

The background of the top half of the cover is a dark red technical drawing of a compressed air system. It shows various components like tanks, pipes, and valves, rendered in a lighter red color against a black background.

Manual técnico

Aire comprimido

MANUAL TÉCNICO DE AIRE COMPRIMIDO

Edita: Junta de Castilla y León
Consejería de Economía y Empleo
Ente Regional de Energía de Castilla y León

Colabora: Dea Ingeniería

Diseño: Imprenta Sorles. LEÓN
www.sorlesimprentaonline.es

PRESENTACIÓN

El sector industrial es uno de los mayores demandantes de energía, llegando a representar más del 31% del total de energía final consumida en España. Esto es debido a que los procesos productivos y de fabricación, además de necesitar materias primas y mano de obra, requieren energía para la obtención de los productos finales.

Básicamente, existen dos tipos de energía convencional que se utilizan en el sector industrial, la energía eléctrica y la energía térmica, ésta segunda en forma de agua caliente, aire caliente o vapor de agua.

Tradicionalmente, el consumo de energía eléctrica para la obtención de aire comprimido utilizable en los procesos industriales no ha contado con la relevancia que su ponderación en el consumo energético final revela. Es de destacar, que más del 10% de la electricidad consumida por el sector industrial se utiliza en la producción de aire comprimido.

Solo en Castilla y León, el consumo de energía eléctrica en el sector industrial y servicios alcanzó las 750.000 tep en el año 2011, por lo que el potencial de ahorro energético y económico que se puede alcanzar implementando medidas favorecedoras del ahorro y la eficiencia energética es muy considerable.

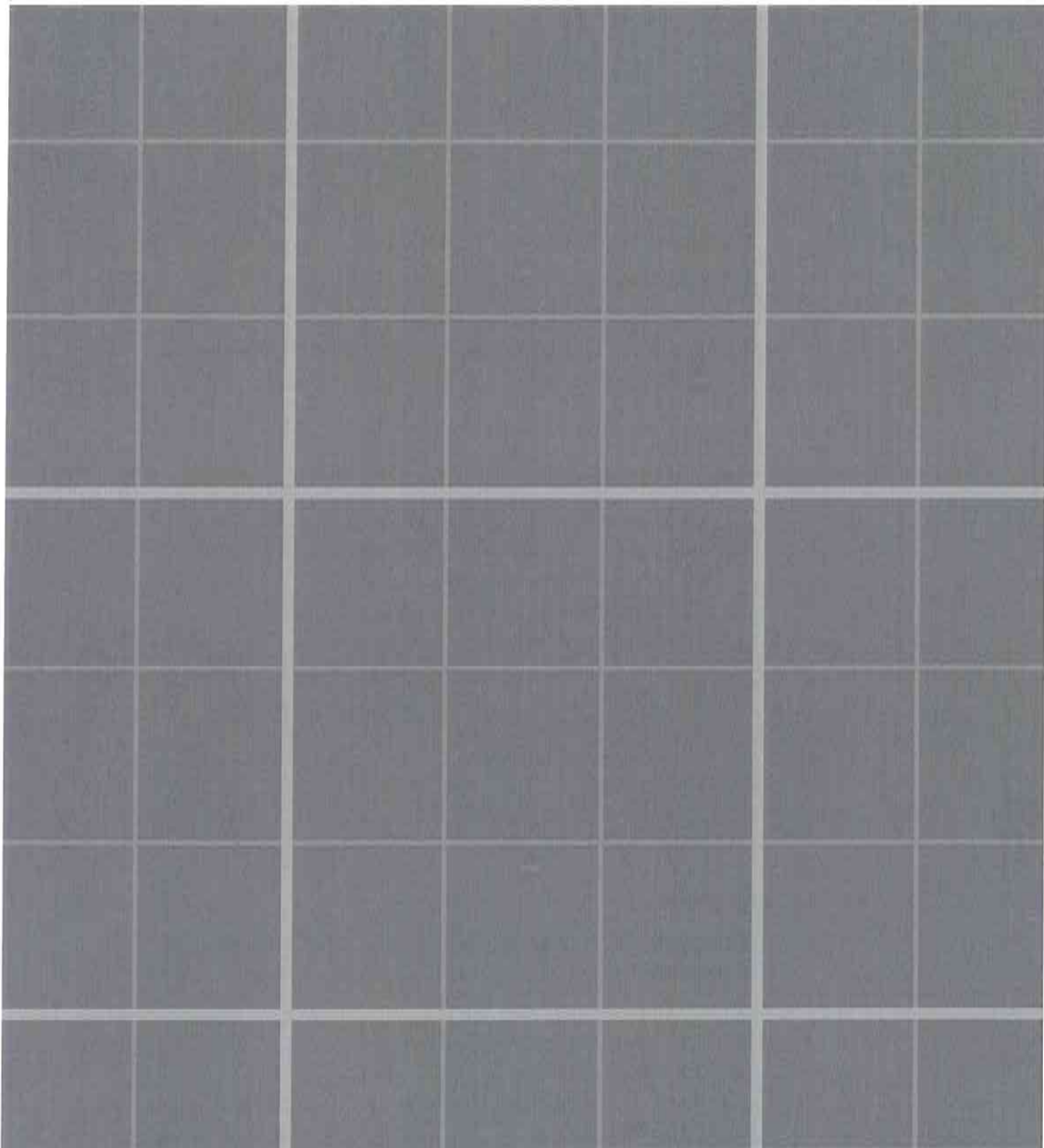
Del mismo modo, no podemos menospreciar los logros y mejoras ambientales obtenidos con la ejecución de estas medidas, como su contribución a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente CO₂, cuantificables también en términos económicos.

Conscientes de los importantes ahorros que se pueden derivar del correcto diseño y ejecución de las instalaciones de aire comprimido, el Ente Regional de la Energía de Castilla y León, en el marco de la Estrategia de Ahorro y Eficiencia Energética en España (E4+), ha elaborado este Manual técnico de aire comprimido, que pretende servir como herramienta de consulta para todas aquellas personas que, por su dedicación profesional o empresarial participan en el diseño, ejecución y utilización de las instalaciones de aire comprimido en el sector industrial.

Si bien, y dado que la energía representa un coste cada vez más importante en la fabricación del producto final, debe controlarse el gasto energético que supone el disponer de aire comprimido para su uso en los distintos procesos industriales.

Es mi deseo que este manual contribuya a la mejora de la eficiencia energética de nuestras empresas, lo que sin duda redundará en una mejora de la competitividad en la producción, pues con la aplicación de los conceptos indicados en este manual, podrán implementarse las tecnologías más novedosas disponibles y ahorrar en costes de fabricación.

TOMÁS VILLANUEVA RODRÍGUEZ
Consejero de Economía y Empleo



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1:	
Introducción.....	17
1.1. El aire comprimido en la industria	17
1.2. Importancia de la eficiencia energética en las instalaciones de aire comprimido	18
Capítulo 2:	
Principios teóricos.....	23
2.1. Estructura molecular y comportamiento físico de los gases.....	23
2.2. Principios de comportamiento termodinámico de los gases.....	25
2.2.1. <i>Principios fundamentales</i>	25
2.2.2. <i>Transferencia de calor</i>	25
2.2.3. <i>Cambios de estado</i>	28
2.3. Unidades de medida en instalaciones de aire comprimido	33
2.3.1. <i>Presión</i>	33
2.3.2. <i>Temperatura</i>	34
2.3.3. <i>Capacidad calorífica</i>	34
2.3.4. <i>Trabajo</i>	35
2.3.5. <i>Potencia</i>	36
2.3.6. <i>Caudal volumétrico</i>	36
Capítulo 3:	
Equipamiento y estructura de las instalaciones de aire comprimido	41
3.1. Compresores.....	42
3.1.1. <i>De desplazamiento positivo</i>	44
3.1.2. <i>Dinámicos</i>	45
3.2. Red de distribución del aire comprimido.....	46
3.2.1. <i>Tuberías</i>	46
3.2.2. <i>Accesorios</i>	46
3.3. Equipos auxiliares para acondicionamiento del aire comprimido	47
3.3.1. <i>Eliminación de agua</i>	48
3.3.2. <i>Eliminación de aceite</i>	50
3.3.3. <i>Eliminación de partículas</i>	51

Capítulo 4:

Dimensionado y puesta en marcha de las instalaciones de aire comprimido.....	55
4.1. Consideraciones generales de ubicación del sistema.....	55
4.2. Dimensionado del compresor.....	56
4.2.1. <i>Tipo de compresor</i>	56
4.2.2. <i>Capacidad de producción</i>	56
4.2.3. <i>Dimensionado en condiciones de altitud elevada</i>	58
4.3. Dimensionado de la red de distribución	61
4.3.1. <i>Geometría</i>	62
4.3.2. <i>Secciones de tubería y pérdidas de carga</i>	63
4.4. Acumuladores.....	68
4.5. Dimensionado del acondicionamiento	69
4.5.1. <i>Eliminación de agua</i>	69
4.5.2. <i>Eliminación de aceite</i>	70
4.5.3. <i>Eliminación de partículas</i>	70
4.6. Dimensionado de la refrigeración	70
4.6.1. <i>Compresores refrigerados por agua</i>	70
4.6.2. <i>Compresores refrigerados por aire</i>	72
4.7. Recuperación de energía	72
4.7.1. <i>Cálculo del potencial de recuperación de calor residual</i>	73
4.8. Sala de compresores.....	74
4.8.1. <i>Emplazamiento y diseño</i>	76
4.8.2. <i>Cimentación</i>	76
4.8.3. <i>Aspiración de aire</i>	77
4.8.4. <i>Ventilación de la sala de compresores</i>	78

Capítulo 5:

Costes y oportunidades de ahorro en las instalaciones de aire comprimido.....	83
5.1. Costes de instalación y operación	83
5.2. Coste del ciclo de vida	85
5.2.1. <i>Cálculos</i>	86
5.3. Oportunidades de ahorro	87
5.3.1. <i>Control de fugas</i>	89
5.3.2. <i>Control de la aspiración del aire</i>	94
5.3.3. <i>Recuperación de energía térmica</i>	94

5.3.4. <i>Control de la presión de la red de distribución</i>	98
5.3.5. <i>Control de los tiempos muertos de trabajo en vacío de los compresores</i>	99
5.3.6. <i>Empleo de compresores eficientes</i>	100
5.3.7. <i>Control de la velocidad de los compresores</i>	102
5.3.8. <i>Control de la demanda artificial</i>	103
5.3.9. <i>Monitorización automática del sistema</i>	105
5.3.10. <i>Control sobre las aplicaciones inadecuadas</i>	107

Capítulo 6:

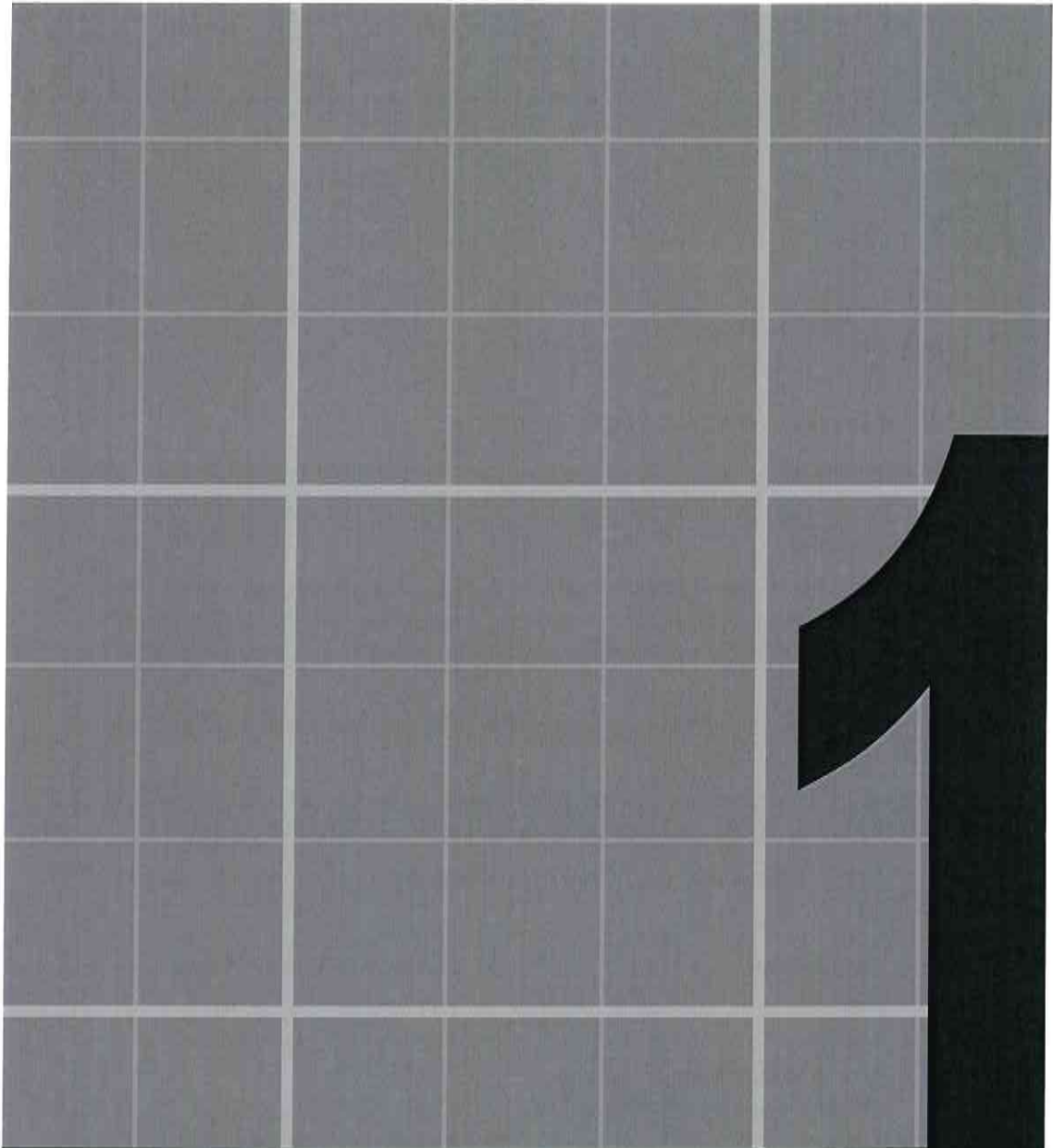
Anexos

6.1. Anexo 1 Longitudes equivalentes de accesorios de tubería	111
6.2. Anexo 2 Propiedades del aire	112
6.3. Anexo 3 Propiedades de la atmósfera.....	113
6.4. Anexo 4 Contenido de agua en el aire, presiones parciales de vapor y puntos de rocío.....	114
6.5. Anexo 5 Magnitudes y sus unidades más habituales.....	115
6.5. Anexo 6 Referencias y bibliografía empleadas	116

Capítulo 7:

Índices

7.1. Índice de figuras.....	119
7.2. Índice temático	121



INTRODUCCIÓN

1 Introducción

1.1. El aire comprimido en la industria

El aire comprimido es una forma de fluido energético muy versátil en la industria.

Su calificativo de fluido energético radica en su capacidad de producir un trabajo cuando se descomprime.

Casi todas las empresas utilizan el aire comprimido en algún tipo de equipo como herramientas de mano, actuadores de válvulas, pistones y maquinaria. De hecho, más del 10% de la electricidad suministrada a la industria se utiliza en la producción de aire comprimido.

En muchos casos, el empleo de aire comprimido es tan vital que la instalación no puede funcionar sin él.

La proporción de energía utilizada para producir aire comprimido varía según los sectores de actividad - en algunos casos, puede ser hasta un 30% del uso total de energía.

Los sectores empresariales que utilizan el aire comprimido de manera más extendida incluyen:

- Aeroespacial
- Cemento
- Cerámica
- Los productos químicos, incluidos los productos farmacéuticos
- Electrónica
- Ingeniería
- Alimentos, bebidas y tabaco
- Fundiciones
- Vidrio
- Los materiales de aislamiento
- Minerales
- Fabricación de automóviles y repuestos
- Papel y cartón
- Generación de energía
- Caucho y plásticos
- Acero
- Textiles
- Tratamiento de aguas

1.2. Importancia de la eficiencia energética en las instalaciones de aire comprimido

El aire comprimido es, probablemente, la forma más cara de energía útil que puede llegar a emplearse.

La razón de esta aseveración radica en la ineficiencia de su producción.

El proceso de compresión del aire lleva asociado un nivel de desperdicio energético muy importante. De la energía total suministrada a un compresor, tan solo entre un 8% y un 10% puede ser convertida en energía útil que sea capaz de realizar un trabajo en el punto de uso.

Un sencillo diagrama de Sankey muestra este hecho de forma gráfica:



A pesar del alto coste de producción, muchos sistemas en funcionamiento lo hacen con niveles de pérdidas de hasta un 30% del aire comprimido producido a causa de fugas, mantenimiento deficiente, aplicaciones inadecuadas y falta de control.

Estas cifras demuestran el alto coste de funcionamiento de un sistema de aire comprimido, y da una idea de la importancia que en estas instalaciones tiene el hecho de tomar medidas para reducir el desperdicio y ahorrar energía y dinero.

La figura siguiente muestra que, durante una vida útil de diez años de un compresor, el coste de la energía para hacer funcionar el sistema es mucho mayor que la inversión inicial de capital. También muestra que el coste de mantenimiento está en el orden de un 7% de los costes totales. Sin embargo, esta es una actividad crucial para maximizar la eficiencia energética de cualquier compresor y su red de distribución asociada.



A pesar de todas estas consideraciones, existen aplicaciones donde su empleo es imprescindible. Un ejemplo claro es el equipo utilizado en atmósferas potencialmente explosivas debido a la presencia de disolventes orgánicos o en la minería, en las que un equipo eléctrico podría provocar graves accidentes.



PRINCIPIOS TEÓRICOS

2 Principios teóricos

No se puede abordar un manual acerca del aire comprimido sin apuntar, al menos de una manera somera, una serie de consideraciones básicas acerca de las leyes físicas que rigen el comportamiento de los gases.

Esta consideración es importante dado que el empleo del aire comprimido aprovecha una serie de transformaciones de este que son, en definitiva, las que le confieren el calificativo y las propiedades de fluido energético.

Estas consideraciones son de dos tipos: Físicas y Termodinámicas.

2.1 Estructura molecular y comportamiento físico de los gases

La Ley de Boyle establece que, a temperatura constante (transformación isotérmica), el producto de la presión por el volumen de un gas, es una constante.

La relación se escribe:

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad [\text{EC. 1}]$$

Donde:

p = presión absoluta [atm]

V = volumen [m^3]

Esto significa que si el volumen se reduce a la mitad durante una compresión, entonces se duplica la presión, siempre que la temperatura permanezca constante.

La ley de Charles establece que a presión constante (transformación isobárica), el volumen de un gas cambia en proporción directa al cambio en su temperatura.

La relación se escribe:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad [\text{EC. 2}]$$

Donde:

V = volumen [m³]
 T = temperatura [K]

La ley general de estado de los gases es una combinación de las leyes Boyle y de Charles. Esto significa que tanto presión, como volumen y temperatura afectan a cada una de las otras variables. Cuando una de estas variables se modifica, esto afecta al menos a una de las otras dos variables.

Esto puede escribirse de la siguiente manera para un mol de un gas:

$$\frac{p \times V}{T} = R \quad \text{[EC. 3]}$$

Donde:

p = presión absoluta [atm]
 V = volumen específico [m³/kg]
 T = temperatura [K]

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \text{constante individual del gas (atm} \cdot \text{l/kg} \cdot \text{K)} \quad \text{[EC. 4]}$$

Donde:

M = masa molecular
 \bar{R} = constante de los gases y solo depende de las propiedades del gas.

De forma general, para n moles de un gas, la relación toma la siguiente forma:

$$p \times V = n \times \bar{R} \times T \quad \text{[EC. 5]}$$

Donde:

p = presión absoluta [atm]
 V = volumen [l]
 n = número de moles
 \bar{R} = constante universal de los gases = 0,08205746 [atm · l/mol · K]
 T = temperatura [K]

2.2. Principios de comportamiento termodinámico de los gases

2.2.1. Principios fundamentales

La energía se presenta de diversas formas, tales como: térmica, mecánica, química, eléctrica, radiación (luz, etc.).

La termodinámica es el estudio de la energía térmica y su capacidad de producir un cambio en un sistema o realizar un trabajo.

La primera ley de la termodinámica expresa el principio de conservación de la energía. Se dice que la energía ni se crea ni se destruye, y de esto se deduce que la energía total en un sistema cerrado siempre se conserva, con lo que es constante y se limita a cambiar de una forma a otra. Así, el calor es una forma de energía que puede ser generada a partir de un trabajo, o bien, generar un trabajo.

La segunda ley de la Termodinámica expresa que en la naturaleza existe una tendencia natural a evolucionar hacia un estado de mayor desorden molecular. La entropía es una medida del desorden: los cristales sólidos y la mayoría de las estructuras regulares de la materia tienen muy bajos valores de entropía. Los gases son una de las estructuras más desorganizadas que existen y, por lo tanto, presentan valores altos de entropía.

La energía potencial de los sistemas energéticos aislados que está disponible para realizar un trabajo disminuye con el aumento de la entropía. La Segunda Ley de Termodinámica afirma que el calor, a partir de "su propio esfuerzo", nunca puede realizar una transferencia de calor desde una región de temperatura baja a una región de temperatura más alta.

2.2.2. Transferencia de calor

Cualquier diferencia de temperatura dentro de un cuerpo o entre las diferentes partes de un sistema lleva asociada una transferencia de calor, hasta que se alcanza un equilibrio de temperaturas. Esta transferencia de calor puede tener lugar de tres diferentes maneras: por conducción, convección o radiación. En situaciones reales, la transferencia de calor tiene lugar simultáneamente, pero no por igual de las tres maneras.

2.2.2.1. Conducción

La conducción es la transferencia de calor por contacto directo de las partículas. Se lleva a cabo entre los cuerpos sólidos o entre finas capas de un líquido o un gas. Los átomos en su estado de vibración natural, transmiten una parte de su energía cinética a los átomos adyacentes que están en un estado de vibración inferior.

$$Q = -\lambda \times A \times t \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad [\text{EC. 6}]$$

Donde:

- Q = calor transferido [J]
- λ = coeficiente de conductividad térmica [W/m· K]
- A = área de intercambio de calor [m²]
- t = tiempo [s]
- ΔT = diferencia de temperaturas (frío-caliente) [K]
- Δx = distancia [m]

2.2.2.2. Convección

La convección es la transferencia de calor entre una superficie sólida y un fluido (gas o líquido) en contacto directo con la superficie, y se ve modificada por la mezcla de la parte del fluido en contacto con el sólido y el resto del fluido próximo. Puede producirse como convección libre, por el movimiento natural de un medio fluido como resultado de diferencias en la densidad debido a diferencias de temperatura. También puede ocurrir como convección forzada originada por el movimiento causado por agentes mecánicos, por ejemplo, un ventilador o una bomba sobre el fluido.

La convección forzada produce valores significativamente mayores de transferencia de calor como resultado de las mayores velocidades de mezcla.

$$Q = -h \times A \times t \times \Delta T \quad [\text{EC. 7}]$$

Donde:

- Q = calor transferido [J]
- h = coeficiente de transferencia de calor [W/m²· K]
- A = área de contacto [m²]
- t = tiempo [s]
- ΔT = diferencia de temperaturas (frío-caliente) [K]

2.2.2.3. Radiación

La radiación es la transferencia de calor a través del vacío en el espacio. Todos los cuerpos con una temperatura superior a 0 K emiten calor por radiación electromagnética en todas las direcciones. Cuando los rayos de calor interceptan un cuerpo, parte de su energía es

absorbida y transformada en calor en el cuerpo. Los rayos que no son absorbidos pasan a través del cuerpo o bien se reflejan en él.

En una situación real, la transferencia total de calor es la suma de la transferencia simultánea de calor por conducción, convección y radiación.

En general, la relación de transmisión total de calor se expresa de la forma:

$$Q = -k \times A \times t \times \Delta T \quad [\text{EC. 8}]$$

Donde:

- Q = calor transferido [J]
- k = coeficiente total de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
- A = área de contacto [m^2]
- t = tiempo [s]
- ΔT = diferencia de temperaturas (frío-caliente) [K]

En la práctica es muy frecuente la transferencia de calor que se produce entre dos cuerpos que están separadas por una pared. En este caso, el coeficiente de transferencia total de calor "k" depende de los coeficientes de convección de ambos lados de la pared y del coeficiente de conductividad térmica de la pared en sí misma.

Para una pared plana y limpia, la expresión es la que se muestra a continuación:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad [\text{EC. 9}]$$

Donde:

- α_1, α_2 = coeficientes de transferencia de calor de cada lado de la pared [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
- d = espesor de la pared [m]
- λ = conductividad térmica de la pared [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
- k = coeficiente de transferencia térmica total [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

Un ejemplo típico es un cambiador de calor. La transmisión de calor en un intercambiador de calor para cada uno de sus puntos es una función de la diferencia de temperaturas entre ambos lados de la pared de intercambio para cada punto y del coeficiente de transferencia total de calor.

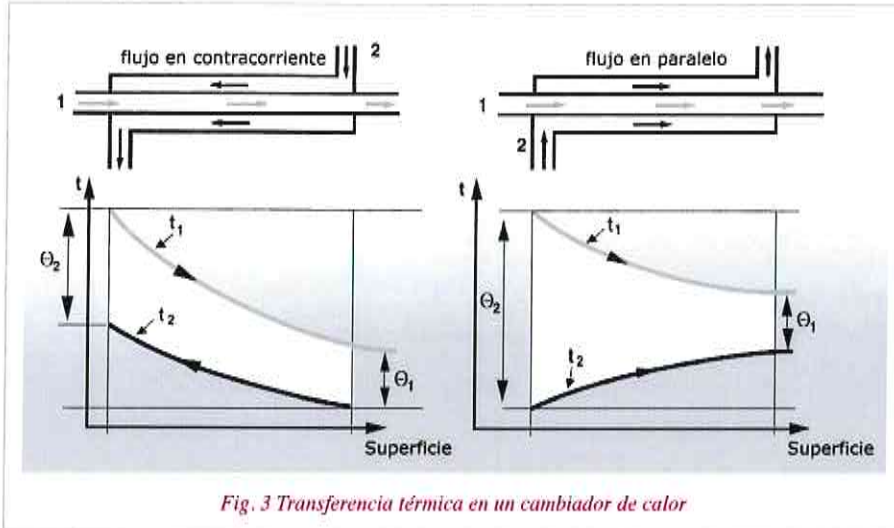


Fig. 3 Transferencia térmica en un cambiador de calor

En este caso es preciso el empleo de la diferencia de temperatura media logarítmica θ_m en lugar de una media aritmética lineal.

La diferencia de temperatura media logarítmica se define como la relación entre las diferencias de temperatura entre los dos lados del intercambiador para ambos puntos de conexión del intercambiador de calor (entrada y salida) de acuerdo con la expresión:

$$\theta_m = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln \frac{\theta_1}{\theta_2}} \quad [\text{EC. 10}]$$

Donde:

θ_m = diferencia logarítmica media de temperaturas [K]

2.2.3. Cambios de estado

Los cambios en el estado de un gas se pueden seguir a partir de un diagrama p / V .

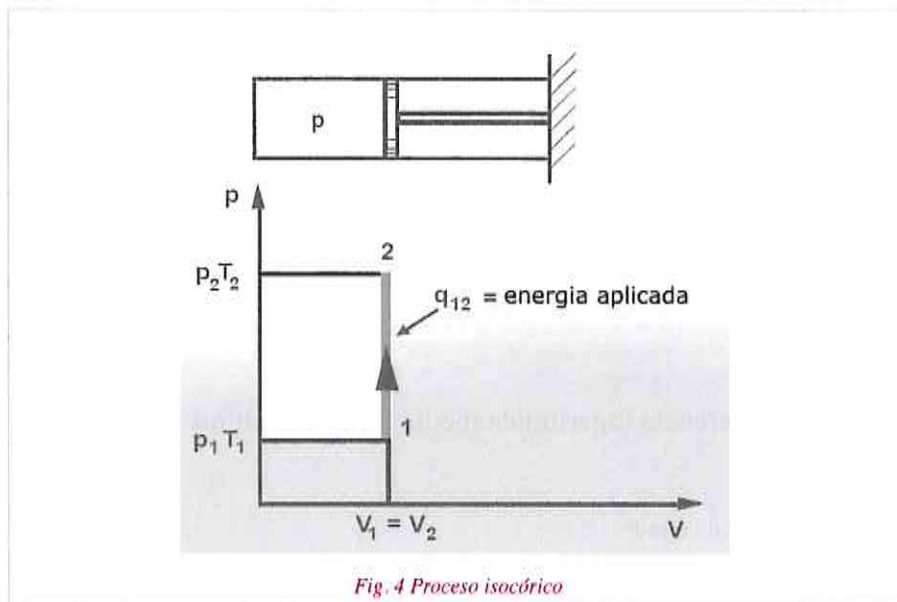
Los casos que se presentan en la vida real requieren del empleo de los tres ejes para las variables p , V y T ocurriendo cambios de estado que se mueven a lo largo de una curva en 3 dimensiones en la superficie p , V y T del espacio.

Sin embargo, para simplificar, se suele tener en cuenta la proyección de la curva en uno de los tres planos. Este es por lo general el plano p / V .

Cinco diferentes cambios de estado pueden ser considerados:

- Proceso isocórico (volumen constante).
- Proceso isobárico (presión constante),
- Proceso isotérmico (temperatura constante),
- Proceso isoentrópico (sin intercambio de calor con el entorno),
- Proceso politrópico (con intercambio completo de calor con el entorno).

2.2.3.1. Proceso isocórico



El calentamiento de un gas en un recipiente cerrado es un ejemplo de proceso isocórico a volumen constante.

Las ecuaciones que rigen esta transformación son:

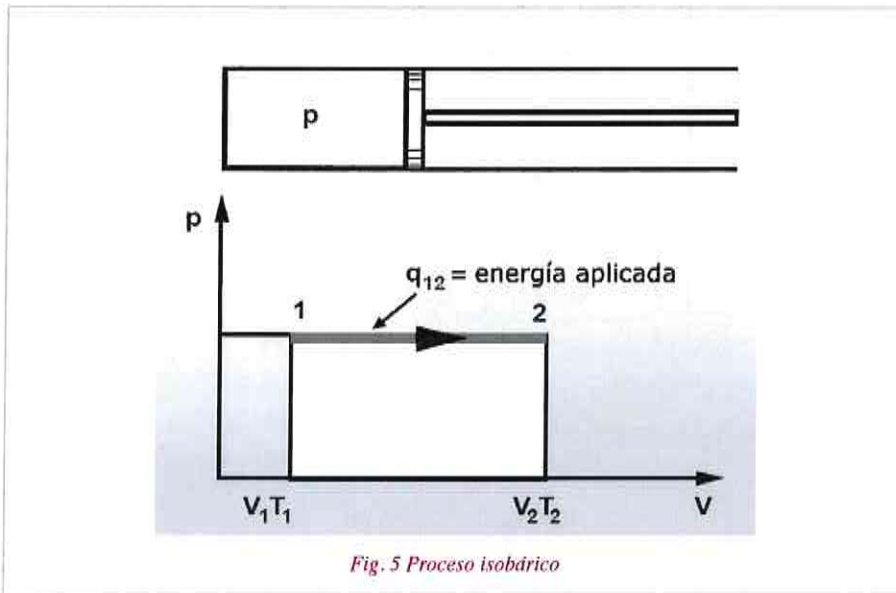
$$Q = m \times c_v \times (T_2 - T_1) \quad [\text{EC. 11}]$$

Donde:

- Q = cantidad de calor [J]
- m = masa [kg]
- c_v = calor específico a volumen constante [J/kg·K]
- T = temperatura absoluta [K]

2.2.3.2. Proceso isobárico

El calentamiento de un gas en un cilindro con una carga constante en el pistón es un ejemplo de proceso isobárico a presión constante.



Las ecuaciones que rigen esta transformación son:

$$Q = m \times c_p \times (T_2 - T_1) \quad [\text{EC. 12}]$$

Donde:

- Q = cantidad de calor [J]
 m = masa [kg]
 c_p = calor específico a presión constante [J/kg·K]
 T = temperatura absoluta [K]

2.2.3.3. Proceso isotérmico

Si un gas en un cilindro se comprime isotérmicamente, una cantidad de calor equivalente al trabajo aplicado debe ir desapareciendo gradualmente. Esto en la práctica no puede ocurrir, ya que tal proceso sería tan lento que se haría inviable.

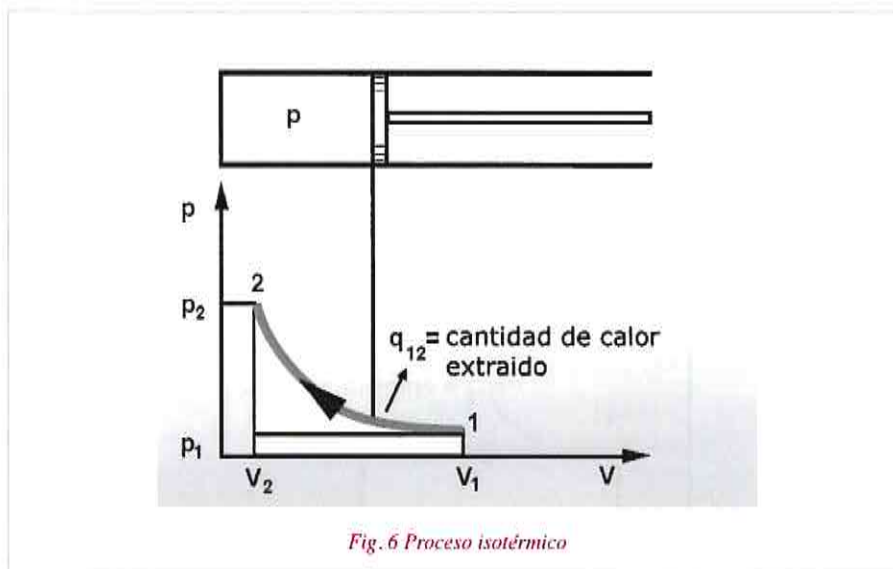


Fig. 6 Proceso isotérmico

Las ecuaciones que rigen esta transformación son:

$$Q = m \times R \times T \times \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad [\text{EC. 13}]$$

$$Q = p_1 \times V_1 \times \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad [\text{EC. 14}]$$

Donde:

- Q = cantidad de calor [J]
- m = masa [kg]
- R = constante individual del gas [J/kg·K]
- T = temperatura absoluta [K]
- V = volumen [m³]
- p = presión absoluta [Pa]

2.2.3.4. Proceso isoentrópico

Un proceso isoentrópico se produce cuando un gas se comprime en un cilindro totalmente aislado sin ningún tipo de intercambio de calor con el entorno. También puede existir si un gas se expande a través de una boquilla con tanta rapidez que no da tiempo a que se produzca un intercambio de calor con el entorno.

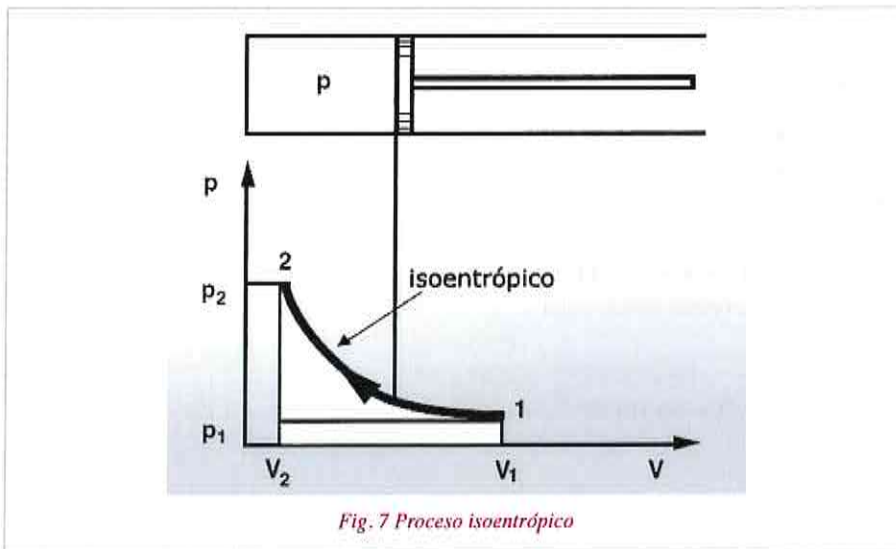


Fig. 7 Proceso isoentrópico

Las ecuaciones que rigen esta transformación son:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} \quad [\text{EC. 15}]$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad [\text{EC. 16}]$$

Donde:

p	= presión absoluta [Pa]
V	= volumen [m ³]
T	= temperatura absoluta [K]
$K=C_p/C_v$	= exponente isoentrópico

2.2.3.5. Proceso politrópico

El proceso isotérmico consiste en el intercambio de calor completo con el entorno mientras que el proceso isoentrópico no implica ningún tipo de intercambio de calor. De hecho, todos los procesos reales ocurren en algún punto entre estos dos extremos, mediante un proceso denominado politrópico.

La expresión matemática para este proceso es la siguiente:

$$p \times V^n = \text{constante} \quad [\text{EC. 17}]$$

Donde:

p	= presión absoluta [Pa]
V	= volumen [m ³]
n	= 0 para proceso isobárico
n	= 1 para proceso isotérmico
n	= K para proceso isoentrópico
n	= ∞ para proceso isocórico

2.3. Unidades de medida en instalaciones de aire comprimido

2.3.1 Presión

La presión a la que está sometido un gas es la fuerza que ejerce el gas sobre las paredes del recipiente que lo contiene, expresado en N/m².

Hay que distinguir entre presión absoluta y presión manométrica. Para ello es preciso tener en cuenta el concepto de presión atmosférica que expresa la fuerza que ejerce el aire atmosférico sobre cualquier superficie.

La fuerza que ejerce sobre un área de un centímetro cuadrado una columna de aire que se extiende desde el nivel del mar hasta el borde exterior de la atmósfera es de 10,13 N.

Por lo tanto, la presión atmosférica absoluta a nivel del mar es de aprox. $10,13 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$, lo que equivale a $10,13 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ (Pascal, la unidad del SI para la presión).

Expresada en otra unidad de uso frecuente: $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

Cuando se está por encima (o por debajo) del nivel del mar, la presión atmosférica es menor (o mayor) que este valor.

La presión manométrica expresa el valor de la presión por encima de este valor de presión atmosférica, de forma que:

$$P_{\text{absoluta}} = P_{\text{manometrica}} + P_{\text{atmosferica}}$$

2.3.2. Temperatura

La temperatura de un gas es más difícil de definir con absoluta claridad.

La temperatura es una medida de la energía cinética de las moléculas. Las moléculas se mueven más rápidamente cuanto mayor sea la temperatura, y su movimiento cesa a una temperatura de cero absoluto (0 K).

La escala Kelvin (K) para las temperaturas se basa en este fenómeno, aunque su graduación es la misma que la escala de los grados centígrados o Celsius ($^{\circ}\text{C}$):

$$T = t + 273,3 \quad [\text{EC. 18}]$$

Donde:

- T = temperatura absoluta [K]
- t = temperatura centígrada [$^{\circ}\text{C}$]

2.3.3. Capacidad calorífica

El calor es una forma de energía representada por la energía cinética de las moléculas desordenadas de una sustancia.

La capacidad térmica (también llamada capacidad calorífica o entropía) de una sustancia representa la cantidad de calor necesaria para producir una unidad de cambio de su temperatura (1 K). Se expresa en J/K y es una propiedad específica de cada sustancia.

Es más habitual el empleo del calor específico o capacidad calorífica específica de una sustancia, y se refiere a la cantidad de calor necesaria para producir una unidad de cambio de la temperatura (1 K) en una unidad de masa de sustancia (1 kg).

El calor específico se expresa en $J/(kg \cdot K)$.

Dado que el cambio de temperatura puede producirse según distintas formas, tenemos diversos calores específicos:

$$\begin{aligned} c_p &= \text{calor específico a presión constante} \\ c_v &= \text{calor específico a volumen constante} \end{aligned}$$

El calor específico a presión constante es siempre mayor que el calor específico a volumen constante.

El calor específico de una sustancia no es una constante, sino que se eleva, en general, al aumentar la temperatura.

A efectos prácticos, se emplea habitualmente un valor medio.

Para los líquidos y sustancias sólidas

$$c_p \approx c_v \approx c$$

Para calentar un caudal másico (q) desde una temperatura T_1 a T_2 se requiere:

$$P \approx q \times c \times (T_2 - T_1) \quad [\text{EC. 19}]$$

Donde:

$$\begin{aligned} P &= \text{Potencia de calentamiento [W]} \\ q &= \text{caudal másico [kg/s]} \\ c &= \text{calor específico [J/kg} \cdot \text{K]} \\ T &= \text{temperatura [K]} \end{aligned}$$

2.3.4. Trabajo

El trabajo mecánico puede ser definido como el producto de una fuerza por la distancia a lo largo de la que opera la fuerza en un cuerpo. Exactamente como para el calor, el trabajo es la energía que se transfiere de un cuerpo a otro. La diferencia es que, en este caso, es una cuestión de fuerza en lugar de temperatura.

Un ejemplo de esto es un gas en un cilindro que se comprime mediante un pistón que se mueve. La compresión se lleva a cabo como resultado de la aplicación de una fuerza que es el movimiento del pistón.

La energía se transfiere desde el pistón hacia el gas encerrado. Esta transferencia de energía es el trabajo en el sentido termodinámico de la palabra.

El resultado de realizar un trabajo puede tener muchas consecuencias, tales como cambios en la energía potencial, la energía cinética o la energía térmica.

El trabajo mecánico asociado con cambios en el volumen de una mezcla de gases es uno de los procesos más importantes en la ingeniería termodinámica.

La unidad del SI para el trabajo es el Joule: $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$.

2.3.5. Potencia

La potencia es el trabajo realizado por unidad de tiempo. Representa la medida de la velocidad a la que se puede hacer un trabajo.

En el SI la unidad de potencia es el watio: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

2.3.6. Caudal volumétrico

El caudal volumétrico de un sistema es una medida del volumen de fluido que circula por unidad de tiempo.

Se puede calcular como el producto del área de la sección transversal al flujo por el caudal promedio. La unidad del SI para el caudal volumétrico es m^3/s .

Es habitual emplear la unidad de litros/segundo (l/s) para referirse al caudal volumétrico (también llamado capacidad) de un compresor. Puede ser expresado como Normal litros/segundo (NI/s) o como Suministro de aire libre FAD (l/s).

La expresión NI/s representa el caudal de aire calculado en el "estado normal", es decir, por convención 1,013 bar(a) y 0°C .

La unidad normal NI/s se emplea habitualmente cuando se especifica un caudal másico.

La expresión aire libre suministrado (FAD), representa el caudal de aire en las condiciones de entrada estándar (presión de entrada 1bar(a) y temperatura de entrada de 20°C).

La relación entre los dos tipos de expresión es

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{T_{FAD}}{T_N} \times \frac{p_N}{p_{FAD}} \quad [\text{EC. 20}]$$

$$q_{FAD} = q_N \times \frac{(273 + 20)}{273} \times \frac{1,013}{1,00} \quad [\text{EC. 21}]$$

Donde:

q_{FAD} = caudal de aire libre [l/s]

q_N	= caudal volumétrico normal [Nl/s]
T_{FAD}	= temperatura estándar de admisión [20°C]
T_N	= temperatura normal de referencia [0°C]
p_{FAD}	= presión estándar de admisión [1,0 bar(a)]
p_N	= presión normal de referencia [1,013 bar(a)]

Téngase en cuenta que la fórmula expresada anteriormente no tiene en cuenta la humedad.

3

**EQUIPAMIENTO Y ESTRUCTURAS DE LAS
INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO**

3 Equipamiento y estructura de las instalaciones de aire comprimido

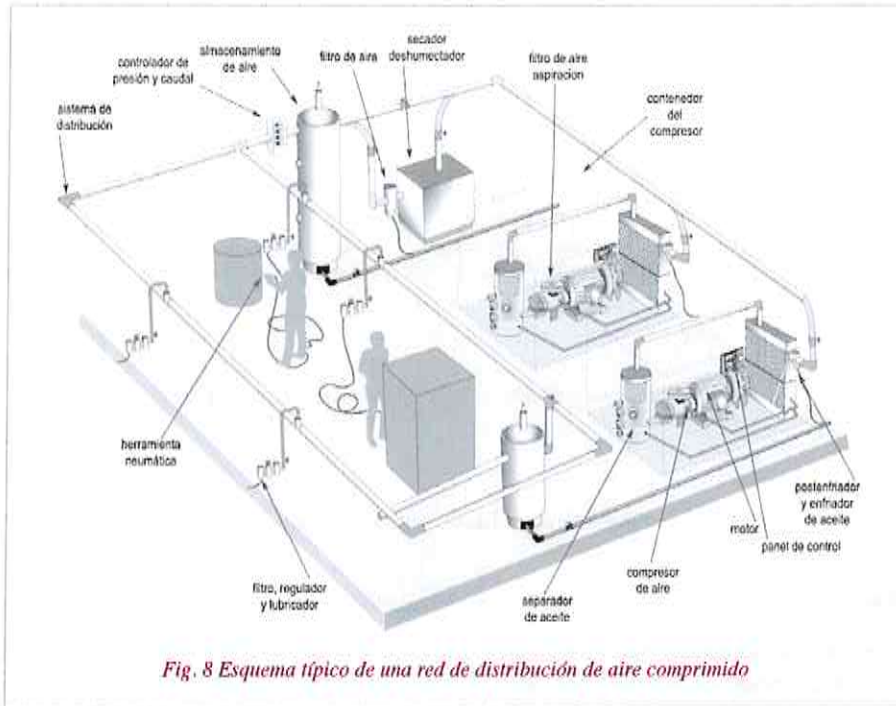
El esquema básico de una instalación de aire comprimido responde a una estructura compuesta por un compresor, un equipo receptor final y una conducción que enlaza ambos puntos y que conduce el aire comprimido desde el compresor hasta el equipo consumidor. En realidad, la mayor parte de las instalaciones de aire comprimido, aunque en su concepción más elemental responden a este esquema, presentan una complejidad bastante mas elevada.

El empleo de aire comprimido, suele hacerse en situaciones de múltiples receptores que se alimentan desde un único generador, lo que implica que la distribución haya que realizarla mediante una red de distribución alimentada desde el compresor o compresores.

Por otra parte los requerimientos de calidad del aire comprimido, exigen la instalación en la red de una serie de equipos destinados a acondicionar este aire hasta las condiciones especificadas por la aplicación a que va a ser destinado.

Todo esto hace que la complejidad de una red de distribución de aire comprimido sea superior a lo que se ha visto en el esquema básico inicial.

Un esquema típico de la configuración de una red de aire comprimido se muestra en la figura siguiente:

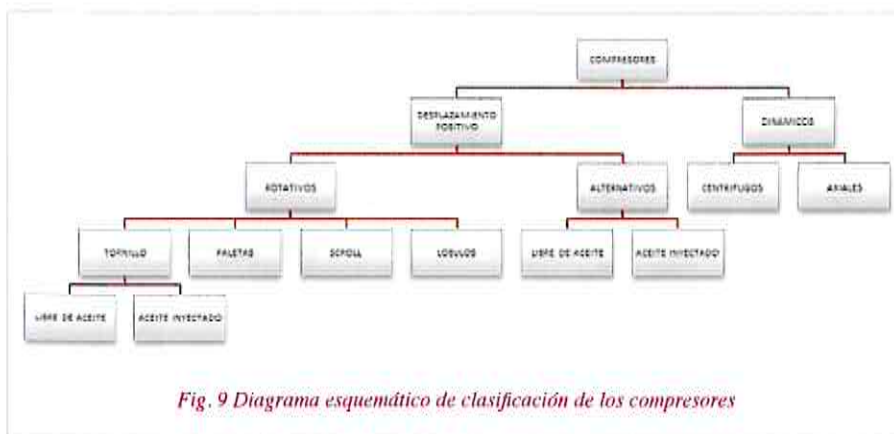


A continuación se verán en detalle cada uno de los componentes típicos que conforman una red de distribución de aire comprimido.

3.1. Compresores

Es importante el conocimiento de los diversos tipos de compresores existentes en el mercado pues cada uno de ellos presenta unas características que les hace idóneos para un determinado tipo de aplicación.

Los compresores pueden ser clasificados, atendiendo a su principio de funcionamiento y características particulares, en una serie de tipos que son los que muestra el siguiente gráfico:



La mayor parte de los compresores utilizados para propósito general son máquinas de tornillo con inyección de aceite.

Para pequeñas aplicaciones son bastante populares los de paletas.

Los libres de aceite se usan de forma generalizada en un amplio rango de tamaños cuando la especificación de la aplicación así lo exige y también para propósito general para tamaños de motor superiores a 200kW.

Los centrífugos están limitados a la parte más alta del rango de mercado, generalmente por encima de 250kW y para aplicaciones libres de aceite.

Los alternativos actualmente tienden a estar limitados a instalaciones tipo pequeños talleres. A pesar de ello, los antiguos compresores alternativos en la industria pueden llegar a ser fiables y eficientes si están bien mantenidos.

A continuación se muestran una serie de gráficos en los que se evidencian la estructura y principio de funcionamiento de los tipos de compresores más importantes clasificados por categorías.

3.1.1. De desplazamiento positivo

3.1.1.1. Rotativos

- **TORNILLO**



Fig. 10 Esquema de un compresor de tornillo

- **PALETAS**

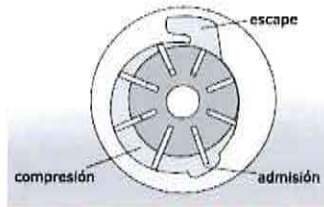


Fig. 11 Esquema de un compresor de paletas

- **SCROLL**



Fig. 12 Esquema de un compresor de scroll

- **LÓBULOS**

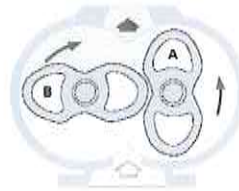


Fig. 13 Esquema de un compresor de lóbulos

3.1.1.2. Alternativos

- *PISTON*



Fig. 14 Esquema de un compresor de pistones

3.1.2. Dinámicos

3.1.2.1 Centrífugos

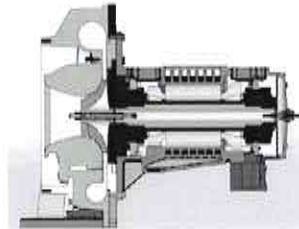


Fig. 15 Esquema de un compresor centrífugo

3.1.2.2. Axiales

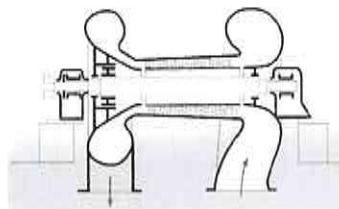


Fig. 16 Esquema de un compresor axial

3.2 Red de distribución del aire comprimido

Una red de distribución de aire comprimido, en principio está compuesta, al igual que cualquier red de distribución de un fluido, por tuberías y accesorios de tubería.

3.2.1. Tuberías

Probablemente el estándar de tuberías más común sea el derivado del American Petroleum Institute (API), donde las tuberías se clasifican según el espesor de pared de tubería, llamado Schedule.

Estos Schedules están relacionados con la presión nominal de la tubería, y son un total de once, comenzando por 5 y seguido de 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, hasta el Schedule 160. Para tuberías de diámetro nominal 150 mm y menores, el Schedule 40 (denominado a veces 'standard weight'), es el más ligero de los especificados. Solo los Schedule 40 y 80 cubren la gama completa de medidas nominales desde 15 mm hasta 600 mm y son los Schedule Utilizados más comúnmente.

Se pueden obtener las tablas de los Schedule en el BS 1600, que se usa como referencia para la medida nominal de la tubería y el espesor de la misma en milímetros. La tabla muestra un ejemplo de diámetros de distintas medidas de tubería, para distintos Schedule. En Europa las tuberías se fabrican según la norma DIN por lo que se incluye la tubería DIN 2448 en la tabla.

Tamaño de tubería (mm)		15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
Diámetro interior (mm)	Schedule 40	15,8	21,0	26,6	35,1	40,9	52,5	62,7	77,9	102,3	128,2	154,1
	Schedule 80	13,8	18,9	24,3	32,5	38,1	49,2	59,0	73,7	97,2	122,3	146,4
	Schedule 160	11,7	15,6	20,7	29,5	34,0	42,8	53,9	66,6	87,3	109,5	131,8
	DIN 2448	17,3	22,3	28,5	37,2	43,1	60,3	70,3	82,5	107,1	131,7	159,3

3.2.2. Accesorios

El montaje de la red de distribución, además de las tuberías de conducción, exige el empleo de accesorios de tubería como: válvulas, codos, reducciones, válvulas de seguridad, válvulas anti retorno, derivaciones, etc., que, por su carácter general en cualquier red de tuberías, no van a ser objeto de más profundización dentro del contexto de este manual.

Entre los accesorios de red, en el punto siguiente se hará especial hincapié en una serie de equipos o accesorios específicos de este tipo de redes.

3.3. Equipos auxiliares para acondicionamiento del aire comprimido

El empleo del aire comprimido exige, en la mayor parte de los casos, un proceso de acondicionamiento con objeto de, por decirlo así, purificarlo, eliminando una serie de componentes que arrastra y que se pueden considerar indeseables en mayor o menor medida según la aplicación a la que se destine.

La clasificación del aire se realiza atendiendo a su carga de contaminantes más importantes. La tabla siguiente muestra la clasificación por clases y los requisitos típicos que figuran en la ISO 8573-1 (Calidad del Aire Clasificaciones Estándar).

Clases de contaminación del aire según ISO 8573.1

CLASE/CALIDAD	PARTÍCULAS SÓLIDAS Tamaño en micras	AGUA Punto de rocío a 7bar(g) °C	ACEITE (incluido vapor) mg/m ³	SISTEMA DE SECADO RECOMENDADO
1	0,1	-70	0,01	Desecante
2	1	-40	0	Desecante o membrana
3	5	-20	1	Desecante o membrana
4	40	+3	5	Refrigeración o membrana
5	-	+7	25	Alta temperatura del aire de entrada
6	-	+10	-	Alta temperatura del aire de entrada

Para elegir la clase requerida, es necesario evaluar el punto de rocío, así como los restantes niveles permisibles de aceite y partículas de suciedad. Por ejemplo, la clase 3-4-1 requeriría un desecador frigorífico junto con un filtro de alta calidad.

En consecuencia, todos los usuarios finales deben estar aislados de acuerdo a sus requerimientos de calidad, cantidad y presión de aire.

Estos parámetros determinan el grado de calidad del usuario final con unos determinados requerimientos de calidad.

La tabla siguiente muestra aplicaciones típicas de aire comprimido y sus grados o clases aplicables.

CLASE DE APLICACIÓN	CLASES DE CALIDAD		
	Polvo	Agua	Aceite
Aire de agitación	5	3	3
Aire de rodamientos	2	3	2
Aire de instrumentación	3	3	2
Aire de motores	4-1	5	4
Maquinaria de vidrio y cerámica	4	5	4
Limpieza de piezas de maquinaria	4	4	4
Construcción	5	5	4
Transporte neumático de productos granulares	4	3	3
Transporte neumático de productos en polvo	3	2	2
Fluidos, circuitos de potencia	4	4	4
Fluidos, Sensores	2-1	2	2
Maquinas de fundición	4	5	4
Alimentación y bebidas	3	1	2
Herramienta neumática de mano	5-4	5-4	4
Maquinas-herramienta	3	5	4
Minería	5	5	4
Manufactura microelectrónica	1	1	1
Maquinas textiles y de embalado	3	3	4
Procesado fotográfico	1	1	1
Cilindros neumáticos	3	5	3
Herramienta neumática	4	4	4
Instrumentación de control de proceso	2	3	2
Pintura a pistola	3	3	3
Chorro de arena	3	3	-
Maquinas de soldadura	4	5	4
Aire general de taller	4	5	4

3.3.1. Eliminación de agua

Los sistemas de producción de aire comprimido generan importantes cantidades de agua.

En un sistema típico funcionando a 7 bar(g), el aire húmedo de la atmósfera se comprime hasta reducir su volumen 8 veces. De esta manera, la concentración de agua en este aire se multiplica por 8, con lo que fácilmente alcanza la saturación.

Este pequeño volumen de aire es liberado del compresor en forma de aire saturado, o dicho de otra manera, un mínimo descenso de su temperatura produce condensación.

Las cantidades de agua condensada producidas en una red de aire comprimido pueden llegar a ser significativas. Un único compresor de 500 cfm (850 m³/h) operando 8 horas producirá en el entorno de 85 litros de agua diarios de los que alrededor de 25 litros permanecerán después del post-enfriamiento.

Si el sistema carece de tratamiento deshumidificador, alrededor de 20 litros condensarán a lo largo del sistema de distribución cuando el aire se enfríe hasta temperatura ambiente.

Se pueden recoger condensados mediante la instalación de purgadores de drenaje a lo largo del sistema.

Por otra parte, el condensado obtenido está contaminado con aceite y partículas sólidas, por lo que no es adecuado para su descarga directa a la red de aguas residuales. Es preciso su tratamiento previo hasta alcanzar los niveles permisibles de vertido regulados por la legislación local en cada caso particular.

La instalación de los purgadores debe realizarse en los puntos donde puede condensar agua, por ejemplo:

- Post-enfriadores
- Pulmones de aire
- Secadores
- Filtros
- Puntos bajos de una red de distribución no tratada

Básicamente existen 4 tipos de sistemas de purga de agua en las redes de aire comprimido:

- De sensor electrónico de nivel
 - Sistema de control inteligente que detecta y descarga condensado solo cuando está presente.
 - No producen pérdidas de aire.
 - Son muy fiables y precisan muy bajo mantenimiento.
- Temporizados
 - Son los más populares.
 - Descargan mediante dos puntos programados: duración y frecuencia de descarga.
 - Para un funcionamiento eficiente requieren de constantes reajustes de sus parámetros en función de las condiciones ambientales y de operación.

- Manuales
 - Requieren continua intervención humana.
 - Suelen degenerar en purga continuada con las correspondientes pérdidas de aire.
- De flotador mecánico
 - Suelen trabajar bastante bien.
 - Precisan de un mantenimiento regular para prevenir su bloqueo.
 - Son muy sensibles a la suciedad, quedándose bloqueados en totalmente abierto con las correspondientes pérdidas de aire, o totalmente cerrado con la correspondiente contaminación de agua en la red de distribución de aire.

3.3.2. Eliminación de aceite

La cantidad de aceite presente en el aire comprimido depende de diversos factores entre los que se incluyen el tipo de máquina, diseño, edad y condición.

Hay dos principales tipos de diseño de compresores a este respecto: los que funcionan con lubricante en la cámara de compresión y los que no.

En los compresores con cámara de compresión lubricada, el aceite está implicado en el proceso de compresión y, por lo tanto, aparece englobado (total o parcialmente) en el aire comprimido. Sin embargo, en los compresores modernos de pistón lubricado y en los compresores de tornillo, la cantidad de aceite es muy limitada. Por ejemplo, en un compresor de tornillo con inyección de aceite, el contenido de aceite en el aire es inferior a 3 mg/m^3 a 20°C .

El contenido de aceite en el aire puede reducirse aún más mediante el uso de filtros de etapas múltiples. Si es esta la solución elegida, es importante considerar las limitaciones de calidad, riesgos y los costes energéticos involucrados.

El aceite en forma de gotas se separa parcialmente en un refrigerador posterior, un separador de condensación o una válvula de condensación mediante un flujo de agua de condensación a través del sistema.

La emulsión aceite/agua obtenida de este tratamiento se clasifica desde el punto de vista ambiental como aceite usado y no debe descargarse en el alcantarillado del sistema o directamente en el medioambiente.

Una solución fácil y rentable para este problema implica la instalación de un separador de aceite/agua, por ejemplo mediante un diafragma filtrante que es capaz de separar por un lado el agua limpia y por otro lado drenar el aceite en un receptáculo especial.

3.3.3. Eliminación de partículas

La eliminación de partículas en suspensión en el aire comprimido se lleva a cabo mediante la instalación de filtros específicos.

Las partículas en una corriente de aire que pasan a través de un filtro se pueden eliminar de varias maneras diferentes:

Las partículas más grandes que las aberturas del material filtrante son separadas mecánicamente ("Tamizado"). Esto por lo general se aplica a partículas mayores de 1 mm. La eficiencia del filtro en este sentido se incrementa con un material filtrante más estricto, compuesto por fibras.

Las partículas menores de 1 mm se recogen sobre materiales fibrosos por tres mecanismos físicos: impacto inercial, intercepción y difusión.

El impacto se produce en partículas relativamente grandes y/o para altas velocidades del gas. Debido a la gran inercia de la partícula pesada, no siguen las líneas de corriente sino que viajan en línea recta y chocan con la fibra. Este mecanismo se produce principalmente por partículas superiores a $1\mu\text{m}$ y es más acusado con el aumento del tamaño de las partículas.

La intercepción se produce cuando una partícula sigue la línea de flujo, pero el radio de la partícula es mayor que la distancia entre la línea de corriente y el perímetro de la fibra.

La deposición de partículas debido a la difusión se produce cuando las partículas muy pequeñas no siguen las líneas de corriente sino que se mueven al azar en todo el flujo siguiendo un movimiento browniano. Este efecto es más acusado con partículas de menor tamaño y a menores velocidades del aire.

La capacidad de separación de partículas de un filtro es el resultado de la combinación de las diferentes sub-capacidades (para los diferentes tamaños de partículas). En realidad, cada filtro presenta un compromiso típico, ya que no es igualmente eficaz en toda la gama de tamaños de partículas. Además, el efecto de la velocidad de la corriente es un factor decisivo en la capacidad de separación para los diferentes tamaños de partícula.

En general, las partículas de entre $0.1\mu\text{m}$ y $0.2\mu\text{m}$ son las que presentan más dificultades de separación (eliminación).

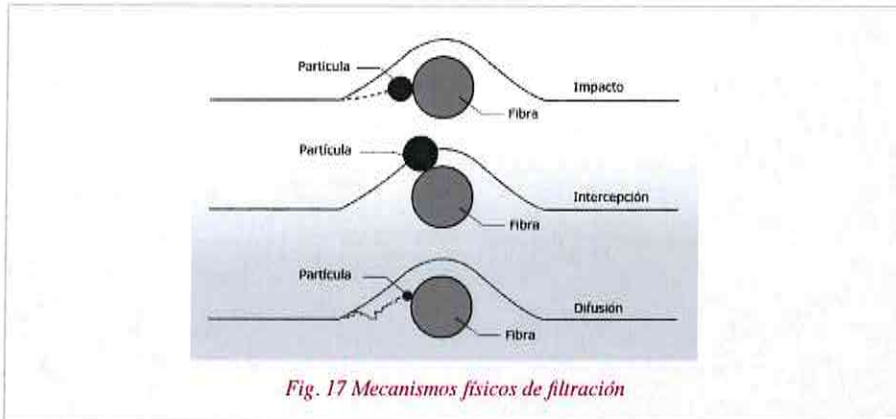


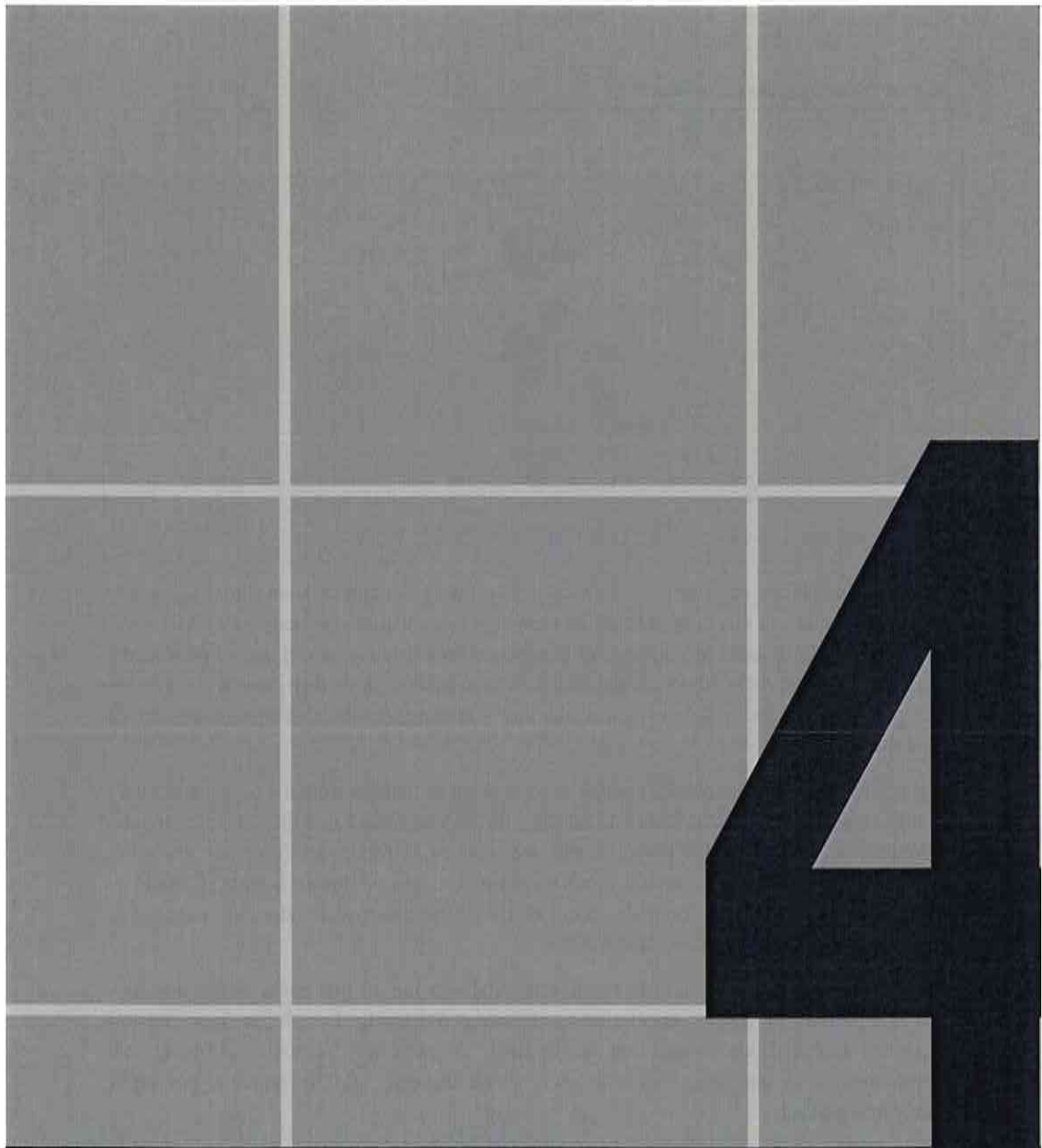
Fig. 17 Mecanismos físicos de filtración

Como se mencionó anteriormente, el total de la eficacia de captura de un filtro coalescente se puede atribuir a una combinación de todos los mecanismos que ocurren. Obviamente, la importancia de cada mecanismo, el tamaño de las partículas por el que se producen y el valor del total de la eficiencia dependen en gran medida de la distribución de tamaños de partículas del aerosol, la velocidad del aire y la distribución de diámetros de fibra de los medios filtrantes.

El aceite y el agua en forma de aerosol se comportan de manera similar a otras partículas y también se pueden separar mediante un filtro de coalescencia. En el filtro, estos aerosoles líquidos se unen en gotas mayores que decantan en el fondo del filtro por gravedad. El filtro puede separar el aceite tanto en aerosol, como en forma líquida. Cuando es preciso separar aceite en forma de vapor, el filtro debe contener un adecuado material de adsorción, por lo general de carbón activo.

Cualquier sistema de filtrado se traduce inevitablemente en una caída de presión, que es una pérdida de energía en el sistema de aire comprimido. Los filtros finos con una estructura más rígida causan una mayor caída de presión y se suelen colmatar más rápidamente, lo que exige reposiciones y mantenimiento más frecuente y, por tanto, mayores costes.

La calidad del aire en lo que respecta a la cantidad de partículas y presencia de agua y aceite está definida en la norma ISO 8573-1, el estándar de la industria de pureza del aire. Para eliminar el riesgo de contaminación del aire en procesos críticos, se recomienda que



**DIMENSIONADO Y PUESTA EN MARCHA DE LAS
INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO**

4 Dimensionado y puesta en marcha de las instalaciones de aire comprimido

se utilice solo aire comprimido clasificado como clase 0.

Los filtros deben ser dimensionados de manera que no solo respondan a un caudal nominal adecuado, sino que también lo hagan para un umbral de mayor capacidad con el fin de gestionar la caída de presión debida a una cierta cantidad de colmatación.

4.1. Consideraciones generales de ubicación del sistema

En el dimensionamiento de una instalación de aire comprimido deben ser tomadas una serie de decisiones para que esta se ajuste a las necesidades del usuario, proporcione una máxima economía de funcionamiento y esté preparada para una futura expansión.

La base son las aplicaciones o procesos que utilizan el aire comprimido. Por lo tanto, éstos deben tratarse como punto de partida para el dimensionamiento de todos los demás componentes del sistema.

Los puntos que deben ser evaluados incluyen el cálculo de las necesidades de aire y la capacidad de reserva así como el espacio para futuras ampliaciones.

La presión de trabajo es un factor crítico dado que incide directamente sobre el consumo de energía. A veces puede ser económico usar diferentes compresores para diferentes rangos de presión.

La cuestión de si la instalación del compresor debe ser centralizada o descentralizada vendrá afectada por los requisitos de espacio y, tal vez, por los planes futuros de expansión. Tanto desde el punto de vista financiero como ecológico se está convirtiendo en cada vez más importante investigar las posibilidades de recuperación de energía en las primeras etapas del diseño con objeto de obtener un rápido retorno de la inversión.

Es importante analizar este tipo de problemas en relación con las necesidades actuales y futuras. Solo después de hacerlo, será posible diseñar una instalación que ofrezca suficiente flexibilidad.

4.2. Dimensionado del compresor

El proceso pasa por definir el tipo de compresor, su capacidad de producción y algunas correcciones en función de su ubicación y condiciones de funcionamiento.

4.2.1. Tipo de compresor

La elección de un determinado tipo de compresor fundamentalmente debe de estar basada en el tipo de aplicación que va a alimentar y los requerimientos de la misma, aunque cada vez es mas frecuente basar esta elección en parámetros de eficiencia energética.

Así, los requerimientos de presión, tamaño, contenido en aceite, regulación, etc., pueden determinar que la elección se decante en un sentido u otro siempre que ambos presenten eficiencias energéticas similares.

4.2.2. Capacidad de producción

4.2.2.1. Cálculo de la presión de trabajo

Los equipos consumidores de aire comprimido en una instalación determinan la presión de trabajo requerida en la red.

La correcta presión de servicio no depende solo del compresor, sino también del diseño de la red de aire comprimido, tuberías, válvulas, secadores de aire, filtros, etc.

Diferentes tipos de equipos pueden exigir diferentes presiones dentro del mismo sistema. Normalmente, la presión más alta determina la presión requerida en la instalación y otros equipos de presión mas baja se instalarán con válvulas reductoras de presión en el punto de consumo. En casos extremos, este método puede ser poco rentable y en este caso puede ser una solución el empleo de un compresor independiente para necesidades específicas.

También hay que tener en cuenta que la caída de presión aumenta rápidamente a medida que aumenta el caudal. Si cabe esperar cambios en el consumo, tiene sentido económico adaptar la instalación a estas condiciones.

Los filtros de polvo y filtros especiales tienen una baja caída de presión inicial, pero se colmatan con el tiempo y deben ser sustituidos cuando alcanzan la caída de presión máxima recomendada por el fabricante. Este factor debe tenerse en cuenta en el cálculo.

La regulación del caudal del compresor también produce variaciones de la presión y, por lo tanto, también debe ser incluida en el diseño.

Tomando la presión requerida por la aplicación del consumidor final y sumándole todas

las caídas de presión entre el compresor y el punto de consumo, se obtiene la presión necesaria de producción en el compresor.

4.2.2.2. Cálculo de las necesidades de aire

El requerimiento nominal de aire comprimido se determina a partir de los consumidores de aire individuales. El cálculo se realiza como un sumatorio de los consumos de aire de todas las herramientas, máquinas y procesos que se conectan al sistema junto con la estimación de su factor de utilización. La adición de fugas, desgaste, y los cambios futuros en la demanda de aire deben ser tenidos en cuenta desde el principio del diseño.

Un método simple para estimar la demanda presente y futura de aire es recopilar en un listado las necesidades de aire para los equipos conectados y su factor de utilización.

Este tipo de cálculo requiere un listado de máquinas con sus respectivos datos de consumo de aire y sus índices de utilización esperados. Si los datos de consumo de aire o factor de utilización no están disponibles, se pueden utilizar valores estándar.

El factor de utilización de las herramientas pueden ser dificultoso de estimar, en cuyo caso debe ser evaluado de forma aproximada por comparación con aplicaciones similares.

La capacidad del compresor viene determinada esencialmente por el requerimiento nominal total de aire comprimido.

La capacidad de reserva calculada viene determinada principalmente por el coste de la pérdida de producción resultante de un potencial fallo del aire comprimido.

El número de compresores y su tamaño relativo vienen determinados principalmente por el grado necesario de flexibilidad del sistema, sistema de control y eficiencia energética.

En una instalación en la que solo un compresor suministra aire comprimido (debido a restricciones económicas), el sistema puede estar preparado para una rápida conexión de un compresor portátil como elemento inherente al mantenimiento. Un viejo compresor que se use como fuente de reserva, se puede utilizar como reserva de energía de bajo coste.

4.2.2.3. Medición de la demanda de aire

Un análisis operativo proporciona claves sobre las necesidades de aire comprimido y la base para evaluar la cantidad óptima de aire comprimido a producir.

La mayoría de las empresas industriales están en constante evolución, y esto significa que sus requerimientos de aire comprimido también cambian. Es por lo tanto importante que

el suministro de aire comprimido esté basado en las condiciones actualmente en curso y un margen adecuado para una futura expansión de la instalación.

Un análisis de operación implica la medición de datos de funcionamiento, complementada a veces con la inspección de la instalación de aire comprimido existente durante un período de tiempo adecuado. Este análisis debe cubrir al menos una semana de operación y el período de medición deberá ser elegido cuidadosamente para que pueda representar un caso típico y proporcionar los datos pertinentes.

Los datos almacenados proporcionan la oportunidad de simular las diferentes situaciones y cambios en las operaciones del compresor y analizar el impacto en la economía general de la instalación.

Factores tales como tiempos de carga y tiempos de descarga también entran en la evaluación total de las operaciones del compresor. Estos proporcionan la base para evaluar el factor de carga y las necesidades de aire comprimido, repartidos en un día o una semana de trabajo.

Un análisis operativo además ofrece una base para evaluar posibles recuperaciones de energía. No se puede olvidar que, con frecuencia, más del 90% de la energía suministrada se puede recuperar.

Este tipo de análisis puede proporcionar respuestas a muchas preguntas relativas al dimensionamiento, así como una ayuda para definir el método de operación mas adecuado para la instalación. Por ejemplo, la presión de trabajo puede reducirse a menudo a ciertas horas y el control del sistema puede modificarse con el fin de mejorar el uso del compresor frente a cambios en la producción. Para la producción de pequeñas cantidades de aire durante la noche y fines de semana, hay que evaluar si, económicamente hablando, vale la pena instalar un compresor más pequeño para cubrir este requisito.

Un análisis operativo es una herramienta de importancia fundamental a la hora de comprobar si hay fugas en el sistema.

4.2.3. Dimensionado en condiciones de altitud elevada

Tanto la presión como la temperatura del aire ambiente disminuyen con la altura sobre el nivel del mar.

Esta reducción de presión, de entrada, afecta a la relación de presiones en el compresor, así como en el equipo conectado a la red. En la práctica, esto significa un impacto, tanto el consumo de energía como en el consumo de aire. Al mismo tiempo, los cambios debidos

a una mayor altitud también afectarán a la potencia nominal disponible de motores eléctricos y motores de combustión.

La forma en que las condiciones ambientales influyen sobre aplicación final en los consumidores debe tenerse en cuenta también.

Todas estas consideraciones crean condiciones específicas para el dimensionamiento de una instalación de aire comprimido instalado a una altura elevada, y puede ser bastante difícil de calcular. Si se tienen dudas, se deben resolver mediante contacto con el fabricante del equipo.

4.2.3.1. El efecto sobre el compresor

Para elegir el compresor correcto en unas condiciones ambiente diferentes de las indicadas en la hoja de especificaciones, deben tenerse en consideración los siguientes factores:

- Altura sobre el nivel del mar o presión ambiente
- Temperatura ambiente
- Humedad
- Temperatura del agua
- Tipo de compresor
- Tipo de motor

Estos factores afectarán principalmente a lo siguiente:

- Máxima presión de trabajo
- Capacidad
- Consumo de energía
- Requisitos de enfriamiento

El factor más importante son las variaciones de la presión de entrada con la altura.

Un compresor con una relación de presiones de 8,0 a nivel del mar, tendrá una relación de presiones de 11,1 a una altitud de 3.000 metros (siempre que la presión de funcionamiento de la aplicación no cambie).

Esto afecta al grado de eficiencia y, en consecuencia, a la demanda de potencia.

La forma en que esta variable se ve afectada depende del tipo de compresor y del diseño, tal como se detalla en la siguiente tabla.

Tipo de compresor	Reducción por cada 1.000 m de altitud	
	Suministro de aire libre FAD %	Flujo másico de aire % Flujo normal de aire %
Tomillo de una etapa libre de aceite	0,3	11
Tomillo de dos etapas libre de aceite	0,2	11
Tomillo de una etapa aceite inyectado	0,5	12
Pistón de una etapa	5	17
Pistón de dos etapas	2	13
Centrífugo multietapa	0,4	12

La temperatura ambiente, la humedad y la temperatura del líquido refrigerante, interactúan y afectan al rendimiento del compresor en diferentes grados, según se trate de compresores de una sola etapa o de etapas múltiples, compresores dinámicos o compresores de desplazamiento.

4.2.3.2. El efecto sobre los motores eléctricos

La refrigeración de los motores eléctricos se ve afectada por la menor densidad del aire a grandes alturas.

Los motores estándar debe ser capaces de trabajar hasta 1.000 metros y con una temperatura ambiente de 40°C sin ningún tipo de impacto. A mayores altitudes, puede emplearse la tabla que se presenta a continuación como guía para establecer la bajada del rendimiento del motor sobre el estándar.

Altitud sobre el nivel del mar [m]	Temperatura ambiente, [°C]					
	<30	30-40	45	50	55	60
1000	107	100	96	92	87	82
1500	104	97	93	89	84	79
2000	100	94	90	86	82	77
2500	96	90	86	83	78	74
3000	92	86	82	79	75	70
3500	88	82	79	75	71	67
4000	82	77	74	71	67	63

Hay que tener en cuenta que para algunos tipos de compresores, el rendimiento del motor eléctrico se deteriora más con la altitud que la demanda de potencia en el eje del compresor bajo el mismo efecto. Por lo tanto, el funcionamiento de un compresor estándar a gran altitud requiere bajar la presión de trabajo, o bien, redimensionarlo con un motor de gran tamaño.

4.2.3.3. El efecto sobre los motores de combustión interna

Una reducción en la presión, un aumento de la temperatura ambiente o un aumento de la humedad reducen el contenido de oxígeno en el aire utilizado para la combustión y, en consecuencia, la potencia extraíble de los motores de combustión interna (IC).

El grado de reducción de potencia en el eje depende del tipo de motor y su método de alimentación (aspiración atmosférica o turboalimentados). Sus valores están expuestos en la tabla siguiente:

TIPO DE MOTOR	Reducción de potencia en % por cada 1.000m de altitud	Reducción de potencia en % por cada 10°C de incremento de Tª
Atmosférico	12	3,6
Turboalimentado	8	5,4

La humedad juega un papel menor (pérdidas <1% 1.000 m) cuando la temperatura está por debajo de 30°C.

Hay que tener en cuenta que la potencia del motor cae de forma más rápida que la demanda de potencia en el eje del compresor. Esto implica que para cada combinación de compresor/motor hay una altura máxima de trabajo que utiliza el margen de potencia total del motor a lo largo de la demanda del compresor para su uso a nivel del mar.

En general, es conveniente confiar en los proveedores para calcular la especificación que se aplica a los compresores, motor y los aparatos de consumo de aire en cuestión.

4.3. Dimensionado de la red de distribución

Aunque se haya puesto el mayor cuidado en dimensionar el compresor, un inadecuado sistema de distribución de aire comprimido dará lugar a:

- facturas energéticas elevadas.
- baja productividad.
- bajos rendimientos de herramienta.

Hay tres puntos críticos en un sistema de distribución de aire comprimido que hay que tener muy presentes a la hora de diseñarlo:

- Una baja caída de presión entre el compresor y el punto de consumo.
- Un mínimo de fugas en la tubería de distribución.
- Una eficiente separación de condensado en el caso de que se disponga de un secador/deshumectador de aire comprimido.

Cuando se diseña una red de distribución de tuberías, hay que hacerlo no solo pensando en las tuberías precisas para las actuales necesidades de consumo de aire comprimido, sino también en las previstas para el futuro.

Hay que tener en cuenta que el coste de la instalación de tuberías, así como sus accesorios sobredimensionados frente a los inicialmente requeridos, es bajo si se compara con el coste de la reconstrucción del sistema de distribución en una fecha posterior.

En una red de distribución de aire comprimido, el diseño de distribución y el dimensionamiento son importantes en orden a conseguir un buen grado de eficiencia, fiabilidad y coste de producción de este aire.

Hay veces que una gran caída de presión en una tubería se compensa en el diseño mediante el aumento de la presión de trabajo del compresor (por ej. de 7 bar a 8 bar). Esta práctica habitual ofrece un ahorro inferior al conseguido si se sobredimensiona la tubería para bajar la pérdida de carga.

4.3.1. Geometría

La mejor solución geoméricamente hablando, consiste en diseñar el sistema de tuberías en forma de anillo cerrado alrededor de la zona en la que se llevará a cabo el consumo de aire y, desde él, tuberías de derivación en los diferentes puntos donde se efectúen consumos.

Este tipo de diseño facilita la disponibilidad de aire comprimido uniforme en todos los puntos de consumo. Ello es debido a que el aire se conduce siempre hasta el punto real de consumo desde dos direcciones, o dicho de otra manera, dispone del doble de sección para fluir.

Este sistema de diseño es el ideal para utilizar en todas las instalaciones, salvo para algunos puntos de gran consumo situados a gran distancia del compresor de la instalación. A estos puntos se accede por separado mediante una tubería principal independiente.

El punto de partida en el diseño y dimensionamiento de una red de distribución de aire comprimido es una lista detallada de todos los equipos consumidores de aire comprimido, y un diagrama que indique su ubicación individual.

A partir de ella, los consumidores se agrupan en unidades lógicas suministrados por la misma tubería de distribución.

La tubería de distribución, a su vez, se alimenta desde las líneas que llegan desde el compresor de la planta.

Una red de aire comprimido se puede dividir en cuatro partes principales: línea/s principales, las tuberías de distribución, las tuberías de servicio y los accesorios de tubería.

Las líneas principales transportan el aire comprimido desde la planta de compresores hasta el área de consumo.

Las tuberías de distribución suministran el aire a través del área de distribución.

Las tuberías de servicio conducen el aire desde las tuberías de distribución a los puntos de trabajo.

4.3.2. Secciones de tubería y pérdidas de carga

4.3.2.1. Dimensionamiento de la red.

La presión obtenida a la salida del compresor nunca puede ser plenamente utilizada en los puntos de consumo, pues la red de distribución de aire comprimido genera unas pérdidas de presión. Estas son las pérdidas por fricción en las tuberías. Además, los accesorios de tuberías llevan también asociadas unas pérdidas de carga específicas.

Las redes fijas de distribución de aire comprimido deben ser dimensionadas de manera que la pérdida de carga total en las tuberías no exceda de 0,1 bar entre el compresor y el punto más remoto de consumo.

En la aseveración anterior deben estar incluidas, tanto la pérdida de carga en la conexión de mangueras flexibles y sus acoplamientos como todos los demás accesorios de tubería. Es particularmente importante para dimensionar correctamente estos componentes, la elevada caída de presión que ocurre con frecuencia en este tipo de conexiones.

El método más general para calcular las pérdidas de carga debidas a la fricción en una tubería es la ecuación de Darcy-Weisbach, que es la ecuación más ampliamente difundida en fluido-dinámica y con la que se obtienen los resultados más precisos.

Permite el cálculo de la pérdida de carga debida a la fricción dentro una tubería, y no presenta restricciones. Es utilizable en todo tipo de tuberías y con todo tipo de fluidos.

La ecuación fue inicialmente una variante de la ecuación de Prony, desarrollada por el francés Henry Darcy. En 1845 fue refinada por el sajón Julius Weisbach, hasta la forma

en que se conoce actualmente:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} = f \cdot \frac{L}{D^5} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 g} \quad [\text{EC. 22}]$$

Donde:

- h_f = pérdida de carga debida a la fricción
- L/D = relación entre la longitud y el diámetro de la tubería
- V = velocidad media de flujo
- g = aceleración debida a la gravedad (9,81 m/s²)
- f = factor de fricción de Darcy

La dificultad de esta ecuación radica en la determinación del factor de fricción f .

El factor de fricción f es adimensional y varía de acuerdo a los parámetros de la tubería y del flujo. Este puede ser conocido con una gran exactitud dentro de ciertos regímenes de flujo; sin embargo, los datos acerca de su variación con la velocidad eran inicialmente desconocidos, por lo que esta ecuación fue, en sus inicios, superada en muchos casos por la ecuación empírica de Prony.

Como se ha visto anteriormente, la dificultad de la ecuación de Darcy-Weisbach radicaba en la determinación del factor de fricción. La razón de esta dificultad está en resolver la ecuación de White-Colebrook que es la que relaciona este factor con los parámetros de los que depende (rugosidad relativa y número de Reynolds).

La expresión de la ecuación de White-Colebrook es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{R\sqrt{f}} \right] \quad [\text{EC. 23}]$$

Donde:

- R = número de Reynolds
- ϵ / D = rugosidad relativa
- f = factor de fricción de Darcy

El campo de aplicación de esta fórmula se encuentra en la zona de flujo turbulento y en la de transición de laminar a turbulento.

Si se observa la ecuación, puede verse que se trata de una ecuación implícita, o dicho de otro modo, f se encuentra en ambos miembros de la ecuación y no hay posibilidad de despejarlo para su resolución.

Con este tipo de ecuaciones hay que recurrir a métodos iterativos para proceder a su resolución. De ahí su dificultad y el hecho que desde su formulación haya sido escaso el uso que se ha hecho de ella a favor de aproximaciones obtenidas a partir de la misma para situaciones y campos de aplicación estrechos.

En el caso del flujo de aire comprimido, una aproximación de la ecuación de Darcy-Weisbach mediante la que se pueden calcular estas pérdidas de presión (pérdidas de carga), es la siguiente ecuación para tubos rectos:

$$\Delta p = 450 \times \frac{Q_c^{1,85} \times L}{D^5 \times P} \quad [\text{EC. 24}]$$

Donde:

- Δp = pérdida de carga [bar]
- Q_c = caudal de aire [l/s]
- L = longitud equivalente de tubería recta [m]
- D = diámetro interno de la tubería [mm]
- P = presión absoluta en cabeza de distribución [bar(a)]

Los valores típicos para la pérdida de carga máxima admisible en el cálculo de las diferentes partes de la red de aire comprimido, se pueden ver en la siguiente tabla:

TIPO DE TRAMO	Δp admisible
TUBERÍAS PRINCIPALES DE SERVICIO	0,03 bar
TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN	0,05 bar
MANGUERAS	0,02 bar
TOTAL EN LA INSTALACIÓN COMPLETA	0,10 bar

Se determina primero la longitud de tubería necesaria para las diferentes partes de la red (mangueras flexibles, tuberías de distribución y tuberías de servicio). Un dibujo a escala de la distribución probable de la red es la mejor base para ello.

A continuación, la longitud de la tubería se corrige mediante la adición de longitudes equivalentes de tubería para válvulas, codos, derivaciones y otros accesorios presentes.

Como alternativa a la fórmula anterior, el cálculo del diámetro de tubería puede realizarse mediante el uso del ábaco que se muestra en la figura adjunta para encontrar el diámetro más apropiado de la tubería.

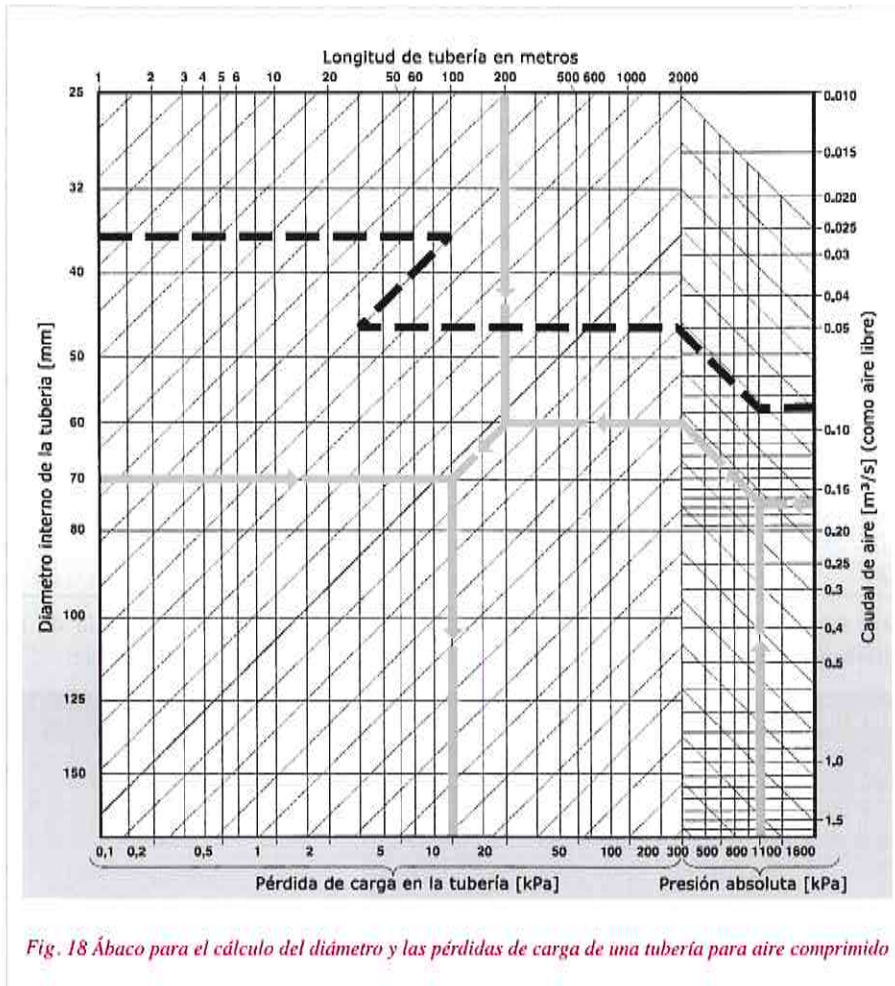


Fig. 18 Ábaco para el cálculo del diámetro y las pérdidas de carga de una tubería para aire comprimido

El caudal, presión, pérdida de carga admitida y la longitud del tubo deben ser conocidos con el fin de hacer este cálculo.

La siguiente tabla muestra los caudales máximos recomendados para aire comprimido a una presión de 7bar(g):

DIÁMETRO NOMINAL DE TUBERÍA		Tuberías Principales	Tuberías secundarias (<15 metros)
mm	pulgadas	m ³ /min	m ³ /min
6	1/8	0,08	0,17
8	1/4	0,17	0,37
10	3/8	0,28	0,82
15	1/2	0,6	1,23
20	3/4	0,99	2,27
25	1	1,53	4,25
32	1-1/4	2,83	8,92
40	1-1/2	3,82	13,31
50	2	6,23	25,49
65	2-1/2	10,62	41,06
80	3	14,16	73,63
100	4	24,78	-
125	5	36,82	-
150	6	53,81	-

Una vez obtenido un diámetro, a partir de él se selecciona el diámetro estándar superior más cercano.

La longitud de tubo equivalente para todos los accesorios de la instalación se calcula utilizando una lista de accesorios y componentes de tuberías que muestra su pérdida de carga típica expresado como longitud de tubería recta equivalente del mismo diámetro.

Una tabla con los valores de longitudes equivalentes de accesorios puede encontrarse en el capítulo de anexos de esta publicación.

La suma de las longitudes equivalentes de los accesorios se añade a la longitud de la tubería recta inicial. Se vuelve a calcular la red completa para asegurarse de que la caída de presión no es demasiado significativa.

Para grandes instalaciones, las secciones individuales (tubería de servicio, tubería de distribución, etc.) se deben calcular por separado.

4.4. Acumuladores

En una instalación de compresores, pueden incluirse uno o más receptores (acumuladores o tanques pulmón) de almacenamiento de aire. Su tamaño se calcula en función de la capacidad del compresor, el sistema de regulación y los requisitos del patrón de consumo de aire. El depósito de aire forma una zona de almacenamiento intermedio para el aire comprimido que absorbe las variaciones debidas al funcionamiento intermitente del compresor, enfría el aire y acumula la condensación. En consecuencia, el acumulador de aire debe estar equipado con un dispositivo de drenaje de condensados.

Para el dimensionamiento del volumen preciso del acumulador se aplica la siguiente relación:

$$V = \frac{0,25 \times q_c \times p_1 \times T_0}{f_{max} \times (p_U - p_L) \times T_1} \quad \text{[EC. 25]}$$

Donde:

V	= volumen de aire del receptor [l]
q_c	= capacidad del compresor [l/s]
p_1	= presión de aspiración del compresor [bar(a)]
T_1	= temperatura del aire del compresor [K]
T_0	= temperatura del aire en el receptor [K]
$(p_U - p_L)$	= diferencia de presión entre carga y descarga [bar]
f_{max}	= máxima frecuencia de carga [ciclos/s]

Hay que tener en cuenta que esta relación únicamente es aplicable para compresores equipados con regulación carga/descarga u ON/OFF cíclico.

En los compresores con control de velocidad variable (VSD), el volumen de acumulación de aire que se necesita es sustancialmente menor. Cuando se utiliza la fórmula anterior, q_c debe ser considerado como el caudal a la velocidad mínima.

Cuando la demanda de aire comprimido presenta picos de gran consumo en períodos cortos de tiempo, no es económicamente viable dimensionar el compresor o la red de tuberías exclusivamente para este patrón de consumo extremo. En este supuesto debe ser colocado un acumulador de aire por separado cerca del punto de consumo y dimensionarlo de acuerdo con el consumo de aire máximo.

En casos más extremos, se utiliza un compresor de alta presión junto con un acumulador de grandes dimensiones que sea capaz de satisfacer, a corto plazo, altos requerimientos de volumen de aire durante intervalos cortos.

En este caso, el compresor se dimensiona para satisfacer el consumo medio.

Para el cálculo del receptor, en este caso particular, se aplica la siguiente relación:

$$V = \frac{q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{L}{p_1 - p_2} \quad [\text{EC. 26}]$$

Donde:

- V = volumen de aire del receptor [l]
- q = caudal de aire durante la fase de llenado [l/s]
- t = tiempo de llenado [s]
- p_1 = presión normal de trabajo en la red [bar]
- p_2 = mínima presión admisible en la red [bar]
- L = requerimientos de aire de llenado [l/ciclo de trabajo]

La fórmula no tiene en cuenta el hecho de que el compresor suministra aire durante la fase de vaciado.

Una aplicación común es en grandes motores de barco, donde los acumuladores se llenan a una presión de 30 bar.

4.5. Dimensionado del acondicionamiento

4.5.1. Eliminación de agua

Los equipos de eliminación de agua de un sistema de aire comprimido exigen, por un lado, determinar el caudal de producción de agua en el sistema (condensación) y, por otro lado, ajustar el tamaño del equipo separador.

La determinación del caudal de producción de agua se lleva a cabo a partir de los datos de caudal de aire comprimido, humedad del aire de aspiración (anexo 4) y requerimientos de punto de rocío final mediante las siguientes ecuaciones:

$$f_3 = f_1 - f_2 \quad [\text{EC. 27}]$$

siendo

$$f_2 = \frac{1 \times h_{sac} \times Q}{100 \times f_1} \quad [\text{EC. 28}]$$

y

$$f_1 = \frac{H_r \times h_{saa} \times Q}{100} \quad [\text{EC. 29}]$$

Donde:

- f_3 = caudal de condensación de agua [g/s]
- f_2 = caudal de agua en el aire antes de condensar [g/s]
- f_1 = caudal de agua remanente en el aire después de condensar [g/s]
- Q = caudal de aire del compresor [l/s]
- H_r = humedad relativa del aire aspirado [%]
- h_{saa} = humedad de saturación del aire aspirado [g/l]
- h_{sac} = humedad de saturación del aire comprimido a la Tª de condensación [%]

A partir de estos datos, se calcula el desecador teniendo en cuenta tanto su capacidad de desecación como de condensados, de manera que la descarga del condensado no se realice de forma continuada sino a intervalos razonables.

En todo el proceso de cálculo hay que tener en cuenta la relación de carga/descarga del compresor en orden a determinar los ciclos de producción efectiva de aire y, por tanto, de condensado.

4.5.2. Eliminación de aceite

El cálculo del sistema de separación de aceite está íntimamente ligado al de separación de agua, y hay que realizarlo una vez calculado este último.

4.5.3. Eliminación de partículas

El diseño del sistema de eliminación de sólidos en suspensión viene fijado por los requerimientos de la aplicación a la que se destine el aire comprimido.

Se basa en elegir el tipo de filtros que presenten una eficacia correcta para el tamaño de partícula que se desee eliminar y una capacidad nominal en cuanto a caudal de aire a tratar suficiente para los requerimientos de la aplicación sin introducir pérdidas de carga superiores a las tolerancias fijadas para la red de distribución.

4.6. Dimensionado de la refrigeración

4.6.1. Compresores refrigerados por agua

La mayoría del aire comprimido se enfría mediante un intercooler y un postenfriador instalados en el interior del compresor. Cuanta más eficiencia energética tenga el compresor, mayor cantidad de vapor de agua se condensará en estas etapas.

Una instalación de compresores refrigerados por agua tiene poca demanda de ventilación

en la sala de compresores, dado que el agua de refrigeración contiene, en forma de calor, aproximadamente el 90% de la energía absorbida por el motor eléctrico.

Un sistema de refrigeración por agua de un compresor puede basarse en uno de los tres esquemas fundamentales siguientes: sistema abierto sin recirculación de agua (conectado a un suministro de agua), sistema abierto con recirculación de agua (conectado a una torre de refrigeración), y sistema cerrado de recirculación de agua (que incluye un intercambiador de calor externo).

4.6.1.1. Sistemas abiertos sin recirculación de agua

En un sistema abierto sin recirculación de agua, el agua es suministrada por una fuente externa: red municipal de agua, lago, arroyo, etc., y después de pasar a través del compresor, esta se deshecha como agua residual.

El sistema debe estar controlado por un termostato para mantener la temperatura deseada, así como para regular el consumo de agua.

Por lo general, un sistema abierto es fácil y barato de instalar, pero caro de mantener, especialmente si el agua de refrigeración se toma del agua municipal de red. El agua de un lago o arroyo es normalmente gratuita, pero debe ser filtrada y purificada con objeto de limitar el riesgo de obstrucción del sistema de refrigeración.

Por otra parte, el agua que es rica en cal puede generar depósitos dentro de los refrigeradores, causando un deterioro gradual del sistema de refrigeración. Lo mismo es aplicable al agua salada, que, sin embargo, puede utilizarse si el sistema está diseñado y dimensionado adecuadamente en consecuencia.

4.6.1.2. Sistemas abiertos con recirculación de agua

En un sistema abierto con recirculación de agua, el agua caliente procedente de la refrigeración del compresor se enfría en un proceso abierto constituido por una torre de refrigeración externa. El agua se enfría en la torre de refrigeración mediante el principio de enfriamiento debido a la absorción del calor de vaporización de la misma cuando se pulveriza en una vena de aire a contra-corriente. Como resultado, parte del agua se evapora y el resto del agua se enfría 2°C aprox. por debajo de la temperatura ambiente (este valor puede variar dependiendo de la temperatura y humedad relativa del aire).

Los sistemas abiertos con recirculación de agua son los que se utilizan preferentemente cuando la disponibilidad de agua externa es limitada. La desventaja de este sistema es que el agua se contamina poco a poco por el aire circundante. El sistema debe ser continuamente alimentado con agua externa, debido a la evaporación.

El agua de estos circuitos debe ser regularmente analizada y tratada con productos químicos para evitar el crecimiento de algas.

4.6.1.3. Sistemas cerrados

En un sistema cerrado de refrigeración, el agua circula continuamente entre el compresor y algún tipo de intercambiador de calor externo. Este intercambiador de calor es a su vez refrigerado por medio de un circuito de agua externo o por el aire circundante.

Cuando el agua se enfría con otro circuito de agua externo, se utiliza un intercambiador de calor de placas.

Cuando el agua se enfría con el aire ambiente, se utiliza un radiador de refrigeración compuesto de tubos de refrigeración y aletas. El aire circundante se obliga a circular a través de las aletas y tuberías mediante uno o más ventiladores. Este método es adecuado si la disponibilidad de agua de refrigeración es limitada.

Si el agua de refrigeración se enfría por intercambio con el aire ambiente externo, se requiere la adición de un anticongelante (glicol, por ejemplo).

El sistema de refrigeración cerrado de agua se llena con agua pura, blanda. Cuando se añade glicol, se debe recalcular el sistema de agua que circula por el compresor, dado que el tipo y concentración de glicol afectan a la capacidad térmica del agua y a su viscosidad.

Un sistema cerrado de refrigeración por agua correctamente diseñado y ejecutado requiere una supervisión muy baja y sus costes de mantenimiento son mínimos.

4.6.2. Compresores refrigerados por aire

Los modernos compresores también están disponibles en una versión refrigerada por aire, por lo que el aire de ventilación forzada en el interior del compresor contiene cerca del 100% de la energía térmica absorbida por el motor eléctrico.

4.7. Recuperación de energía

Cuando el aire se comprime se forma calor. Antes de que el aire comprimido pase a distribuirse en el sistema de tuberías, se extrae la energía térmica que contiene y se transforma en calor residual.

Cada instalación de aire comprimido debe contar con un sistema de refrigeración fiable y de capacidad suficiente.

El enfriamiento puede llevarse a cabo ya sea por medio de aire exterior o mediante un sistema de enfriamiento por agua que utiliza agua municipal, agua corriente o agua de proceso de una manera abierta o un sistema de recirculación cerrada.

Muchas de las instalaciones que producen aire comprimido ofrecen significativas posibilidades de ahorro en forma de energía residual recuperable y esta energía con frecuencia no se recupera.

En las grandes industrias, los costes de energía pueden ascender al 80% del coste total de aire comprimido producido. En torno al 94% de la energía suministrada al compresor se puede recuperar, por ejemplo, como agua caliente a 90°C en el caso de compresores de tornillo exentos de aceite.

Este hecho pone de manifiesto que las medidas de ahorro proporcionan de forma inmediata una rentabilidad importante.

Un compresor central de planta en una gran industria con una potencia de 500 kW y más de 8.000 horas de operación por año, representa un consumo de energía anual de 4 millones de kWh.

Las posibilidades de recuperación de cantidades sustanciales de calor residual a través de aire caliente o agua caliente son reales.

El retorno de la inversión para la recuperación de energía es generalmente menor de 1-3 años. Además, la energía recuperada por medio de un sistema de refrigeración cerrado mejora las condiciones de funcionamiento del compresor, la fiabilidad y la calidad del servicio debido a un nivel de temperatura constante durante toda la vida útil del compresor.

Los Países Nórdicos se pueden considerar como precursores en este campo, y la recuperación de energía de las instalaciones de los compresores ha sido una práctica habitual desde hace bastantes años.

La mayoría de los compresores de tamaños medio a grande de los principales proveedores del mercado están adaptados para conectar equipos para la recuperación del calor residual que generan.

4.7.1. Cálculo del potencial de recuperación de calor residual

Las leyes de la física dictan que casi toda la energía suministrada a la instalación de un compresor se convierte en calor.

Cuanta más energía pueda ser recuperada y utilizada en otros procesos, más alta será la eficiencia general del sistema.

La cantidad de calor que se puede recuperar de una instalación de aire comprimido se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$W = [(K_1 \times Q_1) + (K_2 \times Q_2)] \times T_R \quad \text{[EC. 30]}$$

$$\text{Ahorrando anualmente: } (\text{€}) = W \times \frac{e_p}{\varepsilon}$$

Donde:

- T_R = periodo de demanda de energía recuperada [h/año]
- K_1 = periodo de trabajo en carga del compresor [h/año]
- K_2 = periodo de trabajo en descarga del compresor [h/año]
- Q_1 = potencia refrigerante disponible en carga [kW]
- Q_2 = potencia refrigerante disponible en descarga [kW]
- e_p = precio de la energía habitual [€/kWh]
- ε = eficiencia de la fuente habitual de calor [%]

En muchos casos el grado de recuperación de calor supera el 90% si la energía ganada por el sistema de enfriamiento de la instalación del compresor puede ser utilizada de forma eficiente.

El funcionamiento del sistema de refrigeración, la distancia hasta el punto de consumo, así como el nivel y continuidad de los requerimientos de calor, son factores decisivos a la hora de evaluar el potencial de recuperación.

Con grandes flujos térmicos, la venta de la energía térmica recuperada es una posibilidad que no debe ser ignorada.

Cuando los consumidores no requieren calor residual, el aire caliente se evacua a la atmósfera, ya sea automáticamente mediante control termostático o de forma manual mediante el control de una compuerta de aire.

Un factor limitante es la distancia entre los compresores y los usuarios que necesitan ser calentados. Esta distancia debe ser limitada (preferiblemente la distancia entre edificios colindantes). Además, la posibilidad de recuperación puede estar limitada a los periodos más fríos del año.

La recuperación del calor residual de un compresor refrigerado por aire obtiene buenos resultados con tan solo algunas pequeñas pérdidas de la distribución, y requiere poca inversión.

4.8. Sala de compresores

No hace mucho tiempo, la adquisición de un compresor exigía a los clientes adquirir sus componentes por separado. Esto implicaba, por tanto, examinar a fondo la capacidad y exigencias de calidad con todos los diversos componentes con el fin de garantizar que todo el equipo era compatible con el compresor.

Hoy en día, un compresor y todos sus accesorios se compran como una única solución llave en mano, y muy a menudo como un paquete completamente integrado.

Un compresor consiste en un recinto compacto, en el que se montan el compresor y todos sus accesorios. Todas las conexiones internas entre las diferentes partes vienen realizadas de fábrica.

El compresor completo se incluye en un contenedor aislado con envolvente amortiguadora de sonido para reducir los niveles de ruido. Esto se ha traducido en una significativa simplificación de la instalación.

Un ejemplo extremo son los llamados “fully integrated systems” que incluyen acondicionado (secador, filtro, separadores de aceite y de condensado, etc.), insonorización y medidas eficaces de reducción de vibraciones.

En cualquier caso, aún con estos sistemas, es importante recordar que su forma de instalación todavía puede tener una influencia significativa en el rendimiento del compresor y en la fiabilidad del sistema.

La regla principal de una instalación es proyectar un recinto independiente de la planta para la ubicación del compresor.

La experiencia dicta que la centralización es preferible, independientemente de la industria. Entre otras cosas, proporciona:

- una mejor economía de operación
- un mejor diseño del sistema de aire comprimido
- mejor servicio y facilidad de uso
- protección contra accesos no autorizados
- control de ruido adecuada
- simplifica las posibilidades de control de la ventilación.

Sin embargo, la instalación en un taller o almacén puede facilitar las instalaciones de recuperación de energía.

Si no hay instalaciones disponibles para la ubicación del compresor en el interior, también puede ser instalado al aire libre, bajo un techo. En este caso, se deben tomar ciertas precauciones teniendo en cuenta:

- el riesgo de congelación de la condensación,
- la lluvia

- la protección de la nieve en la boca de aspiración, entrada de succión y ventilación
- el riesgo de polvo y sustancias inflamables o agresivas
- la protección contra el acceso no autorizado.

Un punto importante a tener en cuenta son las necesidades de espacio para futuras ampliaciones y la accesibilidad para el mantenimiento.

4.8.1. Emplazamiento y diseño

La planta de aire comprimido se debe instalar de modo que facilite el enrutamiento del sistema de tuberías de distribución.

El servicio y mantenimiento puede ser facilitado mediante la instalación de la planta cerca de los equipos auxiliares tales como bombas y ventiladores, incluso una ubicación próxima a la sala de calderas puede ser beneficiosa.

La sala debe disponer de accesorios de elevación dimensionados para manejar los componentes más pesados de la instalación del compresor, (por lo general el motor) y/o tener acceso a una carretilla elevadora.

También debe tener suficiente espacio libre en planta para la instalación de otro posible compresor adicional para futuras ampliaciones.

La altura libre debe ser suficiente como para permitir que un motor eléctrico o similar pueda ser izado en caso de necesidad.

La planta de aire comprimido debe tener un drenaje en el suelo u otro sistema alternativo que permita manejar la condensación del compresor, refrigerador posterior, depósito de aire, secadoras, etc.

La recogida de condensados debe realizarse de conformidad con la legislación vigente.

4.8.2. Cimentación

Normalmente, solo se requiere para establecer la planta compresora, un solado de capacidad suficiente para el peso del equipo.

En la mayoría de los casos, las características anti-vibratorias están integradas en el equipo.

Para nuevas instalaciones, se utiliza generalmente un zócalo para cada compresor con el fin de permitir la limpieza del suelo.

Los grandes compresores de pistones y los compresores centrífugos pueden requerir una base o losa de hormigón anclada a roca o sobre una base sólida del terreno.

El impacto de la producción de vibraciones en las actuales plantas compresoras está reducido al mínimo.

En los sistemas con compresores centrífugos, puede ser necesario para amortiguar las vibraciones, la cimentación de la sala de compresores.

4.8.3. Aspiración de aire

La admisión de aire de un compresor debe estar situada en un punto limpio y libre de contaminantes sólidos y gaseosos.

Las partículas de suciedad causan desgaste y los gases corrosivos pueden ser particularmente perjudiciales para el funcionamiento de un compresor.

La entrada de aire del compresor, normalmente se encuentra en una abertura del contenedor insonorizado, pero puede canalizarse de forma remota a un punto en el que el aire sea lo más limpio posible.

La contaminación por los gases de escape de vehículos puede ser fatal si se mezcla con el aire que está destinado a ser inhalado.

Un pre-filtro (ciclones, panel o filtro de banda rotativo) debe ser usado en instalaciones donde el aire que rodea a la instalación tiene una gran concentración de polvo. En tales casos, la caída de presión causada por el pre-filtro debe tenerse en cuenta en el diseño.

Resulta beneficioso para la eficiencia del sistema, que la toma de aire sea fría. Por lo tanto, suele ser apropiado conducir el aire de aspiración a través de un conducto desde la parte exterior del edificio hacia el compresor.

Es importante que las conducciones utilizadas para la admisión sean resistentes a la corrosión, provistas de una malla sobre su entrada y diseñadas de manera que no haya riesgo de entrada de nieve o lluvia en el compresor.

También es importante usar conducciones de un diámetro suficientemente grande como para que tengan una caída de presión tan baja como sea posible.

El diseño de las conducciones de entrada de los compresores de pistón es particularmente crítico puesto que pueden actuar como tubo de resonancia con frecuencia de pulsación cíclica de las ondas acústicas generadas por el compresor. Esto puede dañar las conducciones, el compresor, causar vibraciones y afectar el entorno como ruido molesto de baja frecuencia.

4.8.4. Ventilación de la sala de compresores

El calor en la sala de compresores se genera a partir de todos los tipos de compresores.

La cantidad necesaria de aire de ventilación viene determinada por el tamaño del compresor y por su tipo de refrigeración, ya sea por aire o por agua.

El aire de ventilación de los compresores refrigerados por aire contiene cerca del 100% de la energía liberada por el motor eléctrico en forma de calor.

El aire de ventilación para compresores refrigerados por agua contiene alrededor del 10% de la energía liberada por el motor eléctrico.

El calor debe ser eliminado para mantener la temperatura en la sala de compresores a un nivel aceptable. El fabricante de compresores debe proporcionar información detallada acerca del caudal de ventilación necesario, pero este parámetro también se puede calcular de acuerdo a lo siguiente:

$$q_v = \frac{P_v}{1,21 \times \Delta T} \quad [\text{EC. 31}]$$

Dónde:

- q_v = caudal de aire de ventilación [m³/s]
- P_v = caudal calorífico [kW]
- ΔT = incremento permitido de temperatura [°C]

La mejor manera de hacer frente al problema de acumulación de calor es la recuperación de la energía térmica residual y su uso en un local que lo precise.

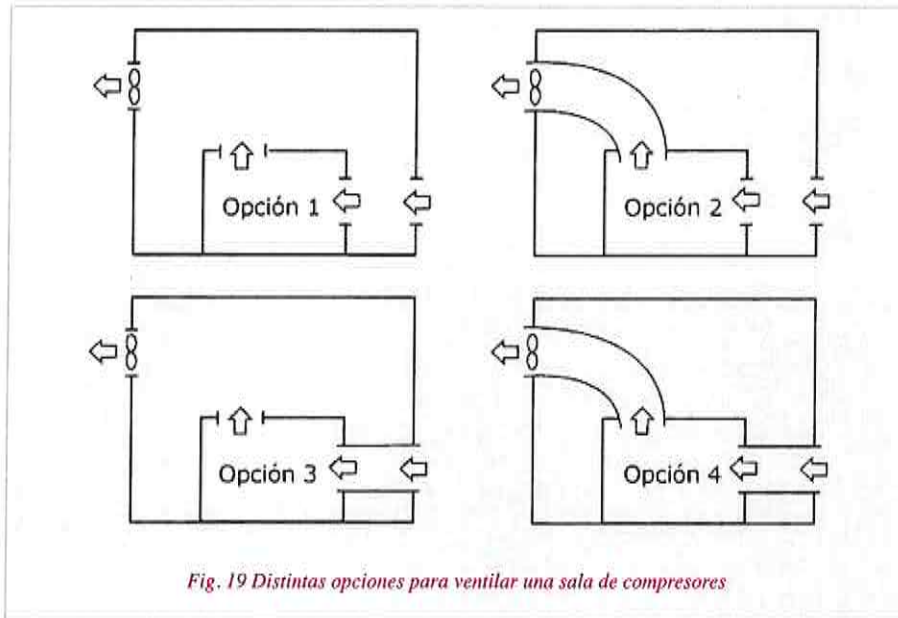
El aire de ventilación se debe de tomar desde el exterior, preferentemente sin usar conductos largos. Por otra parte, la aspiración debe ser colocada lo más bajo posible, pero sin correr el riesgo de que pueda ser obstruida por la nieve durante el invierno.

Incluso existe el riesgo potencial de que polvo y sustancias explosivas o corrosivas puedan entrar en la sala de compresores y este punto ha de ser tomado en consideración a la hora del diseño.

Los extractores deben ser colocados en la parte superior de uno de los muros de la sala de compresores, y la toma de aire se colocará en la parte inferior del muro opuesto.

La velocidad del aire en el orificio de entrada de ventilación no debe superar los 4m/s.

Estos ventiladores deben estar adecuadamente dimensionados para cubrir la caída de presión en la pared de los conductos, rejillas y persianas exteriores, etc.



La cantidad de aire de ventilación debe ser suficiente para limitar a 7-10°C el incremento de la temperatura en la sala de compresores. Lo mas adecuado es realizar un control simple de la ventilación mediante un termostato.

5

**COSTES Y OPORTUNIDADES DE AHORRO
EN LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO**

5 Costes y oportunidades de ahorro en las instalaciones de aire comprimido

5.1. Costes de instalación y operación

La energía eléctrica es la energía más utilizada como fuente de producción de aire comprimido industrial.

El coste del aire comprimido generalmente no es un coste visible y se esconde fácilmente dentro de la factura del proveedor de energía eléctrica.

En muchas instalaciones de aire comprimido, a menudo hay posibilidades significativas y no utilizadas para ahorrar energía, incluida la recuperación de energía, reducción de la presión, reducción de fugas y optimización de las operaciones mediante la elección de un correcto sistema de control y regulación, así como la elección del tamaño del compresor más adecuado.

Cuando se planifica una nueva inversión, lo mejor es hacerlo con la visión puesta en el futuro tan lejos como sea posible y tratar de evaluar el impacto de nuevas situaciones y demandas que puedan afectar a la instalación.

Ejemplos típicos son las exigencias ambientales, el ahorro de energía, el incremento de las demandas, el aumento de los requisitos de calidad de la producción, la producción futura o las futuras inversiones en expansión.

El funcionamiento óptimo de los compresores se está convirtiendo en una preocupación importante, especialmente para las grandes industrias que dependen en gran medida del aire comprimido.

La producción puede cambiar con el tiempo en una industria en desarrollo y es muy probable que lo haga. En consecuencia las condiciones de operación del compresor también cambiarán.

Por ello es tan importante basar el diseño del aire comprimido tanto en las necesidades actuales como así como en los planes de desarrollo futuros.

La experiencia demuestra que un análisis exhaustivo e imparcial de la situación de explotación casi siempre tiene como resultado una mejora en la economía global.

Los costes de energía son claramente el factor dominante que incide en el coste total de explotación del sistema. Por ello es importante centrarse en encontrar las soluciones que cumplen con las exigencias de rendimiento y calidad, y que a la vez hacen un uso eficiente de la energía. El coste adicional asociado en la adquisición de compresores y demás equipos que cumplan con estos requisitos, resultará una inversión rentable en el tiempo.

Como el consumo de energía suele representar aproximadamente el 80% del coste total de explotación, se debe invertir esfuerzo en seleccionar un buen sistema de regulación. Las diferencias significativas en los sistemas de regulación disponibles superan las diferencias significativas en los tipos de compresor.

Una situación ideal se produce cuando la capacidad del compresor a plena capacidad se corresponde perfectamente con la aplicación de consumo de aire.

La mayoría de los compresores se suministran con su propio control y regulación del sistema incorporado, pero la adición de equipos para el control compartido con otros compresores en la instalación puede mejorar aún más la economía de operación.

La regulación de la velocidad ha demostrado ser el método más popular de regulación, debido a su considerable potencial de ahorro energético.

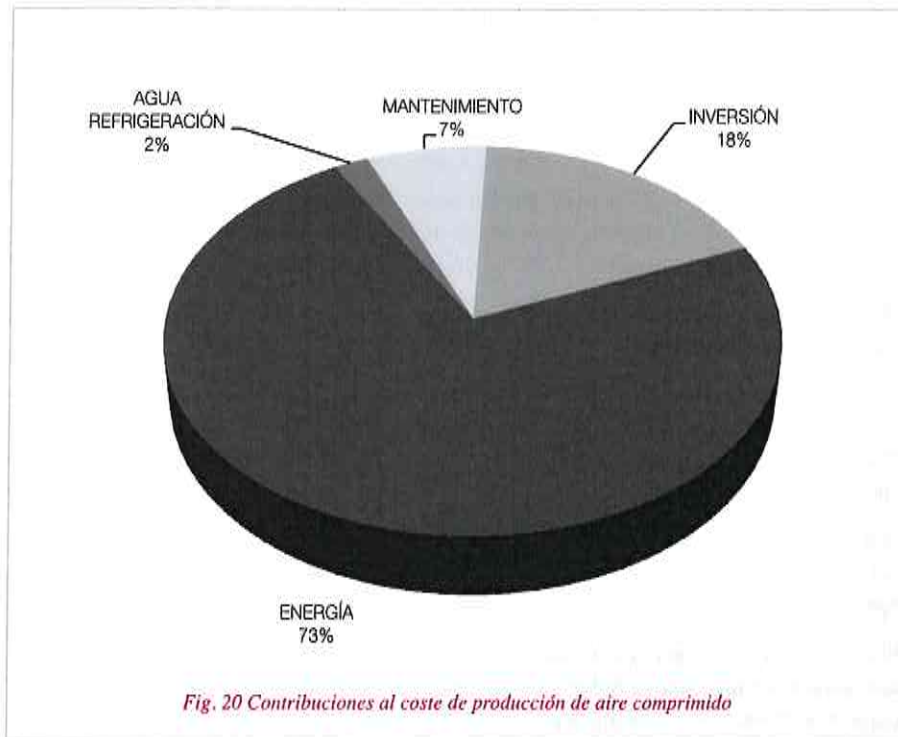
Es preciso analizar con cuidado los requisitos de las aplicaciones con objeto de seleccionar los equipos de regulación más adecuados a fin de obtener los mejores resultados.

Si solo una pequeña cantidad de aire comprimido es necesario durante la noche y fines de semana, puede ser adecuado pensar en la instalación de un pequeño compresor adaptado a este requisito fuera de horas punta.

Si, por alguna razón, una particular aplicación necesita una presión de trabajo diferente, este requisito debe ser analizado al objeto de determinar si toda la producción de aire comprimido debe estar centralizada en una planta compresora central, o si la red debe ser dividida de acuerdo con niveles de presión diferentes.

También se puede considerar el cierre o aislamiento de algunos tramos durante la noche y en los fines de semana, con el fin de reducir el consumo de aire o para asignar los costes internos sobre la base de mediciones de caudal de aire.

Cuando se analiza el coste de las diferentes contribuciones a la producción de aire comprimido, se encuentra una distribución similar a la que se muestra en el diagrama adjunto.



Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el peso relativo de los diferentes tipos de costes puede variar con el número de horas de funcionamiento/año, con los equipos auxiliares incluidos en el cálculo, con el tipo de máquina, el sistema de enfriamiento seleccionado, etc.

5.2. Coste del ciclo de vida

Una forma habitual para analizar la inversión en un producto, un material o un servicio en particular de una manera sistemática aunque simplificada, es mediante el análisis de coste del ciclo de vida (LCC).

Este análisis examina todas las etapas del ciclo de vida del funcionamiento del producto o el servicio. Esto incluye todo, desde la selección del suministro hasta la eliminación final del residuo o reciclaje.

El análisis se utiliza a menudo como una herramienta de comparación entre diferentes opciones de inversión, por ejemplo, para productos o sistemas con características equivalentes.

Los resultados del análisis LCC se utilizan a menudo para proporcionar orientación en cuestiones relativas a procesos específicos o elementos particulares de diseño de un producto. El análisis LCC también puede ser utilizado por las empresas en la comunicación con los subcontratistas, con clientes o con las autoridades para describir las características del sistema.

Los resultados de un análisis LCC pueden servir como base para tomar decisiones que reduzcan al mínimo el impacto operativo de un producto o de un servicio en el medio ambiente. Sin embargo, el análisis LCC no ofrece respuestas a todas las preguntas posibles.

Debe ser examinada toda la tecnología existente con objeto de proporcionar al análisis datos fiables de referencia.

5.2.1. Cálculos

El análisis LCC se utiliza cada vez más como una herramienta para evaluar las distintas opciones de inversión.

Incluidos en el cálculo del LCC se combinan todos los costes debidos al funcionamiento del producto durante un período específico, incluyendo los gastos de capital, el coste de operación y el coste del servicio de mantenimiento.

El cálculo del LCC para una instalación prevista, a menudo se implementa basándolo en una instalación que está ya trabajando actualmente. Esto sirve como base para definir los requisitos de una nueva instalación.

Debe señalarse, sin embargo, que un análisis de LCC a menudo es solo una estimación útil de los costes futuros, y es algo limitada debido a que se basa en los conocimientos actuales de los equipos afectados por la evolución futura de los precios energéticos.

Además, no introduce en el cálculo variables que pueden llegar ser de gran importancia tales como la producción, la seguridad y los posibles costes adicionales.

La realización de un análisis LCC requiere de conocimientos y, preferiblemente, experiencia con otras instalaciones de aire comprimido.

Idealmente, debe ser llevado cabo en colaboración entre el comprador y el vendedor.

Los temas tales como diferentes opciones de inversión que afectan a factores críticos como la calidad de la producción, la seguridad de producción, los requisitos de inversión, la producción de maquinaria, el mantenimiento de la red de distribución, el impacto ambiental, la calidad del producto final y los riesgos de rechazos y el tiempo de inactividad deben estar incluidos en el análisis conjunto.

Una expresión que no se debe olvidar en este contexto es el LCP (beneficio del ciclo de vida), que representa las ganancias que pueden obtenerse a través de recuperación de energía y reducción de rechazos entre otras posibilidades.

Al evaluar los costes del servicio y el mantenimiento, deben tenerse en cuenta las condiciones esperadas del equipo al final del período de cálculo (es decir, si debe considerarse totalmente utilizado y, por tanto, desecharse, o se va a reponer a su estado original).

Además, el modelo de cálculo debe adaptarse al tipo de compresor que se está analizando.

5.3. Oportunidades de ahorro

Es preciso entender que un sistema de aire comprimido consta de dos partes:

- En un lado está la producción que incluye compresores y tratamiento del aire.
- En el otro lado está la demanda, que incluye la distribución, los sistemas de almacenamiento y los equipos de uso final.

Una gestión adecuada del lado de la producción tendrá como resultado:

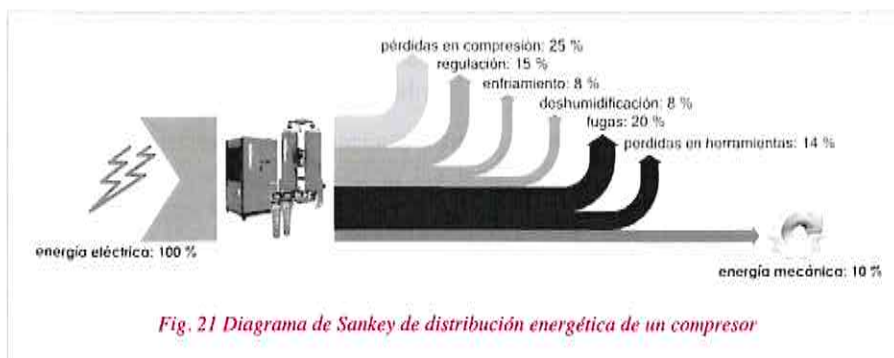
- Aire comprimido limpio, seco y estable.
- Aire comprimido entregado a la presión adecuada.
- Aire comprimido con un coste razonable.

Si la demanda se gestiona adecuadamente significa:

- Minimizar las pérdidas de aire.
- Usar aire comprimido únicamente en aplicaciones apropiadas.

Mejorar y mantener el máximo rendimiento del sistema de aire comprimido requiere abordar tanto la producción como la demanda del sistema, así como la forma en la que interactúan ambas.

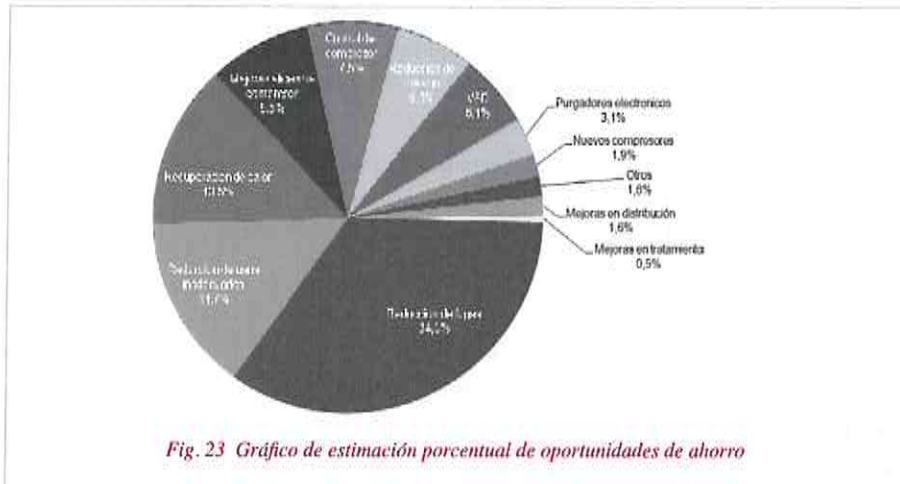
Para poder identificar áreas de oportunidad para el ahorro de energía de un sistema de aire comprimido, es necesario conocer su composición energética así como los componentes estimados de la demanda.



Aproximadamente, el 50% del aire comprimido generado por las unidades de compresión de la planta se estima que se destina a componentes no productivos de la demanda tales como fugas, usos inapropiados del aire comprimido y demanda artificial. En pocas palabras, los componentes no productivos de la demanda son energía neumática que se desperdicia.



El siguiente gráfico muestra una estimación porcentual aproximada de las oportunidades de ahorro clasificadas por tipo de actuación.



5.3.1. Control de fugas

En una instalación de aire comprimido se pueden encontrar dos tipos de fugas diferenciadas según su origen. Dada su diferente naturaleza, también exigen un tratamiento diferente:

5.3.1.1. Fugas por poros, grietas y juntas de la instalación

Todos los sistemas de aire comprimido tienen fugas de aire, incluso los nuevos.

La reducción de las fugas de aire es, en la mayoría de ocasiones, la acción más importante a tener en cuenta a la hora de generar ahorros energéticos.

Diámetro del orificio (mm)	1	3	5	10
Fuga a 6 bar (l/s)	1	10	27	105
Pérdidas de potencia en el compresor (kW)	0,3	3,1	8,3	33

Es imposible calcular una tasa media de fuga de una instalación, pero el objetivo de un sistema en buen estado debe presentar fugas como máximo alrededor del 10% del aire generado.

Para los compresores que operan mediante estrategias de control del tipo marcha/paro o carga/descarga, hay una manera fácil de cuantificar la cantidad de fugas en el sistema.

Este método consiste en poner el compresor en marcha cuando no hay demanda en el sistema (cuando toda la demanda está parada). Se realizan una serie de mediciones para determinar el tiempo promedio que tarda en cargar y descargar el compresor. El compresor entrará en ciclos de carga y descarga debido a las fugas de aire.

La fuga total (expresada en porcentaje) se puede calcular como sigue:

$$\text{Fuga (\%)} = \frac{T \times 100}{(T + t)} \quad [\text{EC. 32}]$$

Donde:

- T = tiempo en carga o en ON [minutos]
- t = tiempo en descarga o en OFF [minutos]

Las fugas se expresarán en términos del porcentaje perdido sobre la capacidad del compresor.

En los sistemas con otras estrategias de control, las fugas pueden ser estimadas cuando hay un medidor de presión aguas abajo del receptor. Este método requiere una estimación del volumen total del sistema, incluidos los receptores de aire secundario, redes de aire comprimido, y las tuberías (V). El sistema se pone en marcha y se lleva a la presión normal de operación (P_1). Se detiene el sistema y se mide entonces el tiempo (t) que tarda el sistema en bajar a una presión más baja (P_2), que debe ser un punto igual cercano a la mitad de la presión de trabajo.

Las fugas en este caso se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\text{Fuga [l/ min FAD]} = \left(\frac{V \times (P_1 - P_2)}{t \times 1,013} \right) \times 1,25 \quad [\text{EC. 33}]$$

Donde:

- $P_1 - P_2$ = diferencia de presiones [bar]
- t = tiempo de bajada de presión [minutos]
- V = volumen total del sistema [litros]

El multiplicador de 1,25 corrige las fugas a la presión normal del sistema, lo que permite calcular las fugas mediante el sistema de descenso de la presión.

Estas pruebas deben llevarse a cabo de forma regular como parte básica de un programa de detección y reparación de fugas.

Vale la pena mencionar aquí, que la cantidad de aire comprimido perdido por fugas reduce la presión mínima de trabajo del sistema.

Cuando se producen aguas arriba de los reguladores de presión, las fugas son de aire no regulado y, por tanto, a mayor presión. Esto hace que todas las fugas de este tipo sean más importantes, dado que a mayor presión pasa más aire por la misma rendija u orificio.

Las fuentes de fuga son numerosas, pero las causas más frecuentes son:


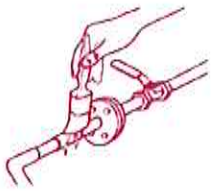

- Válvulas manuales de drenaje de condensado que se dejan abiertas, total o parcialmente.
- Válvulas de cierre que quedan abiertas.
- Fugas en mangueras y acoplamientos.
- Fugas en tuberías, bridas y juntas de las tuberías.
- Fugas en reguladores de presión.
- Suministro innecesario de aire a equipos parados.

Por otra parte, las fugas de aire comprimido representan un problema de seguridad debido a factores tales como el ruido o el arrastre a gran velocidad de partículas en el ambiente. Además, tienen el agravante de interrumpir potencialmente la producción debido a fallos en el equipo y originar costes adicionales a consecuencia de:

- Fluctuaciones de la presión del sistema. Esto puede hacer que las herramientas de aire y otros equipos operados con aire:
 - Funcionen con menos eficiencia y puedan afectar o detener la producción.
 - También puede dar lugar a problemas de calidad. Por ejemplo, una llave de torsión utilizada en la producción puede haber sido calibrada para 6 bar de presión de trabajo. Si existen fugas, se podrían producir reducciones de la presión en la zona, y la llave de torsión no ajustará correctamente los pares de apriete de los tornillos sobre los que se use.
 - Reducir la vida útil y aumentar el mantenimiento de los equipos debido a ciclos innecesarios y mayor tiempo de funcionamiento del compresor.
- Se requerirá una capacidad en exceso de compresor en línea.

Cuando se calculan el coste de todas las fugas y el desperdicio debido a un mantenimiento inadecuado, el desembolso económico para la adquisición de equipo de detección adecuado y piezas de repuesto casi siempre está justificado.

Hay tres formas principales para detectar fugas:

	<p><i>Escuchar</i> - Hacer funcionar el compresor sin demanda de herramientas o equipos consumidores de aire. Asegurarse de que el ruido de fondo es el menor posible y caminar lentamente por el sistema a la escucha de silbidos o sonidos ásperos. Revisar todas las uniones, bridas y válvulas cuidadosamente.</p>
	<p><i>Mirar</i> - Preparar una simple solución de agua jabonosa. Hacer funcionar el sistema sin demanda de herramientas o equipos de aire. Aplicar la solución jabonosa a todas las tuberías (especialmente en articulaciones y empalmes) y luego observar donde se forman burbujas, lo que indica fuga de aire. Este sistema, aunque es engorroso, tiene un nivel de sensibilidad elevadísimo y con su empleo se detectan fugas pequeñísimas.</p>
	<p><i>Detectar</i> - Alquiler o compra de equipos de ultrasonido de detección de fugas suministrados habitualmente por los proveedores de sistemas de aire comprimido. El uso de equipo de ultrasonido es el método más cómodo y conveniente para comprobar si hay fugas.</p>

Una vez detectada una fuga, la mejor práctica aconseja etiquetarla y posteriormente introducirla en un plan de mantenimiento del sistema.

Las pequeñas fugas se pueden reparar in situ, pero antes de hacer frente a grandes pérdidas es aconsejable contactar con el proveedor del equipo. Si hay alguna duda acerca de cómo proceder, debe contactarse igualmente con el proveedor que será quien proporcionará la información más adecuada.

Todas las fugas deben ser reparadas lo más pronto posible. Todo el tiempo que una fuga está sin reparar, es dinero perdido.

5.3.1.2. Fugas asociadas a la purga de agua en el sistema

En capítulos anteriores se ha visto que los sistemas de aire comprimido producen importantes cantidades de agua.

También se ha visto que si el sistema carece de tratamiento deshumidificador, esta agua condensará a lo largo del sistema de distribución cuando el aire se enfríe hasta temperatura

ambiente, y que para eliminar este inconveniente es preciso recoger condensados mediante la instalación de purgadores de drenaje a lo largo del sistema.

El trabajo de un purgador cursa, en la mayor parte de los casos, con fuga de aire que acompaña al condensado y que es un aire que se pierde, por lo que hay que considerarlo una fuga.

La eficiencia energética de un purgador está directamente ligada a la fuga de aire que permite cuando ejecuta la acción de descarga.

Las mejoras de eficiencia energética asociadas a la purga de agua condensada pasan por el conocimiento de los distintos sistemas de purga existentes y sus características.

El drenaje ineficiente de condensados en las redes de aire comprimido suele ser la mayor causa de fugas y por lo tanto de derroche energético en las redes de aire comprimido.

Aunque los drenajes manuales y temporizados son baratos, tienen unos costes de operación elevados debido a la elevada fuga que permiten durante su drenaje.

Los sensores de nivel electrónicos son los más eficientes.

El consumo típico de aire de los diferentes tipos de drenaje se muestra en la tabla siguiente:

TIPO DE PURGADORES	PÉRDIDA TÍPICA DE AIRE cfm (*)
Electrónicos	0
Temporizados	2-6
Manuales	5-30
Flotador mecánico (bloqueado en abierto)	10

(*) 1cfm=1,699 m³/h

Cuando se instalan purgadores electrónicos, hay que asegurarse de que son los adecuados a la localización en la que van a ser instalados. Necesitan dimensionarse conforme a las necesidades de evacuación de condensado.

Usualmente sus capacidades están tabuladas en función del tamaño del compresor.

Si se sitúan en exteriores, hay que considerar las necesidades de calefacción o aislamiento de los mismos y de las tuberías para evitar congelaciones indeseadas.

5.3.2. Control de la aspiración del aire

Para un mejor rendimiento del compresor, el aire aspirado debe estar limpio y frío.

El aire aumenta su volumen específico con la temperatura por lo que cuanto más caliente esté, menor cantidad de aire en términos másicos se introduce en cada ciclo de compresión. Esto hace que disminuya el rendimiento del compresor. La situación inversa (menor temperatura) produce un efecto contrario (aumento del rendimiento).

Debido a esta razón hay que evitar siempre situaciones en las que la aspiración de aire de alimentación al compresor se realice desde la propia sala de compresores o desde cualquier punto caliente.

Cada 4°C de incremento en la temperatura del aire aspirado, aumenta el consumo de energía un 1% para el mismo caudal.

El aire debe aspirarse preferiblemente del exterior en un punto lo mas frío posible y a un mínimo de 2 m de altura.

La tubería de aspiración debe ser recta, corta y libre de suciedad.

Por cada 25 mbar de pérdida de carga en la aspiración, se provoca una reducción de un 2% en el rendimiento del compresor.

5.3.3. Recuperación de energía térmica

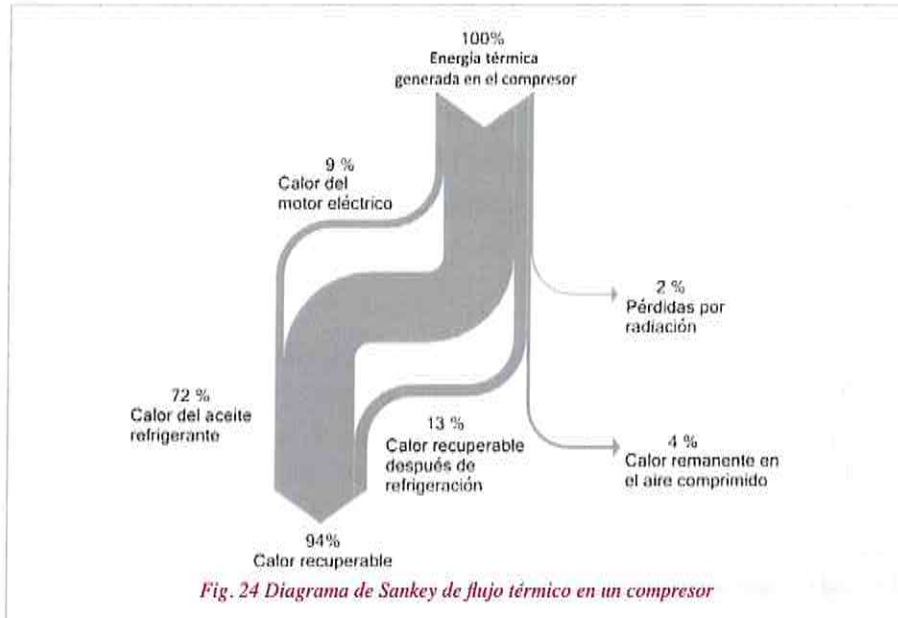
Se pueden obtener ahorros significativos mediante la recuperación de calor de los compresores.

Ya se ha visto que cuando se comprime el aire, se genera calor como una consecuencia natural del proceso. Este calor es habitualmente extraído del aire comprimido por el circuito de refrigeración del compresor.

El 72 % de la energía absorbida pasa en forma de calor al medio refrigerante, un 13% se transmite al aire comprimido en la misma forma y hasta un 9% son las pérdidas del motor eléctrico.

En el caso de motores encapsulados refrigerados por aceite, es posible recuperar incluso el calor de estas pérdidas por medio de una refrigeración adecuada. Hasta un 94% de la energía que consume el compresor puede recuperarse, por tanto, en forma de calor. Solamente el 2 % de la energía se pierde por irradiación al exterior, y un 4% permanece en el aire comprimido

Las pérdidas por radiación no pueden ser recuperadas, pero alrededor del 94% de la



energía generada en forma de calor está disponible para su recuperación a partir del medio de enfriamiento.

5.3.3.1. Equipo

Es preciso disponer de equipamiento extra para recoger el calor desperdiciado en los compresores. Se pueden adquirir compresores con unidad de recuperación de calor o bien invertir en unidades de recuperación adaptadas.

El coste de inversión es relativamente bajo y si el calor recuperado es utilizable, los ahorros energéticos permiten normalmente periodos de retorno inferiores a 2 años.

El tamaño mínimo del compresor, para que sea económica la recuperación de calor, se sitúa en el entorno de los 15kW.

5.3.3.2. Empleo del calor recuperado

Típicos usos para calentamiento de aire incluyen:

- Calefacción de recintos
- Precalentamiento del aire de combustión de calderas

El calentamiento de agua puede ser utilizado para:

- Precalentamiento de agua de alimentación de calderas
- Precalentamiento de agua de proceso
- Calentamiento de agua en lavanderías
- En ocasiones, suministro de calor para la regeneración de los deshumidificadores de aire comprimido.

5.3.3.3. Factores a considerar

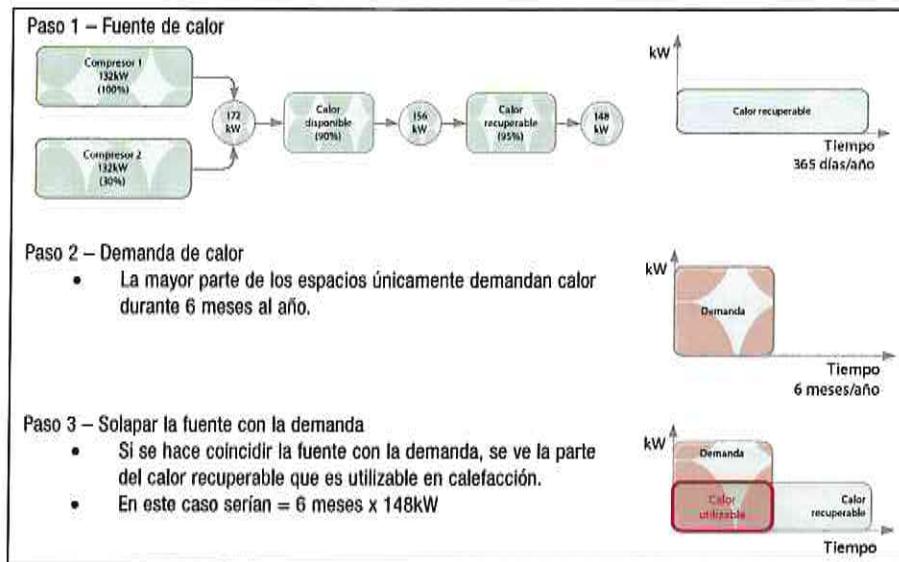
Cuando se planifica una recuperación de calor, es preciso conocer qué cantidad de calor está disponible en los compresores. Esto significa conocer su patrón de carga.

Un método rápido para evaluarlo consiste en multiplicar la potencia nominal por la carga media. Por ejemplo: si dos compresores de 132kW funcionan, uno a plena carga y el otro a un 30% de carga, el consumo base es 172kW.

Una vez conocida la energía disponible, hay que considerar el uso al que va a ser destinada. Además será preciso tener en cuenta otros factores:

- Cuando se utilizará este calor recuperado (por ej. para calefacción de espacios, típicamente solo se empleará 6 meses al año)
- Qué cantidad del calor disponible se empleará.
- Qué consumo energético adicional en equipamiento auxiliar es preciso (ej. Bombas y ventiladores) a pesar de que habitualmente es despreciable.
- Qué coste tiene la fuente de calor alternativa que va a ser remplazada.

Un ejemplo gráfico del modo de proceder queda reflejado de forma esquemática en la figura siguiente:



Si el balance es positivo, se puede proceder a contactar con el suministrador del compresor acerca de los costes de inversión y posibilidades de instalación del sistema.

Si es necesario, se llevará a cabo un análisis más detallado de coste-beneficio.

No se puede olvidar que el propósito fundamental de un compresor es comprimir aire de forma eficiente, por lo que el empleo de un sistema mal diseñado de recuperación de calor puede afectar de forma negativa a la refrigeración básica del compresor. Esto puede afectar a su eficiencia y fiabilidad así como reducir las previsiones de efectividad de las medidas de ahorro de energía previstas.

Las siguientes secciones muestran las opciones de recuperación de calor para los dos tipos de refrigeración del compresor: aire y agua.

5.3.3.4. Recuperación de calor en compresores refrigerados por aire

La recuperación de calor de un compresor refrigerado por aire es bastante sencilla. El método más común es el empleo directo de la salida del aire de refrigeración para suplementar la calefacción de recintos. En su forma más simplificada significa colocar el compresor dentro de un área que precise calefacción. De esta manera puede recuperarse aire caliente en el entorno de 50-60°C.

Cuando el compresor está situado fuera del recinto a calefactar, es sencillo instalar una conducción para inyectar directamente este aire caliente en el área citada. Sin embargo hay que tener cuidado para evitar la restricción de la corriente del aire de refrigeración del compresor, pues esto producirá una disminución de la eficiencia del mismo. Los fabricantes de compresores indican las longitudes máximas de conducción que pueden ser utilizadas para recuperar calor. No obstante, si se superan estas longitudes, siempre es posible el empleo de ventiladores aceleradores suplementarios para asegurar el flujo necesario en el compresor.

5.3.3.5. Recuperación de calor en compresores refrigerados por agua

En un compresor refrigerado por agua, puede recuperarse calor en forma de agua caliente por encima de 90°C. Esto se realiza habitualmente mediante el empleo de un cambiador de placas generando un circuito cerrado que evite la contaminación del sistema de refrigeración del compresor. Hay que asegurarse de que la refrigeración del compresor no se verá comprometida si el cambiador no demanda calor de forma permanente.

La recuperación de calor de los compresores refrigerados por agua es más compleja que en el caso de los refrigerados por aire.

La cantidad de calor recuperado en estos sistemas es también menor que en los refrigerados por aire, debido fundamentalmente a que:

- En muchos casos, las pérdidas de calor del motor no se transfieren al agua de refrigeración.
- Existen también pérdidas en el circuito del cambiador.

Pueden esperarse recuperaciones en la banda del 60% de la energía de entrada.

Se puede recuperar calor de todos los tipos de compresores. Especialmente sencillo resulta en el caso de los equipos compactos de tornillo, tanto si son de aceite inyectado como libres de aceite.

Hay que poner especial cuidado cuando se emplean compresores centrífugos, pues pueden ser muy sensibles a los cambios en la temperatura del agua de refrigeración.

5.3.4. Control de la presión de la red de distribución

La presión de trabajo afecta directamente a los requisitos de potencia absorbida por el compresor. Una presión más alta significa un mayor consumo de energía: el aumento promedio de energía absorbida es de un 8% más por cada 1 bar de aumento de la presión. El aumento de la presión de trabajo para compensar las caídas de presión afecta siempre

a la economía de explotación. A pesar de este efecto económico adverso, el aumento de presión del compresor es un método que se usa de forma habitual e inadecuada para superar las caídas de presión causadas por un sistema infra-dimensionado.

Cuando existen tuberías obstruidas o filtros colmatados, especialmente si han estado en funcionamiento durante un largo período de tiempo sin ser sustituidos, la caída de presión puede ser significativamente mayor que la nominal y, por lo tanto, muy costosa.

En muchas instalaciones, no se pueden implementar reducciones grandes de la presión, pero el uso de los modernos equipos de regulación permite regulaciones de la presión en una banda por debajo de 0,5 bar. Esto representa un pequeño porcentaje de ahorro de energético. Aunque puede parecer insignificante, si se tiene en cuenta que el total de la eficiencia de la instalación se incrementa en un grado equivalente, el valor de esta reducción de presión en términos de ahorro real se hace más evidente.

5.3.5. Control de los tiempos muertos de trabajo en vacío de los compresores

Muchos compresores tienen la característica de funcionar alternando ciclos de carga y descarga. Los ciclos de carga son productivos, los de descarga no y en ellos el motor trabaja en vacío arrastrando el compresor sin producir aire comprimido y demandando una potencia de aproximadamente el 20% de su potencia nominal. La relación entre unos ciclos y otros depende de la demanda que tenga la red en cada momento.

En función de la situación de explotación de la planta es preciso adecuar la producción a la demanda para que los ciclos de descarga, que suponen tiempos muertos con los compresores funcionando en descarga y por tanto consumiendo sin producir, sean lo más reducidos posible.

El uso de un moderno sistema de control permite programar la operación de la instalación de compresores de manera óptima para diferentes situaciones de explotación, a la vez que se mejora la seguridad y la disponibilidad.

La selección del método de regulación en base a la presión óptima más baja y un mayor grado de utilización (eliminación de tiempos muertos con los compresores funcionando en descarga), optimizado para cada máquina de la instalación, redundará en un ahorro de energía. Al mismo tiempo, aumenta el tiempo de disponibilidad, lo que reduce el riesgo de paradas imprevistas.

Además, un control central permite la programación para la reducción automática de la presión en todo el sistema durante la operación de la noche y los fines de semana.

Como el consumo de aire comprimido rara vez es constante, la instalación del

compresor debe tener un diseño flexible, utilizando una combinación de compresores con capacidades diferentes y motores con velocidad controlada. Los compresores deben funcionar a la velocidad de control adecuada para cada momento. Los compresores de tornillo son especialmente adecuados para esto, ya que su caudal y su consumo energético son prácticamente proporcionales a su velocidad.

5.3.6. Empleo de compresores eficientes

Existen diversas maneras de hacer más eficiente un sistema existente de aire comprimido, pero en algún punto de su desarrollo puede llegar a plantearse la posibilidad de invertir en nuevos compresores.

La elección del compresor más adecuado puede conducir a obtener los mejores ahorros junto a un adecuado periodo de retorno de la inversión.

Cada instalación es singular, por lo tanto no existe una solución única y definitiva al problema de instalar un nuevo compresor.

Tampoco hay una respuesta sencilla a la pregunta sobre cuándo un nuevo compresor proporcionará unos ahorros rentables de energía.

Los puntos a considerar a la hora de decidir la conveniencia de cambio en la capacidad de un compresor son habitualmente los mismos, independientemente del tamaño del compresor.

Este apartado se centra en la renovación de compresores para instalaciones existentes, aunque sus contenidos son válidos también para nuevas instalaciones e incluso para ampliación de instalaciones existentes.

5.3.6.1. Factores a considerar

Para decidir si valdría la pena instalar nuevos compresores, debe estudiarse el actual sistema y responder las siguientes preguntas:

- ¿Los compresores existentes cubren en todo momento la demanda actual?
- ¿Los compresores actuales están adaptados en todo momento a la demanda con únicamente pequeñas desviaciones de ineficiencia (menores de un 30% de trabajo en vacío)?
- ¿Los compresores actuales son fiables y de mantenimiento económico?
- ¿Los compresores suministran aire a la misma presión si este se emplea a lo largo de toda la instalación (diferencia de 1bar o menos)?

- ¿Los compresores suministran aire libre de aceite si se requiere?
- ¿Los compresores tienen menos de 10 años de antigüedad?

Si la respuesta a todas estas cuestiones es NO, la instalación de nuevos compresores es indudable que generará ahorros.

No obstante lo anterior, pueden existir soluciones mediante el empleo de máquinas específicas como, por ejemplo, la instalación de un pequeño compresor para dar servicio a un usuario puntual 24 horas al día dentro de un sistema más grande que, de esta manera, puede desconectarse y funcionar únicamente 8h al día.

Si solo la respuesta a alguna de las anteriores cuestiones es NO, puede ser que valga la pena estudiar la posibilidad de instalar un nuevo equipo.

5.3.6.2. Análisis de la demanda

El primer requisito imprescindible es analizar de forma precisa el perfil de demanda. Determinar cómo varía a lo largo de un periodo representativo y de qué manera los compresores existentes cubren este perfil de demanda. Esto se realiza mediante la instalación de registradores de datos que registren caudales y patrones de carga de los compresores. Hay que asegurarse de analizar correctamente los datos obtenidos. Es fácil cometer errores cuando se transforma el consumo energético a caudal, por ejemplo, si las características del compresor no están adecuadamente explícitas.

Si el registro continuo no es posible, se realizará la toma de datos mediante lecturas regulares del patrón de carga del compresor en marcha a lo largo de todo el día. Esto permitirá tener un conocimiento claro del patrón de carga, aunque es evidente que no será tan preciso como mediante un registro continuo.

Los resultados proporcionarán el patrón de demanda así como los costes asociados a esta demanda.

Mediante los mismos datos obtenidos se puede analizar el potencial de ahorro asociado a un cambio de compresores.

Hay que tener cuidado en emplear los mismos datos en cada caso y comprobar particularmente que los datos de energía corresponden con la totalidad del sistema. Hay veces que se citan potencias de salida en eje del motor del compresor y no se han tenido en cuenta detalles como el rendimiento, tanto de motores principales como auxiliares como, por ejemplo, ventiladores de refrigeración.

Los costes de funcionamiento de los sistemas auxiliares deben de considerarse dentro del consumo total. Por ejemplo, los compresores refrigerados por aire usan algo más de

energía que los refrigerados por agua debido a su ventilador interno. No obstante, el ahorro total puede ser mayor cuando tenemos en cuenta que los refrigerados por agua precisan un consumo energético extra así como reactivos químicos y gastos de mantenimiento para enfriar el agua que emplean en su circuito de refrigeración.

5.3.7. Control de la velocidad de los compresores

La primera elección a la hora de instalar un nuevo compresor, a menudo suele ser la tecnología VSD (velocidad variable).

VSD ha sido, probablemente, el desarrollo en términos de eficiencia energética más importante de los últimos años en el campo de los compresores. Sin embargo, a pesar de su eficiencia, no constituye una solución universal.

Los compresores VSD no son adecuados para todas las aplicaciones.

Si trabajan con un nivel de carga muy elevado, pueden resultar más caros que trabajar con un compresor de velocidad fija.

La mayoría de las instalaciones solo requieren de una máquina VSD para controlar las variaciones de la demanda.

Se deben utilizar siempre unidades de compresor estándar (no VSD) como máquinas de carga base.

Si una instalación cuenta ya con un grupo de compresores de capacidades diferentes, un buen sistema de control del grupo puede proporcionar ahorros similares a un VSD a un coste mucho más bajo.

Además, a la hora de tomar una decisión, hay que tener en cuenta que el coste de adquisición de una máquina VSD es alrededor de un 25% más elevado y este sobrecoste hay que amortizarlo en la vida del compresor.

Cuando se considera la adquisición de un compresor VSD, es preciso analizar la demanda cuidadosamente, para asegurarse de que operará de manera más eficiente que mediante una unidad de velocidad fija.

Hay que comprobar el rango de regulación, comparando las variaciones entre fabricantes.

Si se piensa en incorporar una máquina VSD dentro de un sistema existente, hay que asegurarse también de que la interacción entre las máquinas de velocidad fija y la VSD es la correcta. Si los tiempos de reacción y de los ajustes de presión son incorrectos, los de velocidad fija y los VSD puede llegar a competir entre sí, lo que aumentaría significativamente los costes de funcionamiento.

En este caso, es posible que se precise de un sistema de control adecuado para incorporar con éxito una VSD en un sistema existente.

5.3.8. Control de la demanda artificial

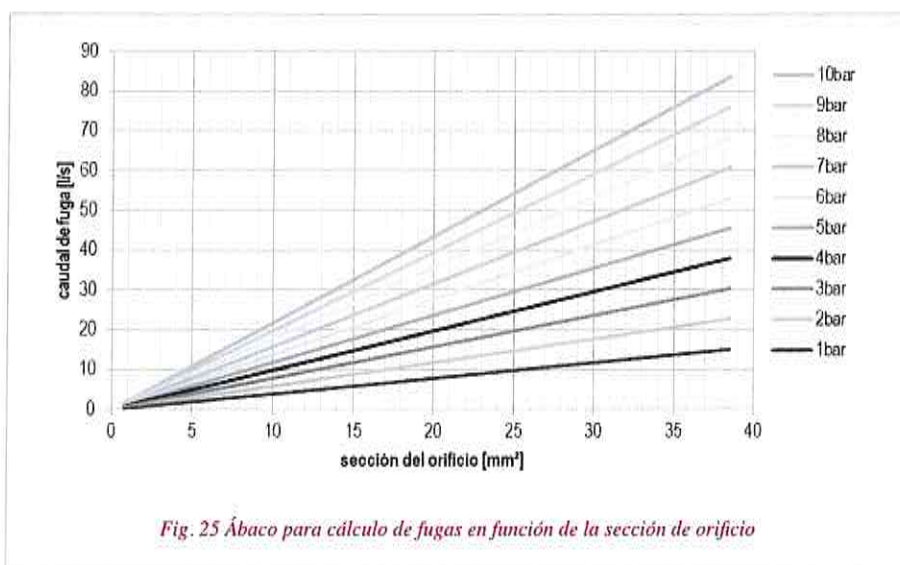
Suele confundirse el término “Demanda Artificial” con el mal uso del aire comprimido, usos tales como barrer el suelo con una pistola de aire por ejemplo.

Sin embargo, la búsqueda de verdaderos ahorros de energía con inversiones mínimas, ha revelado que la gran mayoría de las plantas, presurizan su red de distribución a valores mayores de lo que realmente necesitan para operar los dispositivos neumáticos.

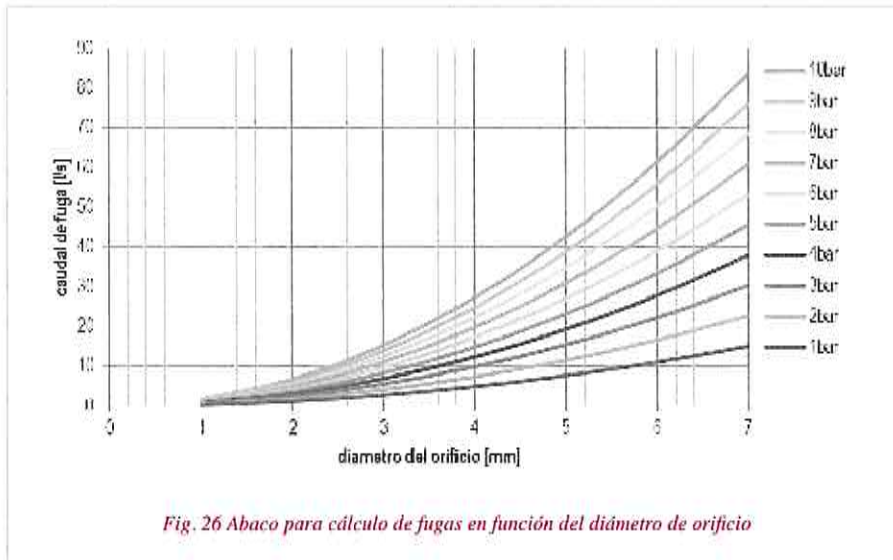
Es común escuchar la frase: “sube la presión que necesito mas aire”, y conforme a las leyes de la física, en realidad lo que ocurre es que al subir la presión el compresor entrega más aire y todos los usuarios, incluidas las fugas, consumen mas aire.

La mayoría de los dispositivos de uso final en un sistema de aire comprimido actúan como orificios o como un agujero en la tubería. Cuanto mayor sea la presión en la tubería, mayor será el flujo de aire a través del dispositivo.

Para una determinada presión, el caudal de aire comprimido a través de un orificio es una función lineal de la sección del orificio. La siguiente gráfica muestra la relación de caudales con las secciones de orificio para una gama de presiones desde 1bar hasta 10bar:



La misma gráfica pero en función de los diámetros de orificio ya no es lineal y se muestra como sigue:



Por ejemplo: si se aplican 7bar(g) a un orificio de Ø 4mm, el consumo de aire en ese orificio es de 19,86 l/s., si se baja la presión a 5bar(g), el consumo en el mismo orificio es tan solo 14,89 l/s, es decir, a 7bar(g) este usuario requiere un 33,4% mas de volumen de aire para operar. Al presurizar la línea a mayor presión, se está provocando un mayor consumo adicional o artificial comparado con presurizar a la presión mínima óptima.

La tensión dinámica que ejercen múltiples usuarios, que en ocasiones superan en forma instantánea la capacidad instalada, y el tiempo que les toma a los compresores bombear, puede causar fuertes variaciones de presión en una red de distribución.

La respuesta más común de los encargados del sistema para evitar las variaciones es incrementar la presión de la red, incrementando el consumo de potencia eléctrica y la demanda artificial.

Además y unido a todo este razonamiento, hay que tener en cuenta que al elevar en 1 bar la presión del sistema, se genera un consumo adicional de 8% de energía eléctrica.

La solución a este tipo de problema pasa por el control del flujo en la red mediante dispositivos especialmente diseñados al efecto.

El siguiente esquema muestra la aplicación de una válvula de control de flujo, que utiliza la reserva de aire comprimido guardado en los tanques de almacenamiento, y que están a mayor presión que la red de distribución, expandiendo el aire a una velocidad de 300m/s.

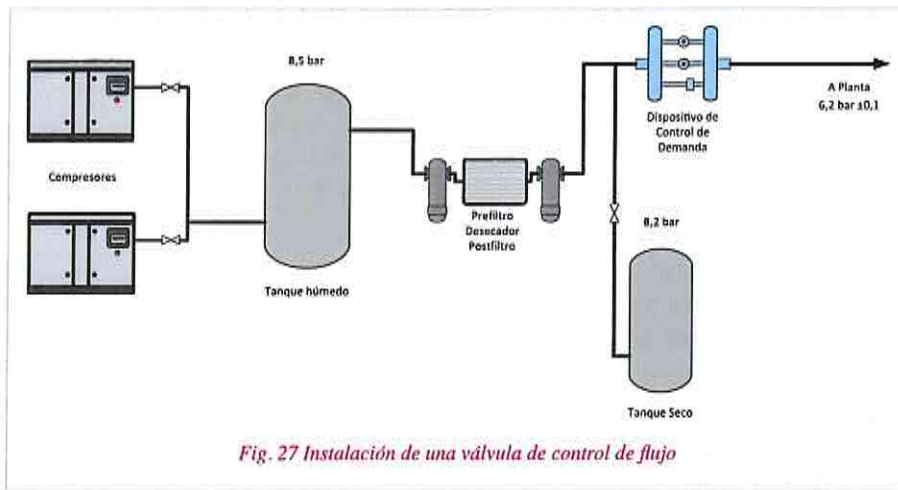


Fig. 27 Instalación de una válvula de control de flujo

La válvula abre cuando detecta que la presión en la red baja 0,05bar y cierra cuando detecta que la presión sube 0,05bar, en ambos casos sobre su set-point. Con esto controla la presión de aire a la salida, multiplicando el flujo disponible al expandir el aire.

La diferencia de presión entre el almacenamiento y la red de distribución, determina el factor de expansión y el volumen disponible desde la reserva de aire, de forma que todos los usuarios tengan presión constante $\pm 0,1$ bar. Es decir, la tubería de distribución siempre va a estar presurizada $\pm 0,1$ bar, y el nivel del almacenamiento va a ser variable.

De esta forma el almacenamiento nos permite atender los picos de demanda, que usualmente son atendidos por un segundo o tercer compresor entrando a funcionar en situación de cargas parciales ineficientes.

5.3.9. Monitorización automática del sistema

Todos los compresores están equipados con algún tipo de equipo de monitorización para proteger el compresor y evitar su funcionamiento improductivo.

Para detectar el estado actual de la instalación se emplean transductores. La información de los transductores se procesa por el sistema de monitorización, que genera una señal destinada a un actuador, por ejemplo.

Un transductor para medir, por ejemplo, la presión o la temperatura, habitualmente consiste en un sensor de medición y un convertidor. El sensor detecta el valor del parámetro a medir. El convertidor de medida transforma la señal de salida del sensor en una señal eléctrica adecuada para ser procesada por el sistema de control.

Los equipos de control están adaptados al tipo de compresor. Esto implica necesariamente una amplia gama de equipos para adaptarse a todo tipo de compresores. Un pequeño compresor de pistón solo está equipado normalmente con un detector de sobrecarga convencional que actúa sobre la desconexión del motor, mientras que un compresor de tornillo de gran tamaño puede contar con un gran número de transductores de sobrecarga, temperatura, presión, etc.

En las máquinas pequeñas, las más básicas, cuando el control del equipo desconecta el compresor, la máquina no se puede reiniciar hasta que no se ha eliminado la causa de la alarma. Una lámpara de advertencia puede, en algunos casos, indicar la causa de esta alarma.

Para compresores más avanzados, la operación del compresor puede ser seguida sobre un panel de control, por ejemplo, leyendo directamente la presión, temperatura y el estado. Si el valor de un parámetro se aproxima al límite de alarma, el equipo de control emitirá una advertencia. Se pueden tomar medidas antes de que el compresor pase a la situación de apagado. Si el compresor se apaga debido una alarma, el compresor se bloquea, no reiniciándose hasta que la causa de fallo haya sido eliminada o el compresor se reinicie de forma manual.

La resolución de problemas en un compresor se facilita de forma significativa en los compresores equipados con una memoria donde los datos sobre la temperatura, la presión y el estado de funcionamiento están almacenados en el sistema. La capacidad de la memoria puede cubrir un periodo variable según el sistema de que se trate. Esta característica permite analizar las tendencias y resolver problemas lógicos que pueden ser utilizados de forma rápida para identificar las razones de inactividad del sistema.

La exigencia fundamental de un sistema de control de un compresor es que sea capaz de mantener una presión predeterminada dentro de límites estrechos y proporcionar un funcionamiento económico de la instalación. Para lograr esto, el control debe ser capaz de predecir qué va a pasar en el sistema, y al mismo tiempo detectar la carga en el compresor. El sistema detecta la velocidad con la que se producen cambios en la presión en uno u otro sentido (es decir, la derivada de la presión respecto del tiempo). Con estos valores, el sistema puede realizar los cálculos que permitan predecir la demanda inminente de aire y, por tanto actuar para descargar/cargar o iniciar/parar las máquinas. Para un dimensionado correcto de la instalación, la fluctuación de presión se mantendrá dentro de $\pm 0,2$ bar.

Es de suma importancia para la eficiencia operacional que el sistema central de control seleccione el compresor o la combinación de compresores más económica, si el sistema está configurado por compresores de diferentes capacidades. Los compresores trabajan así en carga prácticamente continua, minimizando los períodos de funcionamiento en vacío y proporcionando una economía óptima. Otra de las ventajas de un sistema integral de control es que, por lo general, se pueden conectar máquinas más antiguas a estos sistemas y, por lo tanto, se moderniza la instalación de manera relativamente fácil. Las operaciones se vuelven más económicas y la disponibilidad es mayor.

En determinadas instalaciones de compresores, puede existir la necesidad de vigilar y controlar las operaciones del compresor desde una ubicación remota. En instalaciones grandes, donde la inversión que está en juego es muy significativa, el control central es a menudo deseable. Debe consistir en un equipo que ofrezca una visión continua del sistema, y que también proporcione acceso a las distintas máquinas con el fin de controlar los detalles, como la presión del intercooler, temperatura del aceite, niveles, etc.

El sistema de monitoreo también debe tener una memoria con el fin de guardar un registro de lo que ha sucedido, como mínimo, en las últimas 24 horas. El registro se utiliza para trazar las curvas de tendencia, que sirven para identificar fácilmente los valores que tienden a desviarse de la opción predeterminada.

5.3.10. Control sobre las aplicaciones inadecuadas

Es frecuente encontrar instalaciones donde se emplea el aire comprimido para realizar operaciones que pueden ser consideradas como inadecuadas, debido a que responden a un diseño que puede ser sustituido por otro más eficiente y mucho más barato.

Siempre que sea posible, se debe evitar el uso del aire comprimido para aplicaciones de secado. En la industria de conservas de alimentos por ejemplo, se utilizan láminas de aire para soplar el exceso de agua de las latas, lo que acarrea un gran coste en términos de la energía requerida para comprimir el aire empleado.

Por cada 100 unidades de electricidad que entran en el compresor, tan solo 10 unidades estarán disponibles para su uso en forma de aire comprimido, en cuyo caso, el aire que sale del compresor normalmente costaría el equivalente a más de 1€/kWh.

Una vez más, las soluciones alternativas, tales como ventiladores o incluso con el calor evacuado por el compresor, deben ser consideradas en orden a elegir la más eficiente.












6

ANEXOS

6.1. Anexo 1 Longitudes equivalentes de accesorios de tubería

Expresadas en metros equivalentes de tubería del mismo diámetro.

Diámetro DN	25	40	50	80	100	125	150	200	250	300	400
	1,5	2,4	3	4,8	6	7,5	9	12	15	18	24
	0,3	0,5	0,6	1	1,2	1,5	1,8	2,4	3	3,6	4,8
	0,4	0,6	0,8	1,3	1,6	2	2,4	3,2	4	4,8	6,4
	0,5	0,8	1	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8
	1,5	2,4	3	4,8	6	7,5	9	12	15	18	24
	5	8	12	20	25	30	35	45			
	0,3	0,5	0,6	1	1,3	1,6	1,9	2,6	3,2	3,9	5,2
	2	3,2	4	6,4	8	10	12	16	20	24	32
	0,5	0,7	1	2	2,5	3,1	3,6	4,8	6	7,2	9,6

6.2. Anexo 2 Propiedades del aire

Tabla de propiedades del aire a presión atmosférica

Temperatura	Densidad	Peso específico	Viscosidad dinámica	Viscosidad cinemática
T	ρ	γ	μ	ν
[°C]	[kg/m ³]	[N/m ³]	[Pa·s] ó [N·s/m ²]	[m ² /s]
-40	1,514	14,85	1,51·10 ⁻⁵	9,98·10 ⁻⁶
-30	1,452	14,24	1,56·10 ⁻⁵	1,08·10 ⁻⁵
-20	1,394	13,67	1,62·10 ⁻⁵	1,16·10 ⁻⁵
-10	1,341	13,15	1,67·10 ⁻⁵	1,24·10 ⁻⁵
0	1,292	12,67	1,72·10 ⁻⁵	1,33·10 ⁻⁵
10	1,247	12,23	1,77·10 ⁻⁵	1,42·10 ⁻⁵
20	1,204	11,81	1,81·10 ⁻⁵	1,51·10 ⁻⁵
30	1,164	11,42	1,86·10 ⁻⁵	1,60·10 ⁻⁵
40	1,127	11,05	1,91·10 ⁻⁵	1,69·10 ⁻⁵
50	1,092	10,71	1,95·10 ⁻⁵	1,79·10 ⁻⁵
60	1,060	10,39	1,99·10 ⁻⁵	1,89·10 ⁻⁵
70	1,029	10,09	2,04·10 ⁻⁵	1,99·10 ⁻⁵
80	0,9995	9,802	2,09·10 ⁻⁵	2,09·10 ⁻⁵
90	0,9720	9,532	2,13·10 ⁻⁵	2,19·10 ⁻⁵
100	0,9459	9,277	2,17·10 ⁻⁵	2,30·10 ⁻⁵
110	0,9213	9,034	2,22·10 ⁻⁵	2,40·10 ⁻⁵
120	0,8978	8,805	2,26·10 ⁻⁵	2,51·10 ⁻⁵

Propiedades del aire para condiciones estándar a nivel del mar

T	15 °C
P	101,325 kPa
	1,225 kg/m ³
	12,01 N/m ³
μ	1,789·10 ⁻⁵ Pa·s
	1,46·10 ⁻⁵ m ² /s

6.3. Anexo 3 Propiedades de la atmósfera

Altitud sobre nivel del mar	Presión	Temperatura
[m]	[bar(a)]	[°C]
-1000	1,138	21,5
-800	1,109	20,2
-600	1,080	18,9
-400	1,062	17,6
-200	1,038	16,3
0	1,013	15,0
200	0,989	13,7
400	0,966	12,4
600	0,943	11,1
800	0,921	9,8
1000	0,899	8,5
1200	0,877	7,2
1400	0,856	5,9
1600	0,835	4,6
1800	0,815	3,3
2000	0,795	2,0
2200	0,775	0,7
2400	0,756	-0,6
2600	0,737	-1,9
2800	0,719	-3,2
3000	0,701	-4,5
3200	0,683	-5,8
3400	0,666	-7,1
3600	0,649	-8,4
3800	0,633	-9,7
4000	0,616	-11,0
5000	0,540	-17,5
6000	0,472	-24 v,0
7000	0,411	-30,5
8000	0,356	-37,0

6.4. Anexo 4 Contenido de agua en el aire, presiones parciales de vapor y puntos de rocío

T [°C]	T [K]	Pvs [hPa]	Ha [g/m³]
70	343,16	312,14132	196,9212
65	338,16	250,52301	160,3848
60	333,16	199,55035	129,6694
55	328,16	157,68967	104,0292
50	323,16	123,57401	82,7842
45	318,16	95,99324	65,3180
40	313,16	73,88365	51,0764
35	308,16	56,31734	39,5643
30	303,16	42,49127	30,3435
25	298,16	31,71637	23,0288
20	293,16	23,40664	17,2851
15	288,16	17,06844	12,8232
10	283,16	12,29007	9,3964
5	278,16	8,73184	6,7959
0	273,16	6,11657	4,8476
-5	268,16	4,04227	3,2634
-10	263,16	2,61484	2,1511
-15	258,16	1,66289	1,3945
-20	253,16	1,03858	0,8881
-25	248,16	0,63636	0,5551
-30	243,16	0,38206	0,3402
-35	238,16	0,22447	0,2040
-40	233,16	0,12889	0,1197
-45	228,16	0,07221	0,0685
-50	223,16	0,03941	0,0382
-55	218,16	0,02092	0,0208
-60	213,16	0,01077	0,0109
-65	208,16	0,00537	0,0056
-70	203,16	0,00259	0,0028

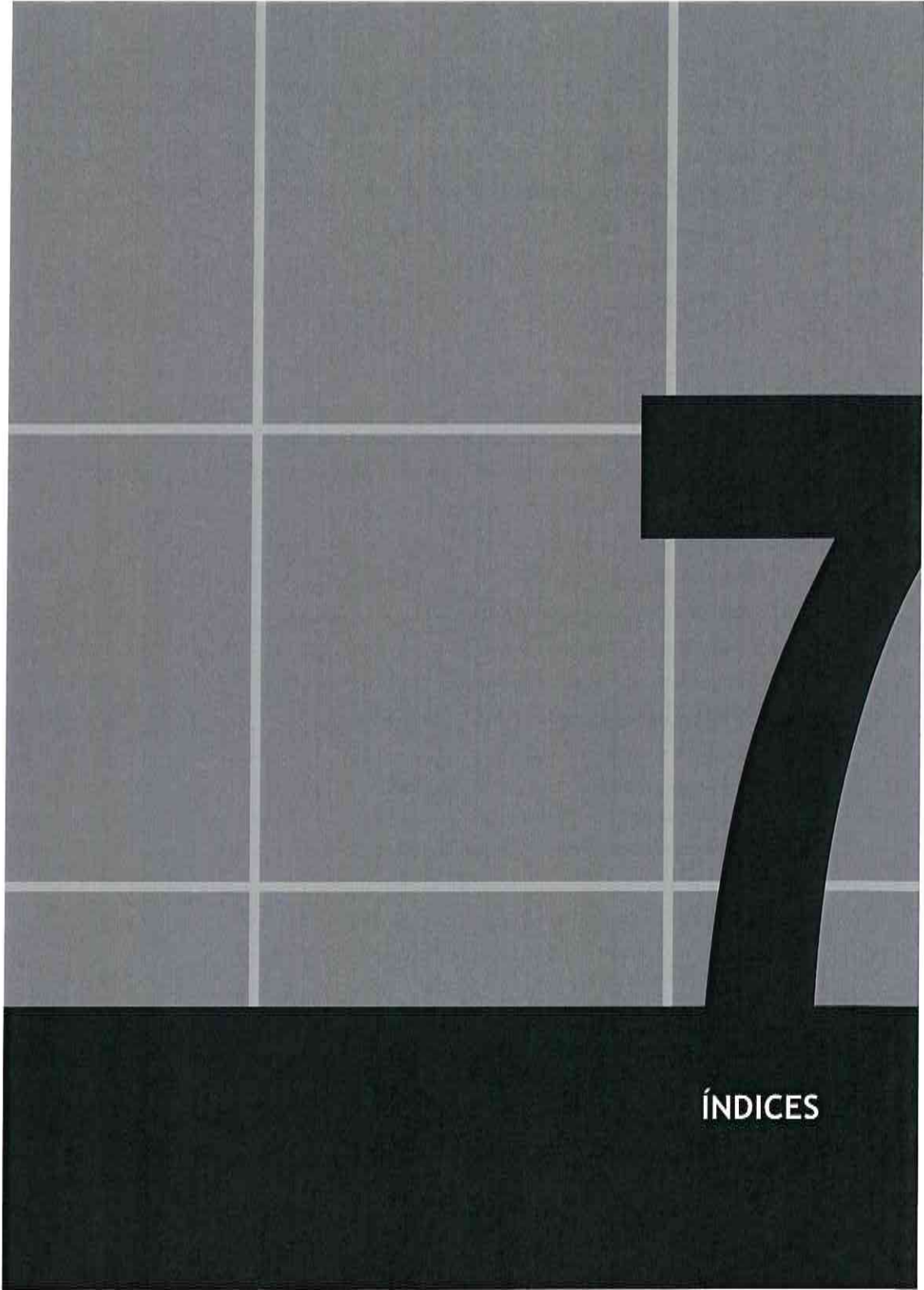
6.5. Anexo 5 Magnitudes y sus unidades más habituales

h	Entalpía específica	kWh/kg
H	Entalpía	kWh/kg
p	Presión	bar
T	Temperatura	°C
L	Longitud	m
V	Velocidad	m/s
Q	Caudal	m ³ /h
D	Diámetro	m
μ	Viscosidad dinámica	cP
ν	Viscosidad cinemática	cSt
	Peso específico	N/m ³
ρ	Densidad	kg/m ³
λ	Conductividad térmica específica	W/m·K
ε	Rugosidad absoluta	mm
h_s	Coefficiente superficial de transmisión de calor	W/m ² ·K
U	Transmitancia térmica	W/m ² ·K
q	Densidad de flujo de calor	W/m ²

6.5. Anexo 6 Referencias y bibliografía empleadas

- *SEI Sustainable Energy Ireland*
COMPRESSED AIR TECHNICAL GUIDE
- *Carbon Trust*
COMPRESSED AIR Introducing energy saving opportunities for business
- *U.S. Department of Energy Energy Efficiency and Renewable Energy*
IMPROVING COMPRESSED AIR SYSTEM PERFORMANCE
- *Kaeser compressors*
COMPRESSED AIR ENGINEERING
- *The Government's Energy Efficiency Best Practice Programme*
HEAT RECOVERY FROM AIR COMPRESSORS good practice guide
- *The Government's Energy Efficiency Best Practice Programme*
ENERGY SAVING IN THE FILTRATION AND DRYING OF COMPRESSED AIR good practice guide
- *Atlas Copco*
COMPRESSED AIR MANUAL 7th edition
- *Warren L. McCabe/Julián C. Smith*
Operaciones Básicas de Ingeniería Química
- *John H. Perry*
CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK
- *Joaquín Ocón García/Gabriel Tojo Barreiro*
Problemas de Ingeniería Química
- *Howard F. Rase*
DISEÑO DE TUBERÍAS PARA PLANTAS DE PROCESO
- *Société Sergot*
CATALOGUE FORMULAIRE
- *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE*
GUÍA TÉCNICA COMPRESORES Y SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

Ente Regional de la Energía de Castilla y León EREN
MEJORAS HORIZONTALES DE AHORRO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA SECTOR INDUSTRIAL



ÍNDICES

7.1. Índice de figuras

Fig. 1	Diagrama de Sankey de pérdidas en un compresor	5
Fig. 2	Distribución aproximada de costes de un compresor	6
Fig. 3	Transferencia térmica en un cambiador de calor	12
Fig. 4	Proceso isocórico.....	14
Fig. 5	Proceso isobárico.....	15
Fig. 6	Proceso isotérmico	16
Fig. 7	Proceso isoentrópico.....	17
Fig. 8	Esquema típico de una red de distribución de aire comprimido.....	24
Fig. 9	Diagrama esquemático de clasificación de los compresores	25
Fig. 10	Esquema de un compresor de tornillo.....	26
Fig. 11	Esquema de un compresor de paletas	26
Fig. 12	Esquema de un compresor de scroll.....	26
Fig. 13	Esquema de un compresor de lóbulos.....	27
Fig. 14	Esquema de un compresor de pistones	27
Fig. 15	Esquema de un compresor centrífugo	28
Fig. 16	Esquema de un compresor axial.....	28
Fig. 17	Mecanismos físicos de filtración.....	35
Fig. 18	Ábaco para el cálculo del diámetro y las pérdidas de carga de una tubería para aire comprimido	49
Fig. 19	Distintas opciones para ventilar una sala de compresores.....	64
Fig. 20	Contribuciones al coste de producción de aire comprimido.....	67
Fig. 21	Diagrama de Sankey de distribución energética de un compresor	70
Fig. 22	Gráfico porcentual de los componentes de demanda energética de un compresor	70
Fig. 23	Gráfico de estimación porcentual de oportunidades de ahorro.....	71
Fig. 24	Diagrama de Sankey de flujo térmico en un compresor.....	78
Fig. 25	Ábaco para cálculo de fugas en función de la sección de orificio	87
Fig. 26	Ábaco para cálculo de fugas en función del diámetro de orificio	88
Fig. 27	Instalación de una válvula de control de flujo	89

7.2. Índice temático

A

Accesorios de tubería, 46
Análisis LCC, 86

C

Caudal de aire comprimido a través
de un orificio, 103
Componentes estimados de la demanda, 87
Condiciones de altitud elevada, 58
Consumo de aire en drenajes, 92
Control de flujo, válvula de, 105

D

Darcy-Weisbach, 63, 64, 65
Demanda Artificial, 103

E

Escala Kelvin, 34

F

Factor de fricción de Darcy, 64
FAD, 36
Filtro coalescente, eficacia
de captura de un, 52
Fugas, 87
Fully integrated systems, 73

I

ISO 8573-1 (Calidad del Aire
Clasificaciones Estándar), 47

L

Ley de Boyle, 23
Ley de Charles, 23
Longitud equivalente de accesorios, 65

P

Patrón de carga, 96
Pérdidas de carga, 63
Presión absoluta, 33
Presión manométrica, 33

S

Schedule, 46

T

Termodinámica, primera ley de la, 25
Termodinámica, segunda ley de la, 25
Tiempos muertos, 99
Transductores, 105
Tubería DIN 2448, 46

U

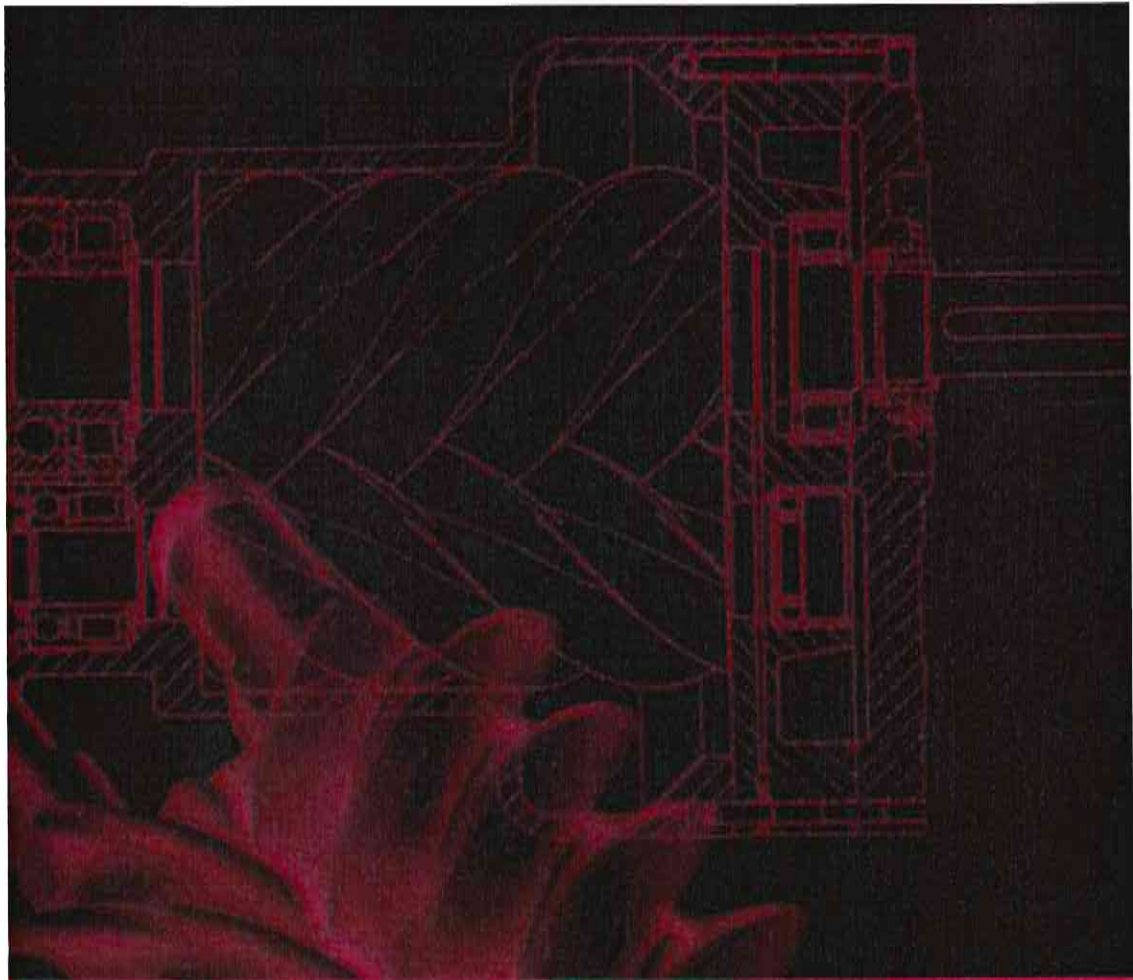
Ultrasonido de detección de fugas, 92
Ultrasonidos, detección de fugas por, 92

V

VSD, 68, 102, 103

W

White-Colebrook, 64



Manual técnico Aire Comprimido

