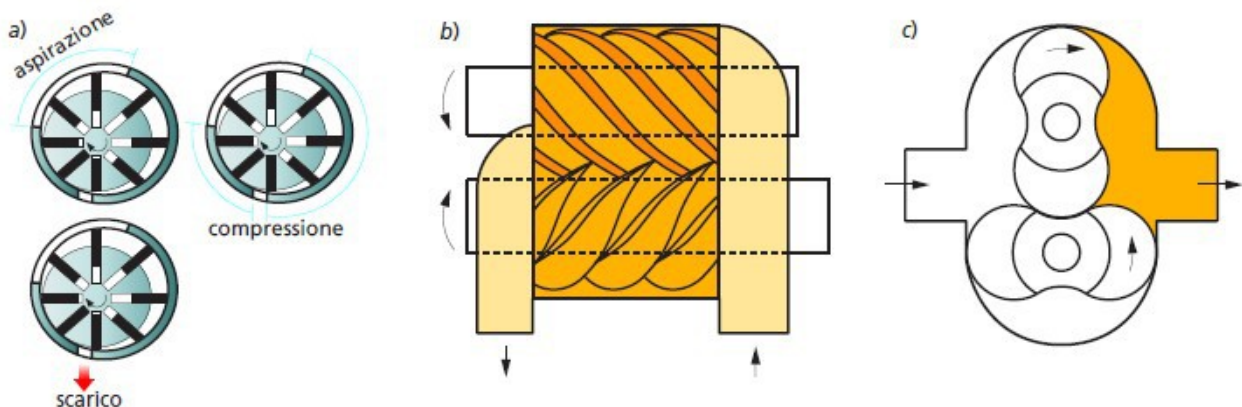
$$\beta = \left(\frac{P_{finale}}{P_{iniziale}} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Ad esempio se vogliamo ottenere una pressione finale $p_{fin} = 9$ bar dividendo la compressione in 2 stadi abbiamo

$$\beta = \left(\frac{P_{finale}}{P_{iniziale}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{9}{1} \right)^{\frac{1}{2}} = 3$$

Compressori rotativi: esistono diversi tipi di compressori rotativi; i più comuni sono i seguenti:

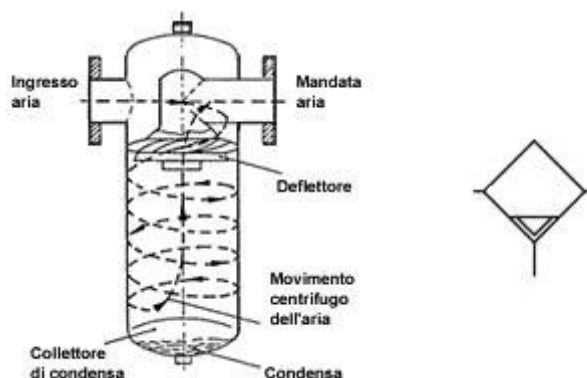
- **A palette** : i compressori di questo tipo sono costituiti da un involucro cilindrico (statore) all'interno del quale ruota eccentricamente un tamburo (rotore) sul cui corpo sono ricavate delle scanalature radiali. In queste scanalature scorrono sottili lamelle di acciaio che durante la rotazione si spostano verso lo statore per effetto della forza centrifuga (figura a).
- **A viti elicoidali** : l'aria aspirata viene compressa grazie alla particolare forma delle viti, che riducono progressivamente il volume e la trasportano da una estremità all'altra, dalla bocca di aspirazione a quella di mandata (figura b).
- **A lobi** : è un compressore poco utilizzato per le modeste prestazioni, produce infatti pressioni fino ad un massimo di 3 bar con scarse portate. Al suo interno sono presenti due ingranaggi rigidamente assemblati su ognuno dei due lobi e liberi di ruotare. Tali lobi ruotando aspirano l'aria e la convogliano dall'ingresso alla mandata. L'accoppiamento tra i due lobi è molto preciso per evitare trafiletti tra ingresso ed uscita. La compressione non avviene nella camera ma nel condotto di mandata; questo spiega la scarsa capacità di fornire pressioni relativamente alte (figura c).



Scambiatori di calore: sono dispositivi utilizzati per raffreddare l'aria in uscita dal compressore; possono essere di diverso tipo, dai più semplici basati su un'alettatura ricavata nel tubo di uscita del compressore fino ai più complessi scambiatori aria-acqua adottati nei grandi impianti.



Separatori di condensa: nell'aria è sempre presente una certa quantità di vapore acqueo; durante la compressione ed il successivo raffreddamento quest'acqua condensa e deve essere eliminata altrimenti provoca danni sia all'impianto che alle attrezzature da esso alimentate; i separatori di condensa possono essere manuali od automatici, in funzione del modo con cui eseguono lo scarico.



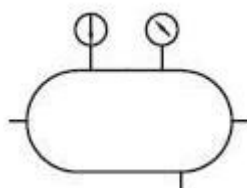
Valvole unidirezionali: sono valvole che permettono il passaggio dell'aria compressa in una sola direzione; in genere vengono poste all'ingresso del serbatoio per impedire che l'aria presente in esso possa ritornare indietro quando il compressore è fermo.



Valvole di intercettazione: sono valvole a sfera posizionate in diversi punti ed hanno l'obiettivo di isolare parti dell'impianto per poter intervenire senza doverlo scaricare per intero.



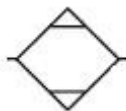
Serbatoio: la presenza di un serbatoio di accumulo evita le variazioni di pressione causate dal funzionamento intermittente e permette di utilizzare l'aria compressa anche con il compressore spento; il serbatoio è sempre dotato di un manometro, di una valvola di sicurezza, di un separatore di condensa e di un pressostato. I serbatoi sono soggetti alle disposizioni di legge relative ai recipienti in pressione alle quali occorre attenersi durante l'installazione e la manutenzione dell'impianto.



Pressostato: è un dispositivo che avvia e ferma il motore che aziona e ferma il compressore in base a valori prestabiliti della pressione dell'aria all'interno del serbatoio.



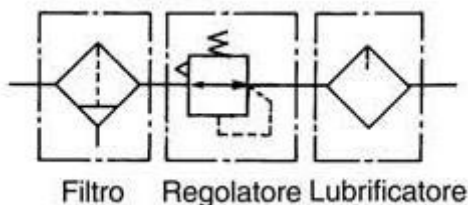
Essiccatore: dispositivo che permette di eliminare il vapore d'acqua ancora presente all'uscita del serbatoio; il suo principio di funzionamento può essere chimico (basato sul fenomeno dell'adsorbimento mediante sali igroscopici) o termico (basato su uno o più cicli di raffreddamento e riscaldamento ripetuti).



Rete di distribuzione: l'aria compressa viene distribuita all'interno degli stabilimenti con dei tubi disposti a maglia od a pettine; i tubi hanno un'inclinazione del 2÷3 % nella direzione dell'aria in modo che la condensa possa raccogliersi nei separatori di condensa presenti in tutti i rami. In prossimità di ogni punto di prelievo dell'aria compressa è presente un gruppo di condizionamento dove sono presenti:

- un *filtro* dotato di separatore di condensa
- un *regolatore di pressione* con manometro
- un *lubrificatore* (solo se le valvole e gli attuatori collegati non sono autolubrificanti)

Talvolta il gruppo di condizionamento viene chiamato FRL, dalle iniziali dei suoi componenti.



Appendice 1: umidità dell'aria

L'aria atmosferica contiene sempre una certa percentuale di vapore acqueo; la quantità massima di vapore acqueo che può essere contenuto in un metro cubo di aria dipende dalla temperatura. Se abbiamo un metro cubo di aria ad una certa temperatura e ad un certo valore di umidità relativa e riduciamo la temperatura il valore dell'umidità relativa può aumentare fino a raggiungere il 100%. Una volta raggiunto il 100% di umidità relativa se la temperatura continua a diminuire si ha la condensazione del vapore sotto forma di goccioline di acqua; il valore di temperatura alla quale l'aria diviene satura di vapore viene detto *punto di rugiada*.

Nella tabella seguente vediamo come varia la quantità massima di vapore acqueo al variare della temperatura

Quantità massima di vapore acqueo in funzione della temperatura			
Temperatura (°C)	g/m ³	Temperatura (°C)	g/m ³
-40	0,18	5	6,86
-35	0,29	10	9,51
-30	0,45	15	13,04
-25	0,70	20	17,69
-20	1,08	25	23,76
-15	1,61	30	31,64
-10	2,37	35	41,83
-5	3,42	40	54,10
0	4,98		

Occorre notare che 1 m³ di aria compressa contiene la stessa quantità di vapore di 1 m³ di aria alla pressione atmosferica.

L'acqua che condensa equivale alla quantità totale di vapore d'acqua presente nell'aria meno il volume che può essere trattenuto dall'aria compressa.

Il vapore condensato deve essere rimosso dall'aria compressa prima che questa venga distribuita per evitare effetti dannosi sui componenti che costituiscono un sistema pneumatico.

Esempio 1: alla temperatura di 25 °C con un umidità relativa del 65% quanta acqua è contenuta in un m³ di aria?

Alla temperatura di 25 °C la massima quantità di vapore che può contenere un m³ di aria è pari a 23,76g; se l'umidità relativa è del 65% in un m³ di aria sarà contenuta una quantità di acqua pari a

$$H_2O_{\text{presente}} = H_2O_{\text{saturazione}} \cdot 0,65 = 23,76 \cdot 0,65 = 15,44 \text{ g}$$