

-
- Handling
 - Machining
 - Assembly
 - Air preparation

FESTO

-
- Pneumatics
 - Electronics
 - Mechanics
 - Sensorics
 - Software

Hesse

Aire comprimido, fuente de energía

Preparación y distribución

-
- Chinese
 - English
 - French
 - German
 - Russian
 - Spanish

**Blue Digest
on Automation**

Hesse

Aire comprimido, fuente de energía

Air preparation
Pneumatics

Stefan Hesse

Aire comprimido, fuente de energía

Preparación y distribución

Blue Digest
on Automation

Blue Digest on Automation

© 2002 by Festo AG & Co.

Ruiter Straße 82

D-73734 Esslingen

Tel. 0711 347-0

Fax 0711 347-2144

Todos los textos, gráficos, imágenes y dibujos contenidos en esta publicación son propiedad de Festo AG & Co. y, en consecuencia, están sujetos a derechos de autor. Queda prohibida su reproducción, tratamiento, traducción, microfilmación, memorización y procesamiento mediante sistemas electrónicos sin previa autorización explícita de Festo AG & Co.

Prólogo

Hay pocas fábricas en las que no se utilice aire comprimido. Los componentes neumáticos se emplean para ejecutar movimientos y son indispensables para la automatización industrial. Una de las aplicaciones más difundidas del aire comprimido es su utilización para el accionamiento de herramientas manuales, tales como martillos, clavadoras, pistolas o destornilladores múltiples. Pero también hay aplicaciones en las que el aire comprimido tiene que cumplir determinadas condiciones específicas. Así sucede, por ejemplo, en las secciones de pintura, en las que el aire no debe contener lubricante; en óptica, por ejemplo, al cortar con rayos láser tiene que utilizarse aire comprimido seco y limpio para soplar la superficie.

Con frecuencia no se toma muy en serio el uso económico del aire comprimido, ya que las fugas que se producen en la red no constituyen peligro alguno. Sin embargo, desperdiciar aire comprimido es desperdiciar dinero!

Por lo tanto, hay muchas razones por las que es recomendable ocuparse no solamente del uso de válvulas, cilindros y unidades de manipulación de tecnología avanzada, sino también de la preparación del aire comprimido utilizado en sistemas neumáticos. La presente publicación tiene la finalidad de ofrecer algunos conocimientos básicos al respecto, ofreciendo informaciones que, con frecuencia, no se tienen en cuenta.

Agradezco la colaboración del señor Frank Schnabel y del ingeniero Ditmar Bruder (Festo) que con sus sugerencias y conocimientos técnicos contribuyeron a la redacción del presente manual.

Stefan Hesse

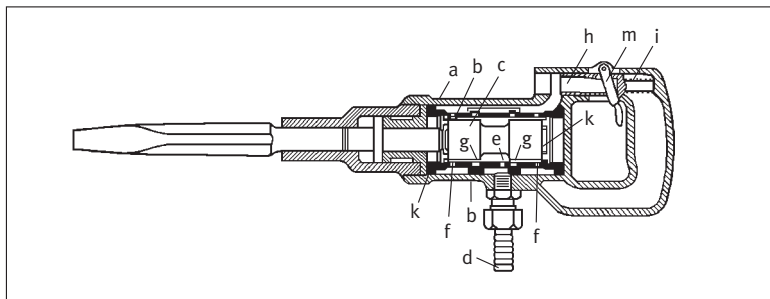
1 El aire comprimido en la industria	9
2 Fundamentos físicos	11
2.1 El flujo	11
2.2 La presión y sus unidades	15
2.3 La humedad del aire	21
3 La preparación del aire comprimido	28
3.1 La calidad del aire comprimido	29
3.2 Procedimientos de secado	31
3.3 Filtración	37
3.4 Lubricación del aire comprimido	45
3.5 Válvulas reguladoras de presión	49
3.6 Unidades de mantenimiento	50
3.7 Unidades intensificadoras de la presión	57
4 La distribución del aire comprimido	60
4.1 Componentes de la red de aire comprimido	60
4.2 Dimensiones de la red	64
4.3 Tuberías y conexiones	72
4.4 Tubos flexibles y conexiones	86
4.4.1 Tipos y propiedades	87
4.4.2 Tipos de conexiones de tubos flexibles	90
4.4.3 Acoplamientos de tubos flexibles	95
4.4.4 Aseguramiento de tubos flexibles	98
4.4.5 Daños en tubos flexibles	98
4.5 Depósitos de aire comprimido	100
4.5.1 Tipos de depósitos y su utilización	101
4.5.2 Dimensiones de los depósitos	102
4.5.3 Normas de seguridad	104
4.6 Las roscas	104
5 Fugas de aire comprimido	107
5.1 Fugas y caídas de presión	107
5.2 Localización de fugas y control	111
6 Sugerencias para ahorrar y controlar	112
Glosario	115
Normas y directivas	119
Bibliografía	121
Índice de términos técnicos	122

1

El aire comprimido en la industria

El aire comprimido es, junto con la corriente eléctrica, la fuente de energía más importante en plantas industriales, talleres y en otros sectores. Aunque en la Edad Antigua ya se sabía que el aire permite transportar energía, las primeras máquinas neumáticas útiles aparecieron sólo en el siglo XIX. Hace unos cien años se publicaron libros sobre “La utilización de aire comprimido en los talleres americanos” (1904) y sobre “El sistema de aire comprimido en el astillero imperial de Kiel” (1904). En esa época se construyeron numerosos tipos de martillos neumáticos, en muchos casos con émbolo percutor con sistema de control propio. Diversos aparatos de carrera corta conseguían ejecutar entre 10 000 y 15 000 movimientos por minuto. Para cincelar y escoplear se utilizaban herramientas que ejecutaban hasta 2 000 movimientos por minuto (fig. 1-1).

Fig. 1-1
El martillo neumático fue la herramienta neumática más utilizada hace un siglo

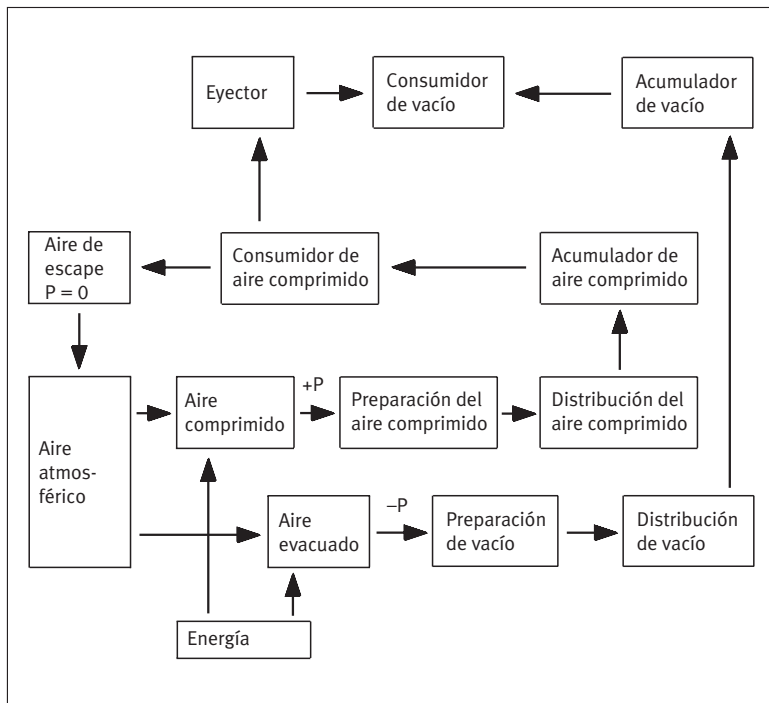


Pero la neumática industrial, tal como la conocemos hoy, sólo empezó a desarrollarse después de 1950, primero en los EE.UU. y posteriormente también en Alemania. La aceptación generalizada que disfrutaban las máquinas neumáticas se explica por varias razones:

- Posibilidad de generar aire comprimido en cualquier lugar y en cantidades ilimitadas
- Gran eficiencia energética, fluidez y transporte sencillo de la energía
- Posibilidad de almacenar el aire comprimido en depósitos que, además, pueden transportarse con facilidad
- El aire comprimido es incombustible y no es inflamable; no existe peligro de explosión
- Por su naturaleza, los componentes neumáticos están protegidos contra sobrecargas
- Mantenimiento y cuidados simples, diseño sencillo de proyectos
- Posibilidad de utilizar varios niveles de presión en función del margen admitido

Esas ventajas son más que convincentes. La mayoría de las empresas industriales disponen actualmente de una red de aire comprimido para utilizar numerosas máquinas y diversos actuadores. El actuador más difundido es el cilindro neumático, empleado para ejecutar movimientos. Pero para que el aire contenga energía, primero hay que transferirle energía. Para ello se utilizan compresores. Hay muchos tipos de compresores: helicoidales, de membrana, rotativos, tipo Roots, de espiral, de turbocompresión, lubricados o secos, con inyección de agua, con refrigeración de aire o agua, etc.. Pero el compresor no es más que la primera estación. El uso de presión y vacío también se puede entender como un sistema de proceso continuo, tal como se muestra en la fig. 1-2.

Fig. 1-2
El aire comprimido, en calidad
de fuente de energía, incluido
en un circuito de proceso
industrial continuo



En este manual únicamente se abordará el tema del aire comprimido, su preparación y su distribución. Estos son los puntos que merecen especial atención, ya que en ellos se puede producir una pérdida de energía que es preferible evitar. Las redes de tuberías constituyen una fuente de pérdidas si están mal tendidas y si no se lleva a cabo un mantenimiento apropiado. Dichas pérdidas pueden originar costos considerables. En ese contexto, deberán tenerse en cuenta los siguientes factores de especial importancia:

- El estado de la red de tuberías. Las fugas, aunque sean pequeñas, pueden resultar muy costosas en el transcurso del tiempo.
- Las dimensiones de los tubos. Si los diámetros de los tubos son demasiado pequeños, es posible que se produzca una caída de presión considerable.
- Las características cambiantes del consumo. Esos cambios exigen una adaptación de la red a las nuevas circunstancias.
- La evacuación del condensado y la preparación del aire. Si los sistemas utilizados con ese fin están anticuados, deben ser sustituidos por soluciones más modernas.

Para conseguir que la presión aumente un solo bar, el consumo de energía aumenta entre 6 y 10 por ciento. Una red en buen estado debería tener un coeficiente de fugas de máximo 10 por ciento. Sin embargo, muchas instalaciones en funcionamiento tienen un coeficiente de fugas entre 20 y 25 por ciento.

2

Fundamentos físicos

El aire comprimido es aire atmosférico sometido a presión, compuesto en un 78% de nitrógeno, un 21% de oxígeno y en un 1% de otros gases (especialmente argón). La presión del aire atmosférico depende de la altura geográfica. Como magnitudes de referencia para la presión y la temperatura del aire suelen utilizarse las siguientes:

$$p_0 = 1,013 \text{ bar y } t_0 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ o } p_0 = 1,013 \text{ bar y } t_0 = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.1

El flujo

El movimiento de los líquidos y de los gases se llama flujo. Estos dos fluidos se diferencian entre sí en la medida en que los líquidos casi no se pueden comprimir, mientras que el volumen de los gases depende en buena parte de la presión. No obstante, los cambios de volumen tienen poca importancia si los gases fluyen a una velocidad inferior que la velocidad del sonido de 340 m/s. Hasta esa velocidad se puede afirmar que el aire tiene un volumen constante. Además, el aire se comporta casi como un gas ideal a temperaturas entre 0 °C y 200 °C y con presiones de hasta 30 bar (sin considerar la fricción interna). Partiendo de estas consideraciones, se pueden aplicar diversas ecuaciones básicas relacionadas con la mecánica de los fluidos. La presión (p), la temperatura (t) y el volumen específico (V_{esp}) son magnitudes que están proporcionalmente relacionadas entre sí. Por lo tanto, tiene validez la siguiente ecuación general:

$$\frac{p \cdot V_{\text{esp}}}{T} = \text{const.}$$

Cuando fluye aire comprimido a través de un tubo, el caudal $\dot{V}$ se expresa en unidades de volumen divididas por unidades de tiempo. Considerando las condiciones de la fig. 2-1:

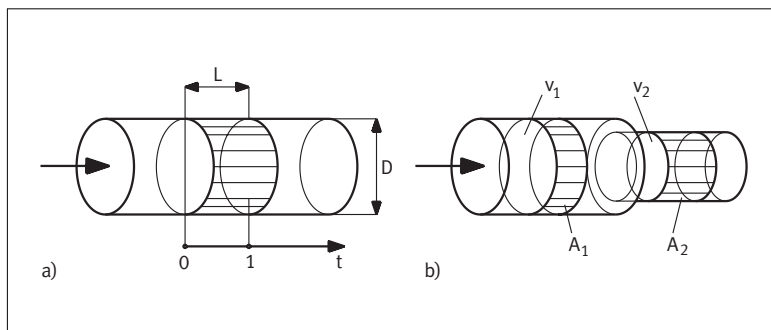
$$\dot{V} = A \cdot L \quad \text{en m}^3/\text{s}$$

A Diámetro interior del tubo en m²; $A = (D^2 \cdot \pi)/4$

L Longitud del segmento de volumen que fluye en un segundo, expresado en m/s

Fig. 2-1
Flujo sin fricción

- a) Caudal por segundo
- b) Caudal al cambiar el diámetro del tubo



Suponiendo que el aire se encuentra en un circuito, también tiene que pasar por la sección de menor diámetro del tubo. En ese caso se aplica la ecuación de continuidad (fig. 2-1b):

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = \dot{V}$$

v Velocidad

Expresado en otros términos, ello significa que las velocidades del caudal son inversamente proporcionales a los diámetros, siempre y cuando no varíe la cantidad del caudal.

En los sistemas neumáticos, el caudal del aire $\dot{V}$ representa el consumo de los actuadores o de los equipos conectados a la red neumática. El caudal se suele expresar en litros por unidad de tiempo. En la tabla 2-1 constan los factores que deberán aplicarse al hacer las conversiones. El caudal se indica por lo general en litros por minuto o en metros cúbicos por unidad de tiempo. El caudal es una referencia para el rendimiento o, para ser más precisos, para el rendimiento necesario. Deberán diferenciarse los siguientes caudales:

- El caudal de un compresor, medido en el lado de aspiración o en el lado de presión
- El caudal de la unidad consumidora, expresada en términos absolutos en función de la demanda o considerando los factores de equilibrio

Si el caudal se expresa en metros cúbicos normalizados por hora (Nm^3/h), siempre está relacionado con una presión $p = 1,013$ bar y una temperatura $t = 0^\circ\text{C}$.

El flujo del aire es laminar si los tubos no tienen elementos perturbadores, aunque el flujo es ligeramente menor junto a la pared interior del tubo que en el centro (fig. 2-2). Cualquier desviación o derivación del tubo, la presencia de válvulas, accesorios o instrumentos de medición provocan remolinos. El índice de Reynolds (O. Reynolds; 1842-1912) indica el límite entre caudal laminar y caudal turbulento. Este índice expresa la influencia que tienen las fuerzas de fricción ocasionadas por los elementos perturbadores del flujo.

Fig. 2-2
Tipos de flujo

- a) Flujo laminar
b) Paso a flujo turbulento
detrás de un elemento
perturbador

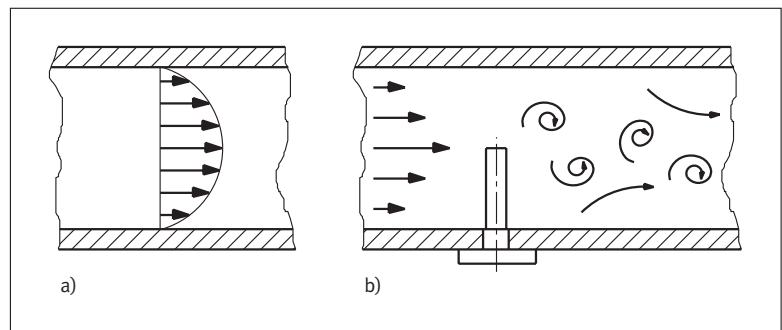


Tabla 2-1
Factores de multiplicación
para la conversión
de caudales

Conversión		Multiplicadores										
a ► de ▼									UK	UK	US	US
	l/s	l/min	l/h	m³/s	m³/min	m³/h	ft³/min	ft³/hour	gal/min	gal/hour	gal/min	gal/hour
l/s	1,0	60,0	3600,0	0,001	0,06	3,6	2,118882	127,133	13,19814	791,8884	15,85032	951,019
l/min	0,016666	1,0	60,0	$0,166 \cdot 10^{-4}$	0,001	0,06	0,0353147	2,118883	0,219969	13,19814	0,264172	15,850316
l/h	$0,278 \cdot 10^{-3}$	$0,46 \cdot 10^{-5}$	1,0	$0,2778 \cdot 10^{-6}$	$0,166 \cdot 10^{-4}$	0,001	$0,588 \cdot 10^{-3}$	0,035315	0,003666	0,219969	0,004403	0,264172
m³/s	1000,0	60000,0	3600000	1,0	60,0	3600,0	2118,88	127133,0	13198,1	791889,0	15850,3	951019,0
m³/min	16,6666	1000,0	60000,0	0,01667	1,0	60,0	35,31466	2118,8833	219,9683	13198,15	264,17166	15850,316
m³/h	0,277778	16,6666	1000,0	0,000278	0,01666	1,0	0,588578	35,3147	3,66615	219,969	4,402863	264,1718
ft³/min	0,471947	28,31682	1699,017	$0,472 \cdot 10^{-3}$	0,0283169	1,699017	1,0	60,0	6,228833	373,730	7,480517	448,8310
ft³/hour	0,007866	0,471947	28,3168	$0,78 \cdot 10^{-5}$	$0,4719 \cdot 10^{-3}$	0,028317	0,016667	1,0	0,103814	6,228833	0,124675	7,480517
UK gal/min	0,0757682	4,546092	272,766	$0,758 \cdot 10^{-4}$	0,004548	0,272766	0,160544	9,63262	1,0	60,0	1,20095	72,05700
UK gal/hour	0,001263	0,075768	4,54609	$0,12 \cdot 10^{-5}$	$0,757 \cdot 10^{-4}$	0,004546	0,002676	0,160544	0,016667	1,0	0,020016	1,20095
US gal/min	0,063090	3,7854	227,125	$0,631 \cdot 10^{-4}$	0,0037854	0,227125	0,133681	8,020832	0,832674	49,96045	1,0	60,0
US gal/hour	0,0010515	0,06309	3,785411	$0,1 \cdot 10^{-5}$	$0,63 \cdot 10^{-4}$	0,003785	0,002228	0,133681	0,013878	0,832674	0,016667	1,0

El tipo de flujo se define en función del índice de Reynolds Re . Si Re es superior a 2 320, entonces el flujo es laminar. Si el índice Re es superior a 2 320 e inferior a 3 000, el flujo puede ser laminar o turbulento. Si Re es superior a 3 000, el flujo es turbulento (arremolinado). En el caso del ser humano por ejemplo, la sangre fluye por las venas de modo laminar. Tratándose de redes neumáticas, la velocidad media del flujo oscila entre 6 y 40 m/s, con lo que por lo general es turbulento. Las turbulencias oponen una resistencia al flujo, con lo que se produce una pérdida de presión en la red. Las turbulencias son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la velocidad del flujo. Ello significa que la meta consiste en disponer de tubos con paredes interiores lo más lisas posible y en configurar la red de tal modo que oponga la mínima resistencia posible al flujo. Para calcular la velocidad media del flujo, debe aplicarse la fórmula siguiente:

$$v_m = \frac{\dot{m}}{A} \cdot v_{esp} \text{ (m/s)}$$

$\dot{m}$ Flujo de la masa (kg/s)

A Sección del tubo (m^2)

v_{esp} Volumen específico (m^3/kg)

La velocidad media del flujo v_m también se incluye en el cálculo del índice Reynolds:

$$Re = \frac{v_m \cdot d}{\nu}$$

d Diámetro del tubo en m

ν Viscosidad cinemática en m^2/s

El caudal por unidad de tiempo $\dot{V} (m^3/s)$ se obtiene multiplicando el diámetro del tubo $A (m^2)$ por la velocidad media del flujo.

¿Qué influencia tiene la temperatura?

La interdependencia existente entre el volumen $V (m^3/kg)$, la presión $p (N/m^2)$ y la temperatura $T (^\circ C)$ se expresa mediante la ecuación general para el estado de los gases. Esta ecuación se obtiene combinando las leyes de Boyle (Boyle, R.; 1627-1691), de Mariotte (Mariotte, E.; 1620-1684) y de Gay-Lussac (Gay-Lussac, L.J.; 1778-1850). Suponiendo que p , V y T cambian al mismo tiempo, son válidas las siguientes ecuaciones:

- Modificación de la presión p_1 a p_2 , sin cambiar la temperatura T_1 (según Boyle y Mariotte)

$$\frac{V_1}{V_x} = \frac{p_2}{p_1} \quad \text{o} \quad V_x = \frac{V_1 \cdot p_1}{p_2}$$

V_x Volumen específico en calidad de estado pasajero (según la derivada)

- Modificación de la temperatura T_1 a T_2 , sin cambiar la presión p_2 (según Gay-Lussac)

$$\frac{V_x}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{o} \quad V_2 = \frac{V_x \cdot T_2}{T_1} = \frac{V_1 p_1 T_2}{p_2 T_1}$$

Combinando estas ecuaciones, se obtiene el cambio general del estado:

$$\frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \text{const.} = R_i$$

La constante del aire es $R_i = 287 \text{ J/kgK}$, siendo $1 \text{ J (Joule)} = 1 \text{ Nm}$.

Ejemplo: Si se tienen 5 kg de aire, si la presión absoluta es de 1,2 bar y si la temperatura es de 20°C , ¿cuál es el volumen?

Para calcular el volumen V del aire, deberá aplicarse la siguiente fórmula:

$$V = \frac{m \cdot R_i \cdot T}{p}$$

$$T = (t + 273,15)\text{K} = (20 + 273,15)\text{K} = 293,15 \text{ K}$$

$$p = 1,2 \text{ bar} = 1,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$V = \frac{m \cdot R_i \cdot T}{p} = \frac{5 \text{ kg} \cdot 287 \text{ Nm/kgK} \cdot 293,15 \text{ K}}{1,2 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2} = 3,5 \text{ m}^3$$

2.2

La presión y sus unidades

Bajo presión se entiende la parte de una fuerza F que se aplica sobre una superficie determinada (A). En consecuencia, el cociente de la presión es el siguiente:

$$p = \frac{F}{A}$$

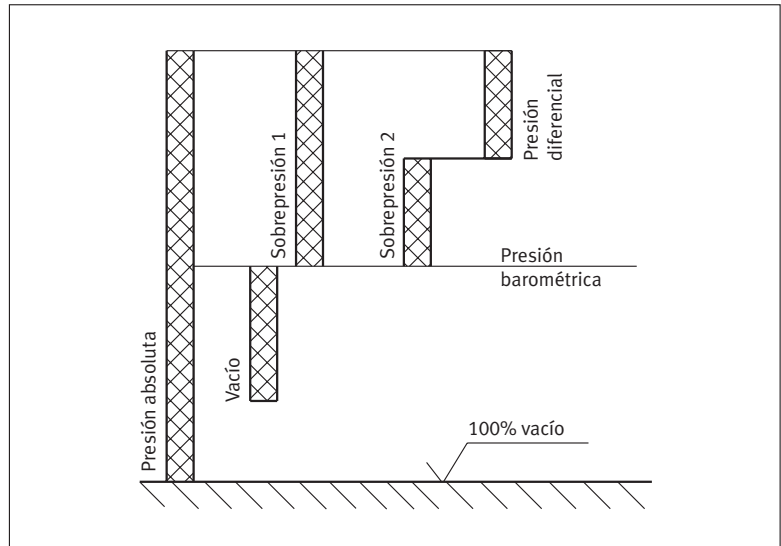
Considerando la libre movilidad térmica de sus moléculas, los gases tienen la propiedad de llenar cualquier espacio cerrado en el que se encuentran. Ese espacio cerrado puede ser un depósito. Las partículas oscilantes del gas chocan con la pared interior del depósito, con lo que aplican brevemente una fuerza en dicha pared. La suma de estas fuerzas redunda en la aplicación de una fuerza constante que se expresa como presión aplicada a la pared exterior del

depósito. Siendo constante la temperatura, dicha fuerza es proporcional a la cantidad de moléculas contenidas en el depósito. Puede diferenciarse entre diversos márgenes de presión:

- Presión atmosférica (presión barométrica del aire)
- Presión absoluta (presión comparada con vacío absoluto en calidad de valor cero)
- Presión diferencial (presión que expresa la diferencia existente entre dos presiones absolutas)
- Sobrepresión (presión que es superior a la presión atmosférica, considerando que ésta representa el valor cero)
- Vacío (presión que es inferior a la presión atmosférica, considerando que ésta representa el valor cero)
- Presión de flujo (presión en la unidad consumidora en el momento de la toma de aire comprimido)
- Presión dinámica (presión existente en una red de tuberías mientras no se consume aire comprimido)

Los márgenes de presión del aire están representados en la gráfica 2-3.

Fig. 2-3
Representación gráfica de los márgenes de presión del aire



Al aprobarse el sistema internacional de unidades (sistema SI) en 1978, el Pascal (Pa) se aceptó como unidad oficial de la presión, siendo

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/ms}^2$$

$$10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar}$$

Los factores de multiplicación que constan en la tabla 2-2 pueden utilizarse para efectuar las conversiones.

Tabla 2-2
Factores de multiplicación
para la conversión
de presiones

Conversión	Multiplicadores										
a ► de ▼	kp/cm ² (at)	mm Hg (Torr)	mm WS	mbar	bar	MPa	N/m ² (Pa)	kgf/cm ²	in water (in H ₂ O)	in Hg	lbf/in ² (psi)
kp/cm ² (at)	1,0	736	10 ⁴	980,665	0,9807	9,807·10 ⁻²	9,807·10 ⁴	1,03322	393,7	28,94	14,22
mm Hg (Torr)	1,36·10 ⁻³	1,0	13,6	1,33322	1,333·10 ⁻³	1,333·10 ⁻⁴	133,3	0,0013591	0,535	3,937·10 ⁻²	1,934·10 ⁻²
mm WS	10 ⁻⁴	7,36·10 ⁻²	1,0	0,09807	9,81·10 ⁻⁵	9,81·10 ⁻⁶	9,81	0,999·10 ⁻⁴	3,937·10 ⁻³	2,695·10 ⁻³	1,422·10 ⁻³
mbar	1,02·10 ⁻³	0,750062	10,197	1,0	0,001	10 ⁻⁴	100	0,0010197	0,401463	0,02953	0,014504
bar	1,0197	750,06	1,02·10 ⁴	10 ³	1,0	0,1	10 ⁵	1,0197	401,6	29,54	14,50
MPa	1,02	7500	1,02·10 ⁵	10 ⁴	10	1,0	10 ⁶	10,1967	4016	295,3	145
N/m ² (Pa)	1,02·10 ⁻⁵	7,5·10 ⁻³	0,102	10 ⁻²	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	1,0	1,019·10 ⁻⁵	4,016·10 ⁻³	2,953·10 ⁻⁴	1,45·10 ⁻⁴
kgf/cm ²	1,000278	735,559	10002,78	980,665	0,9807	9,807·10 ⁻²	98066,5	1,0	393,700	28,959	14,2233
in water	2,54·10 ⁻³	1,868	25,4	2,49089	2,49·10 ⁻³	2,49·10 ⁻⁴	249	0,00254	1,0	7,36·10 ⁻²	3,613·10 ⁻²
in Hg	3,455·10 ⁻²	25,4	345,4	33,8639	3,387·10 ⁻²	3,387·10 ⁻³	3387	0,034532	13,6	1,0	0,491
lbf/in ² (psi)	7,031·10 ⁻²	51,71	703,1	68,9476	6,895·10 ⁻²	6,895·10 ⁻³	6895	0,070307	27,68	2,035	1,0

En sistemas de aire comprimido se utilizan diversos tipos de compresores para generar aire comprimido. Puede diferenciarse entre los siguientes tipos de compresores:

- Compresores rotativos (helicoidal, de laminillas, de anillo líquido y tipo Roots)
- Compresores de émbolo (de émbolo de sumersión, de cruceta, de émbolo libre, de émbolo lineal, de membrana)
- Turbocompresores (radiales y axiales)

Para obtener aire comprimido de baja presión (entre 6 y 15 bar), se utilizan principalmente compresores de émbolo de dos fases y lubricados y, también, compresores helicoidales de una fase con inyección de aceite.

En un depósito, la presión se propaga de modo homogéneo en todas las direcciones. Si se montan manómetros en diversas partes del depósito, se constatará que todos marcan la misma presión. Esa circunstancia se llama ley de la propagación de la presión. En los flujos de aire puede diferenciarse entre la presión estática p_{est} y la presión dinámica p_{din} . La presión p_{total} es la suma de ambas:

$$p_{tot} = p_{est} + p_{din}$$

La presión total actúa en contra del flujo en el sentido del eje del tubo. La presión estática p_{est} es la que actúa sobre la pared interior del tubo. La presión dinámica p_{din} depende de la energía en función de la velocidad de flujo, ya que siendo $v = 0$, únicamente existe presión estática.

La suma de presión estática y presión dinámica siempre es igual y corresponde a la presión estática del fluido inmóvil.

La presión dinámica es la magnitud de referencia para todas las resistencias existentes en un flujo de aire. Esta presión se puede medir utilizando un tubo de Prandtl (fig. 2-4). Se trata de un tubo de doble pared con apertura central para medir la presión dinámica p_{din} y una ranura anular para medir la presión estática p_{est} . La presión diferencial se puede medir utilizando, por ejemplo, un manómetro con tubo en U.

Partiendo de la presión dinámica (presión q en función de la velocidad) se puede calcular la velocidad de un fluido en movimiento, ya que es válida la siguiente ecuación:

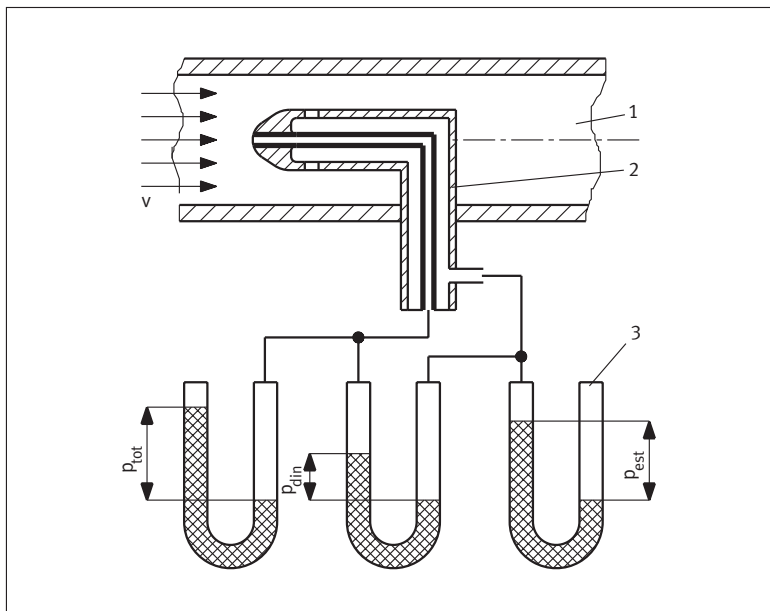
$$q = \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad \text{en m/s}$$

ρ Densidad del aire en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

v Velocidad del fluido en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 2-4
Medición de presiones
con el tubo de Prandtl
(Prandtl, L.; 1875-1953)

- 1 Tubo
- 2 Tubo de Prandtl
- 3 Manómetro de tubo en U



Ejemplo: ¿Cuál es la velocidad v del aire si la diferencia de nivel Δh de la columna de agua en un manómetro conectado a un tubo de Prandtl es de 13,3 mm y si la temperatura del agua en el manómetro es de 20 °C?

La altura Δh representa la presión dinámica, correspondiendo 1 mm de la columna de agua (CA) a una presión de 9,81 Pa ($= 9,81 \text{ Nm}^{-2}$, $= 9,81 \text{ kgm/s}^2$). La presión diferencial (presión dinámica) entre la presión total (p_{tot}) y la presión en la pared (p_{est}) se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\frac{9,81 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}}{\text{mmCA}} \cdot 13,3 \text{ mmCA} = 130,4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$$

Con la siguiente fórmula se calcula la velocidad v del aire.

$$v = \sqrt{2 \cdot \rho^{-1} \cdot q} = \sqrt{\frac{2 \cdot 130,4 \text{ Nm}^{-2}}{1,199 \text{ kgm}^{-3}}} = 14,7 \text{ m/s}$$

¿Cómo se mide la presión?

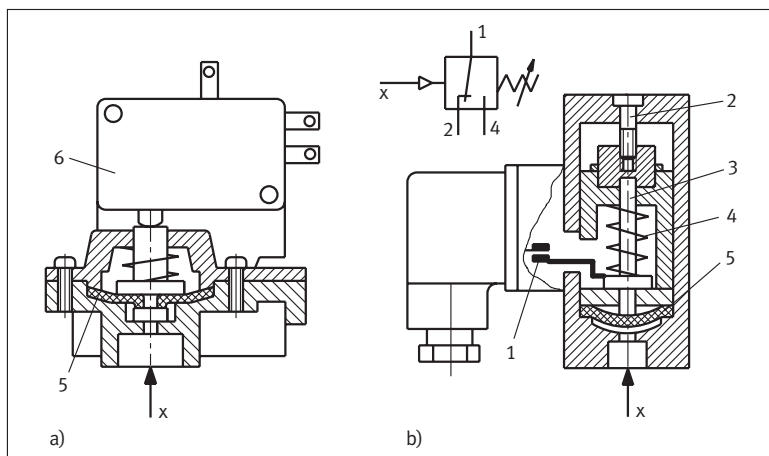
La presión se puede medir, entre otros, con un manómetro de Bourdon (manómetro de resorte elástico) (ver fig. 3-27/página 53). Sin embargo, si sólo se quiere controlar la presión, es suficiente utilizar un presostato o un convertidor de presión NE (convertidor neumática-electricidad). En un convertidor NE, la señal de presión neumática actúa sobre un transmisor eléctrico que funciona como contacto conmutador. Cambiando la superficie de la membrana es posible cambiar la presión necesaria para la conmutación. Si es posible ajustar el margen de respuesta, se trata de un presostato (fig. 2-5).

Fig. 2-5
Elementos de medición
de la presión

- a) Convertidor NE
b) Presostato

- 1 Contacto
2 Tornillo de ajuste
3 Leva
4 Muelle de compresión
5 Membrana
6 Microcontacto

x Toma de presión

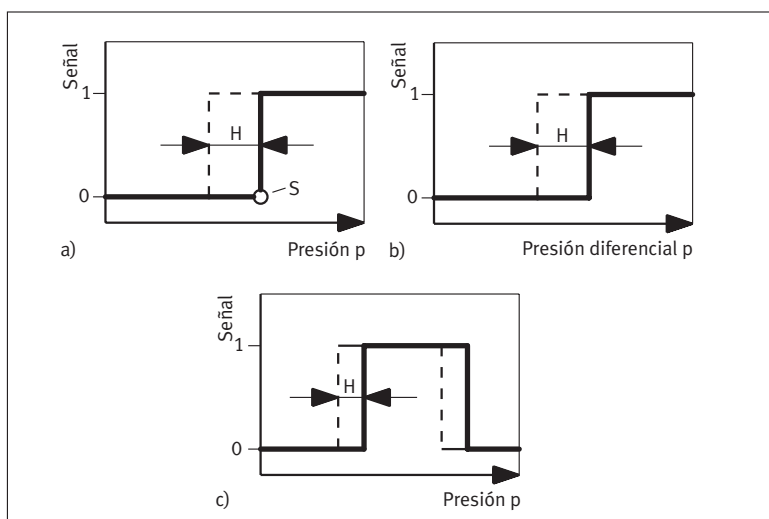


También hay instrumentos de medición que incluyen el sensor y el contacto conmutador en una sola unidad. Con este tipo de medidores es posible controlar los límites de presión de las redes neumáticas industriales. En el caso más sencillo, únicamente se emite una señal de presencia o ausencia de presión (señal de SÍ o de NO). Este caso se explica en la fig. 2-6a. Si se supera determinado valor límite, se emite una señal digital de salida. Si la presión nominal oscila alrededor del valor límite, entonces se produce una “vibración” de la señal de salida. Para evitarlo, puede definirse una histéresis, con lo que la conmutación sólo se produce si se supera el límite correspondiente. Si se quiere controlar el estado del filtro, deberá utilizarse un medidor de presión diferencial. En ese caso se mide la presión delante y detrás del filtro de aire para efectuar la consecuente comparación (fig. 2-6b). Cabe observar, sin embargo, que el resultado de la medición es correcto únicamente si el caudal es constante. Si aumenta el caudal, aumenta la presión diferencial sin que ello signifique necesariamente que aumentó el grado de suciedad del filtro.

Fig. 2-6
Origen de señales
de conmutación

- a) Por debajo o por encima de un valor límite determinado
b) Superación de la presión diferencial
c) Por encima o por debajo de un margen determinado

H Histéresis
S Punto de conmutación definido



Para controlar la presión de funcionamiento en una red, se vigila la presión mínima y la presión máxima. Si la presión real no está dentro del margen establecido por estas dos presiones (margen comparativo), reacciona el sensor de presión. Esta función (fig. 2-6c) puede aprovecharse tanto si se mide la presión absoluta como la presión diferencial.

Ejemplo: La presión mínima se ajusta en 4 bar, mientras que para la presión máxima se define un valor de 7 bar. En el ejemplo que aquí se explica, si la presión supera este margen, pueden producirse fallos en el sistema o, incluso, ponerse en peligro a los operarios. En consecuencia, la presión sólo se mantiene dentro de esos límites. Si la presión es superior o inferior a los límites máximo y mínimo respectivamente, se emite una señal que desconecta el sistema.

2.3

La humedad del aire

El aire húmedo es una mezcla entre aire seco y vapor de agua. El aire sólo puede contener vapor de agua en cantidades limitadas. La cantidad depende de lo que indique el barómetro y, además, de la temperatura. Si el aire se enfría (por ejemplo, entrando en contacto con un cristal frío), el vapor de agua se deposita en el cristal en forma de pequeñas gotas. Este efecto de condensación que se produce con el enfriamiento se conoce desde épocas ancestrales, tal como lo demuestran los pozos de aire. Se trata de grandes cúpulas de piedra que con el frío de la noche extraen agua del aire húmedo. Los límites de la condensación están determinados por el punto de rocío y por el punto de condensación bajo presión.

Punto de rocío

El punto de rocío o, también, punto de condensación, es la temperatura en la que el aire está saturado de vapor de agua. Esta saturación completa corresponde a una humedad de 100 por ciento. En el momento en que la temperatura del aire es inferior a ese punto, empieza la condensación del aire húmedo. Si las temperaturas son inferiores a cero grados centígrados, se forma hielo. Este fenómeno puede limitar considerablemente el caudal y el funcionamiento de los componentes incluidos en una red neumática. Cuanto menor es el punto de rocío, tanto menor es la cantidad de agua que puede retener el aire. El punto de rocío depende de la humedad relativa del aire, de la temperatura y de la presión, aplicándose lo siguiente:

- Cuanto más alta es la temperatura, más vapor de agua es capaz de retener el aire
- Cuanto más alta es la presión, menos humedad contiene el aire

El punto de condensación bajo presión

El punto de condensación bajo presión es un criterio que se utiliza, por ejemplo, para comparar el rendimiento de diversos tipos de secadores de aire. El punto de condensación bajo presión corresponde a la temperatura que se aplica para obtener una determinada presión de funcionamiento. Si se reduce la presión del aire comprimido hasta alcanzar la presión atmosférica, el aire aumenta de volumen. Por ello, el punto de rocío del aire a presión atmosférica es inferior al punto de condensación bajo presión, suponiendo que la temperatura se mantiene constante. Si, por ejemplo, el aire tiene un punto de condensación

bajo presión de +5 °C, no puede condensar agua mientras que la temperatura ambiente sea superior a +5 °C. En el momento en que el aire comprimido tiene una temperatura inferior a esos +5 °C, se produce condensado.

La humedad del aire

La humedad relativa del aire W_{rel} es la relación entre el contenido real de vapor de agua y el contenido máximo posible de vapor de agua en el aire (estado de saturación).

$$W_{rel} = \frac{\text{Humedad absoluta del aire (f)}}{\text{Cantidad de saturación (f}_{\text{máx}})} \cdot 100 \text{ en por ciento}$$

Considérese que cualquier cambio de temperatura provoca una modificación de la humedad relativa aunque se mantenga igual la humedad absoluta del aire.

Humedad máxima del aire ($f_{\text{máx}}$ en g/m³)

La humedad máxima del aire corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que contiene un metro cúbico de aire (cantidad de saturación) a una determinada temperatura.

Humedad absoluta del aire (f en g/m³)

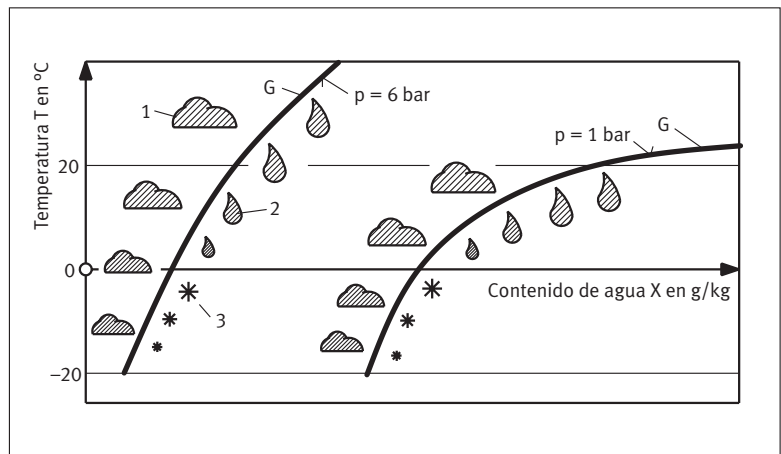
La humedad absoluta del aire corresponde a la cantidad de vapor de agua realmente contenida en un metro cúbico.

¿Cómo puede determinarse el punto de rocío?

Para determinar el punto de rocío se puede recurrir al diagrama de Mollier. En la fig. 2-7 se muestra la forma básica de este diagrama. La curva límite G separa la zona de aire húmedo no saturado de la zona de líquido, hielo o niebla. Sin embargo, antes de utilizar el diagrama, es necesario conocer el contenido de agua del aire húmedo, expresado en gramos por kilogramo.

Fig. 2-7
Diagrama simplificado
de Mollier (según M. Zindl
y T. Engelfried)

- 1 Aire húmedo no saturado
- 2 Gotas de niebla
- 3 Gotas de niebla helada
- T Temperatura del medio
- X Contenido de agua por kilogramo de aire
- G Curva límite



Para calcular el contenido de agua, puede utilizarse la siguiente fórmula:

$$X = 0,622 \cdot \frac{\varphi_{\text{rel}} \cdot p_s}{p - \varphi_{\text{rel}} \cdot p_s} \cdot 10^3 \text{ en g/kg}$$

p Presión absoluta total en bar

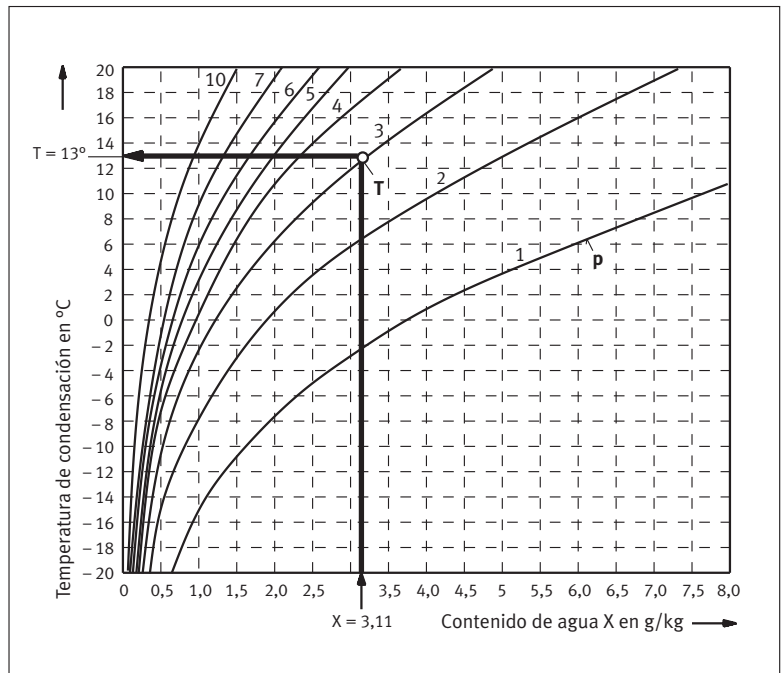
φ_{rel} Humedad relativa ($\varphi = 0$ hasta 1,0)

p_s Presión de saturación con vapor en bar

La presión p_s del vapor de agua contenido en el aire únicamente depende de la temperatura. Si se quiere expresar el agua que contiene el aire en g/m^3 , deberá multiplicarse el resultado de la ecuación anterior por la densidad del aire p_N . Sin embargo, la densidad del aire no tiene un valor constante. Por ello, para simplificar la operación, se calcula con la densidad normalizada p_N . Festo ha determinado que esta densidad es de $1,292 \text{ kg/m}^3$ (Info de Festo n° 980010). La norma ISO establece que $p_N = 1,185 \text{ kg/m}^3$. Después de determinar finalmente el contenido de agua, se puede utilizar el diagrama de Mollier (fig. 2-8).

Fig. 2-8
Diagrama de Mollier
(representación parcial)

T Punto de condensación
 p Presión total en bar



Ejemplo: Suponiendo que la humedad relativa del aire W_{rel} es de 0,5 (= 50%), la presión p es de 3 bar y la temperatura T es de 24 °C, ¿cuál es la temperatura del punto de condensación?

En primer lugar es necesario determinar la presión de saturación p_s (24 °C) a 24 °C. Para ello puede recurrirse a la siguiente tabla:

Temperatura T en °C	p_s en mbar	Temperatura T en °C	p_s en mbar	Temperatura T en °C	p_s en mbar
- 20	1,029	+ 2	7,055	+ 24	29,82
- 18	1,247	+ 4	8,129	+ 26	33,60
- 16	1,504	+ 6	9,345	+ 28	37,78
- 14	1,809	+ 8	10,70	+ 30	42,41
- 12	2,169	+ 10	12,70	+ 32	47,53
- 10	2,594	+ 12	14,01	+ 34	53,18
- 8	3,094	+ 14	15,97	+ 36	59,40
- 6	4,681	+ 16	18,17	+ 38	66,24
- 4	4,368	+ 18	20,62		
- 2	5,172	+ 20	23,37		
0	6,108	+ 22	26,42		

De esta manera resulta que p_s (24 °C) = 29,82 mbar = 0,02982 bar. Para calcular el contenido de agua X se aplica la siguiente fórmula:

$$X = 0,622 \cdot \frac{0,5 \cdot 0,02982}{3 - (0,5 \cdot 0,02982)} \cdot 10^3 = 3,11 \text{ g/kg}$$

Ahora se puede leer la temperatura del punto de condensación en el diagrama de Mollier. Las líneas correspondientes a la saturación con $p = 3$ bar y al contenido de agua $X = 3,11$ se cruzan en los 13 °C.

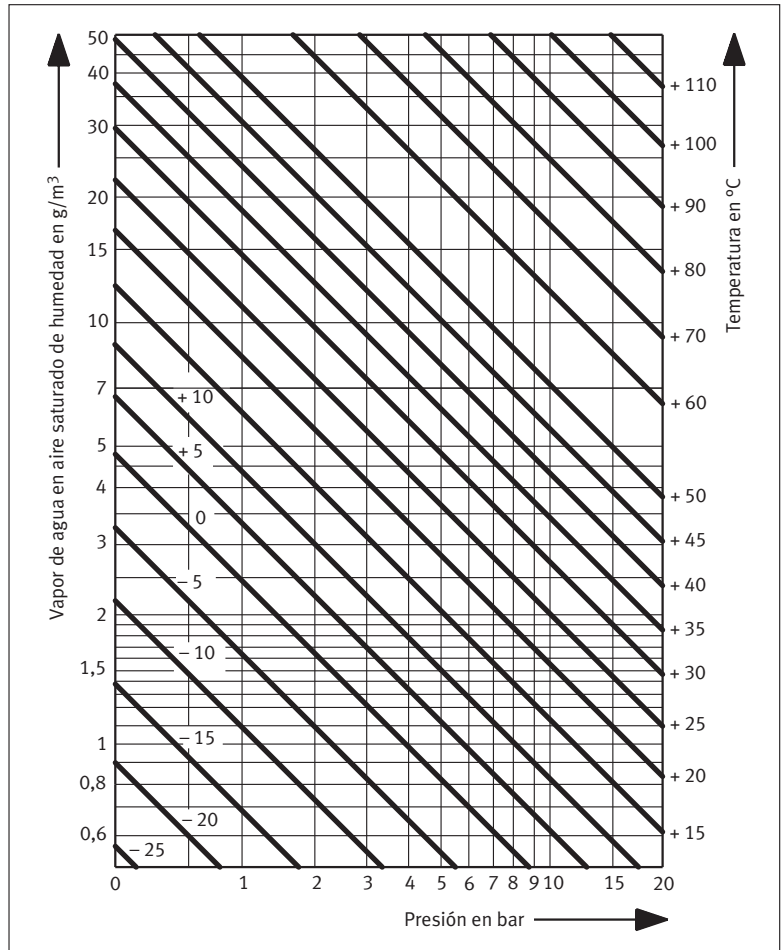
Aunque sería deseable disponer de aire seco, en la práctica sólo se necesita aire completamente seco en muy raras ocasiones. Por lo general es suficiente disponer de aire relativamente seco. El criterio de referencia es la temperatura del punto de condensación. Según las normas internacionales de calidad, se distinguen seis clases de humedad en el aire comprimido (consultar la tabla de la calidad del aire en la página 31). Para máquinas herramienta, máquinas embaladoras y máquinas textiles por ejemplo, se necesita aire comprimido de la clase de calidad 3.

Después de la compresión, ¿cuánta humedad retiene el aire comprimido?

Si, por ejemplo, se aspiran 7 m³ de aire atmosférico para comprimirlo y obtener 1 m³ de aire comprimido, se obtiene un excedente de seis partes de agua que forman condensado (suponiendo que las temperaturas del aire aspirado y del aire comprimido son iguales). Un metro cúbico de aire comprimido no puede contener más humedad que un metro cúbico de aire bajo presión atmosférica. Sin embargo, la cantidad de humedad que realmente contiene el aire comprimido depende de la temperatura del aire y de la presión. En la fig. 2-9 se puede leer la cantidad máxima de humedad. Si el aire se enfría al comprimirlo, su capacidad de retención de vapor de agua es menor. En consecuencia, se

produce condensado. La parte de agua que el aire sigue reteniendo, llega hasta los elementos funcionales de las unidades consumidoras. Por ello es recomendable instalar un filtro delante de las unidades consumidoras. Este filtro puede ser, por ejemplo, un filtro con efecto ciclónico. En este tipo de filtros, el aire es guiado por diversos deflectores para que ejecute un movimiento giratorio, con lo que se enfría. El efecto centrífugo y el enfriamiento tienen como consecuencia la eliminación de condensado.

Fig. 2-9
Contenido de agua en aire comprimido en función de la temperatura y de la presión



Ejemplo de caída de temperatura del aire:

- Un metro cúbico de aire contiene 7 gramos de agua siendo la presión de 6 bar y la temperatura de 40 °C.
- Si la temperatura baja a 10 °C, el agua contiene únicamente 1,3 gramos de agua.
- Ello significa que se eliminan 5,7 gramos de agua ($7 - 1,3 = 5,7$).

Los elementos de mando y de trabajo alimentados con aire comprimido suelen tener una temperatura de aproximadamente 20 °C si se utilizan en el recinto

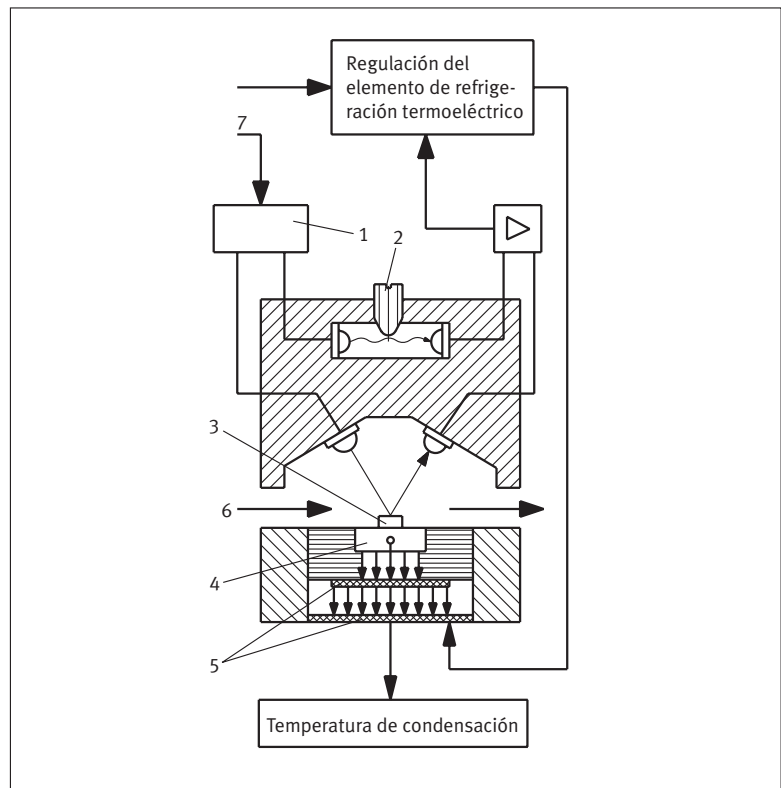
cerrado de una planta industrial. Si el aire que contiene 1,3 gramos de agua llega hasta ellos, ese contenido residual de agua no se elimina, sino que llega a la atmósfera con el aire de escape. Si, por lo contrario, dichos elementos se utilizan en el exterior y si la temperatura ambiente es de tan sólo 5 °C, sí se produce más condensado.

¿Cómo se puede determinar el punto de condensación de los instrumentos de medición?

El punto de condensación puede determinarse, por ejemplo, aplicando el método del espejo. Este método recurre a la relación física existente entre la temperatura de condensación del vapor de agua y el contenido de vapor de agua en una mezcla de gases. El método consiste en bajar la temperatura de un espejo metálico aprovechando el efecto de Peltier hasta que se condense el vapor de agua. Un circuito optoelectrónico se encarga de detectar el condensado mediante la reducción de la intensidad de la luz que se refleja en la superficie del espejo. El sistema de regulación electrónica se encarga de modular la alimentación de corriente en función de la formación del condensado. La situación de equilibrio entre la vaporización y la condensación corresponde al punto de condensación. La temperatura correspondiente se puede medir utilizando una resistencia de gran precisión (por ejemplo un sensor de platino con resistencia de 100 ohmios a 0 °C). En la fig. 2-10 se puede apreciar una representación esquemática de un sensor del punto de condensación.

Fig. 2-10
Sensor del punto
de condensación

- 1 Regulación LED
- 2 Regulación óptica del rayo de referencia
- 3 Espejo metálico
- 4 Sensor de temperatura
- 5 Elemento de refrigeración
- 6 Aire o mezcla de gases
- 7 Alimentación



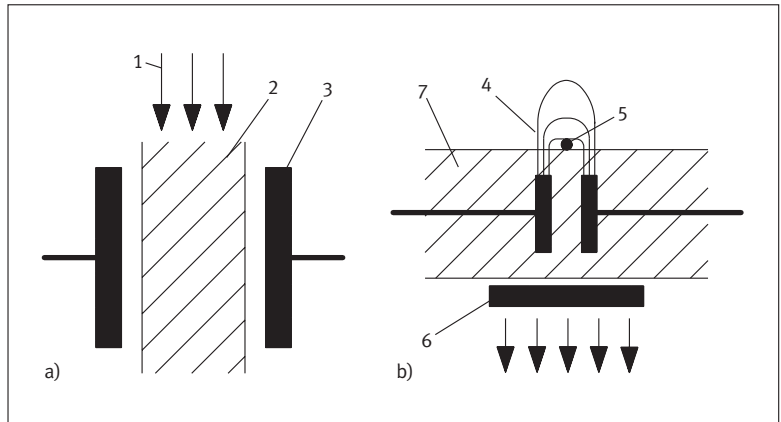
Actualmente se dispone de otros tipos de sensores para medir la humedad del aire. Estos sensores no recurren a sistemas ópticos para detectar la refrigeración de la superficie, sino que utilizan sistemas eléctricos. En la fig. 2-11a se muestra el esquema de un sensor polímero que funciona de la siguiente manera: el agua gaseíforme penetra en un dieléctrico, con lo que cambia su constante dieléctrica. Si la humedad es pequeña, el agua vuelve a separarse de la capa dieléctrica.

En el caso del sensor que se aprecia en la fig. 2-11b, se trata de un condensador embebido en silicio. Aplicando una corriente alterna, se produce un campo eléctrico cuyas líneas de flujo salen del silicio. El agua condensada modifica la frecuencia del campo de dispersión. De esta manera se obtiene una señal correspondiente a la corriente de Peltier que permite medir la temperatura de la superficie. A diferencia de lo que sucede en el caso del sensor polímero, el agua no penetra en el material del sensor, sino que se queda adherida a la superficie. De esta manera se obtiene una curva característica exenta de desviaciones e histéresis.

Fig. 2-11
Sensores de humedad

- a) Sensor polímero
- b) Sensor de condensación

- 1 Agua gaseíforme
- 2 Dieléctrico
- 3 Condensador
- 4 Campo de dispersión
- 5 Agua condensada en la superficie del chip
- 6 Elemento de Peltier
- 7 Chip de silicio con condensador

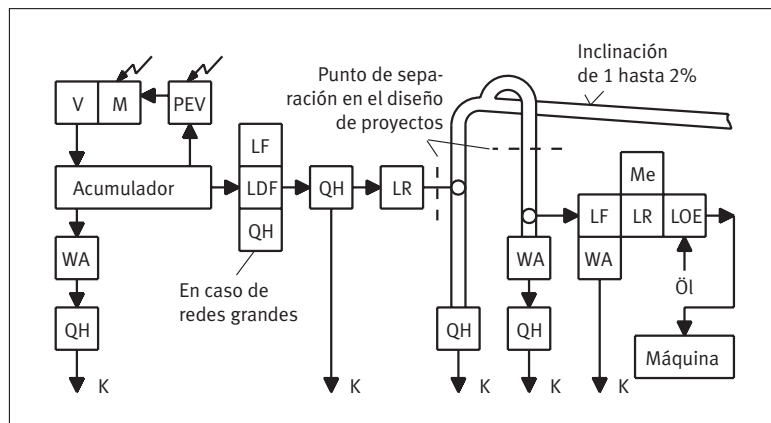


La preparación del aire comprimido

La finalidad de la preparación del aire consiste en conseguir que el aire comprimido tenga la calidad que exige la unidad consumidora. El proceso de preparación del aire puede clasificarse en tres fases. En primer lugar, la eliminación de partículas gruesas, en segundo lugar el secado y, en tercer lugar, la preparación fina del aire. Inmediatamente detrás del compresor se procede a la eliminación de las partículas gruesas. En la fig. 3-1 se muestra un esquema simplificado de una red neumática.

Fig. 3-1
Esquema
de una red neumática

K Condensado
LF Filtro
LOE Lubricador
(aceite nebulizado)
LDF Secador
LR Válvula reductora
de presión
M Motor
Me Instrumento de medición,
manómetro
PEV Presostato
QH Válvula de cierre
V Compresor
WA Separador de agua



El aire comprimido debe prepararse lo mínimo posible, aunque siempre tanto como sea necesario. En otras palabras, el aire comprimido debe estar únicamente tan limpio como sea indispensable. Además, deben tenerse en cuenta los siguientes criterios:

- Si se necesita aire comprimido de diversas calidades, puede prepararse el aire de modo centralizado de tal manera que su calidad corresponda a la clase de calidad más alta necesaria. Sin embargo, es más económico preparar el aire de mayor calidad por separado, junto a los consumidores que lo exigen (preparación fina descentralizada).
- Si se necesita aire comprimido con diversas presiones, es más económico utilizar intensificadores de presión descentralizados, ya que así la presión puede ser inferior en el resto de la red neumática.
- El aire aspirado por el compresor debe ser lo más frío, seco y limpio posible. Si se aspira aire caliente y húmedo, se produce una mayor cantidad de condensado.
- Si la red de aire comprimido sufre fuertes oscilaciones de presión, es recomendable montar un pequeño depósito delante de la unidad de mantenimiento.
- En la parte más baja de la red de tuberías debería colocarse un equipo para acumular y evacuar el condensado que se va formando en la red.
- La necesidad de preparar el aire no se explica únicamente por las exigencias que plantean los procesos de fabricación, ya que también es recomendable por razones de salud. El aire de escape que contiene aceite puede dañar la salud de los operarios y, además, es dañino para el medio ambiente.

3.1

La calidad del aire comprimido

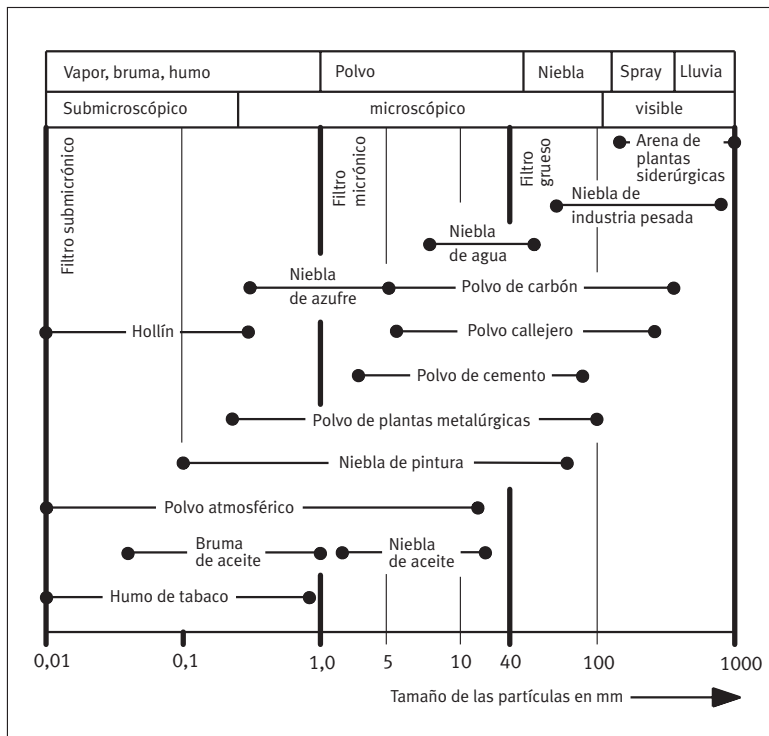
Para que el aire atmosférico se transforme en la fuente energética “aire comprimido”, es necesario conseguir que el aire reduzca su volumen considerablemente. ¿Qué características tiene el aire en su calidad de materia prima? El aire tiene las siguientes propiedades físicas:

Magnitud física	Valor cuantitativo	Unidades
Densidad ρ a 0 °C a 15 °C a 20 °C	1,293 1,223 1,199	kg/m ³ kg/m ³ kg/m ³
Constante R de los gases perfectos	287	J/kg · K
Capacidad térmica a 0 °C; $p = \text{constante}$ a 0 °C; $V = \text{constante}$	$c_p = 1,005$ $c_v = 0,716$	kJ/kg · K kJ/kg · K
Exponente adiabático	1,4	
Viscosidad dinámica (presión normalizada) a 20 °C	$18,13 \cdot 10^{-6}$	Pa · s
Viscosidad cinemática (presión normalizada) a 20 °C (= relación viscosidad/densidad)	15,55	mm ² /s

Según la norma ISO 6358, la densidad normal del aire es de 1,185 kg/m³.

La compresión del aire implica determinados problemas, ya que al comprimirse el aire, también se comprimen todas las impurezas que contiene, tales como polvo, hollín, suciedad, hidrocarburos, gérmenes y vapor de agua. A estas impurezas se suman las partículas que provienen del propio compresor, tales como polvo de abrasión por desgaste, aceites coquizados y aerosoles. Ello significa que al comprimir a 8 bar el aire atmosférico, aumenta la concentración de las impurezas multiplicándose por nueve. Pero ese no es el único problema. Además, la red de tuberías también contiene residuos y depósitos, tales como óxido, cascarilla, residuos de soldadura y de sustancias hermetizantes que pueden producirse durante el montaje de la valvulería. En el cuadro general de la fig. 3-2 se aprecia el tipo y tamaño de las partículas que puede contener el aire. En las grandes ciudades, el aire contiene aproximadamente 140 millones de partículas de polvo por 1 m³. De esas partículas, el 80 por ciento tiene un tamaño inferior a 5 μm . Para que el aire que respiramos pueda considerarse limpio, no debe contener partículas de tamaño superior a 0,01 μm .

Fig. 3-2
Tipos y tamaños de las
impurezas más comunes
contenidas en el aire
(1 μm = 0,001 mm)



Ello significa que, en estado natural, el aire no es limpio. Las impurezas pueden ocasionar fallos en las unidades consumidoras y dañar la red neumática. Las impurezas incluso pueden tener una influencia recíproca negativa. Las partículas de polvo, por ejemplo, crean partículas más grandes si entran en contacto con agua o aceite. El aceite, por su parte, crea una emulsión si entra en contacto con agua.

Existen clases de calidad recomendadas para cada aplicación neumática. Estas clases corresponden a la calidad del aire que, como mínimo, necesita la unidad consumidora correspondiente. En la siguiente tabla consta la calidad del aire comprimido en función de los tipos de impurezas. Las clases de calidad se definen en concordancia con la norma DIN ISO 8573-1.

Aplicaciones	Cuerpos sólidos (μm)	Punto de condensación del agua (0 °C)	Contenido máx. de aceite (mg/m³)	Clase de filtración recomendada
Minería	40	–	25	40 μm
Lavandería	40	+10	5	40 μm
Máquinas soldadoras	40	+10	25	40 μm
Máquinas herramienta	40	+3	25	40 μm
Cilindros neumáticos	40	+3	25	40 μm
Válvulas neumáticas	40 o bien 50	+3	25	40 o bien 50 μm
Máquinas de embalaje	40	+3	1	5 μm – 1 μm
Reguladores finos de presión	5	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire de medición	1	+3	1	5 μm – 1 μm
Aire en almacén	1	–20	1	5 μm – 1 μm
Aire para aplicación de pintura	1	+3	0,1	5 μm – 1 μm
Técnica de detectores	1	–20 o bien –40	0,1	5 μm – 1 μm
Aire puro para respirar	0,01	–	–	–0.01 μm

En esta norma también se clasifica el aire según 7 clases de calidad.

En la tabla siguiente, los datos indicados en metros cúbicos se refieren al estado normalizado según ISO 554.

Clase	Tamaño máx. de las partículas en μm	Densidad máxima de las partículas en mg/m³	Punto máx. de condensación bajo presión en °C	Contenido máx. de aceite residual en mg/m³
1	0,1	0,1	–70	0,01
2	1	1	–40	0,1
3	5	5	–20	1,0
4	15	8	+3	5
5	40	10	+7	25
6	–	–	+10	–
7	–	–	sin definir	–

3.2

Procedimientos de secado

El aire, al comprimirse, se calienta, por lo que es necesario montar un equipo de refrigeración del aire inmediatamente detrás del compresor. El calentamiento se produce porque el aumento de la energía necesaria para incrementar la presión de p_1 a p_2 implica un aumento de la temperatura de T_1 a T_2 . El calentamiento se puede calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$T_2 = T_1 \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{(k-1)}{k}}$$

pudiendo ser k desde 1,38 hasta 1,4.

El aire siempre contiene una cantidad mayor o menor de vapor de agua. Sin embargo, el aire sólo puede contener una cantidad limitada de agua (hasta la cantidad de saturación). Antes que el aire comprimido llegue a las unidades consumidoras, debe conseguirse que se condense la mayor cantidad posible del vapor de agua. Si no se utiliza un compresor exento de aceite, se obtiene una mezcla comprimida de aire y aceite. Ese aceite tiene que extraerse del aire mediante un separador y, a continuación, refrigerarse.

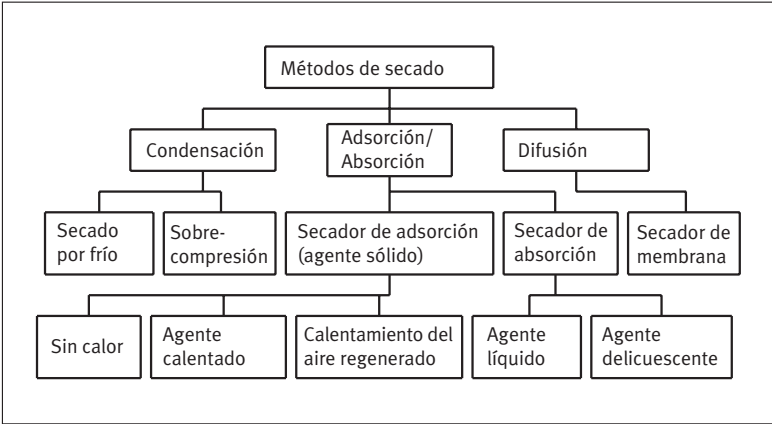
Para que los elementos de mando y los elementos funcionales neumáticos no se transformen en “elementos hidráulicos”, es recomendable secar el aire comprimido. El secado es el proceso más importante de la operación de preparación del aire. Secando bien el aire se evita la corrosión de los tubos y de los elementos neumáticos. El criterio que se aplica para medir el secado del aire es la temperatura del punto de condensación (consultar capítulo 2.3). Cuanto más alta es la temperatura del aire comprimido, más agua puede contener el aire (cantidad de saturación). Así lo demuestra la siguiente tabla:

Temperatura en °C	-20	-10	0	5	10	15	20	30	50	70	90	100
Contenido máx. de vapor de agua en g/m³	0,9	2,2	4,9	6,8	9,4	12,7	17,1	30,1	82,3	196,2	472	588

¿Cómo se puede secar el aire?

El aire se puede secar de diversas formas. En la fig. 3-3 se muestra un desglose de los métodos de secado.

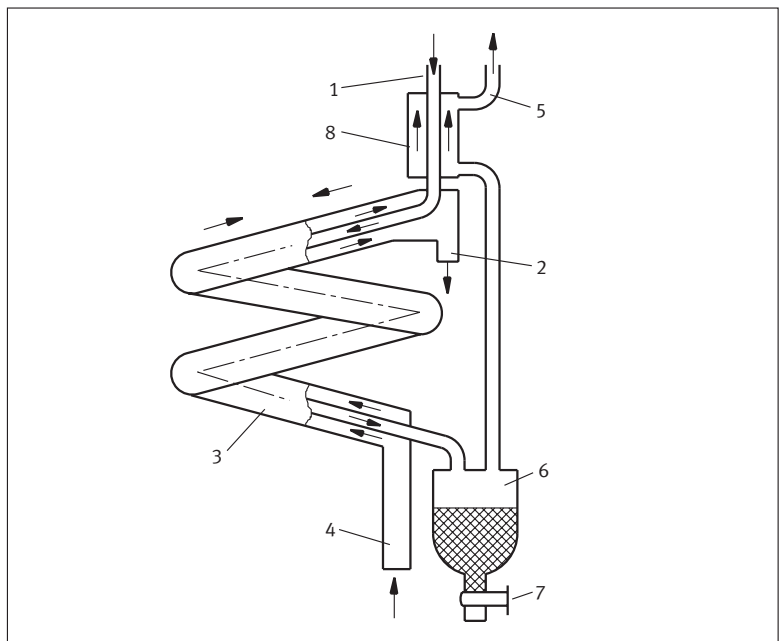
Fig. 3-3
Métodos para secar el aire



En muchos casos es suficiente recurrir al **método de secado por frío**. En ese caso, la temperatura del aire disminuye por efecto de un agente refrigerante. Así se forma condensado y disminuye el contenido de agua del aire. Tal como se puede apreciar en la fig. 3-4, el aire se refrigera al fluir en el sentido contrario de un agente refrigerante. Este proceso de refrigeración suele realizarse en varias fases (refrigeración previa aire-aire y refrigeración principal aire-agente refrigerante). El punto de condensación es de aproximadamente $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si la temperatura de la red no baja de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$, la red de aire comprimido ya no contiene agua. El proceso de secado por refrigeración genera aproximadamente un 3% de los costos energéticos totales correspondientes a la generación de aire comprimido. Para conseguir un ahorro mayor, puede recurrirse a secadores modernos con compresor de agente refrigerante y con regulación de las revoluciones. Este compresor adapta la cantidad del agente refrigerante circulante a la cantidad de aire que en cada momento tiene que secarse.

Fig. 3-4
Principio de funcionamiento
del secador por frío

- 1 Toma de aire comprimido a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2 Salida del agente refrigerante
- 3 Intercambiador de calor
- 4 Entrada del agente refrigerante
- 5 Salida de aire comprimido con $15\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 6 Separador de condensado
- 7 Salida de agua
- 8 Secador previo



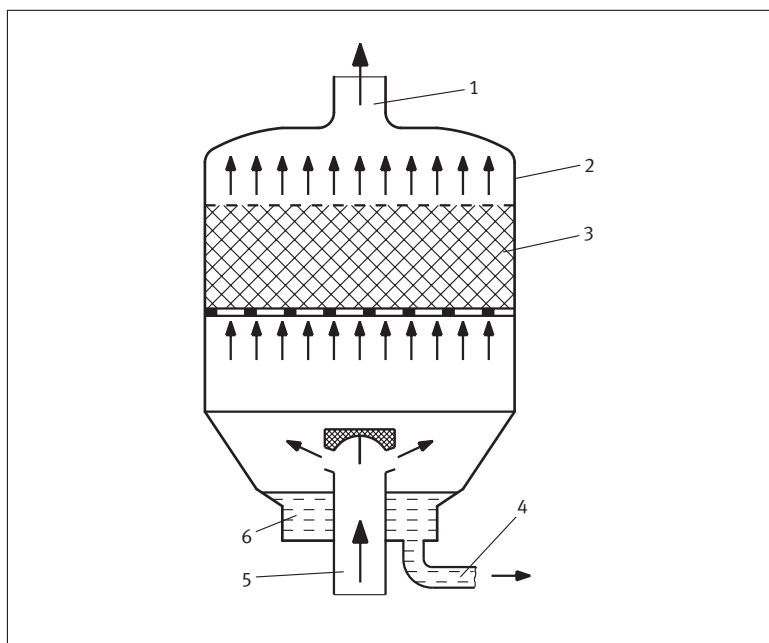
La **sobrecompresión** (alta compresión) es otro de los métodos utilizados para secar el aire. En este caso, el aire se somete a una presión muy superior a la que es necesaria para el funcionamiento de la unidad consumidora. El aire se refrigera, con lo que se produce condensado que se elimina. A continuación, se vuelve a bajar la presión hasta obtener el nivel necesario para el funcionamiento de los actuadores. De esta manera es posible obtener puntos de condensación que son inferiores a $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, este método es bastante costoso.

Si las aplicaciones exigen temperaturas extremadamente bajas (entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$), tienen que aplicarse los métodos de adsorción o de secador de membrana. Los equipos correspondientes llegan a alcanzar hasta un 20% de los costos energéticos de la generación de aire comprimido.

En el caso del **secado por absorción**, una sustancia química atrae la humedad que termina disolviéndose en ella. La sustancia química es una solución salina a base de NaCl . Se trata de un secador de construcción sencilla, tal como se puede apreciar en la fig. 3-5. Cabe observar, sin embargo, que la sustancia química se consume. 1 kg de sal es capaz de retener aproximadamente 13 kg de condensado. Ello significa que es necesario rellenar constantemente la sustancia salina. Con este sistema, el punto de condensación puede ser de máximo $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. También es posible utilizar otros agentes refrigerantes, tales como glicerina, ácido sulfúrico, tiza deshidratada y sal de magnesio hiperacidificado.

Fig. 3-5
Principio de funcionamiento
del secador por adsorción

- 1 Aire comprimido seco
- 2 Contenedor
- 3 Sustancia salina
- 4 Salida del condensado
- 5 Aire (húmedo) proveniente del compresor
- 6 Depósito de condensado

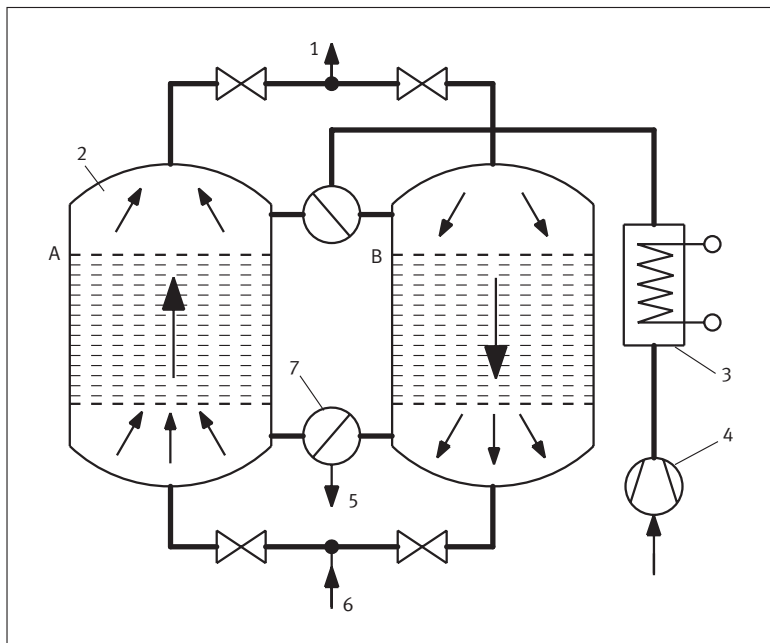


En el proceso de secado por adsorción, las moléculas del gas o del vapor se enlazan debido a las fuerzas moleculares. El agente secante es un gel (por ejemplo, gel silícico) que también se consume, aunque es regenerable. Por ello se necesitan dos depósitos de secado (depósito con dos cámaras) para que los procesos de secado (A) y de regeneración (B) se lleven a cabo simultáneamente. La regeneración puede conseguirse en frío o caliente. Los secadores con regeneración del agente en frío cuestan menos, pero su funcionamiento es menos rentable. En la fig. 3-6 se aprecia un secador con regeneración por calor. Los dos secadores se activan alternamente y según el tipo de agente secador que se utilice, se alcanzan puntos de condensación de hasta $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

También hay secadores por adsorción que utilizan filtros moleculares (silicatos de metal y aluminio o zeolitas) en calidad de agentes de secado. Al igual que todas las sustancias adsorbentes, estos filtros tienen una gran superficie interior (capilaridad). También en este caso es posible regenerar los filtros cargados de moléculas de agua (desorción).

Fig. 3-6
Principio de funcionamiento
del secador por adsorción

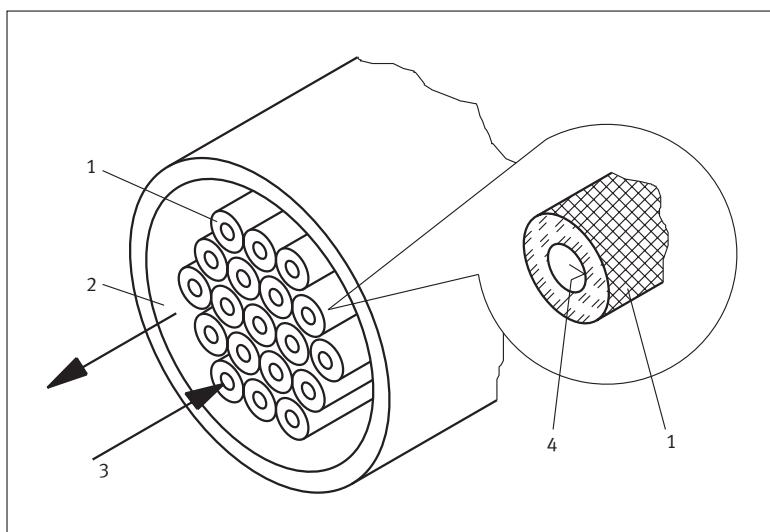
- 1 Aire seco
- 2 Torre de secado
- 3 Calentador
- 4 Ventilador
- 5 Aire caliente
- 6 Aire húmedo
- 7 Válvula



Los **secadores de membrana** están compuestos por un haz de fibras huecas permeables al vapor y que está circundado de aire seco que no está sometido a presión. El secado se produce a raíz de la diferencia parcial de presión entre el aire húmedo en el interior de las fibras huecas y el flujo en sentido contrario del aire seco (fig. 3-7). El sistema procura crear un equilibrio entre la concentración de vapor de agua en ambos lados de la membrana.

Fig. 3-7
Principio de funcionamiento
del secador de membrana

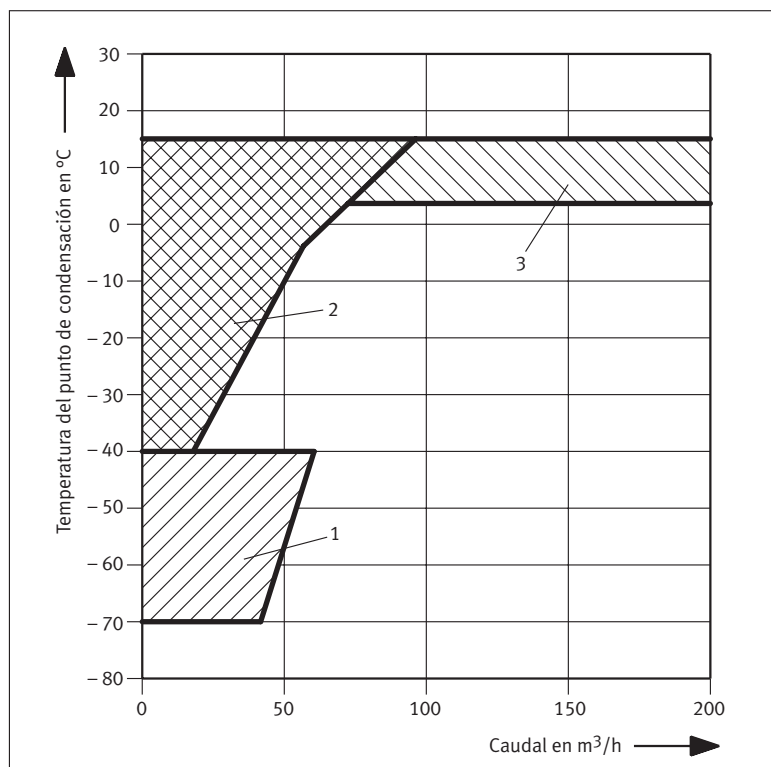
- 1 Fibra hueca
- 2 Aire de enjuague
- 3 Entrada de aire húmedo
- 4 Membrana



Las fibras huecas son de material exento de silicona y están recubiertas de una ínfima capa que constituye la superficie de la membrana como tal. Las membranas pueden ser porosas o homogéneas. Las membranas homogéneas sólo permiten el paso de determinadas moléculas, como por ejemplo las de vapor de agua. En ese caso, no cambia el contenido de oxígeno y de aceite. El aire seco de enjuague se obtiene derivando parte del aire que ya fue sometido al proceso de secado. Este constante consumo de aire de enjuague reduce la eficiencia del secador. Por ello se está intentando encontrar soluciones apropiadas para conseguir reducir el consumo de aire. Debido a su principio de funcionamiento, estos secadores se utilizan preferentemente en tramos parciales de la red o en sus puntos finales (fig. 3-8). Los secadores de membrana no necesitan energía adicional para regular el aire de enjuague, por lo que son muy apropiados para el uso en zonas con peligro de explosión. Es recomendable montar los secadores de membrana delante del regulador de presión de aire, ya que el efecto de secado es mayor si la presión es más alta. Asimismo, es recomendable también montar delante del secador de membrana una combinación de unidad de prefiltración y de microfiltro, ya que de esta manera aumenta la duración de las fibras huecas. Los secadores de membrana se diferencian de otros secadores principalmente por lo siguiente:

Fig. 3-8
Campos de aplicación de
diversos tipos de secadores
(según Hoerbiger-Origina)

- 1 Secador por adsorción
- 2 Secador de membrana
- 3 Secador por frío hasta
1 000 m³/h



Los secadores de membrana reducen la humedad en un porcentaje determinado, mientras que los secadores por frío y por adsorción lo hacen en función de un determinado punto de condensación bajo presión.

Desde hace más de 100 años se utilizan **filtros de aire**, lo que significa que han experimentado una larga evolución. Originalmente se empleaban tejidos para filtrar. La elección del filtro apropiado es fundamental para la calidad del aire. Para obtener aire comprimido de alta calidad, es necesario prever varias fases de filtración. Un solo filtro “fino” no es suficiente para obtener aire de calidad satisfactoria.

Clasificación de los filtros:

- **Filtro:** Los filtros comunes son capaces de retener partículas de tamaños superiores a $40\ \mu\text{m}$ o a $5\ \mu\text{m}$, según su grado de filtración y el tipo de cartucho filtrante.
- **Microfiltro:** Estos filtros retienen partículas de tamaños superiores a $0,1\ \mu\text{m}$.
- **Filtro submicrónico:** Estos filtros pueden retener partículas de tamaños superiores a $0,01\ \mu\text{m}$. Sin embargo, antes de pasar por estos filtros, el aire tiene que haber pasado previamente por otro, capaz de retener partículas de hasta $5\ \mu\text{m}$.
- **Filtros de carbón activo:** Estos filtros son capaces de retener partículas a partir de $0,003\ \mu\text{m}$, lo que significa que pueden retener sustancias aromatizantes u odoríferas. Los filtros de carbón activo también se llaman filtros submicrónicos.

Para conseguir aire de clases de mayor calidad, la filtración de las sustancias sólidas siempre deberá hacerse por fases, para lo que puede montarse, por ejemplo, un filtro submicrónico detrás de un filtro micrónico.

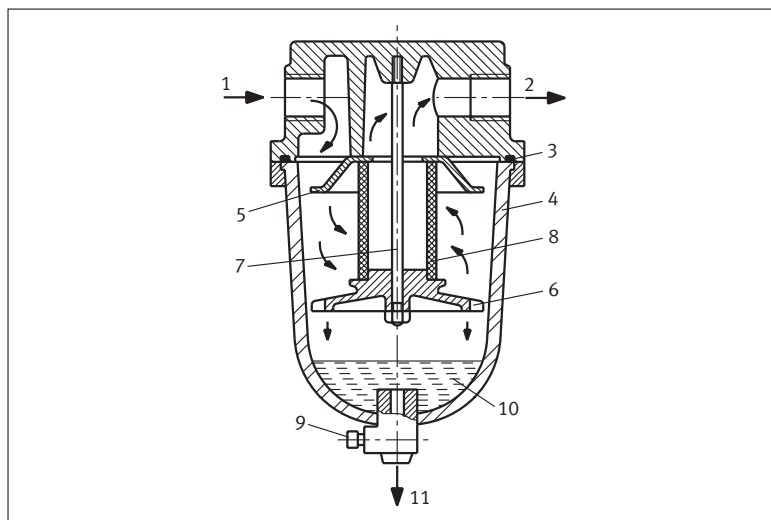
¿Qué principios funcionales se aprovechan en el proceso de filtración?

Filtros ciclónicos

En estos filtros, el aire pasa por una chapa que lo obliga a ejecutar un movimiento rotativo. De esta manera surten efecto las fuerzas centrífugas. En analogía con los ciclones que se producen en las zonas tropicales, estos filtros también se llaman ciclónicos (fig. 3-9).

Fig. 3-9
Principio de funcionamiento
de un filtro ciclónico

- 1 Entrada de aire
- 2 Salida de aire
- 3 Junta tórica
- 4 Recipiente
- 5 Deflector
- 6 Separador
- 7 Tornillo de fijación
- 8 Elemento filtrador
- 9 Botón para purga manual del condensado
- 10 Condensado
- 11 Purga del condensado



La fuerza centrífuga proyecta las partículas sólidas de mayor tamaño y, especialmente, las partículas líquidas hacia la pared interior del depósito del filtro, con lo que es posible retener hasta un 90 por ciento del condensado. A continuación, el aire pasa por un filtro de material sinterizado altamente poroso. El condensado y las partículas de suciedad se acumulan en el depósito. Para que el líquido acumulado pueda salir, hay que pulsar de vez en cuando el botón de purga. El cartucho de filtración debe sustituirse periódicamente.

Filtros de capa simple

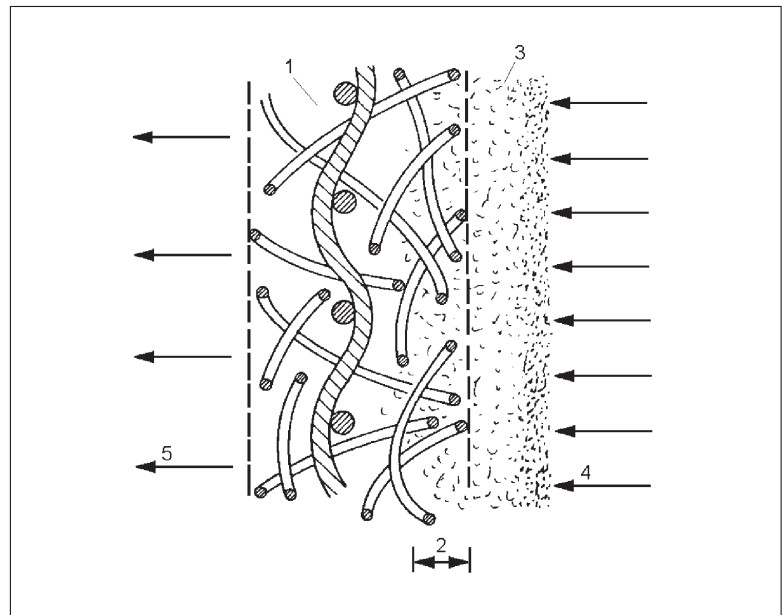
Estos filtros están compuestos de un tejido de metal y de material sintético y sus poros pueden ser de $5\text{ }\mu\text{m}$ o de $40\text{ }\mu\text{m}$. El tejido retiene todas las impurezas que tienen un tamaño mayor que sus poros. Los filtros de capa simple suelen montarse detrás de un filtro ciclónico (fig. 3-9).

Filtros de capas múltiples

Estos filtros de vellones de microfibras (tejidos de fibras de borosilicato) tienen poros de $1\text{ }\mu\text{m}$ (filtro micrónico) o de $0,01\text{ }\mu\text{m}$ (filtro submicrónico). La filtración se produce por retención, absorción, cribado, difusión, carga electrostática y ligación por efecto de las fuerzas de Waals. En la fig. 3-10 se muestra la retención de partículas de polvo. Las partículas sólidas se quedan atascadas entre las fibras. Las partículas líquidas coalescen (se unen) para formar gotas de mayor tamaño y que se acumulan en el depósito del filtro.

Fig. 3-10
Retención de partículas
de polvo en un filtro textil

- 1 Filtro textil
- 2 Depósito de polvo
- 3 Retención de polvo
- 4 Lado del gas antes de la filtración
- 5 Lado del gas filtrado



Los filtros de capas múltiples son capaces de retirar del aire partículas muy finas de aceite y de polvo. Si se utiliza un filtro de carbón activo, incluso es posible evitar el paso de vapor de aceite y de sustancias odoríferas. Ello puede ser necesario en el caso de procesos muy sensibles, por ejemplo en la industria

alimentaria o de productos farmacéuticos. El grado de filtración necesario depende siempre de la aplicación correspondiente. En el aire comprimido se admite la presencia de las siguientes partículas:

- Partículas desde 40 μm hasta 5 μm en motores de émbolo rotativo con paletas, cilindros neumáticos, unidades de mando y herramientas percutoras
- Partículas inferiores a 5 μm en reguladores, válvulas, instrumentos de medición, pistolas de inyección
- Partículas inferiores a 1 μm en el caso de aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y electrotécnica.

Filtros de carbón activo

Estos filtros contienen una unidad filtrante de carbón amorfo poroso. El carbón activo tiene una superficie especialmente grande que puede ser desde 500 m^2/g hasta 1 500 m^2/g . Por ello, estos filtros son capaces de retener partículas muy finas. La adsorción se produce en las partes especialmente activas de la superficie, es decir, en las puntas, esquinas, cantos y en las imperfecciones reticulares de las estructuras de carbón.

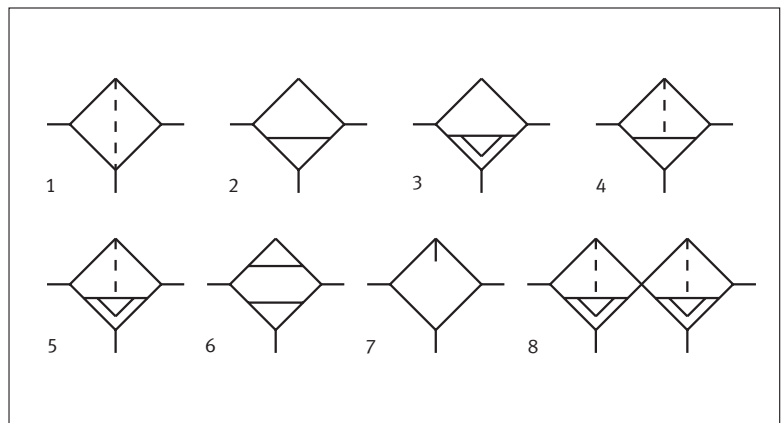
Para aumentar la duración del filtro de carbón activo, siempre deberá montarse delante un filtro micrónico y, delante de éste, una unidad de prefiltración. Los elementos filtrantes de carbón activo suelen tener que cambiarse cada 1 000 horas de funcionamiento o, en su defecto, si se percibe olor a aceite. En estos filtros, el contenido de aceite residual apenas es de 0,003 ppm (ppm = partes por millón; esta unidad, aunque no es oficial, es considerada válida. La indicación en mg/m^3 es más fácil de entender, es decir, en este caso 0,003 mg/m^3). Esta cantidad supone la existencia de un filtro antepuesto al filtro de carbón activo. Estos filtros submicrónicos se utilizan especialmente en la industria alimentaria, de bebidas, farmacéutica y en la técnica médica.

Observación: Los filtros siempre se montan delante de las válvulas utilizadas para reducir la presión, ya que la pérdida de presión que se produce en los filtros cambia según el caudal.

En la fig. 3-11 se muestran los símbolos utilizados en esquemas de distribución.

Fig. 3-11
Símbolos de filtros
y unidades de lubricación

- 1 Filtro (retención de partículas)
- 2 Separador de agua de accionamiento manual
- 3 Separador de agua automático
- 4 Filtro con separador de agua (manual)
- 5 Filtro con separador de agua (automático)
- 6 Secador de aire
- 7 Unidad de lubricación
- 8 Combinación de filtros



La utilización de equipos neumáticos en determinados sectores industriales (por ejemplo, en la industria farmacéutica o alimentaria o en cabinas de pintura) exige el uso de aire comprimido sin aceite. El problema consiste en el aceite residual contenido en el aire comprimido proveniente del compresor. Incluso utilizando compresores exentos de aceite, el aire contiene aerosoles oleosos que crean cierto grado de aceite residual. Este aceite puede taponar los elementos sensibles de los componentes de la red y, además, enjuagar o dañar la lubricación que dichos componentes tienen de fábrica. Según la clasificación Pneurop (directiva 6611), se aplica la siguiente clasificación:

Clase	Contenido de aceite en mg/m ³
1	0,01
2	0,1
3	1,0
4	5,0
5	25,0

El contenido de aceite en el aire comprimido se puede comentar en los siguientes términos:

- **Aire comprimido con poco contenido de aceite**

Este es el caso normal, después de haber pasado el aire por un filtro capaz de retener partículas de máximo 1 hasta 20 µm. Esta categoría corresponde a la calidad de aire utilizado para efectuar mediciones, respirar y trabajar, siempre y cuando cumpla con los requisitos específicos en cada caso.

- **Aire comprimido técnicamente sin contenido de aceite**

En este caso, el contenido de aceite residual es de 0,3 hasta 0,01 mg/m³, lo que significa que se trata de aire comprimido apropiado para cualquier aplicación técnica. Para conseguir aire de esta calidad tienen que utilizarse filtros micrónicos.

- **Aire comprimido absolutamente exento de aceite**

En el proceso de preparación del aire comprimido, el aire que entra en el compresor ya está exento de aceite. El contenido de aceite del aire comprimido es inferior a 0,003 mg/m³. Esta calidad se obtiene únicamente mediante el uso de filtros de carbón activo.

Para reducir el contenido de aceite en el aire comprimido existen tres posibilidades:

- Compresor para la generación de aire comprimido exento de aceite
- Secado por frío con separación de aceite (en aproximadamente un 80%)
- Filtro de retención de aceite

Se sobreentiende que es posible combinar varios de estos métodos, así como también es posible conectar en serie varios filtros, por ejemplo dos filtros finos (siendo el segundo un filtro de carbón activo que actúa como filtro de adsorción). De esta manera es posible evitar también el paso del olor del aceite o de otras sustancias. Dicho sea de paso que la mayoría de los componentes neumáticos de trabajo y de mando funcionan perfectamente con aire comprimido exento de aceite, ya que de fábrica están dotados de una lubricación de larga

duración. Si se utiliza aire que contiene aceite, deberá tenerse en cuenta que, en ese caso, los componentes siempre deberán funcionar con aire comprimido lubricado. ¡Ya no hay vuelta atrás! Las opiniones difieren en que si es mejor generar aire comprimido exento de aceite utilizando compresores sin aceite o si es preferible eliminar posteriormente el aceite mediante filtros. Al respecto cabe anotar que los compresores lubricados con aceite son más económicos.

Al filtrar el aire comprimido también se obtiene agua que se acumula en calidad de condensado que hay que purgar regularmente. Si la cantidad de condensado que se obtiene en el filtro de aire comprimido es demasiado grande, es recomendable utilizar un sistema con purga automática del condensado. De esta manera es más fácil controlar y vigilar los filtros. La purga automática del condensado se consigue de varias maneras:

- **Colector de condensado con flotador**

La purga se controla mediante el nivel del líquido. Un flotador abre la válvula de purga (fig. 3-12), con lo que puede salir el condensado.

- **Colector de condensado con regulación electrónica del nivel**

Un detector capacitivo de nivel emite una señal si el condensado alcanza un nivel máximo. Esta señal abre electrónicamente una válvula de membrana. A continuación, el líquido es vaciado por el conducto de salida.

- **Colector de condensado con purga temporizada y electroválvula**

Por experiencia se sabe con qué frecuencia es necesario purgar el condensado. Este tiempo se programa en un sistema de control que abre y vuelve a cerrar la válvula de purga periódicamente.

Fig. 3-12
Colector de condensado
con flotador

- 1 Cuerpo
- 2 Flotador
- 3 Válvula manual
- 4 Válvula de bloqueo
(de asiento cónico)
- 5 Condensado
- 6 Tubo de salida

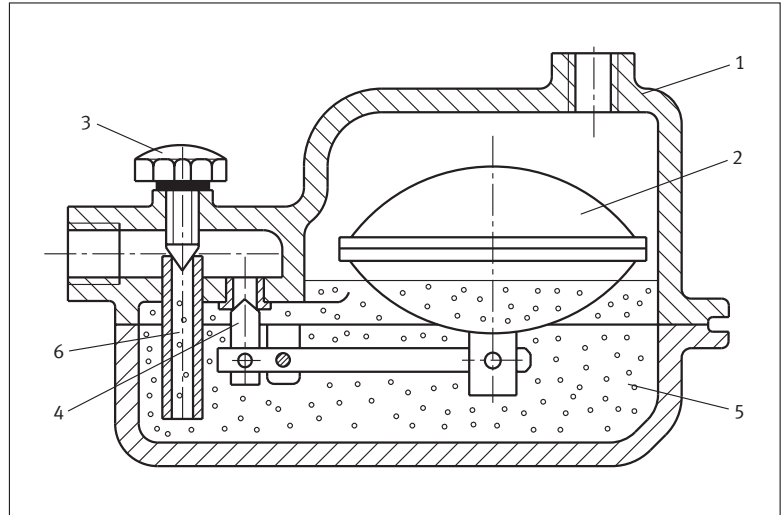
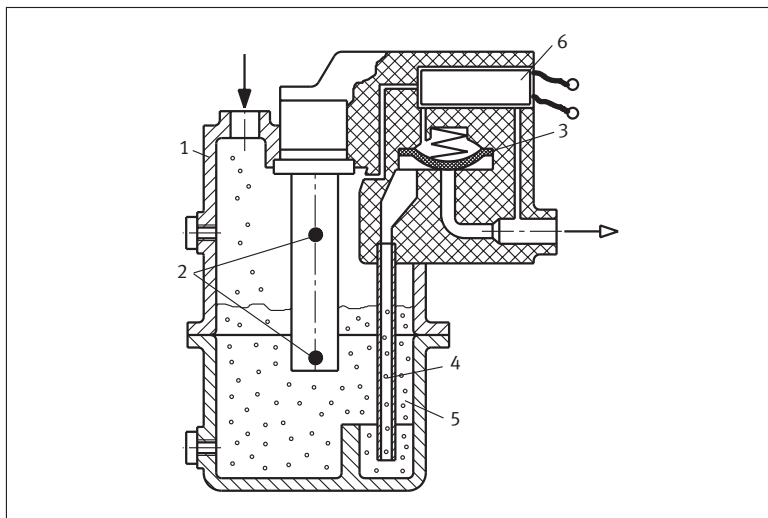


Fig. 3-13
Diversos tipos de filtros

- 1 Unidad de refrigeración posterior
- 2 Acumulador
- 3 Filtro principal con purga automática
- 4 Filtro estándar
- 5 Microfiltro
- 6 Secador por frío
- 7 Filtro submicrónico
- 8 Filtro de carbón activo
- 9 Secador por absorción



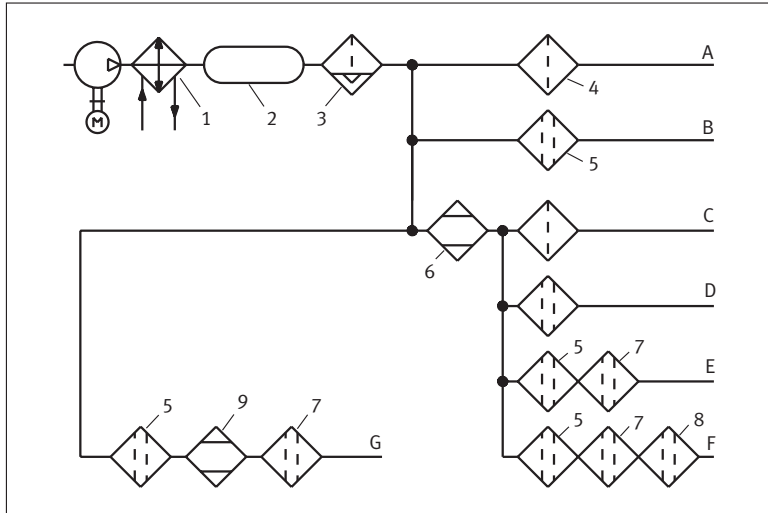
Dado que el condensado no solamente contiene agua, sino que también incluye suciedad y aceite coquizado, es posible que la válvula de salida se obture. Si eso sucede, el condensado no se puede evacuar correctamente y, además, si dicha válvula cierra de modo deficiente, se pierde aire innecesariamente.

Pero también las electroválvulas pueden fallar. Además, también se produce una fuga de aire comprimido mientras están abiertas. Estas pérdidas se pueden evitar utilizando un colector de condensado con regulación electrónica del nivel, ya que la membrana sólo abre la salida de evacuación mientras el depósito contiene condensado.

En la fig. 3-14 se muestran algunas variantes de filtros, comentados en la tabla siguiente.

Fig. 3-14
Variantes de filtros

- 1 Unidad de refrigeración posterior
- 2 Acumulador
- 3 Filtro del conducto principal con descarga automática
- 4 Filtro estándar
- 5 Microfiltro
- 6 Secador por frío
- 7 Filtro submicrónico
- 8 Filtro de carbón activo
- 9 Secador por absorción



Elección de los filtros según el esquema de la fig. 3-14 y en función de la aplicación (según Hofmann/Stein)

	Tipo de filtro	Campo de aplicación	Función principal
A	Se aceptan ligeras impurezas, humedad y aceite	Accionamiento de mandos de máquinas, sistemas de sujeción, martillos percutores, chorros de aire, aire para taller	Eliminación de impurezas; partículas de polvo superiores a 5 µm; aceite líquido superior a 99%, humedad sobresaturada inferior a 99%
B	Eliminación prioritaria de polvo y aceite, admitiéndose una pequeña cantidad de humedad (que se explica por la diferencia de temperaturas)	Equipos industriales; actuadores neumáticos; juntas metálicas; herramientas; motores	Eliminación de impurezas; partículas de polvo superiores a 0,3 µm; niebla de aceite superior a 99,9%; humedad sobresaturada superior a 99%
C	Tiene prioridad la eliminación de la humedad, aceptándose pequeñas cantidades de aceite y de polvo	Aplicaciones similares a las de A, aunque situación más difícil debido a una mayor diferencia de temperaturas en la red o en las unidades consumidoras; cabinas de pintura; aplicaciones con spray	Eliminación de la humedad y de partículas de polvo superiores a 5 µm; aceite superior a 99%; punto de condensación atmosférico de -17 °C
D	Eliminación necesaria de humedad, polvo y aceite	Técnica de procesos, instrumentos de medición; sistemas sofisticados de aplicación de pintura; refrigeración de material fundido; máquinas de inyección de plásticos	Eliminación de impurezas y humedad; partículas de polvo superiores a 0,3 µm; niebla de aceite superior a 99,9%; punto de condensación atmosférico de -17 °C
E	Necesidad de disponer de aire limpio. Eliminación casi total de humedad, polvo y aceite	Instrumentos de medición neumáticos; técnica de fluidos; pintura de aplicación electrostática; secado y limpieza de componentes electrónicos	Eliminación de impurezas y humedad; partículas de polvo superiores a 0,01µm; niebla de aceite superior a 99,9999%; punto de condensación atmosférico de -17 °C
F	Necesidad de disponer de aire extremadamente limpio. Eliminación casi completa de humedad, polvo, aceite y olor	Industria farmacéutica y alimentaria (embalaje, secado, transporte, preparación de alimentos); aplicaciones de técnica médica; trabajos de sellado y emplomado	Eliminación de todas las impurezas y sustancias odoríferas; partículas de polvo superiores a 0,01 µm; niebla de aceite superior a 99,9999%; punto de condensación atmosférico de -17 °C
G	Necesidad prioritaria de un bajo punto de condensación y aire prácticamente exento de polvo y aceite	Procesos de secado en electrónica almacenamiento de productos farmacéuticos; instrumentos de medición de la marina; transporte de material en polvo	Eliminación de todas las impurezas, humedad y vapores; partículas de polvo superiores a 0,01µm; niebla de aceite superior a 99,9999%; punto de condensación atmosférico inferior a -30 °C

Para elegir un filtro, es recomendable responder a las siguientes preguntas y proceder en concordancia con las respuestas:

- ¿Qué grado de pureza debe tener el aire?
- ¿Qué tamaño tienen las conexiones? (En función de la presión y del caudal)
- ¿Qué tipo de purga (manual o automática) es recomendable?

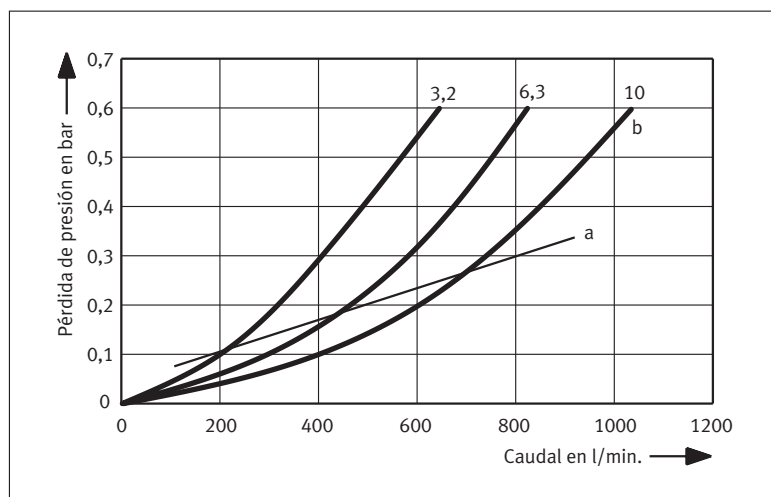
Para determinar el grado de pureza que debe tener el aire comprimido, puede recurrirse a la tabla de la página 31. El tamaño de las conexiones debe elegirse de tal manera que la pérdida de presión no sea superior al 3% de la presión absoluta de entrada. Siendo la presión de trabajo de 6 bar, la pérdida de presión admisible sería de $\Delta p = 0,21$ bar (fig. 3-15). Claro está que también el mejor filtro provoca una pérdida de presión. Según las experiencias acumuladas en la práctica, es recomendable elegir un filtro que permita que el caudal real (a una presión de funcionamiento determinada) quede por debajo de la línea recta que consta en la gráfica de la fig. 3-15.

Ejemplo: Siendo la presión de 6,3 bar y $\Delta p = 0,2$ bar, se obtiene un caudal de 450 l/min.

Es importante respetar los límites del caudal mínimo y máximo. Si el filtro funciona mientras el caudal es inferior al mínimo admisible, las fuerzas de van der Waals suelen no ser suficientes para eliminar las partículas, con lo que el aire comprimido sigue transportándolas. Si el filtro funciona siendo el caudal superior al máximo admisible (cosa que sucede con frecuencia en la práctica), entonces aumenta considerablemente la presión diferencial. En esas condiciones, el sistema funciona con menos eficiencia y, por lo tanto, aumentan los costos. Incluso puede llegarse a la situación extrema en la que las partículas que antes fueron retenidas por el filtro, vuelvan a desprenderse por la fuerza del flujo. En esos casos, el usuario se sorprende y no entiende por qué el aire comprimido contiene una cantidad significativa de partículas a pesar de los filtros.

Fig. 3-15
Pérdida de presión en el filtro
en función del caudal

- a Caudal máximo
recomendado
b Presión de funcionamiento
en bar



Comentarios adicionales sobre el condensado: El condensado es una mezcla de partículas sólidas, agua y aceite. El condensado tiene propiedades agresivas. Por ello es importante eliminarlo. Los equipos químicos-térmicos de preparación del aire comprimido son capaces de transformar el condensado en agua potable y el aire filtrado en aire puro, apropiado para la respiración. Estos sistemas de filtros son respetuosos con el medio ambiente y no exigen un vertido especial al desecharlos.

3.4

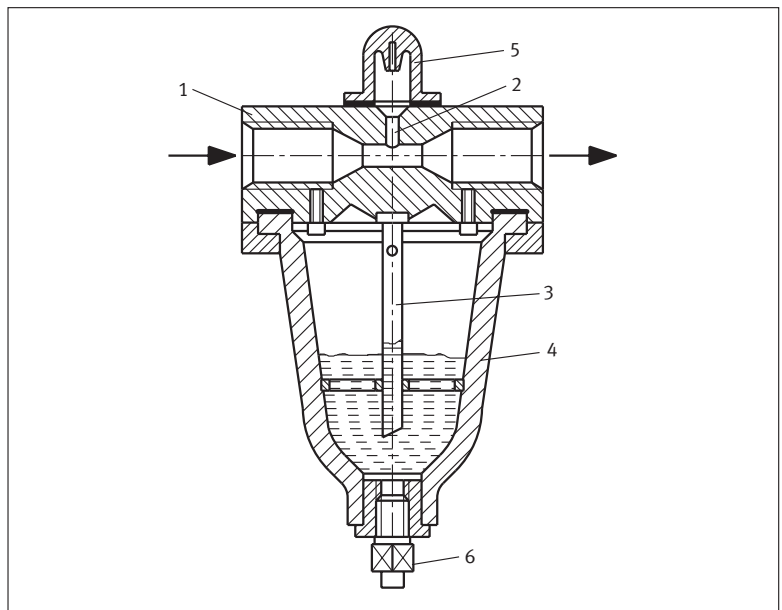
Lubricadores de aire comprimido

En determinadas aplicaciones es necesario disponer de aire comprimido lubricado. Así sucede si el aire no solamente es agente energético, sino también lubricante de las partes móviles de los elementos de trabajo. Los lubricadores se encargan automáticamente de dosificar la niebla de aceite necesaria. El aire enriquecido con niebla de aceite evita que se produzca una fricción seca en las partes móviles de los actuadores y las unidades consumidoras y, además, contribuye a evitar su desgaste prematuro. Sin embargo, sería incorrecto creer que el aceite proveniente del compresor es apropiado para cumplir estas funciones. Buena parte de la estructura molecular de este aceite se destruye por la presión y el calor durante la operación de compresión, con lo que se convierte en un medio ácido muy agresivo. Ello significa que este aceite es completamente inapropiado para la lubricación de los componentes de la red.

El cabezal del **lubricador estándar** tiene una tobera Venturi por la que pasa el aire comprimido. A raíz de la forma convergente de la tobera, se produce un vacío en el lado de aspiración, mediante el cual se aspira el aceite desde el depósito a través de un tubo ascendente (fig. 3-16). A continuación, el aceite gotea y, al hacerlo, se nebuliza. Con una válvula reguladora es posible dosificar la cantidad de gotas que deben caer en la corriente de aire comprimido.

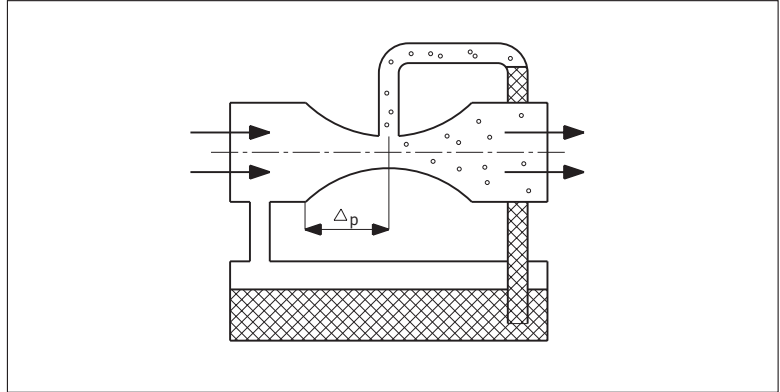
Fig. 3-16
Lubricador
de aire comprimido

- 1 Cabezal del lubricador
- 2 Tobera de aspiración
- 3 Tubo ascendente
- 4 Depósito
- 5 Boquilla cuentagotas
- 6 Tuerca de vaciado



En la fig. 3-17 se muestra el funcionamiento del principio Venturi. A raíz de la convergencia se produce una diferencia de presión Δp que permite aspirar el aceite contenido en el depósito.

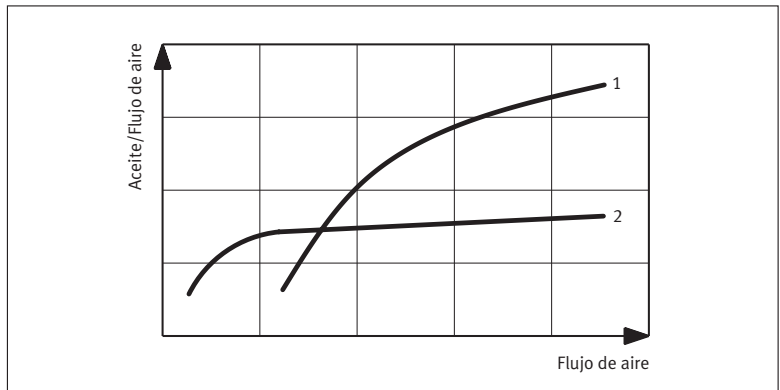
Fig. 3-17
Principio Venturi



El **lubricador de microniebla** se diferencia del lubricador estándar por conseguir una nebulización más fina de las gotas ($> 2 \mu\text{m}$) de aceite mediante un deflector. Con este tipo de lubricadores, sólo aproximadamente un 5% hasta 10% de las gotas de aceite pasan al aire comprimido. Se recomienda el uso de aceites ligeros para máquinas, así como también aceites hidráulicos especiales. La viscosidad debería ser desde 17 hasta 25 mm^2/s a una temperatura de 20 °C. La característica del caudal es el criterio decisivo a la hora de seleccionar el lubricador más apropiado (fig. 3-18). La pérdida de presión Δp no debería superar un valor comprendido entre 0,15 y 0,35 bar. El consumo de aceite depende de las exigencias que plantea cada aplicación concreta, por lo que no es posible indicar una cantidad que tenga validez general.

Fig. 3-18
Aportación de aceite al aire comprimido

- 1 Lubricador estándar
- 2 Lubricador proporcional (microniebla de aceite)

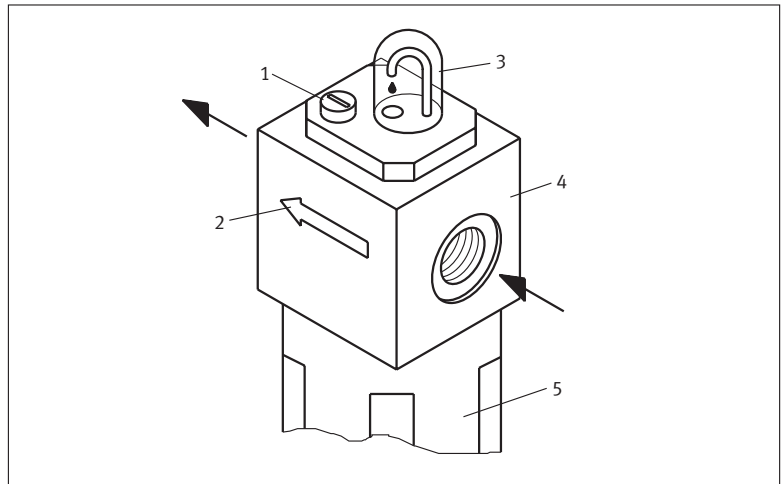


Por lo general se dosifican 2 hasta 5 gotas por m^3 . La menor cantidad es apropiada si el caudal es continuo, mientras que la mayor cantidad de gotas se aplica en presencia de caudales intermitentes. Utilizando lubricadores de microniebla, es necesario multiplicar por 10 hasta 20 la cantidad de gotas necesarias. Para los motores neumáticos son suficientes entre 4 y 6 gotas por 1 000 litros

de aire (una gota corresponde a 15 mm^3 de aceite). La cantidad de gotas se regula girando un tornillo. Si el sistema funciona de modo continuo durante un minuto como mínimo, el aceite puede dosificarse mediante un lubricador de niebla de aceite. Si, por lo contrario, el sistema funciona de modo intermitente (durante menos de un minuto), es recomendable inyectar el aceite cerca del motor para evitar una lubricación deficiente a raíz de la pérdida de aceite en la red de tuberías neumáticas. Dicho sea de paso que no debería utilizarse aire comprimido lubricado si los cilindros tienen juntas termorresistentes, ya que la grasa lubricante que contienen podría enjuagarse por el aceite contenido en el aire comprimido. Los lubricadores de niebla de aceite (fig. 3-19) deben montarse obligatoriamente de tal modo que la entrada esté dirigida hacia el lado de la proveniencia del aire comprimido.

Fig. 3-19
Lubricador de niebla de aceite

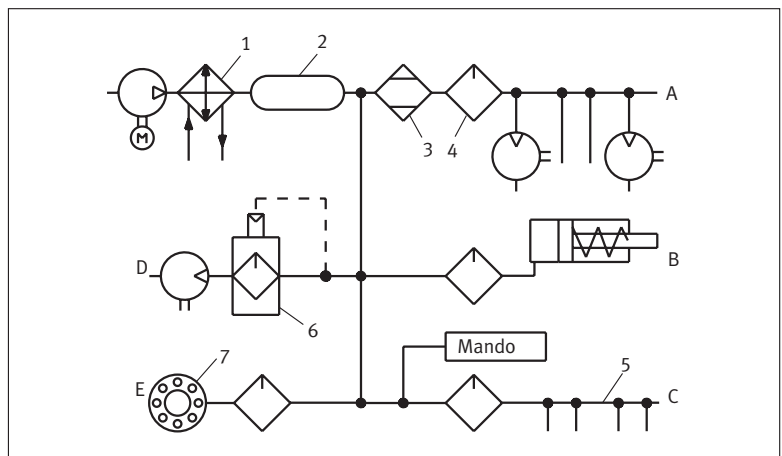
- 1 Tornillo de regulación
- 2 Dirección del flujo
- 3 Dosificador de gotas
- 4 Cuerpo
- 5 Funda protectora



En el esquema de la fig. 3-20 se muestran diversas formas de montaje de lubricadores. En la tabla en página 48 siguiente se incluyen diversos criterios para facilitar la elección entre las variantes A hasta E.

Fig. 3-20
Tipos y aplicaciones de lubricadores

- 1 Unidad de refrigeración
- 2 Acumulador
- 3 Lubricador de presión diferencial
- 4 Lubricador estándar
- 5 Lubricador múltiple
- 6 Lubricador por impulsos
- 7 Microlubricador



	Aplicación	Campos de aplicación (Ejemplos)	Función principal
A	Necesidad de disponer de modo continuo de una niebla de aceite. Tuberías de 150 m o más. Lubricación de una gran cantidad de unidades consumidoras, sin sobrelubricación	Herramientas neumáticas en líneas de montaje; controles neumáticos; líneas de transporte de piezas, soldadura, prensas; grupos de máquinas	Alimentación de una gran cantidad de unidades consumidoras a grandes distancias, niebla de aceite superior a $2\text{ }\mu\text{m}$; buenas características de transporte en tuberías de 150 m o más; se recomienda la instalación por encima de las unidades consumidoras; las derivaciones no ocasionan problemas; transporte continuo del aceite en cantidades entre 7 hasta 12 mg/m^3
B	Para todas las aplicaciones estándar que no exigen la observación de requisitos especiales. En principio, para lubricación de unidades individuales; distancias reducidas	Herramientas, actuadores neumáticos, unidades de mando	Alimentación de aire comprimido lubricado en unidades individuales. Niebla de aceite entre 4 y $10\text{ }\mu\text{m}$. Transporte satisfactorio hasta 6 m; instalación obligatoria encima de las unidades consumidoras; transporte del aceite en cantidades entre 15 hasta $25\text{ mm}^3/\text{gota}$
C	Para aplicaciones con zonas de gran caudal, respuesta muy sensible de las unidades consumidoras; alimentación de aire sin lubricar delante del lubricador	Herramientas con bajo consumo de aire; control de cilindros neumáticos; unidades de control para obtención de aire sin lubricación	Margen de respuesta pequeño, gran caudal: niebla de aceite superior a $10\text{ }\mu\text{m}$, transporte satisfactorio hasta 6 m; instalación obligatoria encima de las unidades consumidoras; transporte del aceite en cantidades entre 15 hasta $25\text{ mm}^3/\text{gota}$
D	Utilización poco frecuente de una unidad consumidora, con pausas prolongadas, grandes distancias entre el lubricador y las unidades consumidoras, caudales pequeños	Cilindros de carrera corta; pequeñas herramientas neumáticas; herramientas cortantes	Poca lubricación; entre 1 y 30 gotas por mm^3 ; las propiedades de transporte no tienen relevancia; instalación junto a la unidad consumidora; transporte del aceite de 1 hasta $30\text{ mm}^3/\text{carrera del émbolo}$
E	Siempre que se necesite una niebla de aceite fina y homogénea en pocas cantidades bien dosificadas	Rodamientos de altas revoluciones; husillos portamuelas; máquinas para tejidos de punto y tricadoras, engranajes	Transporte de niebla fina para lubricar y refrigerar; niebla inferior a $2\text{ }\mu\text{m}$; transporte satisfactorio hasta 30 m; montaje recomendado encima de la unidad consumidora

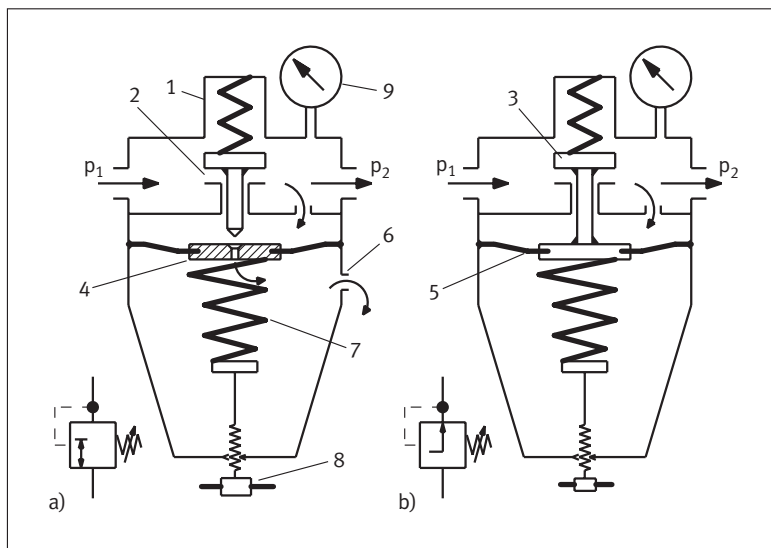
3.5

Válvulas reguladoras de presión

Los reguladores de presión tienen la función de mantener constante el nivel de la presión secundaria (que lleva hacia las unidades consumidoras), independientemente de las oscilaciones que se producen en el circuito principal (presión primaria). Si varía la presión secundaria, el funcionamiento de los elementos de mando y de los actuadores varía de modo inaceptable. Si la presión de funcionamiento es demasiado alta, aumenta el desgaste y el consumo de energía es menos eficiente. Si la presión de funcionamiento es demasiado baja, el rendimiento disminuye y, con frecuencia, las unidades consumidoras no funcionan correctamente. En términos generales, la parte de trabajo de la red debe tener una presión de 6 bar, mientras que la parte de los mandos necesita 4 bar. En la fig. 3-21 se muestra la construcción de dos tipos de reguladores de presión de aire comprimido.

Fig. 3-21
Funcionamiento
de reguladores de presión

- a) Regulador con taladro de escape
 - b) Regulador sin taladro de escape
- 1 Cuerpo
 - 2 Asiento de la válvula
 - 3 Plato de la válvula
 - 4 Membrana con taladro
 - 5 Membrana unida fijamente al émbolo de la válvula
 - 6 Taladro de escape
 - 7 Muelle de compresión
 - 8 Pomo roscado para ajustar la fuerza del muelle
 - 9 Manómetro



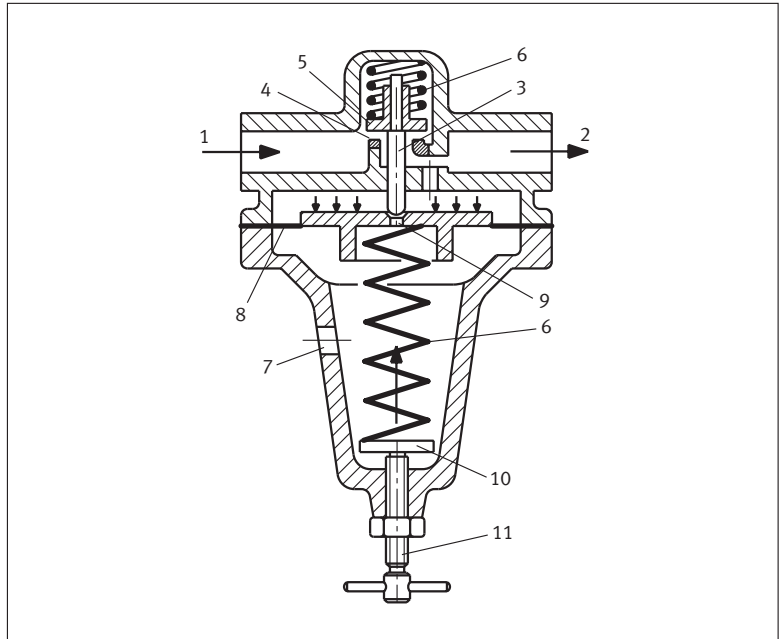
Funcionamiento: La presión primaria p_1 levanta el plato de la válvula (3), separándola del asiento de la válvula (2) en contra de la fuerza del muelle (7). De esta manera se obtiene en la salida la presión p_2 . Esta presión actúa sobre la membrana (4 y 5, respectivamente) a través de un taladro. En el caso del regulador con taladro de escape (fig. 3-21a), el taladro de la membrana queda libre a partir de una determinada presión, de modo que el aire comprimido puede salir a través de la membrana (4) y del taladro de escape propiamente dicho (6) (consumo propio del regulador). Cambiando constantemente la superficie en el asiento de la válvula (sección anular) y quedando abierto el taladro de la membrana, la presión del lado secundario se adapta al caudal (por ejemplo, al cambiar la carga en un cilindro de trabajo). De esta manera se mantiene casi constante la presión secundaria.

En el regulador sin taladro de escape (fig. 3-21b), el plato de la válvula y la membrana (5) funcionan como un sistema de doble émbolo. Si la presión secundaria p_2 es demasiado alta, aumenta la presión aplicada en el asiento de la válvula, con lo que se presiona la membrana en contra de la fuerza del muelle

de compresión. De esta manera disminuye la superficie de la sección del caudal, pudiendo llegar a cero, con lo que el flujo de aire se reduce o se bloquea totalmente. Sólo si la presión de funcionamiento p_2 vuelve a ser más pequeña que la presión primaria, vuelve a fluir más aire comprimido. En la fig. 3-22 se muestra un regulador con taladro de escape, muy usual en aplicaciones industriales.

Fig. 3-22
Construcción de una válvula reguladora de presión

- 1 Aire comprimido sin regular
- 2 Aire comprimido regulado
- 3 Varilla
- 4 Sección anular
- 5 Plato de la válvula
- 6 Muelle de compresión
- 7 Taladro de escape
- 8 Membrana
- 9 Taladro de descarga
- 10 Platinillo del muelle
- 11 Pomo roscado



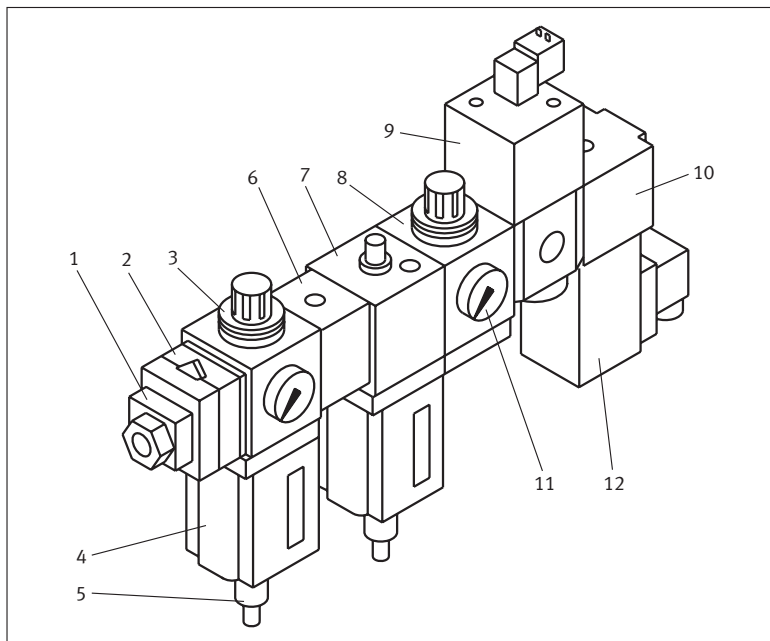
3.6 Unidades de mantenimiento

Las unidades de mantenimiento son combinaciones compactas, por lo general compuestas de una válvula de cierre, filtro, válvula reguladora de presión y lubricador (montaje en ese orden). Estas unidades se montan cerca de las unidades consumidoras y tienen la finalidad de preparar el aire comprimido. Al montar los componentes de una unidad de mantenimiento deberá tenerse en cuenta la dirección del flujo, tal como consta en cada uno de ellos mediante una flecha indicadora. Además, las unidades de mantenimiento también pueden incluir componentes de seguridad y de control. Si la unidad consumidora es una máquina grande, las unidades de mantenimiento pueden estar montadas en el bastidor de la máquina. En ese caso, el espacio libre debajo de la unidad de mantenimiento tiene que ser suficiente para montar un depósito para el condensado. Los reguladores de presión tienen la finalidad de mantener un nivel de presión constante, incluso si varía el consumo de aire comprimido, y, además, deben garantizar la disposición de la presión de trabajo necesaria. La presión de funcionamiento se regula mediante la válvula reguladora. En la fig. 3-23 se aprecia la estructura modular de una unidad de mantenimiento.

Fig. 3-23

Componentes principales de una unidad de mantenimiento modular (ejemplo)

- 1 Empalme para el tubo
- 2 Válvula de cierre manual
- 3 Filtro y válvula reguladora
- 4 Filtro
- 5 Purga de condensado
- 6 Bloque distribuidor
- 7 Lubricador de aire comprimido
- 8 Válvula reguladora de la presión
- 9 Válvula de arranque progresivo
- 10 Bloque distribuidor
- 11 Manómetro
- 12 Presostato

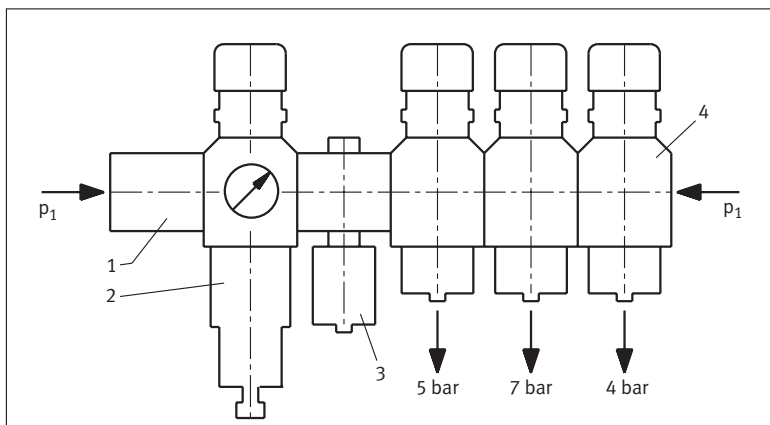


Las unidades de mantenimiento permiten obtener aire comprimido preparado de modo óptimo y, además, consiguen absorber las oscilaciones que puede experimentar la presión debido a la conexión y desconexión del compresor. Ello significa que tanto el lado secundario como el lado primario están acoplados a la unidad de mantenimiento. Los módulos de distribución permiten obtener aire comprimido de diversas calidades mediante diversas combinaciones de filtros (por ejemplo, aire no lubricado que a continuación puede pasar por un lubricador). Además, también es posible componer unidades de mantenimiento para diversos niveles de presión independientes entre sí. En la fig. 3-24 se muestra un esquema de una batería de reguladores con diversas tomas de aire comprimido de diferentes presiones, mientras que la presión primaria pasa de modo enlazado desde el primer hasta el último regulador.

Fig. 3-24

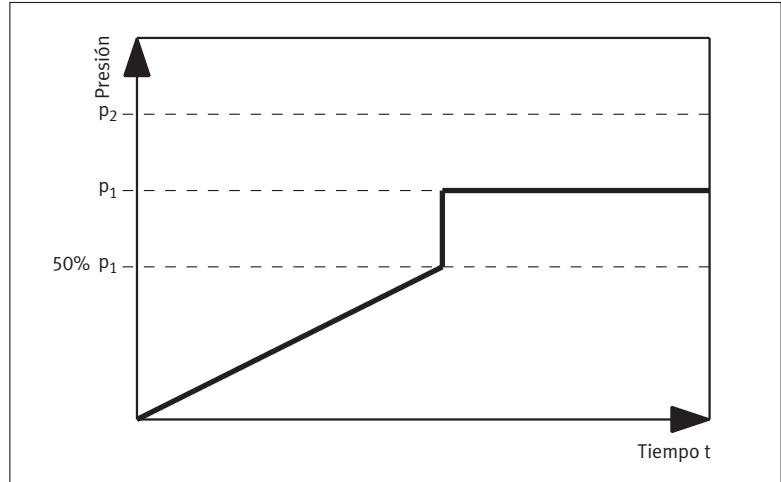
Batería de reguladores de presión de una unidad de mantenimiento

- 1 Válvula de cierre principal
- 2 Filtro y regulador de presión,
- 3 Bloque distribuidor
- 4 Válvula reguladora de presión para montaje en batería



Es posible montar delante una válvula de arranque progresivo. Se trata de una válvula que permite aumentar paulatinamente la presión en sistemas automáticos. De esta manera, los cilindros y las demás unidades de trabajo pasan lentamente a su posición inicial, en vez de hacerlo bruscamente. Una vez que la presión llega al 50% del nivel previsto, ya no pueden producirse colisiones, por lo que la válvula abre el paso completamente (fig. 3-25).

Fig. 3-25
Aumento de la presión
mediante una válvula
de arranque progresivo

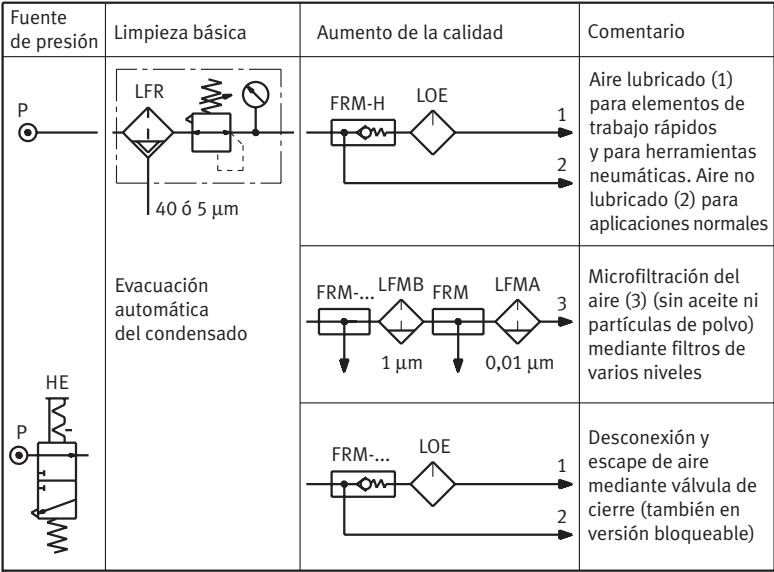


En la fig. 3-26 se aprecian las combinaciones más difundidas en la industria. Aunque es posible montarlas individualmente, es posible adquirir combinaciones montadas en fábrica para la mayoría de las aplicaciones. Estas combinaciones (vistas de arriba hacia abajo en la tabla) se diferencian por lo siguiente:

- Se necesita aire comprimido con o sin lubricación. El aire no lubricado se deriva delante del lubricador. El bloque distribuidor está provisto de una válvula antirretorno para evitar que del ramal de aire lubricado retorne aire comprimido. La niebla de aceite puede dosificarse. La “tubería de mantenimiento” debe tener un caudal superior a las tuberías ramificadas. Esta circunstancia debe tenerse en cuenta al diseñar la red.
- Se necesita aire comprimido de varias calidades. En el ejemplo explicado antes se mostró cómo es posible obtener varias calidades de aire mediante el uso de varios filtros. El último nivel permite obtener aire completamente exento de aceite y partículas de polvo. Este aire microfiltrado es necesario, por ejemplo, en mandos de baja presión. Por razones económicas, el grado de filtración sólo debe ser el absolutamente necesario, ya que cada filtro supone una resistencia al caudal.
- Una combinación también puede empezar por una válvula de cierre. Esta válvula se utiliza para alimentar o descargar aire comprimido. La palanca basculante puede bloquearse mediante un candado corriente.

Fig. 3-26
Combinaciones usuales de unidades de mantenimiento

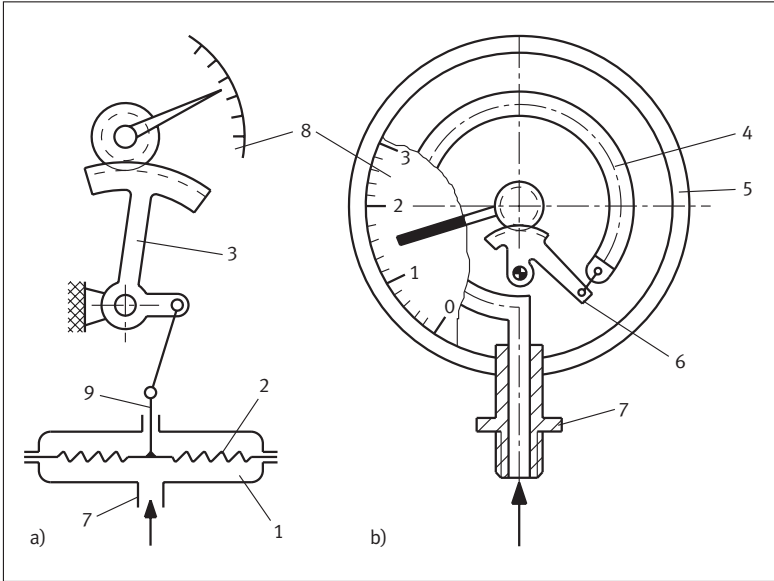
LFR Bloque distribuidor
HE Válvula de cierre manual
LFR Unidad de filtro y regulador
LFMA Filtro micrónico, submicrónico
LFMB Filtro submicrónico
LOE Lubricador
P Fuente de aire comprimido



Las válvulas reguladoras tienen un manómetro para indicar la presión. Los manómetros mecánicos tienen la ventaja de no necesitar energía auxiliar para su funcionamiento, ya que recurren a la deformación elástica del muelle sometido a presión (manómetros de muelle tubular, de membrana elástica). En la fig. 3-27 se aprecian dos manómetros típicos.

Fig. 3-27
Manómetros analógicos

- a) Manómetro de membrana elástica
b) Manómetro de muelle tubular
- Cámara de presión
 - Membrana
 - Segmento dentado
 - Muelle tubular
 - Cuerpo
 - Palanca de desviación
 - Conexión M20 x 1,5
 - Escala
 - Empujador



En el caso del **manómetro de muelle tubular**, el muelle de tubo Bourdon amplía su radio por efecto de la presión y, al hacerlo, transmite su movimiento a una manecilla a través de un sistema de piñones. La amplitud del radio se utiliza como criterio para medir la presión.

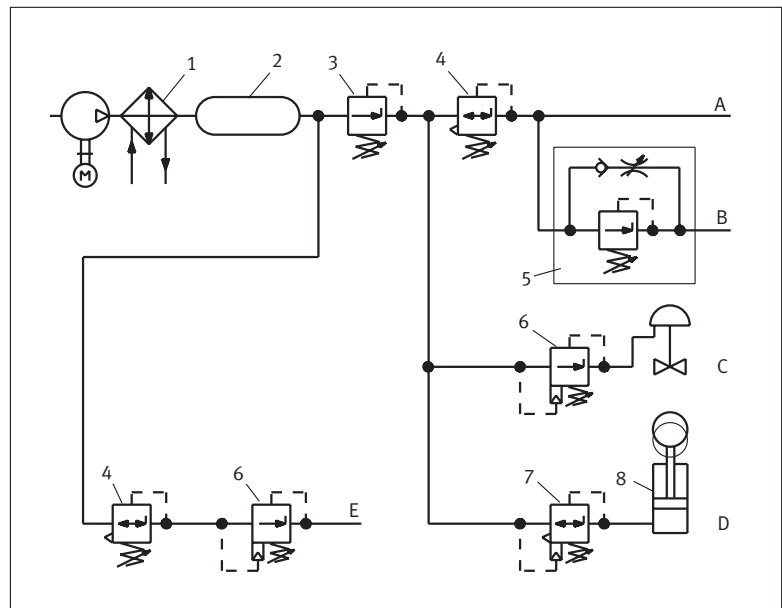
El **manómetro de membrana** tiene una lámina elástica (membrana) con conexión a presión de un lado. Las membranas de este tipo tienen una gran estabilidad mecánica por su diseño y su forma de montaje, por lo que son menos sensibles a las vibraciones. La indicación corresponde a la presión que se ajustó con el regulador. Para elegir el regulador de presión, deben aplicarse los siguientes criterios:

- Característica de regulación (cómo cambia la presión secundaria en función de la presión primaria) recurriendo al caudal como parámetro
- Característica del caudal (cómo cambia la presión secundaria en función del caudal). Por razones económicas, debe elegirse un caudal nominal que sea apropiado para la aplicación correspondiente

En la fig. 3-28 se muestran algunos tipos de reguladores de presión. En el caso de la aplicación B, la posible presión excedente en el lado secundario no tiene salida a la atmósfera, sino que se recupera para aprovecharla en el sistema. Comentarios sobre las variantes A hasta E desde la perspectiva de las aplicaciones:

Fig. 3-28
Esquema con diversos tipos de reguladores

- 1 Refrigeración posterior
- 2 Acumulador
- 3 Regulación de la línea principal
- 4 Regulador estándar
- 5 Válvula reguladora (estrangulación y antirretorno)
- 6 Regulador fino
- 7 Regulador fino con gran escape de la presión secundaria
- 8 Unidad consumidora



	Características de las aplicaciones	Ejemplos de aplicaciones	Función principal
A	Aplicaciones con poca dependencia de la presión primaria, con caudales variados y con descarga de la presión secundaria	Sistemas de control neumático; chorros de arena; pintura a pistola; motores neumáticos	Regulación del caudal con poca dependencia de la presión primaria, regulación de la presión entre 0,5 y 16 bar; caudal hasta 15 000 l/min.; histéresis inferior a 0,05 bar; precisión de repetición de 0,2 bar; descarga de la presión en el circuito secundario; compensación de presión y de caudal
B	Para ahorrar aire comprimido utilizando cilindros de doble efecto; sin mayor precisión de regulación, aunque con ciclos de alta frecuencia	Optimación del consumo al usar cilindros de doble efecto; cilindros de sujeción; motores neumáticos	Regulación de la presión mediante válvula antirretorno; regulación entre 0,5 y 16 bar; caudal hasta 15 000 l/min.; histéresis inferior a 0,05 bar; caudal $\dot{V}$ hasta 250 l/min.
C	Si habiendo un caudal pequeño variable se necesita una presión constante; gran precisión de regulación; oscilación casi imperceptible de la presión primaria	Instrumentos de medición neumáticos; técnica de medición y regulación; técnica de fluidos	Gran precisión de regulación con pequeño caudal; regulación de la presión entre 0,05 y 5,5 bar. Precisión de repetición de 0,005 bar; valor umbral 0,005 bar; $\dot{V}$ hasta 250 l/min.
D	Si es necesario compensar oscilaciones mínimas de la presión secundaria; sin umbral de presión en ambos sentidos del flujo; gran capacidad de caudal	Control de rodillos tensores; compensación de presión en operaciones de llenado de silos; máquinas sopladoras de plástico; alimentación de aire en bancos de pruebas	Gran precisión de regulación con gran caudal, también con descarga de la presión secundaria; regulación de la presión entre 0 y 7 bar; precisión de repetición de 0,005 bar; valor umbral 0,001 bar; $\dot{V}$ hasta 500 l/min.
E	Aplicaciones en las que la alta presión de entrada no permite obtener una baja presión mediante un sólo nivel de regulación	Redes de alta presión con regulación a baja presión; poca precisión de regulación al usar un sólo nivel de regulación	Gran precisión de regulación con presión primaria alta, regulación de la presión entre 0,05 y 5,5 bar; precisión de repetición de 0,005 bar; valor umbral de 0,001 bar; $\dot{V}$ hasta 250 l/min.

Para elegir la unidad de mantenimiento más apropiada, debe recurrirse siempre a los siguientes criterios: presión, caudal, humedad, contenido de aceite y cantidad y tamaño de las partículas. Adicionalmente es recomendable tener en cuenta las sugerencias que se explican a continuación:

- La unidad de mantenimiento siempre debe tener conexiones de un tamaño por una unidad superior que el tamaño que sería teóricamente suficiente para el caudal máximo previsible. Si las conexiones son demasiado pequeñas, se producen oscilaciones de presión en los reguladores y disminuye la duración de los filtros.
- Las unidades de mantenimiento deben montarse en el lugar de menor temperatura de todo el sistema, por ejemplo en el lado interior de una pared exterior de la nave de la fábrica y no en la zona cercana a una máquina que irradia calor.
- La unidad de mantenimiento debe montarse a máximo 5 metros de distancia de la última unidad consumidora. De lo contrario, es posible que la niebla de aceite se deposite antes de llegar a la unidad consumidora que la necesita (suponiendo que se trabaje con aire lubricado).
- El separador de agua se encarga de eliminar las gotas de agua acumuladas en la red de tuberías. Pero, aunque el recipiente sea grande, termina llenándose. Por ello, es absolutamente necesario efectuar los trabajos de mantenimiento con regularidad y en concordancia con las recomendaciones oficiales. Si se tienen dudas, es preferible prever desde un principio el uso de un separador automático.
- Los depósitos de los filtros deberían limpiarse únicamente con agua, no con detergentes. En caso de aplicaciones en condiciones industriales rudas, es preferible utilizar una funda protectora metálica.
- Es recomendable que los filtros para la retención de sustancias sólidas no sean más grandes que lo absolutamente necesario. Al montarlos, debe tenerse en cuenta la dirección del flujo. Los cartuchos filtrantes no se limpian y deben desecharse.
- En caso de emplear un secador por adsorción, debe utilizarse una unidad de prefiltración (grado de filtración de 1 μm) con el fin de prolongar su duración. El aceite disminuiría considerablemente la duración del agente secante. Además, la temperatura de entrada debería ser inferior a 35 °C.
- Para evitar el uso no autorizado de la válvula de regulación, ésta puede estar provista de cabezales con llave.
- Únicamente deberán utilizarse los aceites minerales de poca viscosidad recomendados por el fabricante de los lubricadores de aire comprimido.
- Si se utilizan cilindros grandes (con émbolos de diámetro superior a 100 mm) que funcionan con aire comprimido lubricado, es recomendable utilizar un silenciador para el aire de escape del filtro. De esta manera disminuye el nivel de ruidos y, además, se retienen las partículas mediante un cartucho microfiltrante.
- También las unidades de mantenimiento mismas tienen que someterse a un servicio de mantenimiento regular, ya que de lo contrario pueden averiarse o funcionar de modo deficiente.

3.7

Unidades intensificadoras de la presión

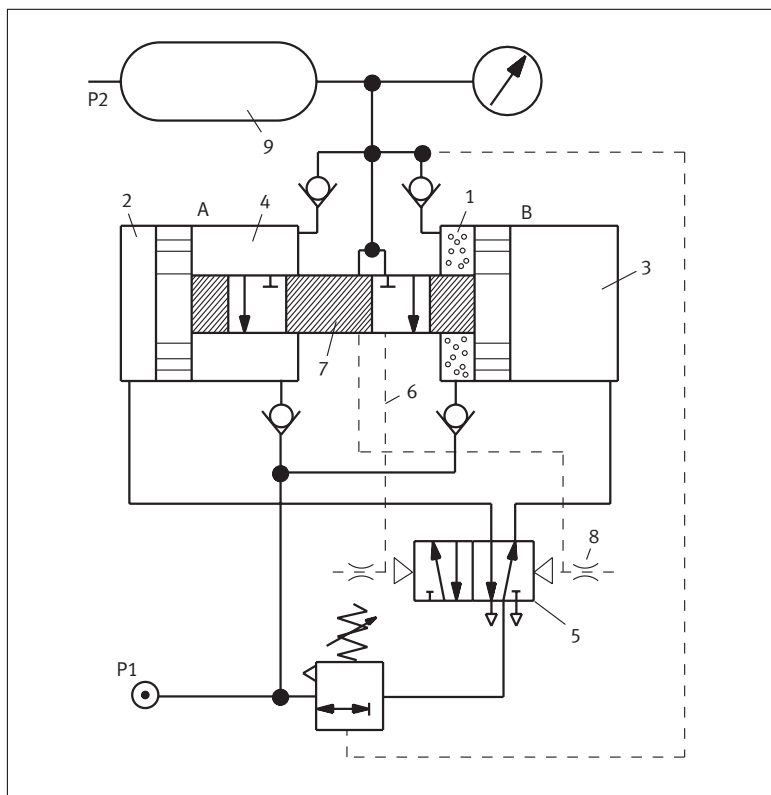
Las unidades intensificadoras de la presión (pressure-booster en inglés) se utilizan para que determinadas unidades consumidoras reciban una presión de trabajo superior a la presión de la red. Ello significa que estas unidades intensificadoras tienen el efecto contrario de las unidades reductoras de la presión (válvulas reguladoras). Para aumentar la presión puede recurrirse a diversas soluciones técnicas. Una solución muy elegante consiste en la utilización de un convertidor de doble émbolo, tal como se muestra en la fig. 3-29. Para su funcionamiento únicamente se necesita aire comprimido. La intensificación puede llegar a duplicar la presión de la red y llegar a máximo 10 ó 16 bar.

Fig. 3-29
Intensificador de presión
(Festo)

- 1 Cámara de intensificación de la presión B
- 2 Cámara de trabajo A
- 3 Cámara de trabajo B
- 4 Cámara de intensificación de la presión A
- 5 Válvula de vías
- 6 Línea de mando
- 7 Vástago
- 8 Válvula estranguladora
- 9 Acumulador de presión

p_1 Presión de entrada desde 2 hasta 8 y de 10 bar

p_2 Presión de salida desde 2,5 hasta 10 y 16 bar

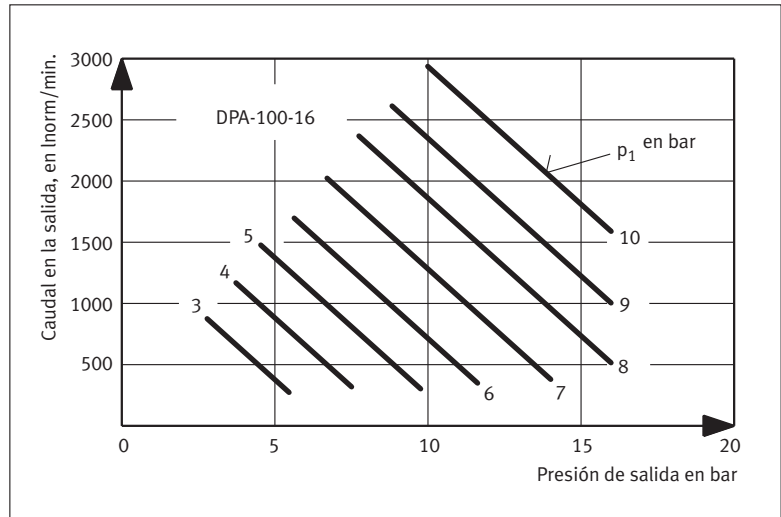


Funcionamiento: Mediante una válvula de vías (5) se alimenta aire comprimido a las cámaras (3) y (4) y se conecta a escape la cámara (2). Los émbolos y el vástago (7) se mueven en este caso hacia la izquierda, con lo que se comprime el aire en la cámara intensificadora (1). Una vez en la posición final, el aire contenido en la cámara (1) fluye a través del taladro del vástago (7) (que hace las veces de válvula de vías) hacia la válvula de vías (5) a través de la junta y de la línea de mando (6).

Así se alimenta aire en las cámaras (1) y (2) y sale aire de la cámara (3). A continuación, los émbolos avanzan hacia la derecha. El vástago (7) cierra el paso en la zona de la junta. La línea de mando se conecta a escape a través de la válvula estranguladora (8). Este proceso se repite continuamente. El movimiento siempre se invierte en las posiciones finales. El caudal depende de la presión de entrada p_1 y de la presión de salida p_2 . El diagrama de la fig. 3-30 permite leer el caudal, expresado en litros normalizados por minuto.

Fig. 3-30
Caudal del intensificador
de presión DPA-100-16
(Festo)

P_1 Presión de entrada



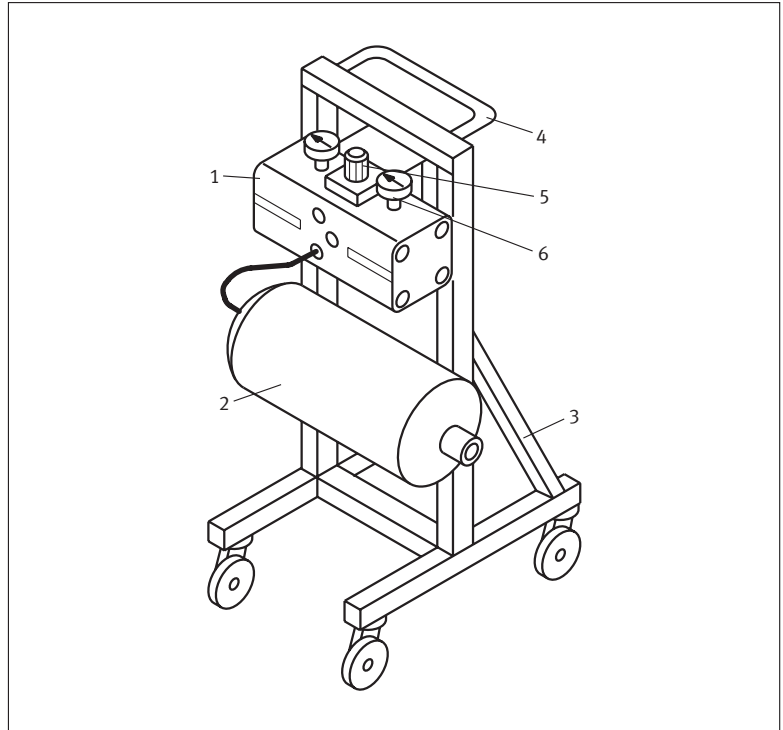
Dada la construcción de la unidad intensificadora, la presión de salida es pulsante. Para compensar dichas pulsaciones y para evitar picos de presión, es recomendable montar detrás de la unidad un depósito de aire comprimido. Además, debe tenerse en cuenta que el convertidor mismo también consume aire. Este consumo aumenta en la medida en que aumenta la presión de salida. Dicho consumo asciende, como mínimo, al 20 por ciento del caudal del lado secundario.

Las unidades intensificadoras de presión tienen que cumplir determinadas condiciones especiales, definidas por las autoridades nacionales pertinentes, tales como la norma de seguridad NE 1012, parte 1. Según esa norma, deben adoptarse las medidas apropiadas para evitar un aumento indebido de la presión en el lado de salida. Con ese fin puede montarse, por ejemplo, una válvula de seguridad que no se puede bloquear. Las válvulas utilizadas en la red de alta presión tienen que estar homologadas para dicha presión. Si lo permiten las circunstancias y si se dispone de un depósito apropiado, es posible prever un funcionamiento en modalidad intermitente.

También existen unidades móviles, tal como se puede apreciar en la fig. 3-31. Se trata de una combinación de intensificador de presión y depósito de aire comprimido. Con esta unidad es posible disponer de aire comprimido a 10 bar en talleres de control o de pruebas o en obras de construcción. Para poner en funcionamiento el equipo, únicamente se necesita una toma de aire comprimido para conectar el intensificador de presión.

Fig. 3-31
Intensificador
de presión móvil (Festo)

- 1 Intensificador de presión
- 2 Acumulador
- 3 Estructura
- 4 Empuñadura
- 5 Botón para regular la alta presión
- 6 Manómetro



Es evidente que el aire comprimido tiene que llegar desde el compresor hasta la unidad consumidora (máquina, herramienta). Para ello es necesario disponer de un sistema eficiente de distribución del aire comprimido constituido por tubos y válvulas. El aire comprimido tiene que llegar hasta la unidad consumidora en la cantidad correcta y la calidad necesaria y con la presión requerida. El sistema de distribución se configura normalmente de tal manera que en la entrada de aire de la unidad consumidora siempre se disponga de la presión mínima necesaria, sin importar cuán alejada esté dicha unidad.

4.1

Componentes de la red de aire comprimido

Los componentes principales de una red de aire comprimido son los siguientes:

- **Tubería principal**

A través de esta tubería se transporta al aire comprimido desde el compresor hasta el taller en el que es necesario disponer de aire comprimido.

- **Tubería de distribución**

La tubería de distribución suele ser una tubería circular (anular). Es la que se encarga de llevar el aire comprimido desde la tubería principal hasta los diversos puestos de trabajo.

- **Tubería de unión**

Se trata de la última parte de la red de tubos fijamente instalados. La tubería de unión une la tubería de distribución con cada uno de los puestos de trabajo. Los tubos de unión con frecuencia son tubos flexibles.

- **Derivación**

Se trata de un tubo que lleva desde la tubería de distribución hasta un determinado lugar del taller; este tubo no es circular y termina en un punto muerto. Su ventaja consiste en que se necesita menos material que una tubería circular.

- **Tubería circular**

En este caso, los tubos forman un anillo de distribución. La ventaja de una tubería circular consiste en que permite bloquear determinados tramos y aún así disponer de aire comprimido en otros puntos. El diámetro nominal de estas tuberías puede ser más pequeño. Además, también ofrecen la ventaja que aunque se consuma aire comprimido simultáneamente en varios puntos vecinos (por ejemplo, en A de la figura 4-2), se dispone de suficiente aire comprimido en B. Si se conectan entre sí varias tuberías circulares, se obtiene una red de tuberías circulares. Una red puede dividirse en varias partes que se pueden bloquear por separado. En la fig. 4-1 se muestra el esquema simplificado de una red.

Fig. 4-1
Ejemplo de esquema de una red de tuberías circulares

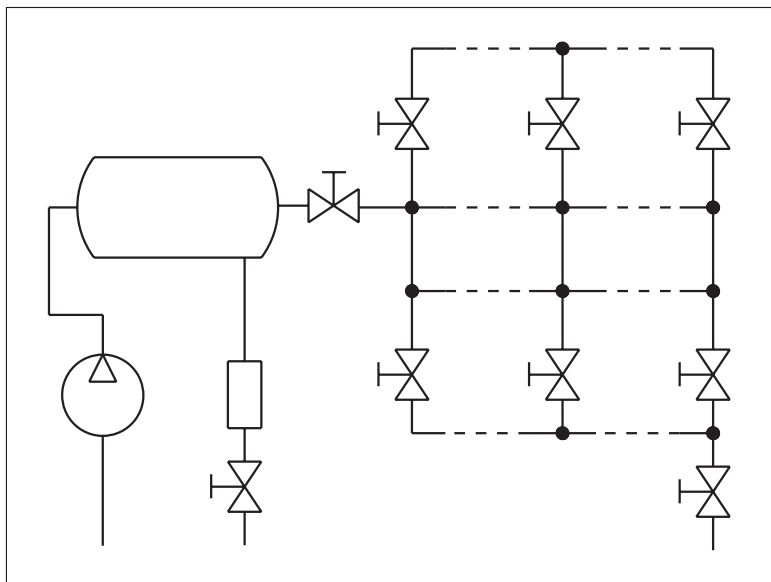
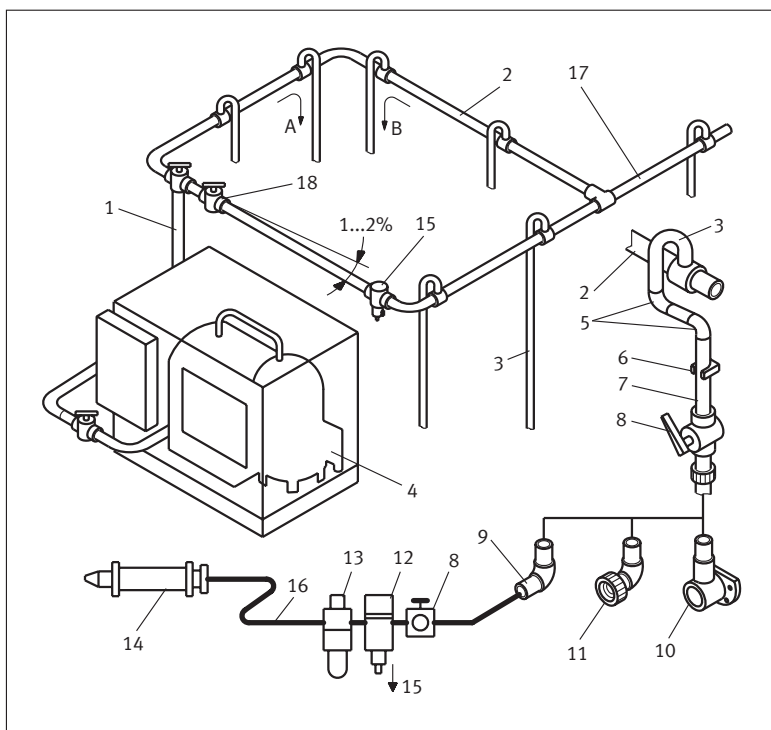


Fig. 4-2
Partes de una red de aire comprimido

- 1 Tubería principal
- 2 Tubería de distribución (en este caso, circular)
- 3 Tubería de unión (toma de aire en la parte superior)
- 4 Compresor
- 5 Codo de 90°
- 6 Horquilla para montaje en la pared
- 7 Tubo
- 8 Válvula esférica
- 9 Tubo acodado
- 10 Disco de pared
- 11 Empalme con rosca interior
- 12 Filtro
- 13 Lubricador
- 14 Unidad consumidora
- 15 Condensado
- 16 Tubo flexible
- 17 Derivación
- 18 Llave de cierre

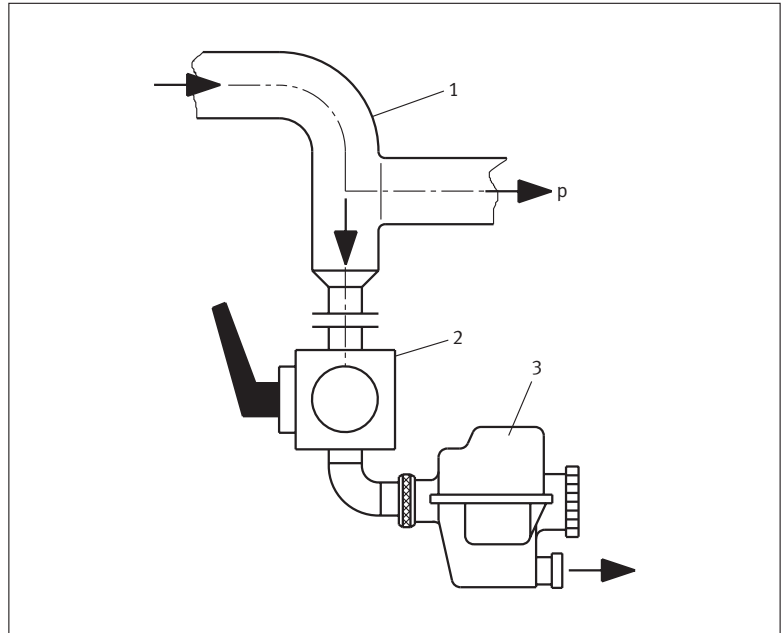


- **Valvulería y accesorios para conexiones**

La valvulería y las conexiones incluyen componentes que se conectan a las tuberías y que inciden en el caudal. En la fig. 4-2 se muestra el ejemplo de un sistema que incluye los componentes más importantes. Tal como se puede apreciar, estos componentes tienen que montarse en la parte superior debido al condensado (montaje en forma de cuello de cisne). Las derivaciones para la purga del condensado tienen que montarse en la parte inferior del tubo en la zona más baja de la red. Si la unidad de purga del condensado se monta directamente en el tubo, deberá evitarse que el caudal arrastre consigo el condensado. En la fig. 4-3 se muestra un ejemplo de montaje.

Fig. 4-3
Purga de condensado

- 1 Tubería
- 2 Válvula esférica
- 3 Purgador de condensado



La presión disponible en el extremo más distante de la tubería es insuficiente en muchos casos. Si una unidad consumidora recibe insuficiente presión, puede deberse a las siguientes razones:

- Diseño deficiente de la red de distribución o compresor de rendimiento insuficiente
- Tubos flexibles de las herramientas demasiado largos o con diámetro demasiado pequeño
- Mal estado de la red de aire comprimido, existiendo fugas grandes y constantes
- Falta de mantenimiento, lo que puede producir, por ejemplo, una obturación de los filtros
- Acoplamientos y boquillas demasiado pequeños
- Demasiadas piezas acodadas (disminuyen la presión)

Ello significa que una red no puede contener una cantidad ilimitada de tuberías de unión. En la tabla siguiente se puede apreciar qué conexiones de qué diámetros se pueden conectar a una tubería.

Tubería de distribución		Cantidad de derivaciones								
		Diámetro interior en milímetros								
Pulgadas	mm	3	6	10	13	19	25	38	51	76
1/2	13	20	4	2	1	–	–	–	–	–
3/4	19	40	10	4	2	1	–	–	–	–
1	25	–	18	6	4	2	1	–	–	–
1 1/2	38	–	–	16	8	4	2	1	–	–
2	51	–	–	–	16	8	4	2	1	–
3	76	–	–	–	–	16	8	4	2	1

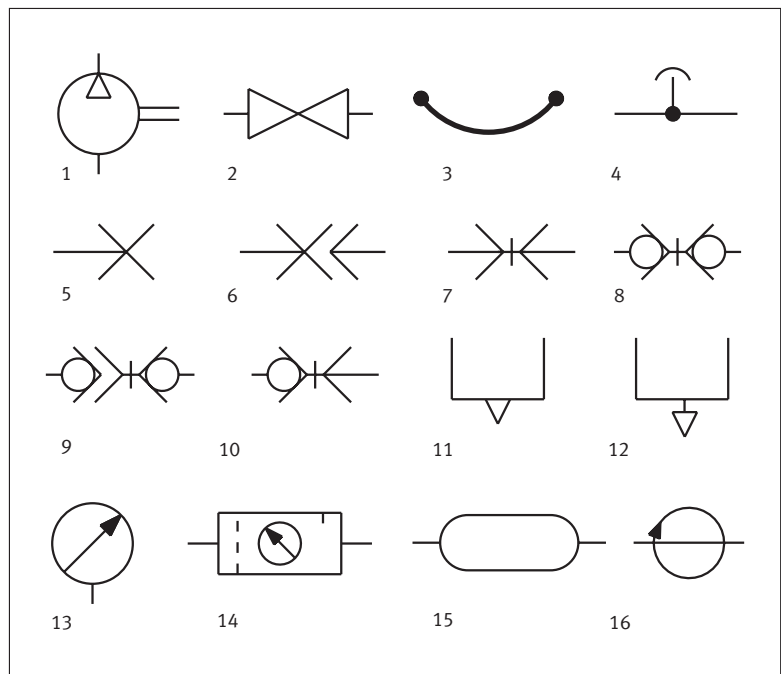
Ejemplo: ¿Cuántas derivaciones pueden haber como máximo en una tubería de distribución que tiene un diámetro interior de 51 mm? Respuestas:

- 16 derivaciones con diámetro de 13 mm
- 8 derivaciones con diámetro de 19 mm
- 4 derivaciones con diámetro de 25 mm
- 2 derivaciones con diámetro de 38 mm y
- 1 derivación con diámetro de 51 mm

Los componentes incluidos en una red de aire comprimido suelen representarse mediante símbolos (fig. 4-4).

Fig. 4-4
Símbolos de componentes de una red de aire comprimido

- 1 Compresor
- 2 Válvula de cierre
- 3 Tubo flexible
- 4 Punto de escape de aire
- 5 Toma de energía (con tapa)
- 6 Toma de energía (con tubería posterior)
- 7 Acoplamiento rápido (sin válvula antirretorno mecánica)
- 8 Acoplamiento rápido con válvulas antirretorno de accionamiento mecánico
- 9 Racor con bloqueo de seguridad
- 10 Racor con bloqueo unilateral
- 11 Salida sin rosca
- 12 Salida con rosca
- 13 Manómetro
- 14 Unidad de mantenimiento (símbolo simplificado)
- 15 Acumulador
- 16 Racor rotativo



Al diseñar una nueva red de aire comprimido, es muy importante tener en cuenta las dimensiones de las tuberías. Por ello, es recomendable proceder de la siguiente manera:

- Definir el lugar en el que se montarán las unidades consumidoras
- Definir la cantidad de unidades consumidoras, distinguiéndolas según su tipo y la calidad de aire que necesitan
- Preparar una lista que incluye el consumo de aire de cada uno de las unidades consumidoras
- Determinar el consumo medio, considerando la duración de la conexión, la simultaneidad de funcionamiento y las reservas necesarias para una posible posterior ampliación de la red
- Confección del plano de las tuberías, incluyendo su longitud, los accesorios (derivaciones, codos, reductores) y los racores necesarios
- Calcular la resistencia que se opone al caudal, convirtiendo la resistencia de los componentes en el equivalente de la resistencia en las tuberías en función de su longitud
- Determinación de la pérdida de presión admisible
- Determinar la longitud nominal de los tubos para, a continuación, determinar su diámetro interior
- Elección del material de los tubos

A continuación se ofrecen informaciones más detalladas sobre estos pasos.

Al decidir sobre el lugar en el que se montarán las unidades consumidoras, deberá procurarse que las tuberías de unión sean lo más cortas posible.

Es preferible utilizar tuberías circulares, porque en ese caso las dimensiones y el caudal son 50% menores. En la tabla siguiente consta el consumo medio de algunas máquinas y herramientas neumáticas, aunque sin considerar el grado de utilización.

Unidad consumidora		Consumo de aire en l/s	Unidad consumidora	Consumo de aire en l/s
Taladradora	0,75 kW	13	Motor neumático 1,4 kW	36
Taladradora	1,0 kW	18	Motor neumático 2,4 kW	60
Taladradora	1,5 kW	27	Motor neumático 3,5 kW	84
Taladradora	2,0 kW	35	Pistola (general)	8
Lijadora	0,75 kW	17	Máquinas elevadoras <500 kg	33
Lijadora	1,0 kW	22	Martillo cincelador	8
Lijadora	1,5 kW	28	Cilindro de avance	16
Destornillador neum.	0,3 kW	5	Destornillador percusor	15 hasta 30
Sierra circular para materiales blandos		22	Pistola de inyección	10
			Cortador de roscas	16

Se sobreentiende que en todos los casos tiene validez el consumo indicado por el fabricante. El consumo que consta en los prospectos y en la documentación técnica suele referirse al consumo bajo condiciones de rendimiento nominal y el volumen de aire se refiere al aire con presión atmosférica. Además, los datos suponen una duración de la conexión de 100%.

¿Cómo se determina el caudal $\dot{V}$ necesario?

El caudal depende de los siguientes factores:

- Cantidad de unidades consumidoras y consumo de aire de cada una
- Factor de simultaneidad (ya que no siempre todas las unidades consumidoras funcionan al mismo tiempo)
- Pérdidas por desgaste de las unidades consumidoras y por fugas en la red
- Duración de la conexión de las unidades consumidoras

La duración de conexión se expresa en porcentaje o como factor. Este criterio tiene en cuenta que la mayoría de las unidades consumidoras no está en funcionamiento constantemente. En la tabla siguiente se incluyen algunos valores de referencia para diversas unidades consumidoras.

Unidad consumidora	Duración de conexión
Taladradora	30%
Lijadora	40%
Martillo cincelador	30%
Mortero	15%
Moldeadora	20%
Pistola neumática	10%
Máquina para alimentar piezas	80%

El factor de simultaneidad también es un valor empírico. Las máquinas que no funcionan de modo continuo suelen conectarse en diversos momentos, con lo que no todas funcionan al mismo tiempo. Ello significa que pueden aplicarse los factores de simultaneidad que se indican a continuación:

Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad	Cantidad de unidades consumidoras	Factor de simultaneidad
1	1	9	0,73
2	0,94	10	0,71
3	0,89	11	0,69
4	0,86	12	0,68
5	0,83	13	0,67
6	0,80	14	0,66
7	0,77	15	0,65
8	0,75	100	0,20

Disponiendo de estos datos, es posible calcular el caudal $\dot{V}_m$ utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{V}_m = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot V_i \cdot \frac{D_i}{100} \cdot FS_i)$$

- i Variable de control
- n Cantidad de diversas unidades consumidoras
- A Cantidad en unidades
- V Consumo de aire comprimido por unidad consumidora en l/s
- D Duración de la conexión en porcentaje
- FS Factor de simultaneidad

Este valor $\dot{V}_m$ se tiene que corregir una vez más de la siguiente manera:

$$\dot{V} = \left[\dot{V}_m + \left[\dot{V}_m \cdot \frac{Ar}{100} \right] + \left[\dot{V}_m \cdot \frac{Ar}{100} \cdot \frac{Fu}{100} \right] \right] \cdot 2$$

- Ar Reserva para posibles ampliaciones posteriores (por ejemplo, 35%)
- Fu Consideración de posibles fugas (por ejemplo, 10%)

La duplicación (multiplicador 2) del caudal $\dot{V}$ tiene la finalidad de compensar picos de consumo (que superan el consumo medio). Por experiencia se sabe que el consumo medio de aire es entre un 20 y un 60 por ciento del consumo máximo de aire.

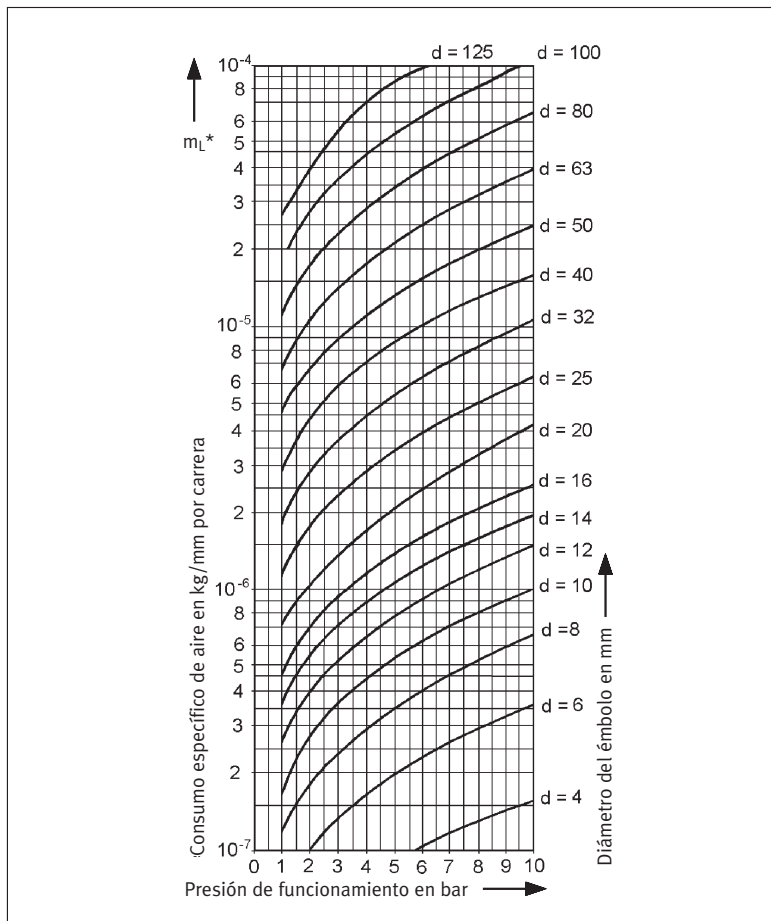
Considerando que las redes de aire comprimido se pueden utilizar durante mucho tiempo (hay redes que ya están en funcionamiento desde hace 50 años), es recomendable prever el montaje posterior de unidades consumidoras adicionales, por lo que la red debe disponer de las reservas correspondientes. Este criterio está incluido en la fórmula anterior (factor Ar).

Muchas máquinas tienen numerosos cilindros neumáticos y estos no permiten determinar sin más ni más el consumo de aire. Por ello se explica a continuación la determinación del aire comprimido necesario. El consumo específico m_L^* de un cilindro equivale en este ejemplo a la masa de aire necesaria por cada milímetro de movimiento del émbolo. El consumo depende de la presión de funcionamiento y del diámetro del émbolo, tal como consta en el diagrama de la fig. 4-5 (siendo $T = 20^\circ\text{C}$ constantes). La masa específica de aire m_L^* se representa en función de la presión de funcionamiento y del diámetro d del émbolo. Suponiendo una carrera doble, es válida la siguiente ecuación:

$$m_L = 2 \cdot H \cdot m_L^* \quad \text{en kg}$$

- H Carrera del émbolo en mm
- m_L^* Consumo específico de aire en kg/mm por carrera

Fig. 4-5
Diagrama para la determina-
ción del consumo de aire de
cilindros neumáticos



Una vez determinada la masa de aire, puede procederse a calcular el volumen normalizado V_N . Al efectuar el cálculo, se supone que la densidad ρ del aire es de $1,2 \text{ kg/m}^3$. El volumen normalizado por carrera doble (DH) se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$V_N = \frac{2 \cdot H \cdot m_L^*}{\rho} = 1,66 \cdot H \cdot m_L^* \quad \text{en m}^3/\text{DH}$$

Con el resultado es posible calcular el consumo de aire por unidad de tiempo.

Ejemplo: ¿Cuánto aire consume un cilindro con diámetro de émbolo de 40 mm, carrera H de 500 mm, siendo la presión de funcionamiento de 5 bar? El tiempo t necesario por carrera es de 2 segundos y los ciclos son de 10 segundos.

El consumo específico de aire se puede ver en el diagrama de la fig. 4-5. Ello significa que, en este caso, dicho consumo es de $m_L^* = 9 \cdot 10^{-6}$ kg/mm de carrera. El consumo de aire por carrera doble (DH) se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$m_L = 2 \cdot H \cdot m_L^* = 2 \cdot 500 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

y el volumen normalizado por carrera doble es:

$$V_N = 1,66 \cdot H \cdot m_L^* = 1,66 \cdot 500 \cdot 9 \cdot 10^{-6} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{DH}$$

Para obtener el resultado de una carrera de trabajo, hay que dividir por dos el volumen normalizado de la carrera doble. Ello significa que en la red de aire comprimido se debe disponer de $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{Carrera}$ en un tiempo t de 2 segundos. Por lo tanto, el caudal necesario es el siguiente:

$$\dot{V} = 3600 \cdot V_N/t = 3,6 \cdot 10^3 \cdot 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot 1/2 = 6,75 \text{ m}^3/\text{h}$$

¿Qué pérdida de presión se produce normalmente en una red de aire comprimido?

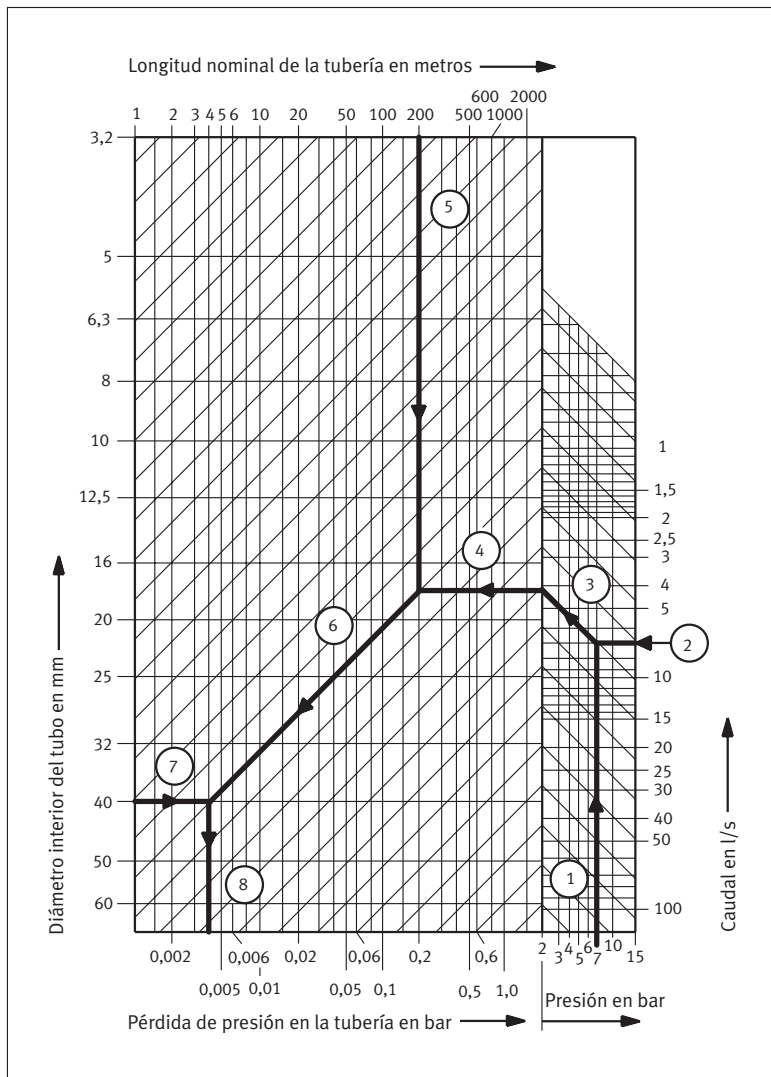
En el plano de la red consta la longitud de los tubos y la cantidad y el tipo de válvulas. Cuanto más largos son los tubos, tanto mayor es la pérdida de presión en el punto de toma para las unidades consumidoras. Esto se explica por la rugosidad de la pared interior de los tubos y por la velocidad del caudal. En el nomograma de la fig. 4-6 se puede leer la pérdida de presión en función del diámetro y de la longitud de los tubos.

Las tuberías de unión suelen tener un diámetro de 25 mm. En ese caso se puede contar con las pérdidas de presión que constan a continuación (en función del caudal y suponiendo una longitud nominal de 10 metros):

Caudal en l/s	Presión diferencial en bar
10	0,005
20	0,02
30	0,04

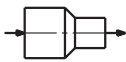
Ejemplo: Si el aire comprimido tiene que pasar por una tubería de 200 metros y si el diámetro interior estimado de la tubería es de 40 mm, ¿cuál es la pérdida de presión? Se ha previsto un caudal $\dot{V}$ de 6 l/s y una presión de funcionamiento de 7 bar. Incluyendo los valores de (1) hasta (7), se obtiene en (8) la pérdida de presión $\Delta p = 0,0035$ bar.

Fig. 4-6
Nomograma para
determinar la pérdida
de presión en tuberías
(presión = presión de trabajo)



Se sobreentiende que las válvulas, accesorios, codos y similares ofrecen una resistencia mucho mayor al caudal. Para tener en cuenta estos componentes, se calcula con una longitud equivalente (ficticia) de la tubería y el resultado se suma a la longitud real de los tubos antes de calcular o determinar gráficamente el diámetro interior necesario de los tubos. En la fig. 4-7 se incluyen estas longitudes ficticias.

Fig. 4-7
Resistencias al caudal
ocasionadas por diversos
tipos de accesorios de redes
de aire comprimido,
convertidas en longitudes
de tubos (datos en metros)

Denominación	Accesorio	Longitudes equivalentes en metros									
		Diámetro interior d del tubo en milímetros									
		9	12	14	18	23	40	50	80	100	
Válvula esférica		0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,6	1,0	1,3	
Codo		0,6	0,7	1,0	1,3	1,5	2,5	3,5	4,5	6,5	
Pieza en T		0,7	0,85	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	7,0	10	
Reductor de 2d a d		0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,9	1,0	2,0	2,5	

Ejemplo: Una red de aire comprimido constituida por tubos de diámetro interior de 23 mm incluye los siguientes accesorios: 2 válvulas esféricas, 4 codos, 1 reductor y 2 derivaciones en T. ¿Qué cantidad de metros equivalentes (ficticios) deberán agregarse a la longitud real de los tubos para obtener una longitud relevante para el caudal?

$$L_{\text{equiv}} = 2 \cdot 0,3 + 4 \cdot 1,5 + 1 \cdot 0,6 + 2 \cdot 2,0 = 11,2 \text{ m}$$

Ello significa que la longitud definitiva de los tubos que debe incluirse en el cálculo es la siguiente:

$$L_{\text{total}} = L_L + \sum_{i=1}^n L_{\text{equiv}}$$

n Cantidad de accesorios a tener en cuenta.

Para simplificar las operaciones de cálculo, también se puede aplicar un valor empírico:

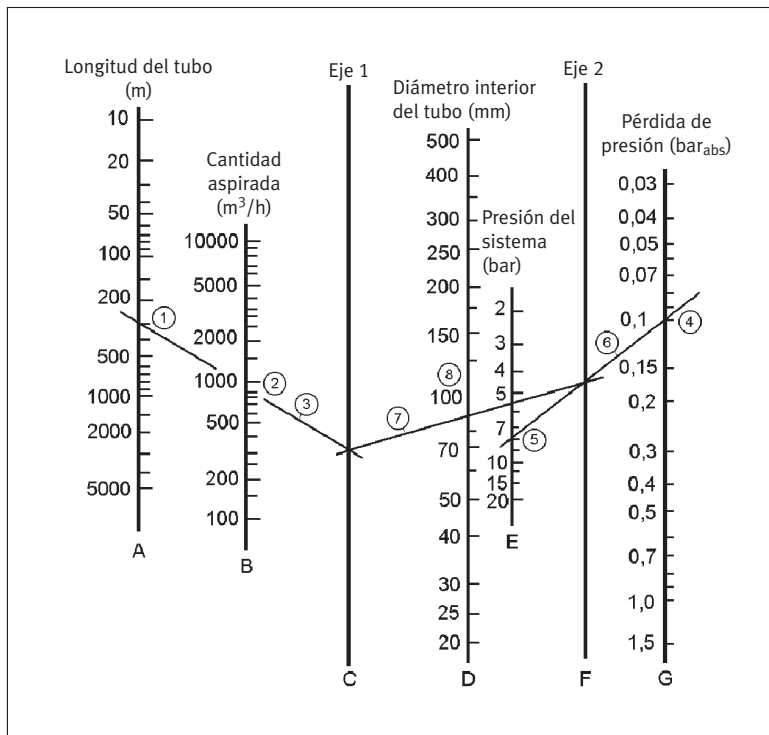
$$L_{\text{total}} = 1,6 \cdot L_L$$

Ello significa que no es necesario tener en cuenta cada accesorio individual y sumarlo a la longitud real. Tal como ya se indicó antes, en caso de una tubería circular se puede suponer que la longitud corresponde a la mitad de la longitud real (y también a la mitad del caudal). A continuación es posible determinar el diámetro interior de los tubos.

Para ello puede utilizarse el nomograma de la fig. 4-8, incluyendo los puntos (1) hasta (7). El punto de intersección con la escala D en (8) indica el diámetro interior del tubo. Para obtener este resultado también se puede utilizar el nomograma de la fig. 4-6.

Fig. 4-8

Nomograma para determinar tuberías para aire comprimido
($1 \text{ m}^3/\text{h} = 0,2778 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$;
 $1 \text{ l/h} = 0,2778 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)



Pero también se puede utilizar una fórmula de aproximación para obtener el diámetro interior d del tubo:

$$d = \sqrt[5]{1,6 \cdot 10^3 \cdot \dot{V}^{1,85} \cdot \frac{L_{\text{total}}}{\Delta p \cdot p_1}}$$

- d Diámetro interior del tubo en metros
- p_1 Presión de funcionamiento en bar
- Δp Pérdida de presión en Pa (no debe ser superior a 0,1 bar)
- L_{total} Longitud nominal de la tubería en metros (valor corregido)
- $\dot{V}$ Caudal en m^3/s

Ejemplo: Cálculo del diámetro interior d de los tubos de una red de 300 metros. El caudal $\dot{V}$ es de $21 \text{ m}^3/\text{min}$ ($= 0,340 \text{ m}^3/\text{s}$) y la presión de funcionamiento es de 7 bar = 700 000 Pa).

$$d = \sqrt[5]{\frac{1,6 \cdot 10^3 \cdot 0,35^{1,85} \cdot 300}{10\,000 \cdot 700\,000}} = 0,099 \text{ m} \quad \text{es decir } 100 \text{ mm}$$

En caso de utilizar tubos de poliamida (indicación del diámetro en mm), puede determinarse aproximadamente el diámetro exterior del tubo recurriendo a la tabla siguiente (según J.Guest GmbH):

Caudal en l/min.	Longitud de la tubería en metros						
	25	50	100	150	200	250	300
200	12	12	12	15	15	15	18
400	12	12	15	15	15	18	18
500	15	15	15	18	18	18	18
750	15	15	18	18	18	22	22
1000	15	15	18	18	22	22	22
1500	18	18	18	22	22	22	22
2000	18	18	22	22	22	28	28
3000	22	22	28	28	28	28	28
4000	28	28	28	28	28	28	28

Ejemplo: Determinar el diámetro del tubo para una tubería circular de 300 metros un caudal de 2 m³/min (presión de 7 bar).

Tratándose de una tubería circular, se puede calcular con la mitad de su longitud, es decir, 150 metros. El caudal corresponde a la mitad de 2 m³/min (= 2 000 l/min.), es decir, 1 000 l/min. Según la tabla, el diámetro exterior de los tubos debe ser de 18 mm.

Finalmente tiene que determinarse el material de los tubos. En el siguiente capítulo se abordará este tema.

4.3

Tuberías y conexiones

Para elegir el material de los tubos utilizados en redes de aire comprimido, hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Calidad del aire comprimido (tuberías resistentes a la corrosión, empalmes que no provoquen la acumulación de depósitos)
- Dimensiones de los tubos
- Presión (poca pérdida de presión; máximo 0,1 bar); fugas mínimas
- Condiciones del entorno (estabilidad a la incidencia de luz solar, resistencia a bacterias y a temperaturas tropicales)
- Trabajo de montaje (tendido sencillo de los tubos y montaje de los empalmes, utilización de herramientas y materiales especiales, necesidad de disponer de conocimientos especiales)
- Costos del material (válvulas y accesorios de alta calidad y robustos a precios económicos)
- Rigidez de los materiales (utilización de componentes auxiliares para el montaje, por ejemplo escuadras de montaje)
- Coeficiente de dilatación térmica del material
- Experiencias y conocimientos en materia de las técnicas necesarias

En una misma red pueden utilizarse diversos materiales. Además, también hay que tener en cuenta siempre los costos de instalación. Los tubos de material sintético pueden unirse de modo completamente estanco utilizando pegamentos. Sin embargo, para ello es necesario tener experiencia en el uso de pegamentos. Los tubos de metal suelen ser más baratos, pero hay que soldarlos o unirlos con conexiones roscadas, por lo que es posible que el interior de los tubos contenga residuos. La pérdida de presión también depende de la rugosidad de la pared interior de los tubos. En la tabla siguiente se ofrecen datos resumidos sobre la rugosidad de diversos tipos de tubos.

Material	Rugosidad en μm
Tubo de cobre	menos de 1,5
Tubo de material sintético	menos de 1,5
Tubo de acero estirado	10 hasta 50
Tubo de acero soldado	50 hasta 100
Tubo de hierro cincado	120 hasta 150

Los datos relacionados con las dimensiones de los tubos suelen indicarse en DN (diámetro nominal). El diámetro nominal no tiene una unidad específica y corresponde aproximadamente al diámetro interior libre de los tubos, expresado en milímetros. El criterio de “diámetro nominal” se aplica también en el caso de otras unidades de valvulería y empalmes. Los diámetros nominales de mayor importancia en redes de aire comprimido son los siguientes:

DN	DN	DN
20	80	300
25	100	350
32	125	400
40	150	450
50	200	500
65	250	600

Las redes pueden estar constituidas de tubos de metal y/o material sintético. En la tabla 4-1 en las páginas 74 y 75 se hace una comparación de las características técnicas de tubos neumáticos de metal y de material sintético.

Tabla 4-1
Características técnicas
de tubos para redes de aire
comprimido

	Tubo de acero sin costura	Tubo roscados	Tubo de acero inoxidable	Tubo de cobre	Tubo de aluminio	Tubo de material sintético
Ejecución	Negro o cincado	Semipesado hasta pesado. Negro o cincado	Sin costura o soldado	Suave en tuberías circulares, duro en tubos rectos	Recubierto o pintado	Material blando enrollable hasta 100 metros. Material duro en unidades de hasta 3 metros.
Material	Por ejemplo, St 35	Sin costura St 00 Soldado St 33	p. ej. W.S.T. 4301, 4541, 4571	Cobre	Aluminio, p. ej. resistente al agua salada	Poliamida (PA, PUR, PE)
Dimensiones	10,2 hasta 558,8 mm	1/8 hasta 6 pulgadas	6 hasta 273 mm	6 hasta 22 mm suave 6 hasta 54 mm duro 54 hasta 131 mm duro	12 hasta 40 mm	12 hasta 63 mm
Presiones	12,5 hasta 25 bar	10 hasta 80 bar	Hasta 80 bar y en parte presión superior	Según ejecución 16 hasta 140 bar	14 bar (a -30 °C hasta +30 °C)	14 bar (a -25 °C hasta +30 °C)
Extremo del tubo	Liso	Cónico, liso o rosca	Liso	Liso	Liso	Liso
Uniones	Soldadura	Racores, soldadura	Soldadura (con gas protector)	Roscas, soldadura, racores	Racores enchufables reutilizables	Racores enchufables reutilizables

Tabla 4-1
Características técnicas
de tubos para redes de aire
comprimido

	Tubo de acero sin costura	Tubo roscados	Tubo de acero inoxidable	Tubo de cobre	Tubo de aluminio	Tubo de material sintético
Ventajas	Uniones estancas; posibilidad de doblar	Disponibilidad de numerosos racores y accesorios; posibilidad de doblar	Uniones estancas, ausencia de corrosión, posibilidad de doblar, para máximas calidades de aire (p. ej. en aplicaciones de técnica médica)	Ausencia de corrosión, paredes interiores lisas, posibilidad de doblar	Resistente a roturas, ausencia de corrosión, pared interior lisa ligero	Ausencia de corrosión, flexible, ligero, resistente a golpes, exento de mantenimiento, instalación sencilla, conexiones sencillas entre tubos flexibles
Desventajas	Corrosión (tubos negros) Montaje por operarios experimentados. Gran masa en comparación con tubos de plástico o de aluminio	Corrosión, en parte también en tubos cincados, grandes resistencias al flujo y resistencias por fricción; fugas después de uso prolongado; montaje difícil debido a la necesidad de cortar roscas y de soldar; montaje por operarios experimentados	Montaje únicamente por operarios experimentados; oferta limitada de racores y accesorios; piezas costosas	Montaje por operarios experimentados y especializados. Posibilidad de formación de calcantita	Menor distancia entre apoyos en comparación con tubos de acero	Poca longitud, menor distancia entre apoyos en comparación con tubos de acero. Al aumentar la temperatura disminuye la resistencia a la presión. Posibilidad de cargas electrostáticas. Gran coeficiente de dilatación térmica (0,2 mm/ °C)

Los usuarios tienen especial interés en conocer la diferencia entre los tubos metálicos y los de material sintético. En la tabla 4-1 se ofrece una comparación algo más detallada entre las características de tubos de metal y de material sintético. La tabla 4-2 contiene una comparación más esquematizada entre estos dos tipos de tubos. Se sobreentiende que no existe un material ideal para los tubos. La elección siempre depende de las exigencias específicas que plantea cada aplicación.

Tabla 4-2
Comparación entre tubos
de diversos materiales

Círculo completo
= muy adecuado
Semicírculo = suficiente
Cuarto de círculo
= con limitaciones

Material del tubo	Acero	Cobre	Acero inox.	Plástico
Presión superior a 12 bar				
Corrosión, calidad del aire				
Temperatura hasta 20 °C				
Temperatura hasta 50 °C				
Características de flujo				
Trabajo de montaje				
Masa por unidad de longitud				
Trabajo de mantenimiento				
Diámetro en 100 metros				
Disponibilidad de válvulas y racores				

Existen tubos de aluminio especialmente desarrollados para el uso en sistemas de distribución de aire comprimido. Estos tubos son resistentes a la corrosión y son fáciles de instalar porque su masa es relativamente pequeña. Sin embargo, no deben doblarse ni soldarse. Además, también son sensibles a las temperaturas. Si los tubos son largos y rectos, la dilatación o contracción son especialmente grandes. Por ello deben utilizarse componentes que compensan estos cambios de longitud ΔL. En la fig. 4-9 se muestran algunos ejemplos al respecto. Si se utilizan tubos de aluminio perfilado en bastidores de máquinas, debería preverse una compensación de dilatación a partir de longitudes de 6 metros.

La dilatación de los tubos de aluminio (diferencia ΔL de la longitud) se calcula con las siguientes ecuaciones:

Diámetro del tubo de 25 mm: $\Delta L = (0,2 \cdot L) + (0,024 \cdot L \cdot \Delta T)$

Diámetro del tubo de 40 mm: $\Delta L = (0,4 \cdot L) + (0,024 \cdot L \cdot \Delta T)$

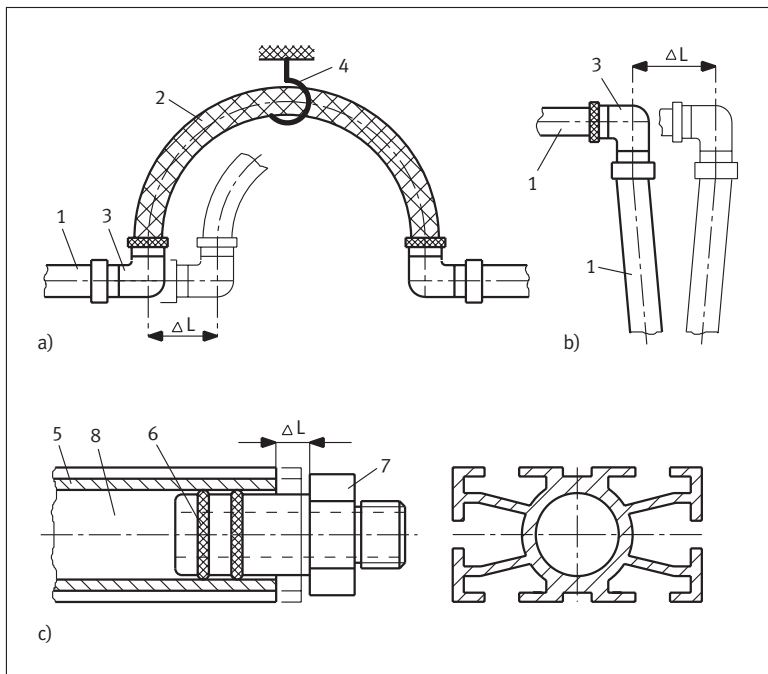
ΔT Diferencia entre la temperatura de instalación y la temperatura de funcionamiento, expresada en °C

ΔL Diferencia de longitud en mm

L Longitud del tubo en el momento de la instalación, expresada en metros

Fig. 4-9
Ejemplos de compensación
de la dilatación

- a) Compensación mediante arco de dilatación
 - b) Compensación mediante codo de empalme
 - c) Compensación mediante tubo insertable
- 1 Arco de dilatación
 - 2 Tubo flexible
 - 3 Codo
 - 4 Gancho
 - 5 Tubo de aluminio perfilado
 - 6 Junta
 - 7 Compensador de dilatación
 - 8 Canal de aire comprimido



Coefficiente de dilatación para 1 metro de tubo y 1 °C de diferencia de temperatura:

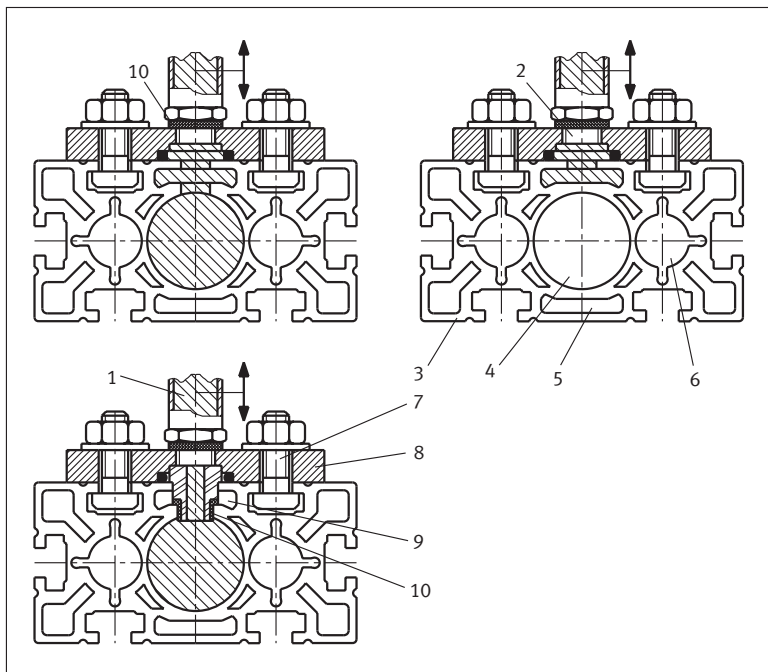
- Acero 0,0012 hasta 0,0014 mm
- Cobre 0,0019 mm
- Aluminio 0,024 mm
- Material sintético 0,08 hasta 0,2 mm (Poliamida 0,2 mm)

Otra forma de alimentar aire comprimido cerca de las máquinas consiste en el uso de las diversas cámaras del aluminio perfilado. Estos perfiles pueden tener secciones de muy variado diseño y se utilizan cada vez con mayor frecuencia en estructuras de soporte. Las cámaras separadas entre sí pueden utilizarse para configurar sistemas con conductos integrados para aire comprimido. Si estos tubos perfilados tienen varias cámaras, también es posible disponer de aire comprimido de presiones diferentes en cada una de ellas. En la fig. 4-10 se muestra un ejemplo al respecto. La cámara central (I) está conectada a la toma principal mediante una conexión de 1/2 pulgada. La utilización de las cámaras laterales (II y III) y de la cámara central se realiza conectando las correspondientes unidades consumidoras. Estas unidades se montan en las ranuras perfiladas mediante tornillos para ranuras en T. Para efectuar el montaje hay que taladrar el perfil. Disponiendo de derivaciones, los extremos del tubo perfilado están cerrados o están unidos al siguiente tubo perfilado mediante empalmes con juntas.

Fig. 4-10

Utilización de tubos perfilados para la distribución de aire comprimido (DEMAG)

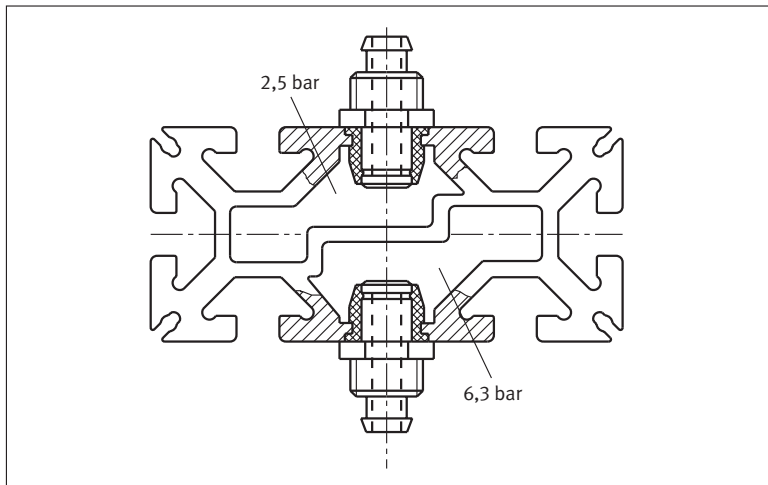
- 1 Aire comprimido
- 2 Conexión roscada
- 3 Perfil del sistema
- 4 Cámara central
- 5 Cámara inferior
- 6 Cámara lateral
- 7 Tornillo para ranura en T
- 8 Placa de montaje
- 9 Cámara superior
- 10 Elemento hermetizante



En la fig. 4-11 se muestra un perfil de aluminio de dos cámaras en el que se puede montar una toma de aire comprimido superior y otra inferior mediante boquillas enchufables para tubos flexibles. La presión es diferente en las dos cámaras.

Fig. 4-11

Conexión de tubos flexibles a un tubo perfilado de varias cámaras mediante boquillas enchufables

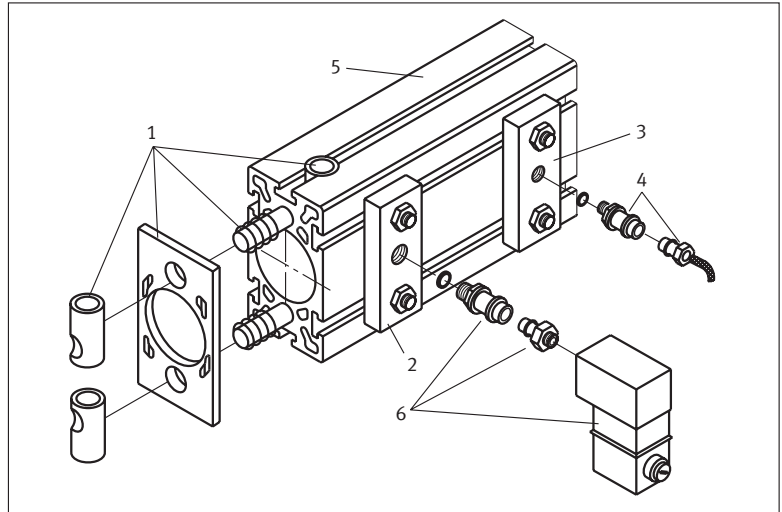


La última parte de una tubería de unión puede estar constituida por un tubo flexible, siempre y cuando el punto de la toma de trabajo tenga que ser móvil. El perfil de aluminio es, a la vez, tubería principal y tubería de distribución y,

además, soporte para máquinas y otras estructuras. Para prolongar el tubo perfilado se utilizan elementos de unión longitudinales. Para que el acoplamiento sea estanco, se monta una junta para bridas con taladros para el paso del aire (fig. 4-12). La cámara de presión suele alimentarse desde el frente a través de un conjunto de conexión. En el ejemplo de la fig. 4-12 se aprecia un presostato con el que puede regularse la presión entre 0,5 y 10 bar. Si la presión cae por debajo del límite inferior, se emite una señal de alarma.

Fig. 4-12
Montaje de conexiones en un tubo de aluminio perfilado, conducción de aire comprimido (Mannesmann/Dematic)

- 1 Conjunto de prolongación del perfil, incluyendo junta para bridas
- 2 Conexión de G 1/2 pulgadas para unidad consumidora
- 3 Conexión de G 1/4 pulgadas para unidad consumidora
- 4 Acoplamiento para tubo flexible
- 5 Aluminio perfilado
- 6 Conexión de G 1/2 pulgadas para presostato



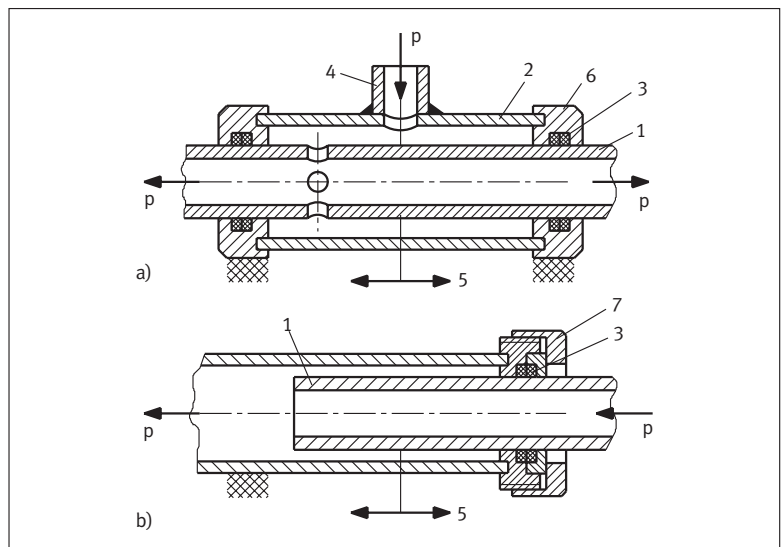
En algunos casos es necesario transportar aire comprimido entre dos partes de una máquina que ejecutan un movimiento lineal opuesto entre sí (por ejemplo, en el caso de sistemas de manipulación de piezas). En este caso se puede recurrir a tubos telescópicos o deslizantes (fig. 4-13).

Fig. 4-13
Paso de aire comprimido entre dos tubos móviles

- a) Tubo deslizante
- b) Tubo telescópico

- 1 Tubo deslizante,
- 2 Tubo de alimentación
- 3 Empaquetadura
- 4 Empalme
- 5 Sentido del movimiento de un componente de la máquina
- 6 Brida
- 7 Tuerca

p Aire comprimido



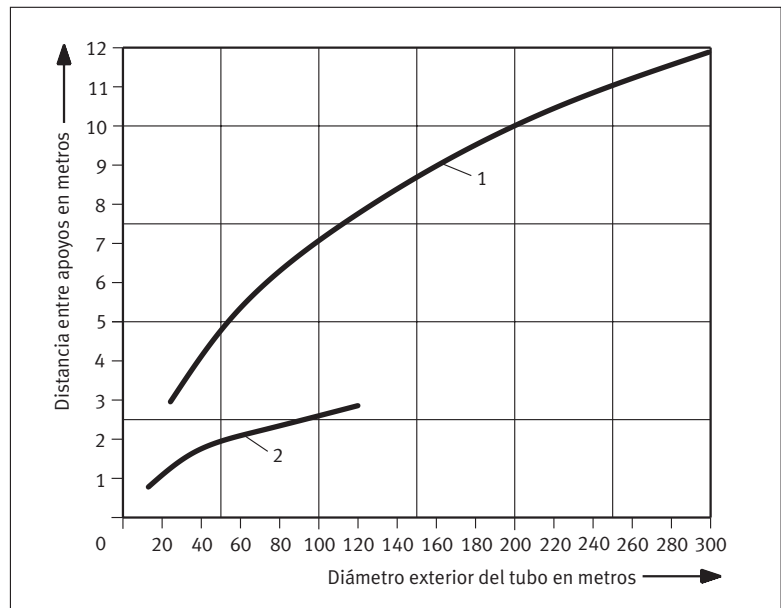
En el caso de los **tubos telescópicos**, un tubo de diámetro menor se desplaza hacia el interior de otro de diámetro mayor. La estanquidad necesaria se consigue mediante collarines obturadores o con juntas tóricas, aunque también es posible utilizar empaquetaduras blandas. Los tubos telescópicos están sometidos a una presión axial, lo que significa que se comportan como un cilindro de trabajo en la medida en que tienden a extenderse.

Los **tubos deslizantes** no tienen esta desventaja, ya que no están expuestos a una presión axial. En el caso de estos tubos, un tubo deslizante se desplaza encima de un tubo de alimentación fijo. La carrera del tubo deslizante corresponde más o menos a la mitad de la longitud del tubo fijo.

Los tubos para aire comprimido y, también, la valvulería y las piezas moldeadas suelen ser de materiales resistentes a choques y a roturas por fragilidad, especialmente desarrollados para el uso con aire comprimido. Estos tubos no se corroen exterior o interiormente, por lo que no precisan mantenimiento y no tienen influencias negativas en el aire que fluye a través de ellos. Además, llegan a ser hasta un 80% más ligeros que los tubos metálicos. Sin embargo, al montar las redes, las distancias entre apoyos tienen que ser menores que utilizando tubos de metal (fig. 4-14). El uso de tubos de material sintético supone un minucioso examen para comprobar si son apropiados para una aplicación determinada, ya que variando la composición de sus materiales también cambian sus características. Un criterio importante a tener en cuenta es la presión de funcionamiento máxima aplicable en función de diversos factores, tales como temperatura, inflamabilidad, carga electrostática, incidencia de rayos ultravioleta, soldadura o pegamentos, dilatación longitudinal (que puede ser de 0,1 hasta 0,2 milímetros por °C y por metro) y resistencia a golpes y a rotura por fragilidad.

Fig. 4-14
Distancia máxima entre
apoyos de tubos de redes
de aire comprimido

1 Tubo de acero normal
2 Tubo de material sintético
(ABS con 20 °C)



A continuación se ofrecen explicaciones más detalladas sobre diversos tipos de tubos de material sintético utilizados en redes de aire comprimido.

- **ABS (acrilnitrilo-butadieno-estireno)**

Los tubos y las piezas de unión correspondientes se unen mediante pegamento. Las zonas provistas de pegamento son sumamente resistentes, más que los propios tubos o racores. Antes de aplicar el pegamento tiene que prepararse la superficie para que la unión química que se produce entre las piezas sea óptima. Pero también es posible establecer la unión mediante roscas. En ese caso se utiliza cinta de teflón en calidad de junta hermetizante. Estos tubos pueden tener diámetros desde 12 hasta 110 milímetros y resisten presiones de hasta 12,5 bar, siendo la temperatura de 20 °C.

- **PE (polietileno)**

Estos tubos suelen unirse mediante soldadura de manguitos, aunque también es posible utilizar piezas de unión soldadas por arco voltaico. El calor de fusión necesario se aplica en las superficies respectivas mediante alambres bobinados calefactables eléctricamente. Estos tubos pueden tener diámetros desde 10 hasta 450 milímetros y resisten presiones de funcionamiento de hasta 10 bar.

- **PA (poliamida)**

Estos tubos se unen mediante racores de metal o plástico y con piezas de unión moldeadas. Sus diámetros pueden ser desde 4 hasta 40 milímetros y, según el material, resisten presiones de funcionamiento de hasta 100 bar.

¿Cómo se pueden unir los tubos entre sí?

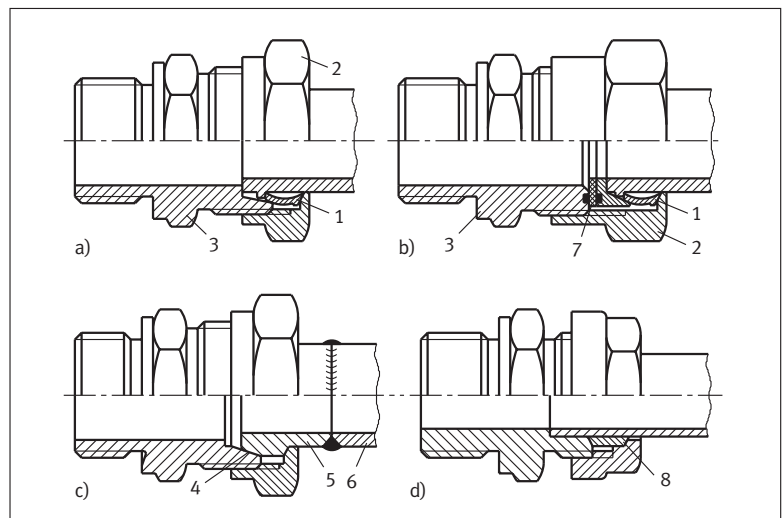
Por lo general suelen utilizarse racores. En la fig. 4-15 se muestran algunos ejemplos. Estos racores son apropiados para tubos de acero normal o de precisión sin costura. Es recomendable evitar que los racores estén expuestos a grandes fuerzas de tracción, ya que de lo contrario se produce una fatiga prematura del material. Las formas básicas de los racores son las siguientes:

- Racores rectos
- Racores angulares
- Racores en T

Fig. 4-15
Racores para tubos de acero

- a) Racor de anillo cortante
- b) Racor de anillo cortante y guiado
- c) Racor de manguito esférico
- d) Racor de anillo opresor

- 1 Anillo de corte
- 2 Tuerca de unión
- 3 Racor
- 4 Canto de dilatación
- 5 Manguito esférico
- 6 Tubo
- 7 Anillo obturador
- 8 Anillo opresor



Funcionamiento de los racores de anillo cortante

Al ajustar la tuerca de unión, el tubo se presiona hasta llegar al tope en el interior del racor. Al mismo tiempo, el anillo hermetizante se introduce a presión en el cono interior del racor, mientras que el canto cortante del anillo se queda prensado al tubo. De esta manera, el tubo queda sujeto al racor y la unión es estanca. El efecto hermetizante se mantiene incluso si se suelta y vuelve a ajustar el racor varias veces, siempre y cuando se aplique suficiente fuerza al ajustar la tuerca de unión.

Posibles errores de montaje:

- Aplicación de una fuerza insuficiente al ajustar la tuerca de unión
- El tubo no llega hasta el tope
- El anillo obturador no está montado en la posición correcta

El racor de anillo cortante y el racor de anillo cortante con carril de guía se utilizan cuando es necesario efectuar un montaje de los tubos o componentes en sentido radial.

Funcionamiento de los racores de manguito esférico

Se trata de un racor para tubos soldados al que el tubo se une mediante soldadura. Antes de soldar es necesario que la tuerca de unión ya esté montada. Al ajustar esta tuerca, se aplica presión sobre el manguito que entonces entra en el cono interior del racor. En teoría, el canto hermetizante forma una línea anular homogénea, aunque en la realidad se produce cierto aplanamiento. Es necesario aplicar una fuerza considerable para obtener una estanquidad satisfactoria.

Unión por brida

En la fig. 4-16 se muestra una unión de tubos metálicos por brida. Las bridas están soldadas. Todas las bridas se clasifican y están normalizadas según diámetro nominal (DN) y presión nominal (PN). Las bridas utilizadas en una misma unión tienen que tener el mismo diámetro nominal y la misma presión nominal. En la fig. 4-17 se muestra una unión de tubo de acero con tubo de plástico mediante bridas sueltas.

Fig. 4-16
Unión de tubos metálicos
por bridas de centrado
obligado según DIN 2448

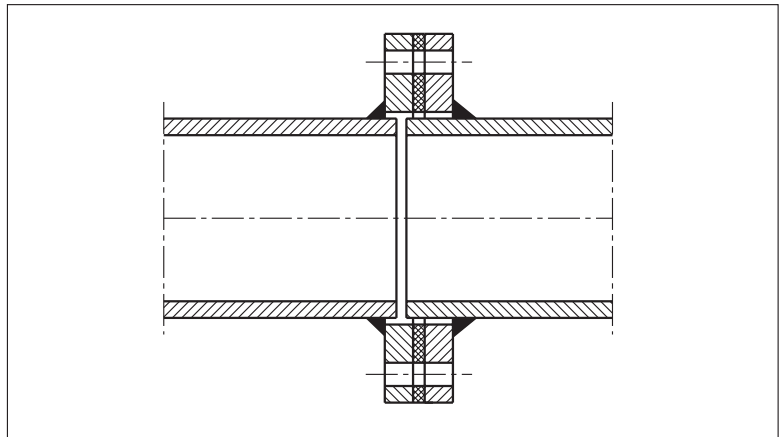
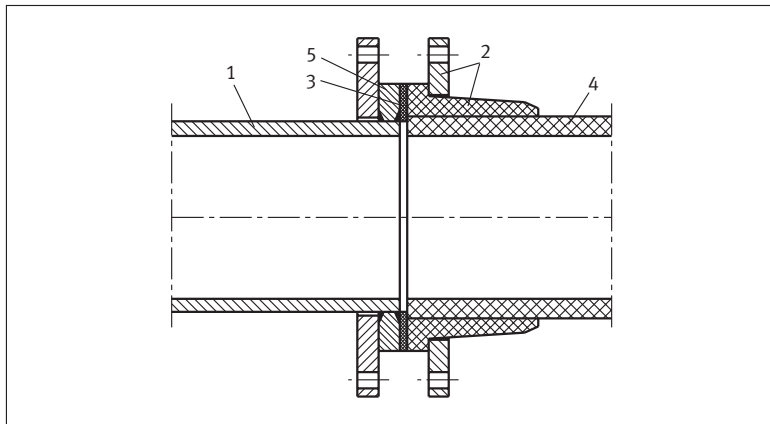


Fig. 4-17

Unión por brida de un tubo metálico y de un tubo de material sintético

- 1 Tubo de acero, tubo de cobre
- 2 Brida suelta con cuello
- 3 Junta
- 4 Tubo de material sintético
- 5 Brida soldada



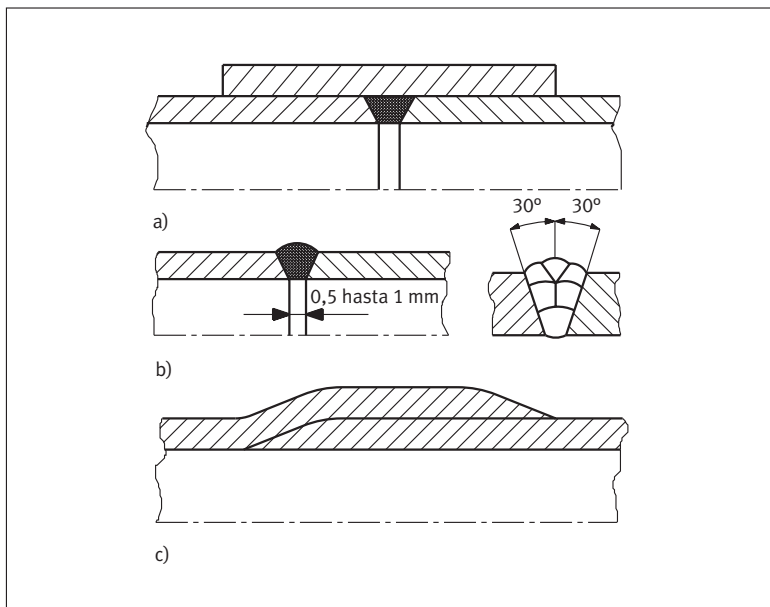
Unir mediante soldadura y pegamento

Los tubos metálicos suelen unirse mediante soldadura. Si el grosor de la pared del tubo es de hasta 5 milímetros, la unión se consigue mediante soldadura a tope mediante costura en I. Si el grosor es mayor, se aplica preferentemente una costura en forma de V. Para ello es necesario biselar los extremos de los tubos. Golpeando ligeramente los tubos o aplicando un chorro de aire se eliminan las perlas y escorias de soldadura. En la fig. 4-18 se muestran algunas variantes de soldadura. Para realizar estos trabajos de soldadura es necesario disponer de conocimientos técnicos y experiencia en la materia, mientras que utilizando racores roscados no es necesario tenerlos.

Fig. 4-18

Uniones fijas de tubos metálicos y de material sintético

- a) Soldadura a tope con manguito contráctil
- b) Soldadura a tope con costura en V
- c) Unión mediante pegamento



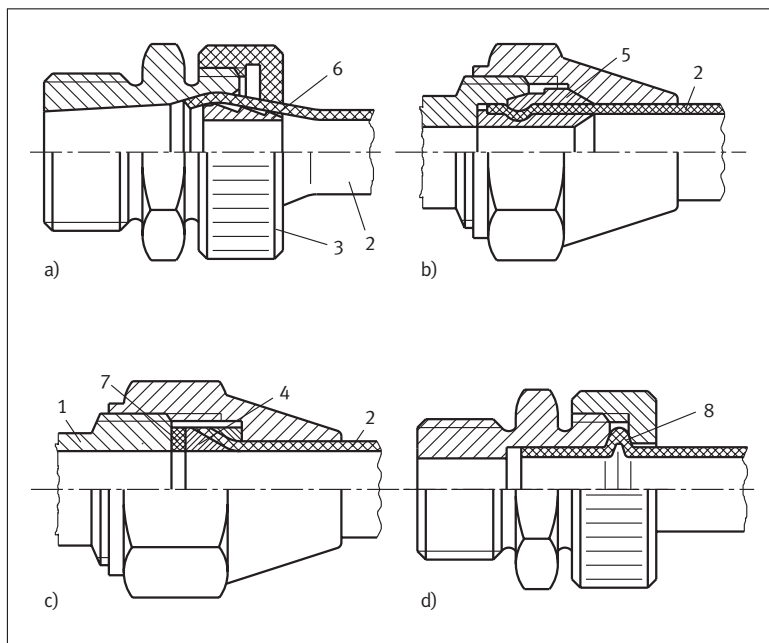
En la fig. 4-19 se incluyen algunos ejemplos de unión de tubos de material sintético mediante racores. Los racores que constan en 4-19 b y c pueden ser sustituidos sin problemas por racores de anillo cortante normales y guiados para el montaje de tubos de metal.

Fig. 4-19

Racores para tubos de material sintético

- a) Racor atornillable con anillo de refuerzo
- b) Racor enchufable con tuerca de unión prolongada
- c) Racor con manguito de apriete
- d) Racor con reborde hermetizante para tubos de poliamida

- 1 Tubo de acero o de cobre
- 2 Tubo de material sintético
- 3 Tuerca de unión
- 4 Manguito de apriete
- 5 Anillo de apriete
- 6 Anillo de refuerzo
- 7 Arandela
- 8 Rebordo comprimido



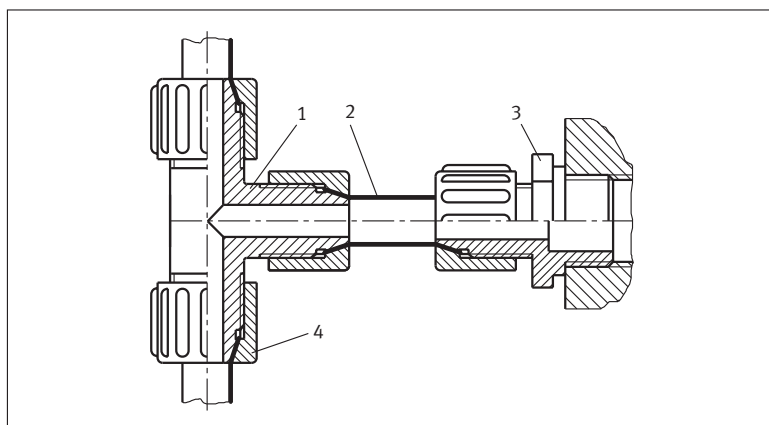
Racores con casquillo de sujeción

Estos racores se utilizan para el montaje en sentido radial. Utilizando tuercas de unión más largas los tubos están mejor guiados, con lo que se evita la rotura por vibración en las salidas de la tuerca. También los racores mismos pueden ser de material sintético. En la fig. 4-20 se muestra un ejemplo, aunque hay numerosas ejecuciones que se utilizan para la ejecución de funciones de control y regulación, especialmente en la neumática de alta presión.

Fig. 4-20

Racores de material sintético

- 1 Racor en T
- 2 Tubo flexible
- 3 Racor atornillable
- 4 Tuerca cónica

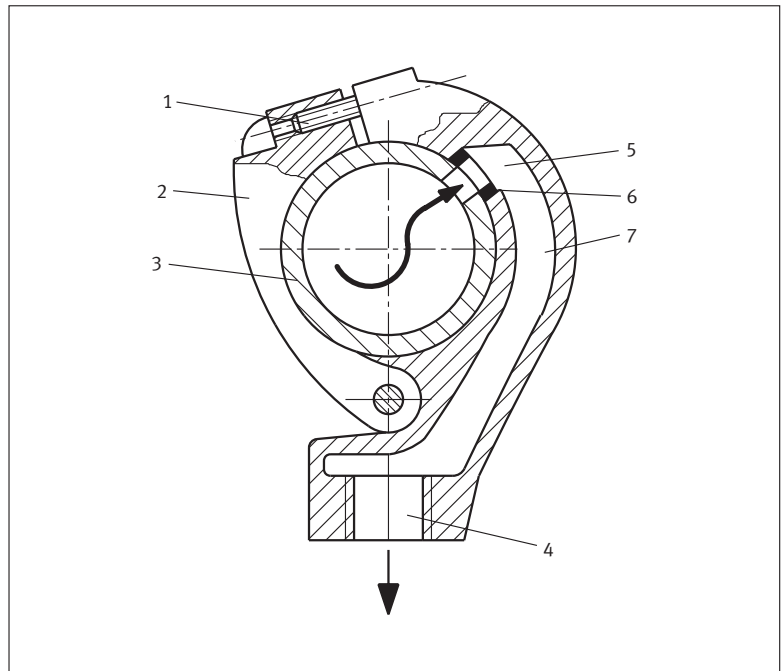


Racores rápidos para tubos flexibles

También existen sistemas que permiten disponer de una derivación de aire comprimido en cualquier parte de la tubería utilizando un acoplamiento especial. Tal como se puede apreciar en la fig. 4-21, el tubo (de aluminio) está taladrado en la parte superior y no tiene rebabas. A continuación, la brida se ajusta mediante tornillos. El diseño de este racor es de cuello de cisne para retener el condensado. Este tipo de racores es apropiado especialmente si es necesario montar una red de aire comprimido sin saber aún definitivamente en qué lugar se encontrarán las unidades consumidoras.

Fig. 4-21
Racor rápido (Legris)

- 1 Tornillo de apriete
- 2 Brazo tensor
- 3 Conducto de aire comprimido
- 5 Cuello de cisne
- 6 Junta
- 7 Cuerpo de la brida

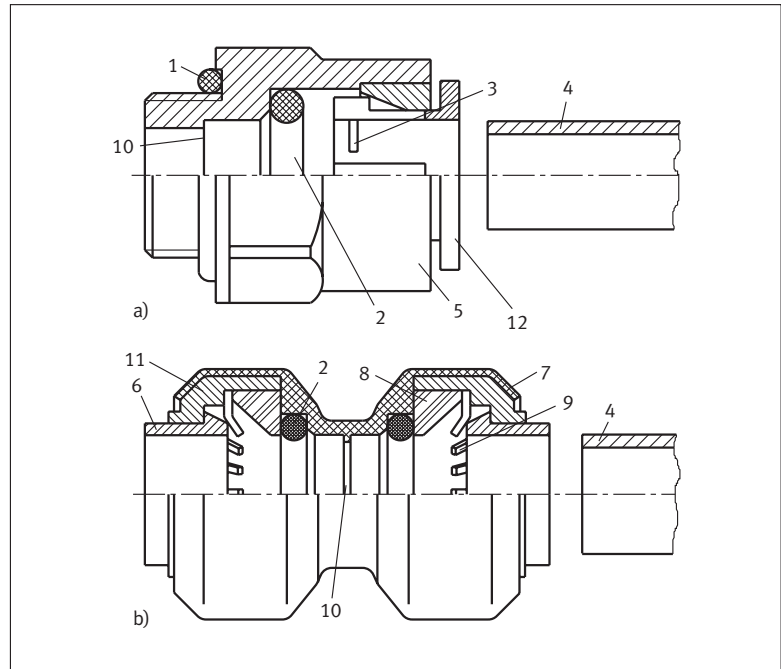


Las derivaciones se pueden montar posteriormente. Este tipo de racores puede utilizarse con presiones de hasta 13 bar y con temperaturas de funcionamiento desde -20 °C hasta +60 °C.

La fig. 4-22 muestra un acoplamiento para tubos de aluminio y material sintético que establece una unión fiable, aunque puede abrirse posteriormente. El extremo del tubo tiene que estar ligeramente achaflanado o, al menos, exento de rebabas. Para establecer la unión no se necesitan herramientas.

Fig. 4-22
Racores enchufables
para tubos

- a) Racor rápido roscado (Festo)
b) Racor enchufable (Schneider)
- 1 Junta
2 Junta tórica resistente al aceite
3 Diente de fijación
4 Tubo
5 Cuerpo con rosca
6 Anillo de desmontaje
7 Cuerpo compacto de metal
8 Anillo distanciador
9 Garra de acero inoxidable
10 Tope para el tubo
11 Casquillo de soporte
12 Elemento de sujeción de POM con dientes de fijación de acero inoxidable



Los racores enchufables, con todas las piezas que los componen, suelen ser más caros que los acoplamientos soldados o pegados. Sin embargo, ofrecen ventajas evidentes:

- Montaje rápido; el tiempo que se ahorra en el montaje suele compensar el mayor costo de sus piezas individuales
- No es necesario disponer de conocimientos especiales para efectuar el montaje
- Los componentes se pueden utilizar varias veces
- Es sencillo corregir un montaje deficiente

4.4 Tubos flexibles y conexiones

Los tubos rígidos se emplean para el flujo del aire comprimido entre máquinas neumáticas estacionarias, mientras que para llevar el aire comprimido hasta las máquinas móviles es necesario utilizar tubos flexibles. Mientras que los tubos rígidos mantienen su forma, los tubos flexibles cambian de forma. La flexibilidad de estos tubos depende de su material, de la carga y de la temperatura. Debido a la carga, la duración de los tubos flexibles es menor que la de los tubos rígidos. Por ello es recomendable utilizar tubos flexibles sólo cuando sea absolutamente necesario. Por otro lado, su uso es indispensable para unir válvulas y cilindros neumáticos con una unidad descentralizada de preparación

de aire comprimido. Una ventaja de los tubos flexible consiste en su rápido y sencillo montaje. Con los materiales sintéticos modernos resulta difícil hacer una distinción nítida entre tubos flexibles y tubos rígidos.

4.4.1

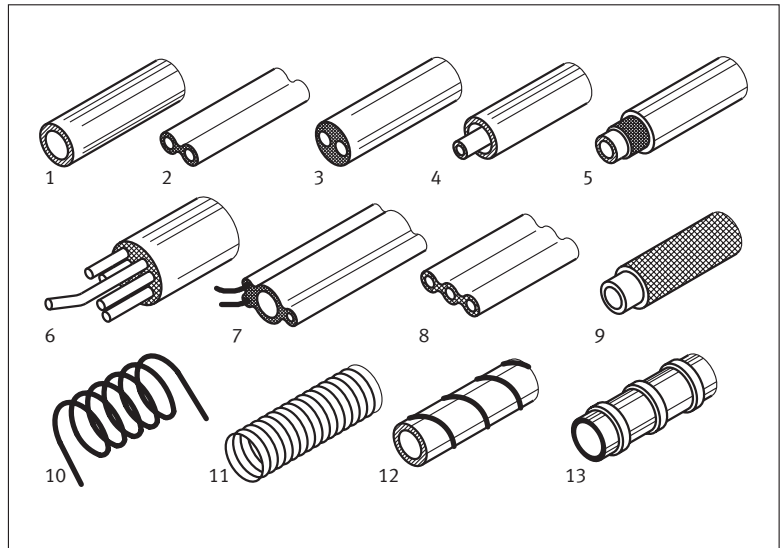
Tipos y propiedades

Existen tubos de diversa índole. Los tubos en espiral son apropiados si el aire comprimido tiene que alimentarse a elementos móviles (brazos de robots, carros, destornilladores colgantes). Los tubos de material sintético recubiertos de tubos metálicos de protección se utilizan, por ejemplo, para proteger contra chispas de soldadura. En la fig. 4-23 se muestran algunos tipos de tubos flexibles. En la fig. 4-24 se muestran las estructuras de diversos tipos de tubos flexibles.

Fig. 4-23

Tipos de tubos flexibles

- 1 Tubo flexible normal
- 2 Tubo flexible doble soldado
- 3 Tubo flexible doble incorporado
- 4 Tubo flexible coaxial (tubo dentro de tubo)
- 5 Tubo flexible con capa intermedia de refuerzo
- 6 Tubo flexible múltiple
- 7 Tubo flexible híbrido (combinación de cable eléctrico, tubo de vacío y tubo de aire comprimido)
- 8 Tubo flexible triple extrudado
- 9 Tubo flexible recubierto
- 10 Tubo en espiral
- 11 Tubo flexible ondulado de protección
- 12 Tubo flexible de vacío con espiral de alambre de acero
- 13 Tubo flexible con anillos protectores de metal



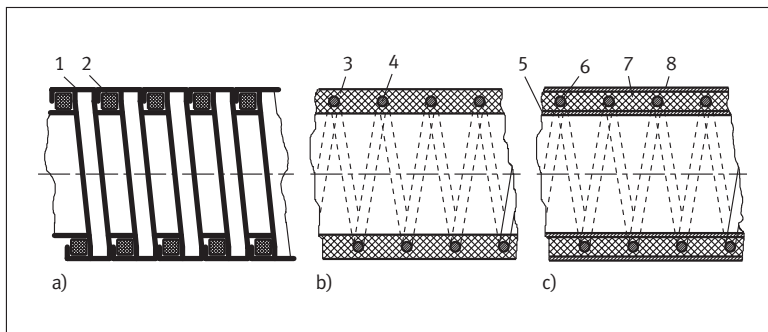
El **tubo flexible de espiral de acero** (cintas de acero plegadas) se utiliza para proteger un tubo flexible de material sintético. El radio de curvatura admisible de estos tubos es relativamente grande. Estos tubos pueden conectarse a tierra, con lo que pueden evitarse las cargas electrostáticas.

El **tubo flexible de material sintético en espiral** tiene una espiral fundida de PVC (o de alambre de acero) para mantener su forma. Estos tubos tienden a cargarse electrostáticamente. En algunos casos, estos tubos también están envueltos de un cordón metálico flexible.

El **tubo flexible de goma en espiral** puede llevar vulcanizado un cordón de cobre en espiral para descargar mejor las cargas electrostáticas.

Fig. 4-24
Estructura de algunos tipos
de tubos flexibles

- a) Tubo flexible de espiral de acero
 - b) Tubo flexible en espiral de material sintético
 - c) Tubo flexible de goma
- 1 Cinta de acero en espiral con bordes doblados
 - 2 Junta
 - 3 Tubo de PVC blando
 - 4 Espiral de PVC duro
 - 5 Recubrimiento interior de goma
 - 6 Espiral de acero
 - 7 Capa de unión
 - 8 Recubrimiento exterior de tejido



Los tubos flexibles pueden ser de diversos materiales sintéticos, cuyas propiedades técnicas han mejorado considerablemente en el transcurso de los últimos años. Pero la gran variedad dificulta la selección acertada en función de cada aplicación específica. En la tabla 4-3 se muestran las características generales más importantes, debidamente comentadas. Estas características se aplican esencialmente también a los racores y a otros componentes de material sintético. Además también se utilizan tubos flexibles de goma (NBR, caucho de nitrilo acrílico) con o sin refuerzo de tejido.

Criterios que deben aplicarse para seleccionar tubos flexibles:

- Flexibilidad, radio de curvatura mínimo
- Resistencia mecánica, resistencia a los golpes y a la fricción
- Resistencia a la fatiga por envejecimiento del material, a rayos ultravioleta, a las condiciones meteorológicas
- Propiedades dieléctricas y electrostáticas
- Inflamabilidad, combustibilidad
- Resistencia a la presión interior
- Resistencia a la temperatura
- Resistencia a sustancias químicas, resistencia a aceites minerales
- Tolerancia de los diámetros interiores y/o exteriores
- Rugosidad de la pared interior
- Permeabilidad de gases
- Posibilidad de soldar o pegar
- Resistencia a la fatiga por envejecimiento a raíz de vibraciones y tensiones continuas
- Recuperación duradera (en caso de tubos flexibles en espiral)
- Estabilidad de la forma y de la sección
- Apropiado para uso de cadenas de arrastre
- Apropiado para la industria alimentaria y farmacéutica
- Identificación mediante colores diferentes
- Resistencia a hidrólisis y microbios

Tabla 4-3

Propiedades técnicas de tubos flexibles para aire comprimido (productos y nomenclaturas de Festo)

- a) Para racores rápidos roscados (p. ej. Quick Star)
b) Utilizar versión negra
c) Para boquillas enchufables

CM Conductor
DUO Tubo doble

H Resistente a hidrólisis

N Calibración exterior según CETOP RP54P

PA Poliamida

PE Polietileno

PFA Alcóxido perfluórico

PU Poliuretano

PL PVC reforzado con tejido

S Tubo flexible en espiral,

VO Pírorretardante

Círculo negro: apropiado

Semicírculo: con limitaciones

Círculo blanco: no apropiado

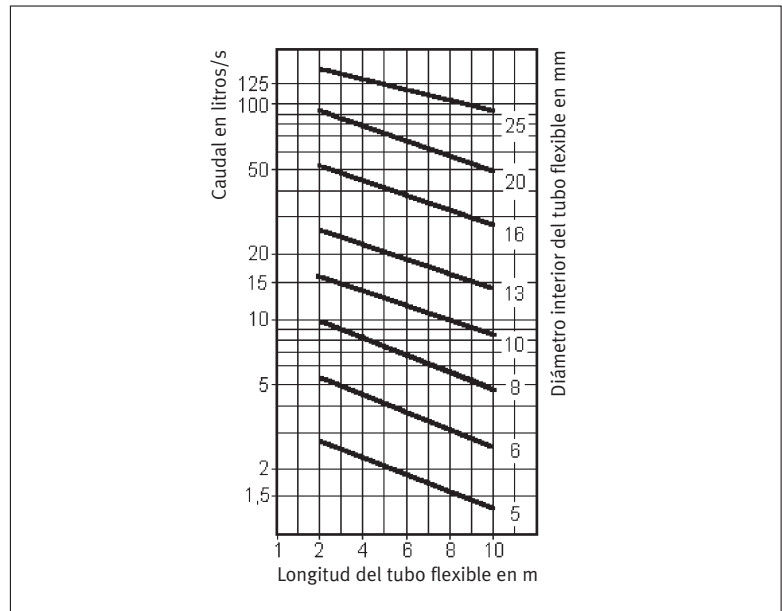
Raya: no procede

Características técnicas	PU							PE							PVC	PFA
	PUN	PUN- DUO	PUN- -H	PUN- -VO	PUN- -CM	PU	PU- DUO	PL	PLN	PAN	PAN- -L	PAN- -VO	PP	PPS	PL	PFAN
Diámetro exterior (a) (Cetop RP 54P)	●	●	●	●	●	—	—	—	●	●	●	●	—	—	—	●
Resistencia a sustancias químicas	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	◐	○	●
Resistencia a microbios	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Resistencia a rayos ultravioleta (b)	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	●
Resistencia a la hidrólisis	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Resistencia a rotura por tensión	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Protección antiinflamable	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	●	○	○	○	●
Homologación para la industria alimentaria	○	○	●	○	○	○	○	●	●	○	●	○	○	○	○	●
Antiestático, conductor	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Sin halógeno	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	○	●	●	○	○
Datos para tipos homologados de Festo	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Sin sustancias agresivas para la laca	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Apropiado para cadenas de arrastre	●	●	●	●	●	●	●	◐	◐	●	●	●	●	●	◐	◐
Recomen. para contacto con agua (no potable)	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Resistencia a la abrasión	●	●	●	●	◐	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	◐	●
Seguridad contra pandeo	●	●	●	◐	◐	●	●	◐	◐	●	●	◐	●	●	◐	◐
Resistencia a agentes refrig. y detergentes	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●
Apropiado para vacío	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	●
Resist. a gran. esfuerzos térmicos y mecánicos	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●	●	◐	●
Masa reducida	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◐	●	●	●	◐
Calibración del diámetro interior (c)	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	○	●	○	○	●	●
Gran flexibilidad a bajas temperaturas	●	●	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	◐	●	●	◐	●
Gran resistencia a altas presiones	●	●	●	●	◐	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Los tubos flexibles utilizados para alimentar aire comprimido a herramientas neumáticas que funcionan con aire lubricado no deberían tener más de 3 ó 5 metros de largo (distancia entre la herramienta y la unidad de mantenimiento con lubricador). Sin embargo, en muchos casos no es posible respetar esta distancia máxima.

Al utilizar tubos flexibles, con frecuencia se comete el error de emplear tubos de diámetros diferentes en un mismo ramal. De esta manera disminuye la presión del fluido. Además, muchas veces los tubos flexibles son demasiado largos. También debe tenerse en cuenta que los tubos en espiral pierden más presión que los tubos rectos. En la fig. 4-25 se muestra la pérdida de caudal en función de la longitud de los tubos flexibles y de su diámetro interior. En el ejemplo se supone una presión de salida fija de 7 bar y una pérdida de presión de 0,2 bar. El tubo flexible es un tubo de PVC con racores en ambos extremos.

Fig. 4-25
Reducción del caudal
en tubos flexibles



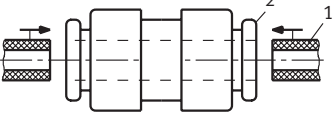
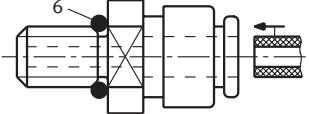
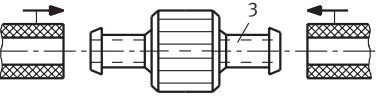
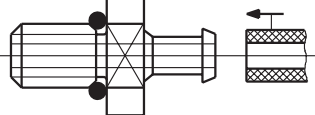
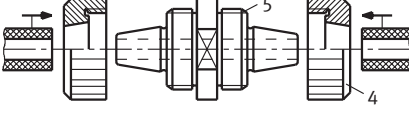
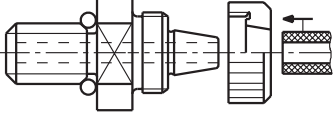
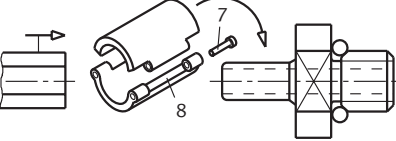
Utilizando los racores de Festo, no disminuye la sección y, por tanto, tampoco disminuye la presión a causa de los racores

4.4.2 Tipos de conexiones de tubos flexibles

Existen diversas formas de unir tubos flexibles entre sí o de unirlos con válvulas, ya sea de modo permanente o desconectable. En la fig. 4-26 se muestran diversas soluciones técnicas para establecer conexiones de modo sencillo. Cada uno de estos tipos de conexiones tiene muchas variantes y también hay numerosas posibilidades de combinar elementos funcionales.

Fig. 4-26
Algunos pocos ejemplos
de uniones de tubos flexibles

- 1 Tubo
- 2 Anillo extractor
- 3 Boquilla
- 4 Tuerca de unión
- 5 Rosca fina
- 6 Junta
- 7 Perno
- 8 Abrazadera tubular

	<u>Racor rápido enchufable</u> Autobloqueante después de enchufar; estanco en el diámetro exterior del tubo
	<u>Racor rápido roscado</u> Racor con combinación de rosca y conexión enchufable al extremo del tubo
	<u>Boquilla enchufable</u> Las boquillas se introducen en los tubos; estancan en el diámetro interior del tubo; asegurar la unión con abrazaderas
	<u>Racor con boquilla enchufable</u> Combinación de boquilla y racor roscado; estanco en la rosca y en el diámetro interior del tubo
	<u>Unión rápida</u> Montaje por deslizamiento exterior del tubo flexible y aseguramiento mediante tuerca de unión; estanco en el cono y en el interior del tubo
	<u>Racor rápido</u> Válvula con rosca y junta cónica para tubos para montaje por deslizamiento exterior
	<u>Abrazadera tubular</u> Después de montar el tubo, se coloca la abrazadera que se fija mediante un perno. Apropia para tubos flexibles conductores

Las boquillas enchufables son muy sencillas y se ofrecen también en forma de T, V e Y y, además, en combinación con racores y elementos funcionales. Si se trata de aplicaciones dinámicas, es recomendable utilizar abrazaderas para asegurar la unión.

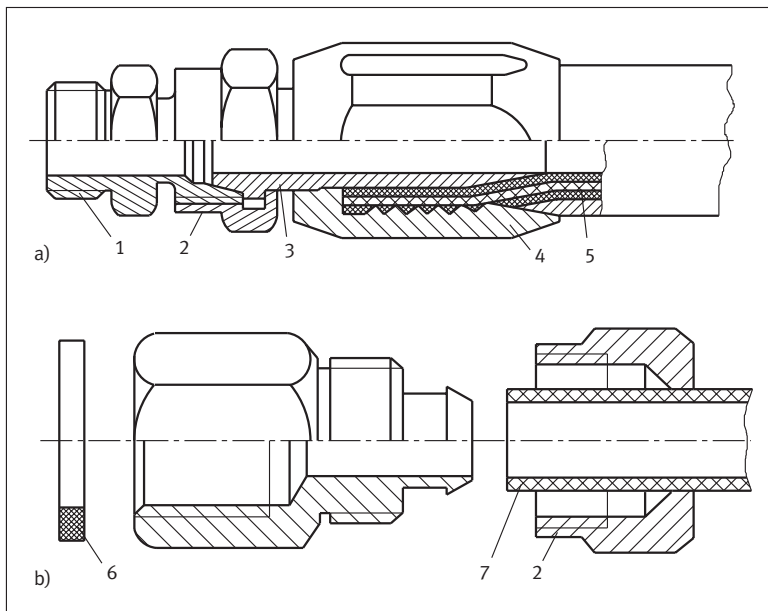
En la fig. 4-27 se muestran algunos racores rápidos roscados. El tubo flexible relativamente grueso que aparece en la fig. 4-27a está reforzado con tejido. El racor rápido roscado de la fig. 4-27b puede obtenerse en diversos materiales y numerosas combinaciones, por ejemplo como distribuidor con tres conexiones o como racor rápido roscado giratorio en L.

Fig. 4-27

Racores para tubos flexibles

- a) Racor con casquillo interior
b) Racor rápido roscado (Festo)

- 1 Empalme
- 2 Tuerca de unión
- 3 Casquillo interior atornillado con manguito esférico
- 4 Casquillo exterior con dientes
- 5 Tubo flexible de goma con tejido de refuerzo
- 6 Junta
- 7 Tubo de material sintético



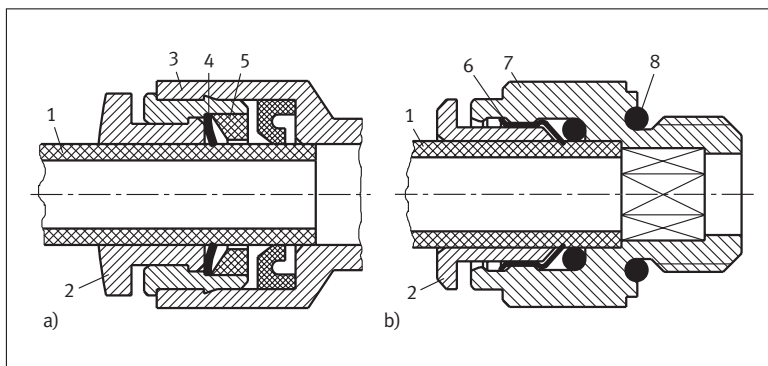
En la fig. 4-28 se aprecia la estructura de racores enchufables y roscados. Estos racores son apropiados tanto para aire comprimido como para vacío. El tubo flexible queda asegurado mediante garras de acero, sin dañar su superficie. Los racores absorben las vibraciones y los picos de presión. Presionando sobre el anillo extractor (para separar las garras del tubo) se pueden soltar fácilmente los tubos. Este sistema de enchufar y fijar se utiliza en numerosas variantes.

Fig. 4-28

Racores rápidos para unir tubos flexibles

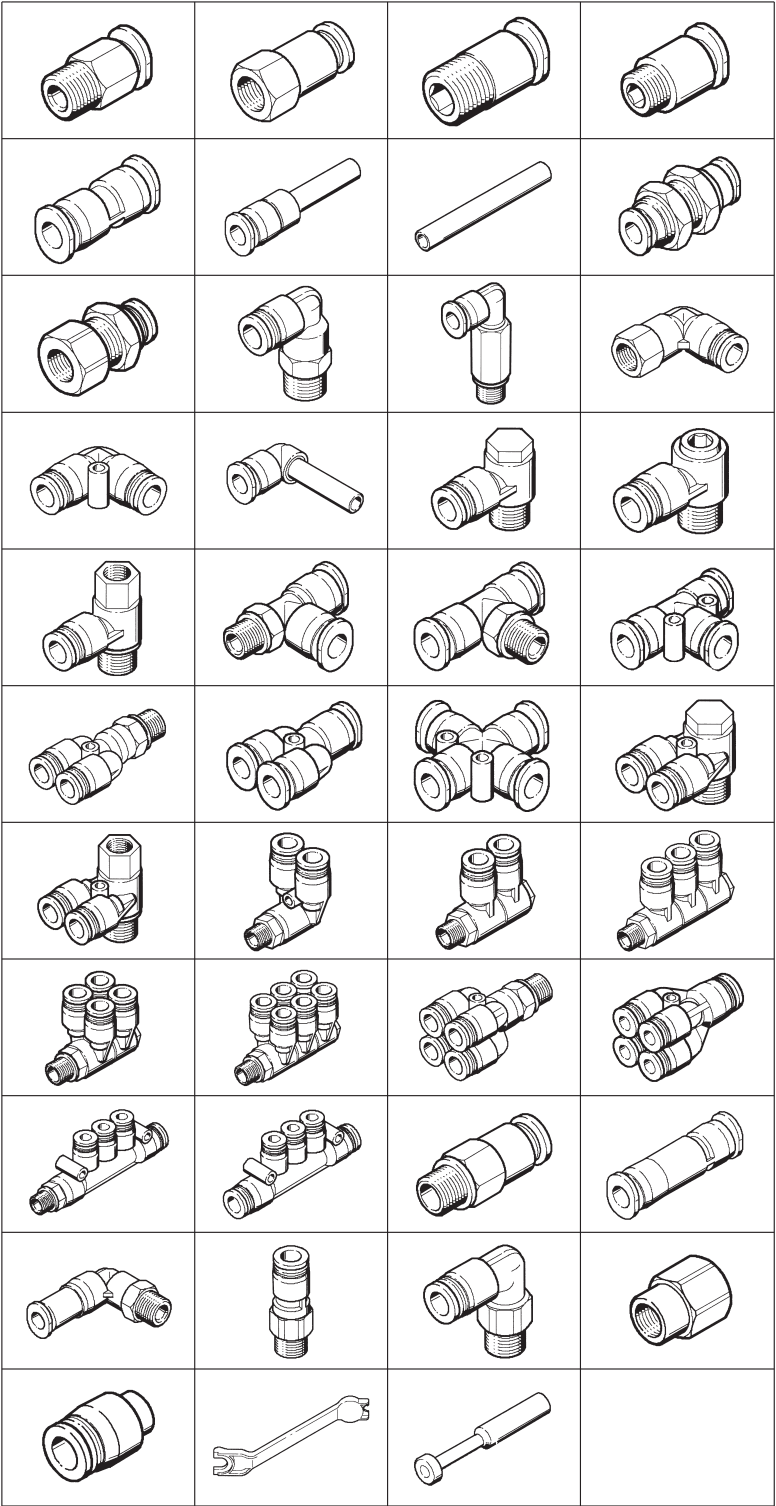
- a) Principio de funcionamiento de un racor enchufable (Festo, QS, QS-V0, CRQS, QS-CM)
b) Racor rápido roscado (Festo, QS-F)

- 1 Tubo flexible de material sintético
- 2 Anillo extractor
- 3 Cuerpo resistente a roturas
- 4 Garra de acero inoxidable
- 5 Manguito hermetizante
- 6 Mordaza de fijación de acero inoxidable
- 7 Cuerpo de latón
- 8 Junta tórica



En la fig. 4-29 se muestra la gran variedad de componentes comerciales utilizados para el transporte y la distribución de aire comprimido. Además, los componentes pueden ser de diversos materiales y tamaños. En la tabla (página 94) se incluyen diversos materiales en función de las aplicaciones, recurriendo a ejemplos de los tipos de Festo que se utilizan actualmente en diversas ramas industriales.

Fig. 4-29
Selección de racores
roscados y enchufables



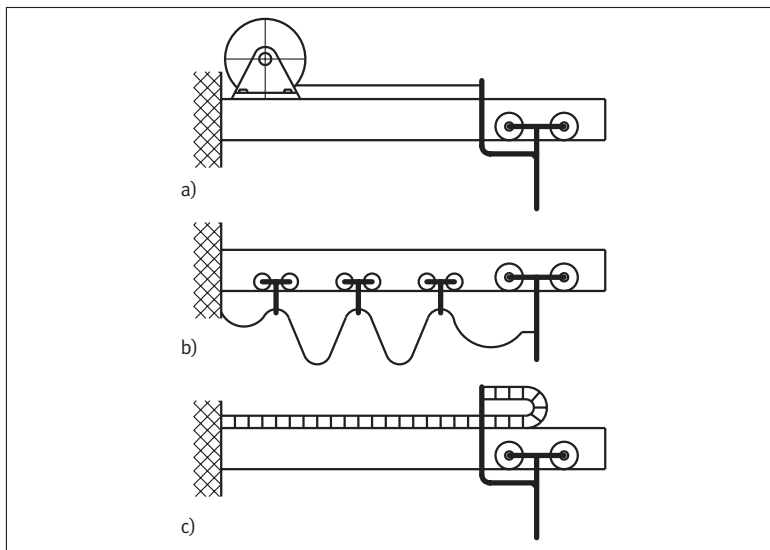
Componentes de racores rápidos roscados	Versiones mini y estándar	Versiones de metal	Versiones ignífugas	Versiones resistentes a la corrosión y a ácidos	Versiones antiestáticas
Anillo de extracción	Polycarbonato	Latón niquelado, cromado	PBT (ignífugo)	Acero inoxidable	POM
Manguito elástico	NBR	Vitón	NBR	Vitón	NBR
Cuerpo	Acero, PBT, latón niquelado, aluminio anodizado	Latón niquelado, cromado	PBT (ignífugo)	Acero inoxidable	PBT conductor
Mecanismo de bloqueo	Latón/Acero inoxidable	Latón/Acero inoxidable	Latón/Acero inoxidable	Acero inoxidable	Latón/Acero inoxidable
Pieza roscada	Latón/niquelado, masa hermetizante de teflón	Latón/niquelado, cromado	Latón/niquelado, masa hermetizante de teflón	Acero inoxidable	Latón/niquelado, masa hermetizante de teflón
Tubos normalizados con tolerancia exterior	PAN, PUN PUN-H PLN	PAN, PFAN, PUN, PUN-H, PLN	PAN-VO PUN-VO PFAN	PFAN PUN-H PLN	PUN-CM

Si se necesita aire comprimido en tomas móviles (por ejemplo, para carros o elementos de manipulación de piezas de accionamiento manual), la longitud de los tubos flexibles tiene que ser variable. Para ello pueden utilizarse tambores, tubos colgantes y cadenas de alimentación de aire comprimido, tal como se puede apreciar en la fig. 4-30. En el caso de los colgantes se debe tener en cuenta que hay un tramo no aprovechable, ya que cuando los carros están juntos, ocupan determinado espacio. Además, también los bucles del tubo pueden ocasionar problemas porque pueden engancharse a otras piezas del equipo. Las cadenas de alimentación de aire comprimido contienen todos los cables y conductos necesarios y se utilizan en máquinas industriales y en equipos que ejecutan movimientos en varios en varios sentidos. Los tubos correspondientes tienen que ser apropiados para cadenas de arrastre, lo que significa que tienen que moverse con facilidad y deben resistir una gran cantidad de flexiones antes de romperse.

Existen sistemas elevadores que prescinden completamente de marañas de tubos flexibles, utilizando en vez de ello un pequeño generador de aire comprimido que avanza con el pórtico. Sin embargo, en ese caso se necesita energía eléctrica que, en el caso de los pórticos, suele obtenerse mediante carriles conductores y las respectivas tomas de corriente.

Fig. 4-30
Alimentación de aire
comprimido en equipos
que ejecutan movimientos

- a) Tambor de tubos
- b) Tubo colgante
- c) Cadena de alimentación
de energía



4.4.3

Acoplamientos de tubos flexibles

Los sistemas de acoplamiento de tubos flexibles se utilizan en redes neumáticas en las que es necesario conectar y desconectar esporádicamente un sistema para transportar el aire comprimido. En la fig. 4-31 se muestran algunos tipos de acoplamientos.

Fig. 4-31
Acoplamientos
de tubos flexibles

- 1 Arandela
- 2 Enchufe macho
del acoplamiento
- 3 Enchufe hembra
del acoplamiento
- 4 Tubo flexible reforzado
- 5 Placa de acoplamiento
- 6 Pieza de unión enchufable
- 7 Rosca
- 8 Boquilla

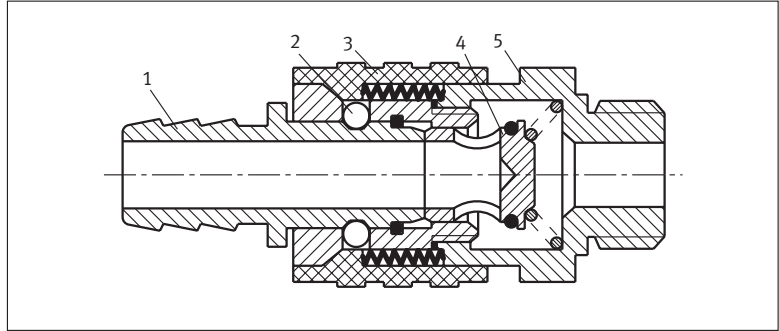
	Acoplamiento simple de tubos flexibles Unión simple con partes macho y hembra. Bloqueo automático al desconectar
	Acoplamiento de seguridad Acoplamiento de tubos flexibles con o sin indicación de la presión; función de descarga a través de casquillo desbloqueable; Bloqueo automático para desconexión sin peligro
	Acoplamiento de garras Acoplar y asegurar mediante garras engranadas. Utilizado con frecuencia para herramientas neumáticas manuales. Con boquilla u otros tipos de conexiones
	Acoplamiento múltiple Para acoplar tubos flexibles con aire de mando. Ejecuciones con placas o conectores redondos. Fijación con tornillos, ganchos o anillos con rosca. Conexión mediante boquilla o racor enchufable

Los acoplamientos para tubos flexibles están diseñados de tal manera que el aire comprimido no puede salir si el acoplamiento no está cerrado. Una vez establecida la conexión, el aire comprimido puede fluir en ambas direcciones. En la fig. 4-32 se muestra el interior de un acoplamiento. Las partes macho y hembra se fijan mediante un anillo portabolas. El acoplamiento únicamente se puede abrir desplazando el manguito. Al cerrar el acoplamiento, la junta se desliza hacia el interior, dejando abierto el canal para el paso del aire comprimido.

Fig. 4-32

Acoplamiento con bloqueo mediante anillo portabolas

- 1 Boquilla para conectar el tubo flexible
- 2 Bola de retención
- 3 Manguito desplazable
- 4 Junta
- 5 Enchufe roscado



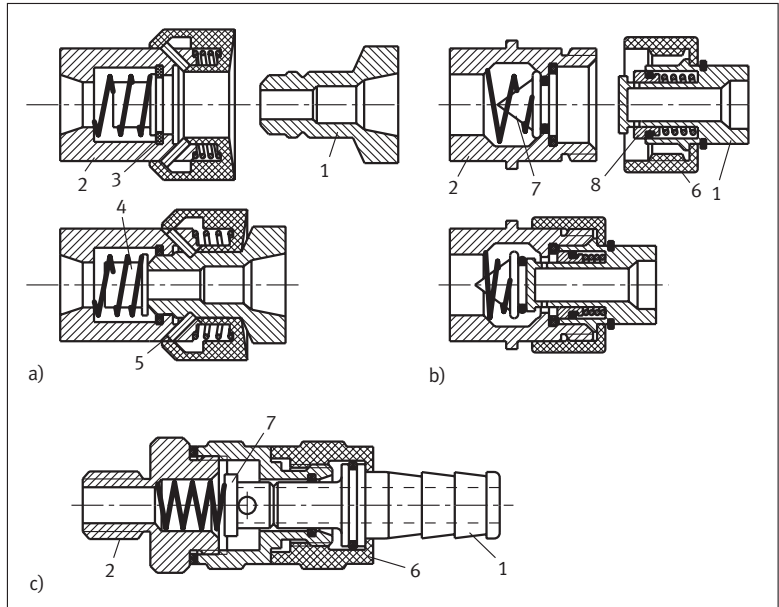
Los acoplamientos de tubos flexibles también pueden evitar la salida de aire en ambos lados al separar la conexión (bloqueo unilateral o bilateral). Al conectar herramientas neumáticas, un sistema de bloqueo automático permite prescindir de la llave de bloqueo que se necesitaría en otro caso. En la fig. 4-33 se muestran otros tipos de acoplamientos.

Fig. 4-33

Acoplamientos de tubos flexibles

- a) Acoplamiento con enclavamiento mediante pasador
- b) Acoplamiento con bloqueo de dos ramales y racor roscado
- c) Acoplamiento con bloqueo de un ramal y aseguramiento mediante tuerca de unión

- 1 Enchufe macho del acoplamiento
- 2 Enchufe hembra del acoplamiento
- 3 Junta
- 4 Émbolo bloqueante
- 5 Pasador de enclavamiento
- 6 Tuerca de unión
- 7 Placa hermetizante
- 8 Manguito de cierre



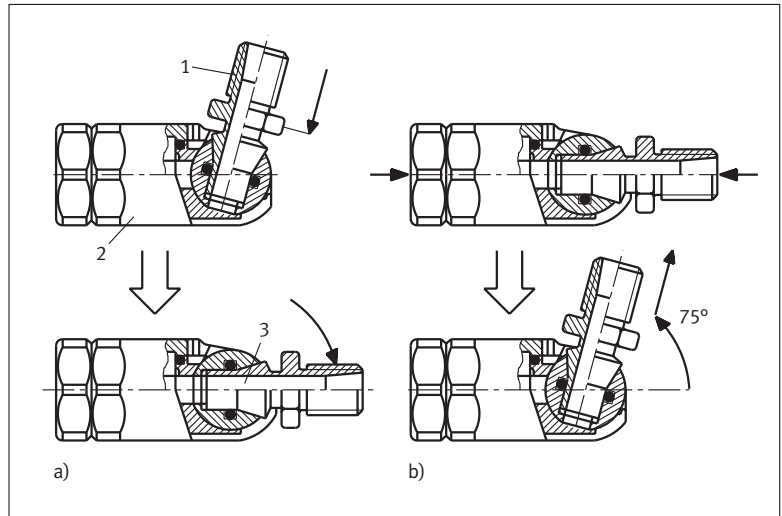
No todos los tipos son apropiados para obtener un buen flujo. Sin embargo, el acoplamiento rápido que se muestra en la fig. 4-34 sí lo es. La conexión se puede establecer con una sola mano y aplicando poca fuerza. Al abrir el acoplamiento no se tiene que aplicar fuerza en contra de la presión de la red. El enchufe macho se introduce en el taladro para la bola hermetizante y, a continuación, se gira. Para abrir, hay que girar el enchufe 75° y retirarlo sin que sea necesario aplicar fuerza en contra de una presión. Al girar la bola, su pared exterior bloquea el flujo de aire.

Fig. 4-34

Acoplamiento para tubos flexible que permite un buen caudal (Atlas Copco)

- a) Cerrar el acoplamiento
b) Abrir el acoplamiento

- 1 Enchufe hembra
2 Enchufe macho
3 Canal para el paso del aire comprimido



Los **acoplamientos de seguridad** se diferencian de los acoplamientos simples por su mayor seguridad al abrirlos. Para hacerlo, tiene que desplazarse hacia atrás un casquillo de bloqueo, con lo que se produce el escape del aire de la máquina. Si se vuelve a colocar el casquillo, es posible abrir el acoplamiento sin peligro alguno. Además, estos acoplamientos disponen de un anillo para indicar ópticamente si la presión de funcionamiento es superior a 1 bar.

Los **acoplamientos de garras** se utilizan frecuentemente para conectar herramientas neumáticas. Dado que estos acoplamientos siempre permiten el paso del aire, hay que tener especial cuidado al abrirlos. Por ello, debe cerrarse primero la válvula de bola correspondiente. A continuación se puede poner en funcionamiento la máquina para reducir la presión del aire comprimido contenido en el tubo flexible. Sólo después se puede abrir el acoplamiento sin correr peligro. Si se vuelve a cerrar el acoplamiento, es recomendable abrir lentamente y con cuidado la válvula de bola (5 segundos).

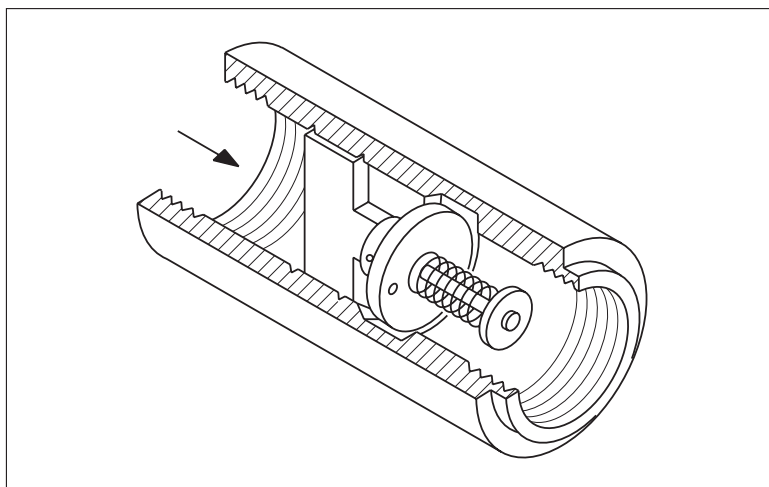
Los **acoplamientos múltiples** están constituidos por varios enchufes macho y hembra. Se suelen utilizar en armarios de distribución y permiten la conexión de varios tubos flexibles de diámetros nominales entre 2 y 6. Si la conexión es redonda, este tipo de acoplamiento se denomina acoplamiento de conexiones múltiples. La forma de las conexiones impide un error de conexión, aplicando un sistema similar al que se utiliza en la electrónica.

4.4.4

Aseguramiento de tubos flexibles

Un tubo flexible que se encuentra bajo presión puede soltarse repentinamente o, también, puede ser que se produzca una rotura imprevista. En ese caso, el aire comprimido sale de modo descontrolado, con el consecuente peligro que representa un tubo flexible suelto dando latigazos. Esta situación es peligrosa y puede ocasionar daños físicos a los operarios. Si en un taller es posible que surja esta situación, es recomendable utilizar elementos especiales para impedir la salida descontrolada de aire comprimido. Concretamente, se puede utilizar una válvula dotada de un émbolo obturador que cierra el paso súbitamente por acción de un muelle si cambian la presión y el caudal entre la unidad consumidora y dicha válvula (fig. 4-35). Estas válvulas de seguridad deben utilizarse especialmente si se trabaja con acoplamientos de garras, ya que éstos son especialmente peligrosos si el tubo flexible empieza a dar latigazos.

Fig. 4-35
Válvula para asegurar
tubos flexibles



Dicho sea de paso que también hay válvulas de esta índole para vacío. En ese caso, las válvulas impiden una caída del vacío si alguna apertura de aspiración se queda abierta de modo descontrolado. Es recomendable elegir válvulas de seguridad que permiten un caudal 50% superior al caudal del sistema, ya que de lo contrario es posible que se bloquee la alimentación de aire cuando no procede.

4.4.5

Daños en tubos flexibles

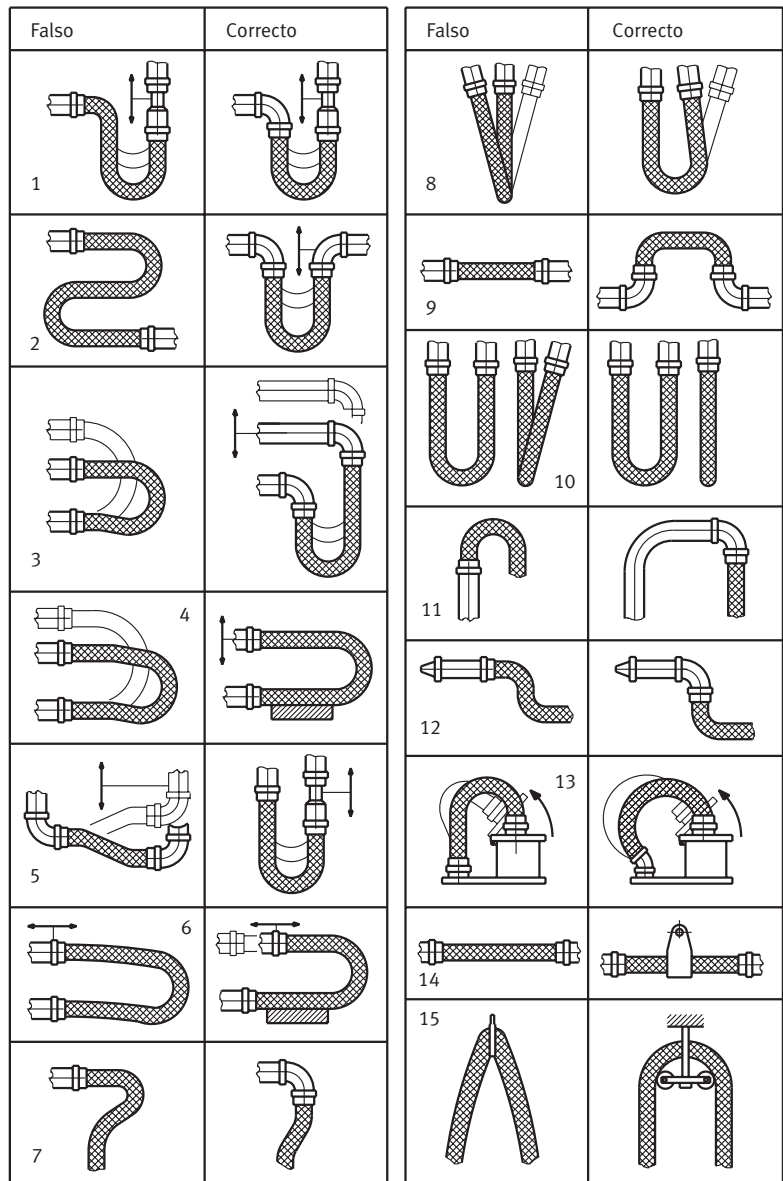
Los tubos flexibles deben elegirse minuciosamente en función de la aplicación prevista. Si no se tienen en cuenta debidamente las condiciones de utilización, es posible que se produzcan averías prematuras. Empíricamente se puede constatar que los daños más frecuentes son los siguientes:

Sobrecargas mecánicas

Los tubos flexibles deben conectarse de tal manera que no haya cambios de sentido en ángulos pequeños detrás de los elementos de acoplamiento. Las zonas de curvaturas provocan daños precoces. La fig. 4-36 incluye una comparación de casos bien y mal configurados. Para evitar el pandeo indebido, se puede recurrir a tubos flexibles dotados de una espiral de refuerzo (de alambre) que,

a pesar de ello, mantienen su flexibilidad. Los ejemplos 1 hasta 5 muestran acoplamientos en los que una de las conexiones está sometida a movimientos verticales constantes. Por extensión, lo mismo se aplica en el ejemplo número 6. Poco recomendable es el caso del ejemplo 13, en el que el tubo tiene una curvatura negativa en relación con la anterior. En los ejemplos 6, 14 y 15 se muestran formas de evitar que el tubo flexible quede combado. Por otro lado, los tubos flexibles tampoco deben tenderse de tal modo que queden tensos, considerando que pueden dilatarse hasta $\pm 5\%$ por efecto de la temperatura, la humedad del aire y otros factores.

Fig. 4-36
Formas correctas y falsas
de conectar tubos flexibles



Si se utilizan tubos flexibles en combinación con cadenas de arrastre, deberá tenerse en cuenta lo siguiente:

- Respetar los radios de curvatura mínimos admisibles
- No superar la capacidad de la cadena de arrastre
- Prever un sistema de compensación de la carga de tracción en el elemento de acoplamiento del tubo flexible

Las sobrecargas mecánicas provocan fisuras debido a constantes cambios de pando y de presión. Las fisuras se explican por la sobredilatación que se produce en el lado exterior del tubo flexible. Si, además, intervienen detergentes o desinfectantes, se viene a sumar una tensión en el interior del tubo que acelera aún más el surgimiento de fisuras. Ello significa que este tipo de rotura se debe a fenómenos físicos, aunque también puede deberse al efecto de reacciones químicas.

Degradación de cadenas moleculares

Los polímeros de los tubos flexibles se disocian por efecto de los procesos químicos que se producen al entrar en contacto con medios del entorno (soluciones alcalinas, soluciones ácidas) o a causa de irradiaciones (rayos ultravioleta, rayos gamma). De esta manera los tubos flexibles se vuelven frágiles, forman finas grietas y, en consecuencia, pierden elasticidad. Muchos polímeros sufren una degradación de sus moléculas por el mero contacto con agua (hidrólisis). Esta degradación puede limitarse a una zona determinada y, además, depende del tiempo que el tubo está expuesto a la sustancia o medio agresivo. También los microbios (por lo general, encima de hongos) pueden provocar un proceso de degradación.

Utilización de tubos flexibles de materiales no apropiados

Muchos daños se explican por la selección de un material que no es apropiado para una aplicación determinada. En el caso de tubos flexibles que se encuentran cerca de una estación de soldadura, debe utilizarse, por ejemplo, un tubo flexible (PUN VO o PAN VO) que no se inflame en absoluto o que lo haga con dificultad, ya que cabe suponer que estará expuesto a salpicadura de chispas. Concretamente, los tubos utilizados en estas condiciones deben tener un grado de resistencia correspondiente a la norma UL 94 VO (UL 94V-0, 94V-1, 94V-2, Underwriters Laboratories Inc. USA, control de inflamabilidad). Si ese grado de resistencia no es suficiente, deberá preferirse el uso de tubos flexibles recubiertos de un tubo flexible metálico.

4.5

Depósitos de aire comprimido

Para que un sistema de aire comprimido funcione sin problemas, es necesario que no se produzcan picos de presión. Por ello se montan depósitos de aire comprimido inmediatamente detrás de los compresores o, también, en la cercanía de una zona de mayor consumo de aire comprimido. Los depósitos tienen las siguientes funciones:

- Compensación de oscilaciones en la alimentación de aire comprimido
- Compensación de variaciones en el consumo de aire comprimido y picos de consumo pasajeros

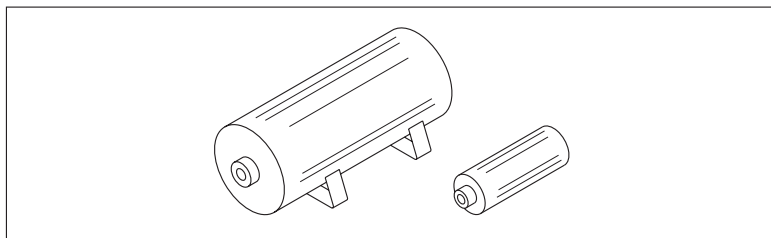
- Alimentación de emergencia de aire comprimido en caso de una interrupción en la red
- Ahorro de energía mediante reducción de la frecuencia de conexión de compresores y de intensificadores de presión

4.5.1

Tipos de depósitos y su utilización

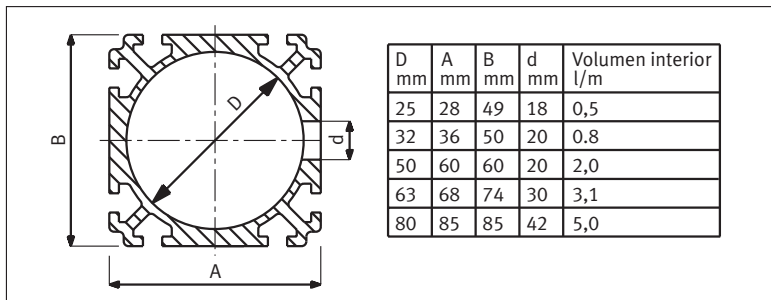
Un simple espacio hueco en un tubo perfilado de aluminio puede servir de depósito de aire comprimido. En los equipos de elevación por vacío se aprovecha el travesaño portante hueco como depósito de vacío. De esta manera, el conducto y el depósito están integrados en un solo elemento funcional. En los depósitos se enfría el aire, por lo que es necesario montar un sistema de purga de condensado. En la fig. 4-37 se muestra el ejemplo de una aplicación. Los depósitos tienen que cumplir determinados requisitos en relación con la calidad de la costura de soldadura, la capacidad de deformación, la resistencia al envejecimiento del material y a la corrosión. Los depósitos suelen tener volúmenes de 0,1/0,4/0,5/2,5/5/10 y 20 litros. Se sobreentiende que en estaciones centrales de compresores, los depósitos tienen una capacidad mucho mayor (por ejemplo, de 4 000 litros). Sin embargo, en la mayoría de los casos es suficiente disponer de un depósito de 20 litros. A modo de criterio de referencia, se puede hacer el siguiente cálculo: si el depósito tiene que entregar aire comprimido de modo continuo, su capacidad es suficiente si corresponde a 1/8 hasta 1/10 del caudal en m³/min. Este valor de referencia es válido si se utiliza un compresor de émbolo con presión de trabajo normal de 10 bar sin regulación automática de la conexión y desconexión. Si estas operaciones se regulan de modo automático, el depósito de aire comprimido tiene que ser más grande, ya que de lo contrario los ciclos de conexión serían demasiado cortos.

Fig. 4-37
Depósito de aire comprimido (Festo)



Si las tuberías de la red son de aluminio extruido (fig. 4-38), es posible recurrir a su volumen interior para aprovecharlo como depósito de aire comprimido.

Fig. 4-38
Tubería de aluminio para aire comprimido (Air Concept)



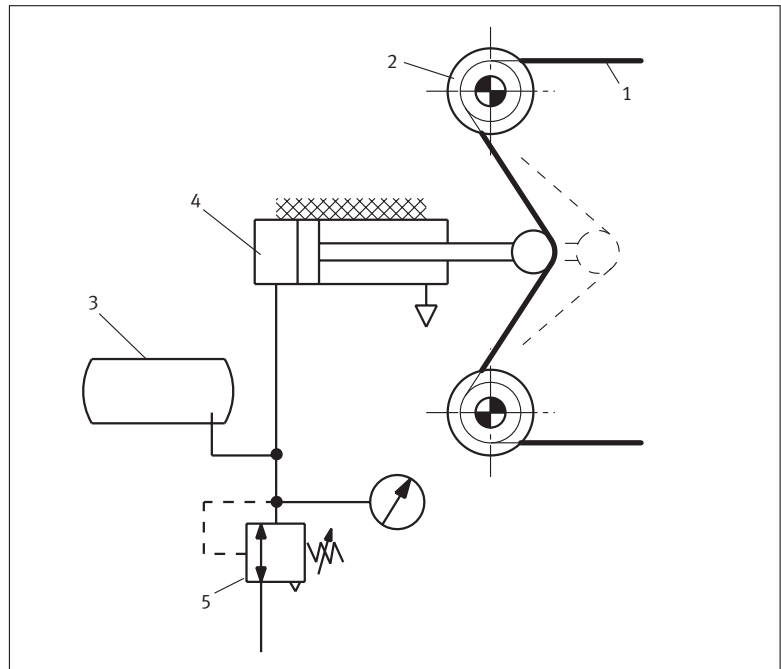
Ejemplo de aplicación

Una cinta de transporte que tiende a avanzar de modo irregular tiene que tensarse mediante un cilindro neumático. En un primer término se intentó utilizar una válvula de escape rápido para permitir un aumento repentino de la velocidad del émbolo. Sin embargo, con esta solución se producían constantes oscilaciones de la presión en función de la apertura de la válvula. Por ello se optó por la utilización de un depósito de aire comprimido (fig. 4-39) obteniéndose un resultado más satisfactorio, ya que ahora se compensan mucho mejor los picos de presión.

Fig. 4-39

Compensación de picos de presión en una cinta de transporte.

- 1 Cinta de transporte
- 2 Rodillo de desviación
- 3 Depósito de aire comprimido
- 4 Cilindro neumático
- 5 Válvula reguladora de presión



4.5.2

Dimensiones
de los depósitos

El tamaño de un depósito de aire comprimido depende del tipo y rendimiento del compresor (por ejemplo, un intensificador de presión), de la presión de funcionamiento, de las oscilaciones de presión ocasionadas por la unidad consumidora y del sistema de regulación. El sistema de regulación es necesario si el compresor o intensificador funcionan sólo pasajeramente. La oscilación del consumo de aire comprimido tiene especial importancia si sólo hay pocos consumidores conectados a la red, pero que consumen mucho aire comprimido. Si existen muchas unidades consumidoras, las oscilaciones suelen compensarse, por lo que el consumo total de aire comprimido puede ser relativamente constante.

Selección del depósito en caso de consumo irregular de aire comprimido

El consumo se caracteriza por la alternancia irregular o regular de picos de consumo, bajo consumo o consumo nulo. El volumen del depósito V_{dep} , expresado en m^3 , se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_{\text{Dep}} = \frac{\Delta t_{\text{Cons}}}{\Delta p} \cdot (\dot{V}_{\text{Cons}} - \dot{V}_{\text{ef}})$$

Δt_{Cons} Duración del pico de consumo en minutos

Δp Caída de presión admisible en el depósito, expresada en bar

$\dot{V}_{\text{Cons}}$ Pico de consumo en m³/min. (aspiración)

$\dot{V}_{\text{efec}}$ Cantidad efectiva en m³/min. (según ISO 1217)

Además tiene que comprobarse si las pausas entre los consumos de aire son suficientes para que el depósito vuelva a estar lleno. El tiempo necesario para conseguirlo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta t_{\text{llen}} = \frac{V_{\text{Dep}} \cdot \Delta p}{\dot{V}_{\text{ef}}}$$

Ejemplo: Instalar un depósito en la parte de la red de aire comprimido que incluye un intensificador. ¿Qué volumen debe tener dicho depósito si en la correspondiente parte de la red hay una unidad consumidora que necesita 850 l/min. durante 30 segundos? La caída de presión admisible es de $\Delta p = 1$ bar, mientras que la alimentación efectiva de aire comprimido es de $\dot{V}_{\text{ef}} = 600$ l/min. (= 0,6 m³/min.).

$$V_{\text{Dep}} = \frac{0,5}{1} (0,850 - 0,6) = 0,125 \text{ m}^3 = 125 \text{ l}$$

El depósito se vuelve a llenar en el tiempo siguiente:

$$\Delta t_{\text{llen}} = \frac{0,125}{0,6} 0,2 \text{ min} \cdot 12 \text{ s}$$

Ello significa (teóricamente) que la unidad consumidora se puede poner en funcionamiento transcurridos siempre 12 segundos desde su desconexión.

Selección del depósito en función de la frecuencia de conexión

Si el compresor no funciona de modo continuo, poniéndose en marcha únicamente si la presión en un depósito disminuye hasta un nivel de presión previamente definido, entonces debe tenerse en cuenta la cantidad de operaciones de conexión y desconexión del motor. Para evitar un desgaste prematuro, el motor en cuestión sólo debe ponerse en marcha entre 6 y 10 veces por hora. Para calcular el volumen necesario del depósito (V_{Dep}) en m³, deberá aplicarse la siguiente fórmula:

$$V_{\text{Dep}} = \frac{15 \cdot \dot{V}_{\text{ef}} \cdot p_1}{Z_s \cdot \Delta p}$$

p_1 Presión del entorno en bar

Z_s Frecuencia de conexión en h⁻¹

Δp Diferencia de la presión de conexión en bar

Cuantas más operaciones de conexión y desconexión se admiten por unidad de tiempo, tanto menor puede ser el volumen del depósito.

4.5.3

Normas de seguridad

Los depósitos de aire comprimido, al igual que cualquier depósito sometido a presión interior, tienen que cumplir las normas de seguridad vigentes. La mayoría de los depósitos de aire comprimido de Festo están homologados de acuerdo con la norma de “depósitos sencillos”, válida para aire comprimido y oxígeno. Los depósitos para los que el resultado de la multiplicación de presión (bar) x litros (l) es superior a 50, tienen que cumplir determinadas condiciones en relación con la soldadura, la capacidad de deformación y la resistencia al envejecimiento del material.

Ejemplo: Un depósito de 20 litros está instalado en una red que incluye un intensificador que genera una presión máxima de funcionamiento de 16 bar. De esta manera se obtiene una presión de 20 litros x 16 bar = 320 bar/l

Ello significa que el depósito tiene que cumplir con la directiva de la CE 87/404, norma 286-2). Los depósitos de Festo están homologados de acuerdo con dicha norma. Los depósitos de acero inoxidable (X5CrNi 1810) de Festo cuentan con una declaración del fabricante y un informe de la institución de inspección técnica alemana TÜV. Es recomendable montar una válvula de seguridad en la red de aire comprimido para conseguir que la presión bajo ninguna circunstancia supere los 16 bar (en el ejemplo que aquí se comenta). Sin embargo, si el volumen del depósito tiene como consecuencia que se supera el resultado del producto de 3 000 bar x litro, deberán respetarse condiciones más estrictas especificadas en otras normas. Así sucede, por ejemplo, con los depósitos de oxígeno utilizados por buceadores. Además, una placa de identificación tiene que indicar con claridad las condiciones de utilización admitidas. Asimismo, tiene que cumplirse el correspondiente intervalo para las inspecciones técnicas del depósito.

4.6

Las roscas

En la neumática se utilizan roscas hermetizantes especialmente en los puntos de alimentación y de toma de aire. Las roscas se definen por su perfil, el paso, la cantidad de vueltas y el sentido de las espiras. Los tipos de rosca más difundidos son los siguientes:

Denominación	Abreviatura	Ejemplo	Norma
Rosca métrica estándar según ISO	M	M 10	DIN 13; ISO 1502
Rosca métrica fina según ISO	M	M 16 x 1,5	DIN 13
Rosca Whitworth de tubos (G)	G	G 1/8	DIN ISO 228
Rosca Whitworth de tubos (R)	R	R 1/8	DIN 2999
Rosca NPT	NPT	NPT 1/2"	Norma americana
Rosca de tubos blindados	PG	PG 21	EN 50626; (DIN 40431)

Rosca métrica según ISO: Este tipo de rosca se utiliza en tornillos y tuercas de todo tipo. También se llama rosca estándar porque se utiliza para los más diversos fines. El ángulo de ataque de la rosca es de 60°. En neumática existe un proyecto de norma de setiembre de 2001 (ISO/FDIS 16030) para taladros y pernos con rosca.

Rosca métrica fina ISO: Este tipo de rosca se utiliza en elementos de sujeción y hermetizantes. El paso de rosca es menor que en el caso de las roscas tipo estándar, por lo que la cantidad de espiras es mayor.

Rosca Whitworth fina ISO: El ángulo de ataque en estas roscas es de 55°. Estas roscas no se utilizan con fines hermetizantes. La rosca es cilíndrica y su identificación está determinada por el diámetro nominal (diámetro interior) del tubo sobre el que se monta la rosca.

Rosca Whitworth fina (R): Se trata de una rosca cónica hermetizante (cono de relación 1:16). Esta rosca se utiliza para uniones de tubos y para racores. En el siguiente cuadro se incluye la conversión de las indicaciones del diámetro:

Tamaño de la rosca en pulgadas, diámetro exterior del tubo	R 1/8	R 1/4	R 3/8	R 1/2	R 3/4	R 1	R 1 1/4	R 1 1/2	R 2
Diámetro nominal del tubo según DIN 2440 en mm	6	8	10	15	20	25	32	30	50
Diámetro exterior de la rosca en mm	9,7	13,2	16,7	21,0	26,4	33,3	41,9	47,8	59,6
Longitud útil de la rosca en mm	6,5	9,7	10,1	13,2	14,5	16,8	19,1	19,1	23,4

Rosca NPT (*national pipe thread*): Se trata de una rosca (americana) cónica que se utiliza en fábricas de máquinas y de automóviles.

Rosca de tubos blindados: Esta rosca se utiliza en tubos de pared delgada con tubo de protección de acero, especialmente en la electrotecnia.

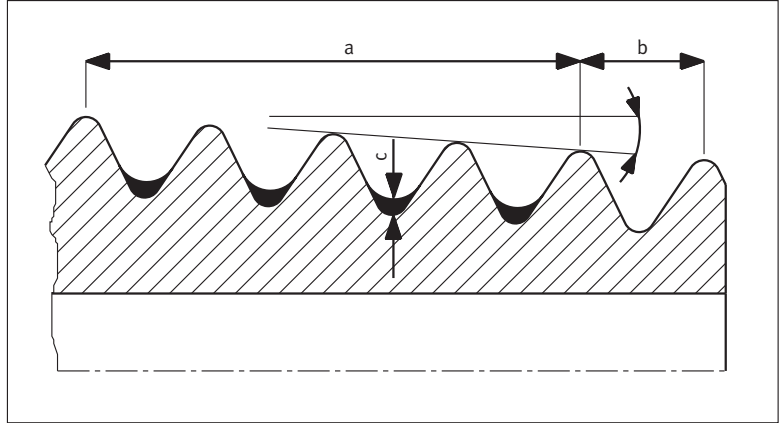
Para conseguir que las roscas sean estancas, se puede recurrir a uno de los siguientes métodos:

- Utilización de retenes o cinta de teflón
- Aplicación de pegamento o de agentes hermetizantes especiales
- Utilización de roscas con recubrimiento de teflón

Tal como se aprecia en la fig. 4-40, la rosca sólo tiene un recubrimiento parcial. De esta manera se evita un excedente de material hermetizante que podría ensuciar el interior del tubo al ajustarse la rosca. Por esta misma razón también es importante respetar los momentos de apriete indicados. Si una rosca pierde sus propiedades hermetizantes por haberse utilizado varias veces (más de 5 veces), deberá emplearse una cinta de teflón.

Fig. 4-40
Tramo de una rosca cónica con recubrimiento de teflón

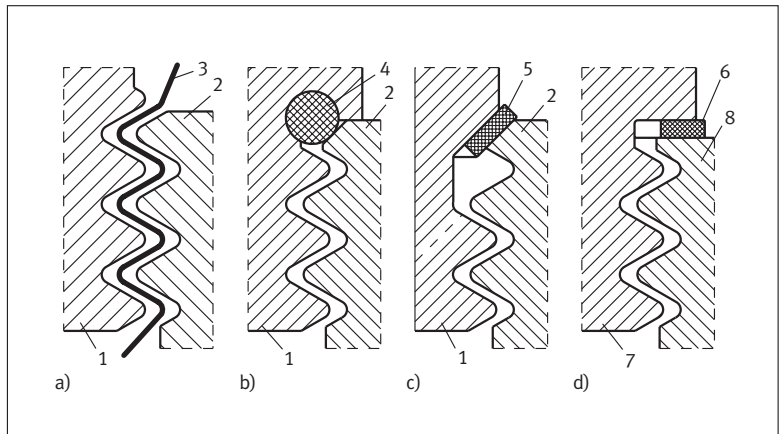
- a) Zona recubierta
- b) Zona sin recubrimiento
- c) Grosor del material de recubrimiento



En la fig. 4-41 se muestran otras posibilidades para conseguir que las roscas sean estancas. Entre estas posibilidades se incluye el uso de juntas de material sintético o de metal, para lo que las roscas correspondientes deben tener los rebajes, superficies o acanaladuras necesarias.

Fig. 4-41
Diversos métodos para la hermetización de roscas

- a) Cinta obturadora
 - b) Junta tórica en acanaladura
 - c) Hermetización de un rebaje de 45°
 - d) Junta plana
- 1 Rosca exterior
 - 2 Rosca interior
 - 3 Cinta de teflón
 - 4 Junta tórica
 - 5 Junta metálica de 45°
 - 6 Junta plana
 - 7 Rosca R cónica exterior
 - 8 Rosca interior G cilíndrica



5

Fugas de aire comprimido

En la medida de lo posible, debe procurarse que la red de aire comprimido no tenga fugas. El aire que se fuga inútilmente constituye un despilfarro de energía. Además, ese aire desperdiciado tiene que generarse y prepararse primero, por lo que las fugas pueden tener como consecuencia la necesidad de disponer de compresores y de otros componentes innecesariamente grandes. En términos técnicos, la estanquidad corresponde a una fuga admisible de 10^{-10} mbar por litro y segundo. Sin embargo, en la práctica no es necesario llegar a tal grado. Es suficiente si las fugas no superan valores entre 10^{-2} y 10^{-5} mbar litro/s. En una red con una presión de 7 bar en el punto de toma de aire comprimido, se considera aceptable una pérdida de presión de 0,6 bar.

5.1

Fugas y caídas de presión

Por fuga se entiende la pérdida de aire comprimido en zonas no estancas. En esos puntos, el aire comprimido se escapa a gran velocidad. A lo largo de un año, las pérdidas de aire pueden ser considerables, tal como se muestra en la tabla siguiente. Si las fugas son grandes, el aire comprimido resulta ser un fluido bastante costoso. Además, las fugas que al principio son pequeñas, aumentan rápidamente.

Diámetro del orificio de la fuga en mm	Pérdida de aire comprimido (6 bar) en l/s	Pérdida de energía en kW
1	1,3	0,3
3	11,1	3,1
5	31,0	8,3

Dado que las fugas de aire no constituyen una contaminación del medio ambiente (a diferencia de lo que sucede con las fugas de electricidad o de aceite), suele no tomarse muy en serio la solución de este problema. La fuga puede medirse observando el vaciado del depósito de aire comprimido. Concretamente, se mide en qué tiempo disminuye la presión en una cantidad determinada (por ejemplo, 1 bar). Al efectuar la medición es necesario que todas las unidades consumidoras estén desconectadas y, por su puesto, no se debe alimentar aire comprimido al depósito. Para determinar la cantidad de aire que se pierde por la fuga, se aplica la fórmula siguiente:

$$V_L = \frac{V_B \cdot (p_A - p_E)}{t}$$

V_L Cantidad de aire perdido por la fuga, expresada en l/min.

V_B Capacidad del depósito de aire comprimido en litros (l)

p_A Presión inicial en el depósito en bar

p_E Presión final en el depósito en bar

t Duración de la operación de medición en min.

Ejemplo: En un depósito de aire comprimido (capacidad de $V_B = 500$ l) se constata una pérdida de presión de $p_A = 9$ bar a $p_E = 7$ bar transcurrida media hora ($t = 30$ minutos). ¿Cuánto aire pierde el sistema?

$$V_L = \frac{500 (9 - 7)}{30} = 33,3 \text{ l/min}$$

A modo de alternativa se puede comprobar cuánto aire comprimido tiene que alimentar el compresor a la red para mantener la presión de trabajo normal. También en este caso es necesario que las unidades consumidoras estén desconectadas. En el momento en que la presión de trabajo corresponde al nivel previsto, el compresor se desconecta. A continuación se produce la fuga de aire comprimido en la red. Transcurrido un tiempo determinado (t_2), el compresor se vuelve a conectar debido a la caída de presión que se produjo en la red debido a la fuga. Además, tienen que medirse con un cronómetro los tiempos de rellenado (t_1). Para obtener el valor porcentual correspondiente a la pérdida de aire comprimido en función de la cantidad de aire suministrada por el compresor, se aplica la siguiente fórmula:

$$L_v = \frac{t_1}{t_2 + t_1} \cdot 100 \quad \text{en tanto por ciento}$$

L_v Pérdida de aire comprimido en tanto por ciento

t_1 Tiempo necesario para recuperar la presión de red

t_2 Tiempo de inactividad del compresor

Si la fuga tiene como consecuencia una pérdida correspondiente al 10% del caudal del compresor, es indispensable adoptar las medidas necesarias para solucionar este problema.

Ejemplo: el tiempo de recuperación t_1 es de 1 minuto. El compresor se vuelve a conectar después de 10 minutos. En ese caso, las pérdidas ocasionadas por la fuga son las siguientes:

$$L_v = \frac{1}{10 + 1} \cdot 100 = 9,1\%$$

Para obtener un resultado más preciso, es recomendable repetir la medición varias veces (siempre empezando en el momento en que se para el compresor) (fig. 5-1). En ese caso, la fórmula es la siguiente:

$$V_L = \frac{V_K \cdot \sum_{i=1}^n t_i}{T}$$

V_K Caudal del compresor en m^3/min .

t_i Duración del ciclo "i" para recuperar la presión de red

n Cantidad de ciclos de recuperación de la presión de red

T Duración total de la operación de medición

Ejemplo: el caudal V_K del compresor es de $3 \text{ m}^3/\text{min}$., durante la medición se ejecutan cinco ciclos ($n = 5$) y el tiempo total es de 10 minutos ($T = 10$). La suma de todos los tiempos cronometrados de recuperación es de 2 minutos.

Suponiendo estas circunstancias, la pérdida de aire comprimido es la siguiente:

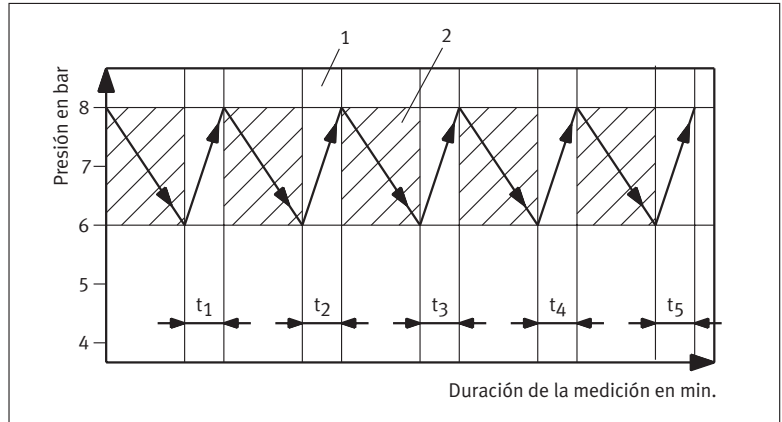
$$V_L = \frac{3 \cdot 2}{10} = 0,6 \text{ m}^3/\text{min}$$

Esta pérdida equivale al 20% del caudal del compresor. El compresor sigue funcionando, a pesar de que las unidades consumidoras están desconectadas. Esta situación es motivo de alarma, ya que

¡Las fugas representan un consumo innecesario!

Fig. 5-1
Ciclos de conexión y desconexión del compresor para determinar la pérdida de aire por fugas (método de mantenimiento de la presión)

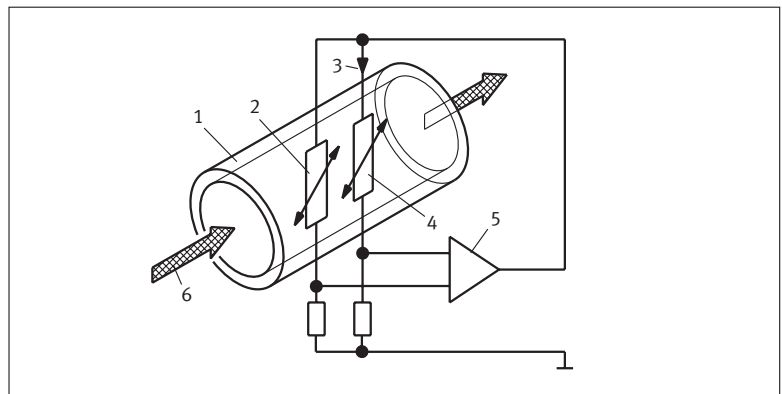
- 1 Proceso de relleno
- 2 Pérdida por fuga



Para recibir un dato correspondiente a la masa de aire perdido, puede llevarse a cabo una medición del caudal. Sin embargo, el método convencional (por ejemplo, con un orificio de medición aplicando el método de presión efectiva) es poco apropiado para este fin, ya que la pérdida de presión es una magnitud “secundaria” en este caso. Para conseguir resultados más fiables, es recomendable utilizar medidores térmicos de caudal (por ejemplo, un anemómetro de película caliente). En la fig. 5-2 se muestra un sensor de esta índole. En el canal se colocan láminas de resistencia de platino, dispuestas en paralelo al flujo del aire. La resistencia (4) se calienta, con lo que parte del calor se entrega al aire. El regulador (5) se ocupa de mantener constante la temperatura del aire a pesar del calentamiento de las placas de platino. Con ello, aumenta la corriente utilizada para el calentamiento al aumentar la velocidad del flujo. La resistencia (2) ofrece un valor de referencia para la temperatura del aire, de modo que es posible regular con precisión la diferencia de temperatura.

Fig. 5-2
Principio de funcionamiento de un anemómetro de película caliente

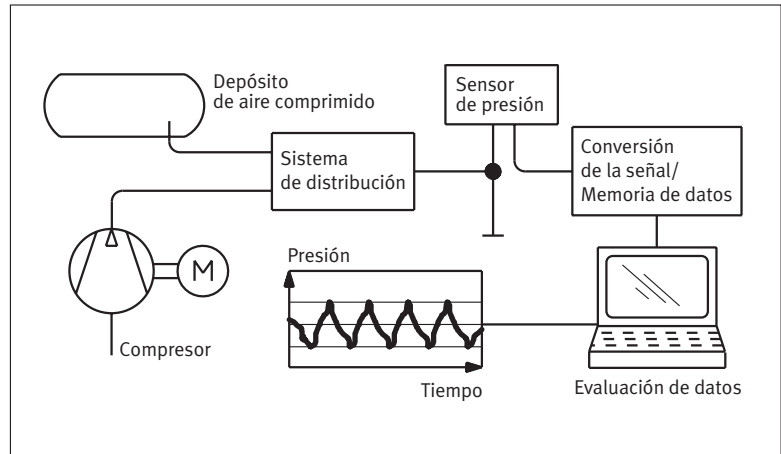
- 1 Canal
- 2 Resistencia de película fina para la temperatura del fluido
- 3 Calentamiento mediante corriente eléctrica
- 4 Resistencia térmica de capa delgada
- 5 Regulador
- 6 Caudal de aire



Con este método se obtiene directamente el valor correspondiente al flujo expresado en kg/h o el valor equivalente del caudal normalizado Nm³/h. Este método de medición también es ideal para medir el consumo de aire comprimido de determinados equipos neumáticos o, también, para medir el consumo para determinar los costos ocasionados en determinadas zonas del taller o de la fábrica. Con este método es posible medir caudales muy pequeños.

En todos los métodos antes explicados, es necesario que las unidades consumidoras no estén en funcionamiento. Para determinar la pérdida de presión mientras que está en funcionamiento todo el sistema de fabricación, debe aplicarse el método de la caída mínima de presión. En la fig. 5-3 se muestra el esquema necesario para llevar a cabo las mediciones correspondientes.

Fig. 5-3
Medición de la presión
en función del tiempo en
una red de aire comprimido
(ITS Nord KG, Gasex)



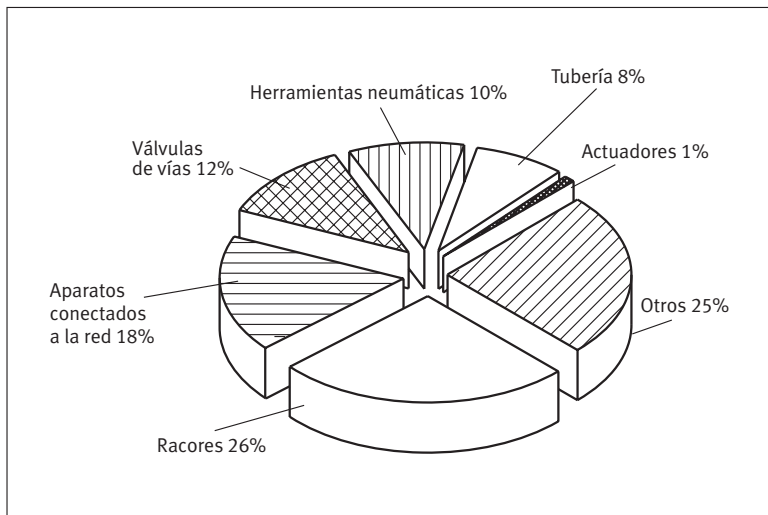
Aplicando este método se mide la presión cientos de miles de veces. Los resultados de esta medición y el tiempo se relacionan con la diferencia de presión y con la diferencia de tiempo. Mientras que el compresor no está en funcionamiento y si la carga útil no es suficiente, se determina el valor mínimo para cada uno de los niveles de presión. De esta manera se obtienen valores correspondientes a la parte útil y a la parte correspondiente a la fuga de aire comprimido. Cabe anotar que la evaluación de cientos de miles de valores de medición no se puede hacer manualmente, por lo que es necesario disponer del software correspondiente.

5.2

Localización de fugas y control

Antes de eliminar las fugas hay que localizarlas primero. Uno de los métodos más difundidos para hacerlo, consiste en aplicar lejía jabonosa en los lugares sospechosos. Si se forman burbujas, es fácil encontrar el orificio que causa la fuga de aire. Pero también puede recurrirse a métodos de medición para localizar las fugas. En la fig. 5-4 se muestran los lugares más comunes de las fugas.

Fig. 5-4
Distribución de las fugas en la red de aire comprimido



Localización mediante ultrasonido

El aire se escapa por las fugas a gran velocidad y produciendo un sonido inaudible para el ser humano. Sin embargo, con sensores sí es posible detectar ese sonido y transformar su frecuencia para que sí lo perciba el ser humano. Utilizando auriculares es posible localizar la fuga detectando el sonido que ocasiona. En este método se aprovecha el sentido de orientación del hombre. Además, también es posible digitalizar las señales. Con este método es posible localizar muy rápidamente cualquier fuga en bridas, acoplamientos, válvulas o tubos.

El aire comprimido es un agente energético que debe aprovecharse del modo más eficiente posible. En muchos casos se dispone de compresores modernos, aunque la red está anticuada y en mal estado. Con frecuencia se desperdicia el 50% de la energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de la red neumática. Ello significa que las redes neumáticas constituyen una importante fuente de posibles ahorros. Para ahorrar es necesario localizar las fugas y cerrarlas para que la pérdida de presión en la red sea lo más baja posible. En los conductos que llevan hacia las unidades consumidoras pueden producirse las siguientes pérdidas de presión:

• Tubería principal	0,03 bar
• Tubería de distribución	0,03 bar
• Derivaciones	0,04 bar
• Secador	0,30 bar
• Filtro	0,40 bar
• Unidad de mantenimiento y tubo flexible	0,60 bar
Pérdida de presión total	1,40 bar

Las redes de aire comprimido deberían inspeccionarse con regularidad con el fin de detectar fallos, corrosión, elementos de sujeción sueltos y fugas. Concretamente, es recomendable realizar los siguientes controles:

- **Diariamente:** vaciar el condensado acumulado en el depósito del filtro o utilizar un separador automático de condensado y, además, controlar el nivel de aceite del lubricador y, en caso necesario, rellenar aceite.
- **Semanalmente:** comprobar si los tubos flexibles están porosos, eliminar virutas de metal, controlar el pandeo, verificar el buen funcionamiento de las válvulas reguladoras (cerrarlas y, a continuación, ajustar una presión de 6,3 bar), controlar el funcionamiento de los lubricadores
- **Mensualmente:** controlar todos los racores, reparar daños en los tubos, controlar las válvulas de flotador de las unidades de purga automática de condensado, ajustar las conexiones sueltas de los cilindros y, si procede, hermetizarlas, limpiar los filtros, enjuagar o soplar los cartuchos de los filtros, controlar posibles fugas en las válvulas y comprobar si los taladros de escape están obturados.
- **Trimestralmente:** controlar todas las uniones para comprobar si tienen fugas, limpiar válvulas, enjuagar o soplar cartuchos filtrantes o sustituirlos si procede.
- **Semestralmente:** Controlar posibles huellas de desgaste en las guías de los vástagos de los cilindros, controlar fugas en todos los componentes y sustituir silenciadores sucios.

Algunas sugerencias e indicaciones generales para ahorrar

- La red de tuberías debería ser lo más corta posible y el diámetro de las tuberías debería ser el más pequeño admisible. Sin embargo, en los tubos que llevan hacia la válvula de vías se pierde menos presión si su diámetro es más grande.
- Las tuberías que se instalan adicionalmente deben provenir de la fuente de aire comprimido y no de alguna derivación.
- Las unidades de mando deben montarse de modo descentralizado. Las unidades de conmutación deben estar lo más cerca posible a las unidades consumidoras.
- Utilizar cilindros con volúmenes residuales pequeños. Los cilindros neumáticos provistos de amortiguación necesitan cámaras de presión más grandes.
- Utilizar cilindros con émbolos de diámetro apropiado. No elegir diámetros demasiado grandes para, supuestamente, “tener un margen de seguridad”. Lo mismo se aplica a la carrera.
- Es más económico trabajar con el nivel de presión más bajo posible. Reduciendo la presión se puede ahorrar lo siguiente:

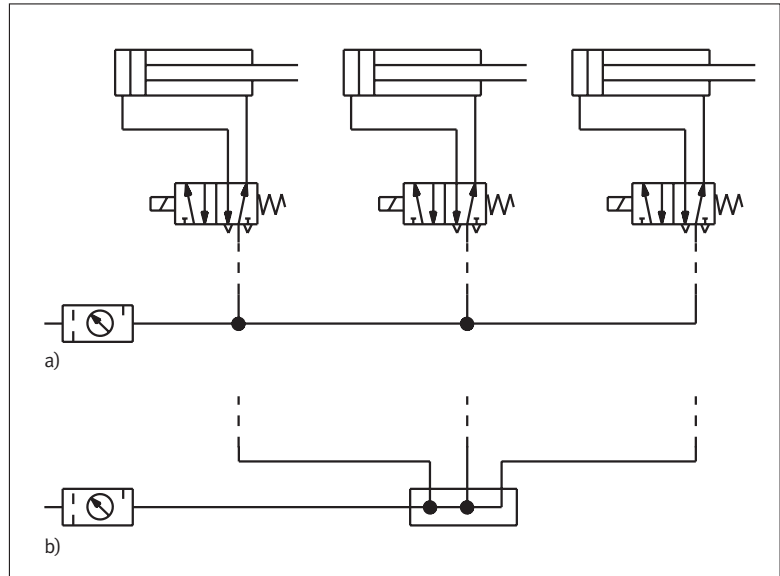
Presión en bar	Ahorro en por ciento
de 6 a 5	17
de 6 a 4	33
de 6 a 3	50

- Cambiar el valor correspondiente a la baja presión para trabajar con la presión mínima posible
- Trabajar según un plan de control sistemático con el fin de detectar posibles fugas.
- Utilizar el mando puramente neumático únicamente si resulta recomendable por razones de seguridad, sencillez y velocidad.
- Siempre que sea posible, utilizar cilindros de simple efecto en vez de cilindros de doble efecto, ya que los de simple efecto sólo necesitan aire comprimido en una carrera de trabajo.
- Las pistolas de chorro de aire, utilizadas para limpiar, soplar, eliminar virutas, etc., consumen mucho aire. Aplicando una presión de 2 bar (en vez de la presión de 6 bar de la red) se necesita únicamente la mitad del aire.
- Los cilindros de carrera larga (más de 100 mm) no funcionan en modalidad de simple efecto con muelle de recuperación. Sin embargo, sí pueden hacerlo recurriendo al principio de funcionamiento de los muelles neumáticos, es decir, aplicando una presión constante de 2 bar por medio de un regulador delante del émbolo.

- Los distribuidores en T originan remolinos y, en consecuencia, pérdidas de presión considerables que, a continuación, tienen que compensarse mediante una presión superior en el sistema. Es más recomendable utilizar bloques de distribución/colectores, a los que se conectan los tubos. Deberán elegirse bloques de distribución con diámetros de salida grandes (fig. 6-1).

Fig. 6-1
Distribución
para ahorrar energía evitando
distribuidores en T

- a) Conexiones
convencionales
b) Distribución mediante
bloque de distribución/
colector



- Las juntas de los racores se contraen después de algunas semanas, con lo que se producen fugas audibles. Por ello es recomendable utilizar juntas de materiales compuestos (combinación de elastómero y termoplástico, Festo), con las no se producen dichas fugas.
- Las válvulas deben montarse lo más cerca posible de las unidades consumidoras, ya que así se evita el llenado inútil de los conductos que llevan hasta el cilindro de trabajo. La mejor forma de ahorrar en este caso consiste en utilizar combinaciones de cilindro y válvula. Sin embargo, en ese caso debe disponerse de espacio suficiente para el montaje y, además las condiciones del entorno deben cumplir determinadas condiciones (evitar suciedad causada por polvo).
- Si para el retroceso de un cilindro de doble efecto no se necesita toda la fuerza y si el proceso no es crítico por el tiempo, puede utilizarse una presión menor para ejecutar dicho movimiento (por ejemplo, 3 en vez de 6 bar).
- Si la guía del vástago de cilindros neumáticos es demasiado grande, puede producirse un desgaste mayor de la junta del vástago, con lo que pueden ocasionarse fugas que, además, son difíciles de detectar.

Absorción

Retención de sustancias internamente; proceso de incorporar una sustancia contenida en otras sustancias, por ejemplo, el agua que contiene el aire.

Adsorción

Retención de sustancias externamente; proceso de retener una sustancia disuelta (por ejemplo, vapor de agua) en la superficie de una sustancia sólida. Esta agregación puede ser física (fuerzas de van de Waal) o química (enlace).

Aerosol

Gas (por ejemplo aire) que contiene partículas líquidas o sólidas muy finas y difundidas.

Aire de aspiración

Aire atmosférico sin sobrepresión con temperatura y humedad del ambiente.

Caída de presión

Disminución no intencionada de la presión debido a diversas resistencias al flujo (tubos, racores, válvulas) entre el compresor y la unidad consumidora.

Cantidad de alimentación

Cantidad efectiva de aire comprimido que, en función de la cantidad de aire aspirado (l/min.; m³/min.), es capaz de suministrar un compresor.

Caudal

Denominación del volumen que fluye por unidad de tiempo (expresado, por ejemplo, en m³/s o l/s).

Caudal másico

Denominación que se refiere al caudal en función del tiempo (expresado, por ejemplo, en kg/s.)

Derivación muerta

Tubería que termina en un punto determinado (comparable a una calle sin salida). Es lo contrario a una tubería circular o anular.

Difusión

Compensación de diferencias de concentración sin influencias externas.

Duración de conexión

Tiempo durante el que una unidad consumidora neumática está en funcionamiento. En sistemas automáticos, los cilindros neumáticos (por ejemplo) sólo se activan durante un porcentaje determinado del ciclo de trabajo.

Factor de simultaneidad

Valor empírico que expresa la probabilidad que en una red de aire comprimido esté en funcionamiento una determinada cantidad de unidades consumidoras al mismo tiempo.

Fluido

Concepto general que se refiere a todas las sustancias gaseiformes, líquidas o capaces de fluir, utilizadas para transmitir energía o datos. La técnica de fluidos incluye la hidráulica y la neumática.

Fuerzas de van der Waal

Enlaces de poca fuerza entre las moléculas. Estas fuerzas surgen entre átomos o moléculas neutrales debido a una distribución pasajera y contraria de la carga.

Fuga

Pérdida de aire comprimido por falta de estanquidad en la red o debido al desgaste de los equipos neumáticos.

Intensificador de presión (compresor complementario)

Se trata de otra denominación para un compresor. El intensificador aumenta la presión de entrada del aire comprimido para, por ejemplo, obtener una presión de salida duplicada.

Memoria de datos (logger)

Sistema para registrar y administrar automáticamente grandes cantidades de datos de medición.

Neumática

Parte de la física que trata de la propiedad de los gases. Principalmente aire, utilizado como portador de energía o de señales.

Número de Reynolds

Valor numérico empleado para caracterizar el tipo de flujo en una estructura hidráulica donde la resistencia al movimiento depende de la viscosidad del líquido en conjunto con la inercia. Es igual a la razón entre fuerzas de inercia y fuerzas viscosas.

Preparación fina

Preparación final del aire comprimido delante de la unidad consumidora.

Presión dinámica

También se llama presión cinética. Es la parte de la presión total existente en un fluido que corresponde al cuadrado de la velocidad v del caudal. Esta presión actúa en la dirección del flujo.

Presión normal en la neumática

En la neumática industrial, la presión entre 3 y 10 bar (presión de trabajo o de mando).

Presión normalizada

Presión atmosférica a nivel del mar ($0m = NN$) y con $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La presión normalizada ha sido definida como presión de $1,01325\text{ bar}$.

Presión parcial

En una mezcla de gases o vapores, la presión de cada uno de los componentes.

La suma de las presiones parciales equivale a la presión total.

Punto de condensación bajo presión

Denominación de la temperatura del punto de condensación con presión de trabajo.

Punto de rocío

Si se enfría el aire, aumenta la humedad relativa. La temperatura en la que el contenido llega al 100 por cien se llama punto de rocío o, para ser más exactos, temperatura de condensación. Si la temperatura baja más, se forma condensado.

Racor

Componente utilizado para unir tubos. También puede ser una pieza distribuidora.

Saturación

Cantidad máxima de agua que puede contener el aire en un m^3 a una temperatura determinada.

Tubería circular (anular)

Conducto de aire comprimido que forma un circuito cerrado de distribución.

Una tubería circular puede contener diversas derivaciones.

Tubería de distribución

También se llama tubería de alimentación. Se trata de la tubería que, atravesando un espacio determinado, transporta aire comprimido hasta el lugar de consumo (máquina, puesto de trabajo). Las tuberías de distribución son, por lo general, tuberías circulares.

Tubería de unión

Esta tubería establece la conexión entre la tubería de distribución y la unidad consumidora. También se llama derivación intermedia. Suele ser de tubo flexible.

Tubería principal

Tubería para transportar el aire comprimido desde el compresor hasta la tubería de distribución. Por lo general hay una tubería principal en cada nave de una fábrica.

Tubo flexible

Tubo elástico para gases y líquidos. Los tubos flexibles para aire comprimido suelen tener un refuerzo exterior, mientras que los tubos de vacío tienen un refuerzo interior.

Valor característico del aire comprimido

Magnitud utilizada para medir la eficiencia. Los fabricantes de compresores expresan este valor en euros por 1 000 m³.

Valvulería

Concepto general que engloba diversos tipos de componentes utilizados en redes neumáticas, incluyendo los elementos de mando y los instrumentos de medición.

Aceites (para lubricación de aire comprimido) DIN 51524-HLP 32
Aire comprimido, utilización general PNEUROP 6611

Bridas, dimensiones de las conexiones DIN 2501

- Formas de superficies hermetizantes DIN 2526
- Bridas planas para soldar, presión nominal 10 DIN 2576
- Bridas para soldar, presión nominal 10 DIN 2632
- Roscas, roscas R DIN 2999-1 e ISO 7-1
- Rosca G DIN ISO 228-1
- Pernos roscados, taladros y roscas de tubos DIN 3852
- Rosca de montaje CETOP RP 6 P
- Atribución de conexiones roscadas a los diámetros de tubos rígidos y flexibles CETOP RP 38 P
- Tubos roscados, cincados, semipesados DIN 2440

Cantidad de alimentación, compresores de desplazamiento, controles de aprobación ISO 1217

Clases de protección (IP...) DIN 40050

Clases de pureza del aire, impurezas DIN ISO 8573-1

Compresores, homologación y ensayos de rendimiento VDI 2045

Determinación del caudal, compresores de desplazamiento, homologación DIN 1945

Diámetros de tubos rígidos y flexibles CETOP RP 37 P

Diámetros exteriores de tubos para la técnica de fluidos CETOP RP 76 P, CETOP RP 54 P

Directiva de depósitos de presión NE 286 T1 y CE 87/404

Directivas de neumática ISO 4414

Elementos metálicos de unión por apriete para tubos de polietileno DIN 8076

Elementos para unir tubos y piezas para tubos de aire comprimido de polietileno de gran densidad (HDPE) DIN 16963

Homologación para alimentos FN 942010

Identificación de tubos DIN 2403

Máscaras protectoras, aire para respirar, valores límite DIN NE 12021

Material ignífugo UL 94...

Norma de seguridad DIN NE 983

Preparación de aire comprimido, impurezas, clases de calidad DIN ISO 8573-1

Presión, valores normalizados de presión y conceptos utilizados en la técnica de fluidos DIN 24312

Radios de curvatura para tubos soldados sin costura DIN 2916

Racores con anillo cortante DIN 2353, DIN 3859

Racores rápidos cilíndricos ISO 6150

Secadores de aire comprimido, especificaciones técnicas, control DIN ISO 7183
Símbolos DIN ISO 1219

Técnica de salas limpias; bases, definiciones y clases de salas limpias VDI 2083
Tipos de secadores, secadores de aire comprimido, requisitos, controles
DIN ISO 7183

Tolerancias CETOP RP 54

Tuberías, diámetros nominales DIN NE 764-1

- Abreviaturas, clases de tubos DIN 2406
- Racores, DIN 2353, cuadro general DIN 3850
- Tubos de PVC duro DIN 8061 hasta 8063
- Tubos de poliamida DIN 16982, DIN 73378
- Tubos de polietileno duro DIN 8074 y 8075
- Tubos de acrílnitrilo-estireno-butadieno (ABS) DIN 16890, 16891
- Símbolos para redes de tuberías DIN 2429

Tubos de acero semipesados, tubos roscados DIN 2440

Tubos de cobre DIN 1754

Tubos flexibles DIN 2825

Tubos de poliamida, valores característicos CETOP RP 54 P, DIN 16982

Unidades de purga de condensado

- DIN 3548,
- DIN NE 26554, 26704, 26948, 27841, 27842,
- DIN ISO 6553,
- ISO 6552, 6554, 6704, 6948, 7841, 7842

Valores característicos del caudal en equipos de aire comprimido

CETOP RP 50 P, CETOP RP 84 P

Valvulería para tubos DIN 817

Viscosidad de aceites ISO 3448

Instituciones

CETOP	Comite Europeen des Transmissions Oelohidrauliques et Pneumatiques
DIN	Deutsche Industrienorm
ISO	International Organization for Standarization
NE	Norma Europea
PNEUROP	European Comitee of Manufacturers of Compressors, Vacuum Pumps and Pneumatic Tools
UL	Underwriters Laboratories Inc. (USA)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Bibliografia

Bronner, M.: Compressed Air Maintenance Service, Festo, Esslingen 2001

Croser, P.; Ebel, F.: Pneumatik, editorial Springer, Berlin/Heidelberg 1989

Deppert, W.; Stoll, K.: Pneumatik-Anwendungen, editorial Vogel, Würzburg, 1990

Feldmann, K.-H.; Moring, W., Stapel, A.G.: Druckluftverteilung in der Praxis, editorial Resch, Gräfeling 1985

Hoffmann, E.; Stein, R.: Pneumatik in der Konstruktion, editorial Vogel, Würzburg, 1987

Mark, G.: Service und Wartung pneumatischer Anlagen, Festo, Esslingen 1987

Prede, G.; Scholz, D.: Elektropneumatik, editorial Springer, Berlin/Heidelberg 1998

Rothe, M.: Druckluftherzeugung und -aufbereitung, editorial Vulkan, Essen 2000

Vogel, G.; Mühlberger, E.: Faszination Pneumatik, editorial Vogel, Würzburg 2001

A	Acoplamiento de garras	97
	Acoplamiento de seguridad	97
	Acoplamiento de tubos flexibles	95
	Acoplamiento múltiple	97
	Agente refrigerante	34
	Aire de enjuague	36
	Aire húmedo	21
	Alta compresión	33
	Anemómetro de película caliente	109
	Arco de dilatación	77
B	Bloqueo mediante anillo portabolas	96
	Bloqueo mediante anillo portabolas	96
	Boquilla enchufable	89, 91
C	Calidad del aire comprimido	30
	Caudal del aire	12
	Caudal	11
	Coefficiente de dilatación	77
	Colector de condensado	41
	Colector de condensado con flotador	41
	Condensado	24
	Conducción de aire comprimido por tubo perfilado	79
	Conexión múltiple	97
	Contenido de aceite	40
	Contenido de agua	25
	Convertidor NE	19
D	Depósitos de aire comprimido	100
	Derivación	60
	Determinar tuberías	71
	Diagrama de Mollier	22
	Dimension	64
	Distancia máxima	80
	Distribución del aire comprimido	60
	Duración de conexión	65
E	Ecuación para el estado de los gases	14
F	Factor de simultaneidad	65
	Filtro micrónico	39
	Filtro submicrónico	37
	Filtro	37
	Filtros ciclónico	37
	Filtro de aire	37
	Filtro de capa simple	38
	Filtro de capas múltiples	38
	Filtro de carbón activo	37, 39

	Flujo	11
	Fuerza de van der Waals	44
	Fuga	107
H	Hidrólisis	100
I	Impurezas contenidas en el aire	30
	Índice de Reynolds	14
	Intensificador de presión	57
L	Lubricador de aire comprimido	45
	Lubricador de microneblas	46
	Lubricador estándar	45
M	Manómetro de membrana elástica	53
	Manómetro de muelle tubular	53
	Manómetro de resorte elástico	19
	Manómetro	53
	Márgenes de presión del aire	16
	Martillo neumático	9
	Método de secado por frío	33
	Métodos de secado	31
	Microfiltro	37
	Montaje en forma de cuello de cisne	62
N	Neumática industrial	9
	Normas de seguridad	104
P	Pérdida de presión	68
	Preparación del aire comprimido	28
	Presión absoluta	16
	Presión de flujo	16
	Presión diferencial	16
	Presión dinámica	16
	Presión estática	18
	Presión	15
	Presostato	20
	Pressure-booster	57
	Principio Venturi	46
	Punto de condensación bajo presión	21
	Punto de rocío	21
	Purga de condensado	62
R	Racor con casquillo de sujeción	84
	Racor de anillo cortante	82
	Racor de manguito esférico	82
	Racor enchufables	86
	Racor para tubos flexibles	92

	Racor rápido	85
	Racor	81
	Red de tuberías circulares	60
	Red neumática	28
	Reguladores de presión	49
	Resistencia al caudal	69
	Rosca hermetizante	104
	Roscas	104
S	Secado por absorción	34
	Secadores de membrana	35
	Selección del depósito	102
	Señal de conmutación	20
	Sensor de condensación	27
	Sensor del punto de condensación	26
	Sensor polímero	27
	Sobrecompresión	33
	Sobrepresión	16
T	Tipos de flujo	12
	Tipos de tubos flexibles	87
	Tubería circular	60
	Tubería de distribución	60
	Tubería de unión	60
	Tubería principal	60
	Tubo de Prandtl	19
	Tubo de PVC	90
	Tubo flexible de espiral de acero	87
	Tubo flexible de goma en espiral	87
	Tubo flexible de material sintético en espiral	87
	Tubo perfilado de varias cámaras	78
	Tubo de aluminio	76
	Tubo de poliamida	72
	Tubo deslizantes	80
	Tubo perfilados	78
	Tubo telescópicos	80
U	Unidad de mantenimiento	50
	Unidad intensificadoras de la presión	57
	Unión por brida	82
V	Vacío	16
	Válvula de arranque progresivo	52
	Válvula para asegurar tubos flexibles	98