

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA AGROMÓTICO PARA LA
GESTIÓN EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN INSTALACIONES DE AIRE
COMPRESIDO DE INDUSTRIAS AGROALIMENTARIAS”**

Proyecto final de carrera

Álvaro Castellano Reverte

[Seleccione la fecha]



En este proyecto se recoge información sobre el sector agroalimentario español, el diseño y el uso de las instalaciones de aire comprimido, así como medidas de eficiencia energética para dichas instalaciones y la implantación de un sistema SCADA para el control de la instalación.

ÍNDICE:

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	5
1º-OBJETIVOS DEL PROYECTO:.....	5
2º-AGROMÓTICA:.....	5
3º-EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL:	6
CAPÍTULO II: AIRE COMPRIMIDO, ELEMENTOS Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN.....	10
4º-EL AIRE COMPRIMIDO EN LA INDUSTRIA:	10
4.1-IMPORTANCIA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO:.....	10
4.2-UNIDADES:	11
Presión:.....	11
Caudal volumétrico:	12
Temperatura:	13
Capacidad calorífica:	13
Trabajo:	14
Potencia:.....	14
4.3-CALIDAD DEL AIRE:.....	15
4.4-FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS:	16
4.5-EQUIPAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO:	19
Compresores:	20
Compresores de desplazamiento positivo:.....	21
Compresores dinámicos o turbocompresores:.....	26
Equipo de refrigeración posterior (Aftercooler):	27
Depósito de acumulación:.....	28
Filtros:.....	31
-Eliminación de partículas:	32
-Eliminación de aceite	34
Secadores:	34
Separadores agua / aceite:.....	38
Red de distribución del aire comprimido:.....	39
Accesorios:	39
5º-DIMENSIONADO Y PUESTA EN MARCHA DE LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO: ..	40
5.1-ESTIMACIÓN DE CONSUMOS:.....	41

Medición de la demanda de aire:.....	42
5.2-CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA:.....	43
5.3-DIMENSIONADO DE LA RED DE TUBERÍAS:.....	48
Geometría:	49
5.4-CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FUGAS:	51
5.5-DIMENSIONADO DEL COMPRESOR:.....	53
5.6-DIMENSIONADO DEL DEPÓSITO:	55
5.7-DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO:	56
Eliminación de agua:	56
Eliminación de aceite:	57
Dimensionado del sistema de refrigeración:	57
Compresores refrigerados por agua:	57
Sistemas abiertos con recirculación de agua:	58
Sistemas cerrados:	59
Compresores refrigerados por aire:	59
5.8-SALA DE COMPRESORES:	59
5.9-EMPLAZAMIENTO Y DISEÑO:	60
Cimentación:	61
Aspiración de aire:.....	61
Ventilación de la sala de compresores.....	62
CAPÍTULO III: MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	64
6º-COSTES Y OPORTUNIDADES DE AHORRO EN LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO: .	64
6.1-COSTE DEL CICLO DE VIDA:	65
Cálculos:	66
6.2-CONTROL DE FUGAS:	68
7º-MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICAS:	73
7.1-FUGAS ASOCIADAS A LA PURGA DE AGUA EN EL SISTEMA:	73
7.2-CONTROL DE LA ASPIRACIÓN DEL AIRE:	74
7.3-RECUPERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA:	74
Equipo:	75
Empleo del calor recuperado:	75
Factores a considerar:	76
Recuperación de calor en compresores refrigerados por aire:	77
Recuperación de calor en compresores refrigerados por agua:.....	77

-Control de la presión de la red de distribución.....	78
7.4-CONTROL DE LOS TIEMPOS MUERTOS DE TRABAJO EN VACÍO DE LOS COMPRESORES:	78
7.5-EMPLEO DE COMPRESORES EFICIENTES:.....	79
Factores a considerar:	79
Análisis de la demanda:.....	80
7.6-CONTROL DE LA VELOCIDAD DE LOS COMPRESORES:.....	81
7.7-CONTROL DE LA DEMANDA ARTIFICIAL:.....	81
7.8-CONTROL SOBRE LAS APLICACIONES INADECUADAS:	84
7.9-RECUPERACIÓN DE ENERGÍA:	84
Cálculo del potencial de recuperación de calor residual	85
CAPÍTULO IV: SISTEMA AGROMÓTICO PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO.....	87
8º-MONITORIZACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO DEL SISTEMA:	87
8.1-CONCEPTOS BÁSICOS DEL SISTEMA SCADA:.....	88
Funciones principales del sistema:.....	90
Transmisión de la información:.....	90
Comunicaciones:	91
Elementos del sistema:	92
Período de Escaneo:.....	94
Dispositivos de Campo y Cableado:	95
8.2-SOFTWARE SCADA.....	96
Introducción a LabView de National Instruments:	96
9º-LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMA DE CONTROL EN INSTALACIONES INDUSTRIALES:.....	97
9.1-IMPLANTACIÓN DE MEDIDAS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	98
IMPACTO	98
DIFICULTAD	98
10º-EJEMPLO PRÁCTICO:	100
11º-CONCLUSIONES:	104
CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA	105
12º-ANEXOS:	106

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se definirán los objetivos de este proyecto y se comentará brevemente qué es la agromótica y cuál es el estado del sector agroalimentario español.

1º-OBJETIVOS DEL PROYECTO:

Los objetivos de este son proyecto son el estudio de las instalaciones de aire comprimido en la industria agroalimentaria española, el estudio de las distintas tecnologías para conseguir una mayor eficiencia en las instalaciones de aire comprimido y el desarrollo de un software que permita el control automático e instantáneo de una instalación de aire comprimido en una empresa agroalimentaria.

El software será desarrollado en el programa LabView y se presentará un ejemplo de simulación.

2º-AGROMÓTICA:

La Agromótica es una rama de la Ingeniería Agronómica que, actualmente, se encuentra en desarrollo y expansión. Esta plataforma surge dentro de un contexto de unión de las empresas, investigadores y científicos que, en los últimos años, están trabajando en algún campo de la Agromótica, con el fin de impulsar acciones comunes, tanto a nivel formativo como de investigación.

La Agromótica se encarga del estudio y desarrollo de aplicaciones de automatización y control en el sector agrario y alimentario. Hoy en día, no se concibe la Agromótica sino es unida a la Telegestión, realizando la adquisición de datos en tiempo real por Telemetría y el manejo de actuadores por Telecontrol.

Adicionalmente, esta tecnología puede ser orientada a la sostenibilidad de los recursos naturales utilizados en la agricultura. Mediante un adecuado control en tiempo real de los recursos naturales es posible gestionarlos racionalmente y evitar su sobreexplotación. Con todo ello se dispone de una herramienta útil desde el punto de vista medioambiental.

La plataforma incluye a una gran variedad de técnicos y grupos de investigación que aportan una masa crítica importante. Es una plataforma multidisciplinar, pues además de Ingenieros Agrónomos, incorpora a Ingenieros y Científicos de otras disciplinas, proporcionando un intercambio de conocimientos capaz de enriquecer sustancialmente esta tecnología.

3º-EL SECTOR AGROALIMENTARIO ESPAÑOL:

El sector agroalimentario está compuesto por dos elementos principalmente: por una parte, el sector primario, conjunto de actividades formado por la agricultura, la ganadería, la silvicultura y la pesca; y por otro lado, la llamada agroindustria o industria agroalimentaria, en la que se incluyen aquellas empresas o actividades en las que se produce una transformación de las materias primas agrícolas o ganaderas, más allá de la mera distribución, incorporando en el proceso un valor añadido y dando lugar a productos elaborados o semielaborados.

Este amplio concepto del sector agroalimentario se interrelacionan dos macrosectores tradicionalmente analizados de forma individual y sin relaciones definidas: el sector primario - agricultura y ganadería- y el sector secundario o industria, manufacturera en este caso.

DA Industria de la alimentación, bebidas y tabaco	15 Industria de productos alimenticios y bebidas	151 Industria cárnica	1511 Sacrificio de ganado y conservación de carne 1512 Sacrificio y conservación de volatería 1513 Fabricación de productos cárnicos
		152 Elaboración y conservación de pescados y productos a base de pescado	1520 Elaboración y conservación de pescados y productos a base de pescado
		153 Preparación y conservación de frutas y hortalizas	1531 Preparación y conservación de patatas 1532 Fabricación de jugos de frutas y hortalizas 1533 Fabricación de conservas de frutas y hortalizas
		154 Fabricación de grasas y aceites (vegetales y animales)	1541 Fabricación de aceites y grasas sin refinar 1542 Fabricación de aceites y grasas refinadas 1543 Fabricación de margarina y grasas comestibles similares
		155 Industrias lácteas	1551 Fabricación de productos lácteos 1552 Elaboración de helados
		156 Fabricación de productos de molinería, almidones	1561 Fabricación de productos de molinería 1562 Fabricación de almidones y productos amiláceos
		157 Fabricación de productos para la alimentación animal	1571 Fabricación de productos para la alimentación de animales de granja 1572 Fabricación de productos para la alimentación de animales de compañía
		158 Fabricación de otros productos alimenticios	1581 Fabricación de pan y productos de panadería y pastelería frescos 1582 Fabricación de galletas y de productos de panadería y pastelería de larga duración 1583 Industria del azúcar 1584 Industria del cacao, chocolate y confitería 1585 Fabricación de pastas alimenticias 1586 Elaboración de café, té e infusiones 1587 Elaboración de especias, salsas y condimentos 1588 Elaboración de preparados para la alimentación infantil y preparados dietéticos 1589 Elaboración de otros productos alimenticios
		159 Elaboración de bebidas	1591 Destilación de bebidas alcohólicas 1592 Destilación de alcohol etílico procedente de fermentación 1593 Elaboración de vinos 1594 Elaboración de sidra y otras bebidas fermentadas a partir de frutas 1595 Elaboración de otras bebidas no destiladas, procedentes de fermentación 1596 Fabricación de cerveza 1597 Fabricación de malta 1598 Producción de aguas minerales y bebidas analcohólicas

El sector agroalimentario es importante en la economía española por su contribución, responsable del 7,8% del PIB nacional, generando 1,8 millones de puestos de trabajo, que representa el 10,3% del empleo en España.

Las exportaciones ascendieron a 27.900 millones de euros (13% del total de exportaciones de bienes de España). Esto supuso un superávit comercial de 5.500 millones de euros. Y los datos ya disponibles del año anterior muestran una mejora de estas cifras del 10% sobre los valores de 2011.

Los principales productos del sector agroalimentario español son:

Los productos hortofrutícolas encabezan el ranking, habiendo alcanzado los 12.453 millones de euros en junio de 2012, casi un 4% más que en el mismo periodo anual precedente. Por productos destacan:

- Las hortalizas y legumbres con 3.723 millones de euros
- Las frutas frescas con 2.629 millones de euros
- Los cítricos con 2.609 millones.

En segundo lugar, son los productos cárnicos los que mayor presencia tienen en el exterior, cuya cifra en valor alcanzó los 4.155 millones de euros. Pero es su crecimiento interanual de un 20,5% es la cifra más relevante ya que significa un gran avance respecto a la misma fecha del año anterior.

- Las carnes frescas, con 1.940,3 millones de euros
- Las carnes congeladas, con 1.902 millones de euros,

Siendo éstos los que más se han exportado.

Tienen también un lugar preferente las exportaciones de:

- Pescados y mariscos, que registraron una cifra de 2.808 millones de euros y un crecimiento interanual cercano al 10%
- El aceite de oliva, cuyo valor de ventas en el exterior ascendió a 1.940,4 millones de euros, una cifra muy similar al mismo periodo precedente.

El otro gran sector que está avanzando en el exterior es el vino. El dato interanual de junio fue de 2.323,5 millones de euros, lo que supuso un 15% más que en el periodo precedente.

- Los vinos con DO se exportaron por valor de 851 millones de euros, un 12,7% más que el año pasado.
- Los vinos de mesa, por valor de 667 millones de euros, con un incremento del 29%.

Los principales destinos de los productos del sector agroalimentario español son:

Por mercados, sigue siendo la Unión Europea el principal destino de los productos agroalimentarios. Encabeza el ranking:

- Francia con 5.871 millones de euros y un crecimiento interanual en junio del 7,5%,

- Alemania con 3.741,8 millones, un 6,8% más que el año pasado.
- Italia con 3.740 millones, un 5,8% más que el año pasado.

No obstante, las exportaciones españolas agroalimentarias están creciendo también en otros mercados como Estados Unidos, país al que se vendió por valor de 997,7 millones de euros, un 5,9% más, o Rusia, donde las exportación ha crecido cerca del 24%, con 788,7 millones de euros.

Destacan, asimismo, los mercados asiáticos como China, con 418,2 millones de euros y un crecimiento interanual del 41,3%, Japón con 390,6 millones de euros y un incremento del 32% o Emiratos Árabes Unidos, país al que se exportó por valor de 263,8 millones de euros, con un espectacular crecimiento del 70,5%.

El sector agroalimentario es un sector estratégico por:

- Contribuir a la seguridad alimentaria (foodsecurity) con un suministro de alimentos sanos y de calidad (food safety & quality). Aquí se incluye un gran número de alimentos y bebidas de gran prestigio, por su marca registrada o por ser de calidad diferenciada (Denominaciones de Origen e Indicaciones Geográficas Protegidas. Baste señalar en Vino de Rioja, el Jamón Ibérico, las naranjas españolas, el aceite de oliva virgen o el queso manchego.
- Gestionar el 48% territorio nacional proporcionando servicios ecosistémicos (prevención de incendios, erosión, inundaciones, captura de CO2...) y hábitats claves para la conservación de la biodiversidad a través de los agro-ecosistemas. Éstos constituyen también paisajes tradicionales y complejos que forman parte del patrimonio y proporcionan un valor diferenciado a nuestra oferta turística.
- Proporcionar empleo a lo largo del territorio, constituyendo la principal fuente de empleo directo e indirecto en muchas comarcas rurales, evitando la despoblación y desertización del territorio.
- Ser origen y soporte de nuestra cultura y tradiciones, imprescindibles para no descapitalizar culturalmente a un país sólo urbano en su actual generación, y constituir un atractivo en el competitivo sector de turismo internacional.

Las fortalezas del sistema

- La principal fortaleza del Sistema Agroalimentario español es su capacidad productiva, apoyada en una extraordinaria mejora de su productividad. En las últimas dos décadas, la Producción Agraria española ha crecido más de un 55%, frente a un aumento del 15% en nuestro entorno económico (UE-15). Todo ello con consecuencias positivas tanto económicas como medioambientales.
- La Industria Agroalimentaria está compuesta por 29.000 empresas (el 96% son PYMES), con ventas netas por valor en 2011 de 83.773 millones de euros

- La Industria Agroalimentaria española destaca también como la más innovadora de los sectores de bienes de consumo no duradero

Además, España se sitúa como cuarto país por retorno económico, con un 10%, por detrás de Alemania, Reino Unido y Holanda.

Por otro lado su inversión en el exterior alcanzó los 733 millones de euros (20% de la inversión exterior de la industria española), y la inversión de empresas extranjeras en la industria agroalimentaria española fue de más de 700 millones de euros (41% de la inversión extranjera en la industria española).

CAPÍTULO II: AIRE COMPRIMIDO, ELEMENTOS Y DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN.

En el siguiente capítulo trataremos la composición de las instalaciones de aire comprimido en la industria, los elementos y partes que las componen, su dimensionado y los cálculos que ello requiere. Así como la medida de la calidad del aire y las unidades en las que se trabaja.

4º-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

4.1-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:

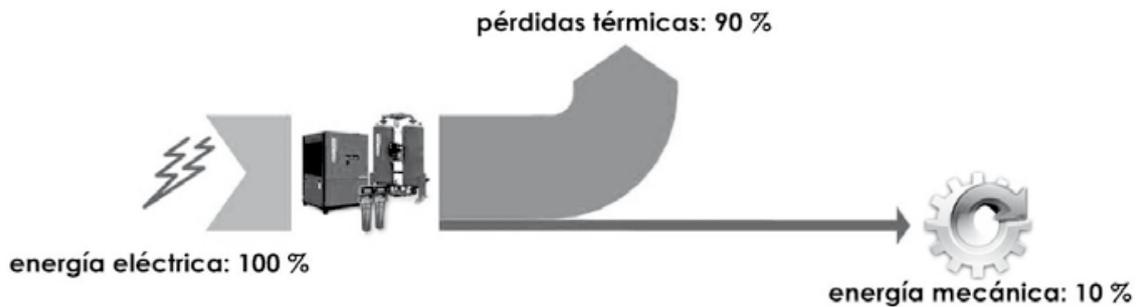


Diagrama Sankey de las pérdidas de un compresor

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.

4.2-UNIDADES:

Presión:

Como acuerdo internacional, se toma la presión atmosférica normalizada, 1 atmósfera, que está definida como la presión atmosférica media al nivel del mar, y que toma los siguientes valores según el sistema de unidades:

- 1 atmósfera = 1,01325 bar;
- 1 atmósfera = 760 Torr (760 mm de Hg);
- 1 atmósfera = 101 325 Pa (N/m²);

- 1 atmósfera = 1,033227 Kg/cm²;
- 1 atmósfera = 14,69595 PSI (pound/inch²);
- 1 atmósfera = 10,33 metros de columna de agua (m.c.a.)

Para definir la presión en un sistema de aire comprimido se utiliza la presión efectiva, denominada también presión manométrica, y que suele expresarse en bares. Esta presión hay que distinguirla de la presión absoluta. Para pasar de una a otra sólo hay que restarle a la presión absoluta la presión ambiente (aproximadamente 1 bar). Por tanto, la presión manométrica se aplica en todos aquellos casos donde la presión de trabajo es superior a la atmosférica, porque cuando esta presión es inferior a la atmosférica entonces se habla de presión de vacío.

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 m³/s.

Por otro lado, en ocasiones el consumo de aire de un punto de utilización viene definido en Nm³/min o Ndm³/min (también NI/min), donde Nm³ y Ndm³ (o NI) significa *normal metro cúbico* y *normal decímetro cúbico (normal litro)* respectivamente. Cuando se antepone el prefijo *Normal* a la unidad de medida se refiere a que está medido en unas condiciones de presión, temperatura y humedad relativa del aire, que son las siguientes:

- Presión: 1,013 bar(a)
- Temperatura: 0 °C
- Humedad Relativa: 65%

Pero el caudal volumétrico del aire libre suministrado para un equipo compresor (*FAD*) suele venir definido en su hoja de especificaciones según unas condiciones estándar en la entrada del equipo que no suelen coincidir con las condiciones normales (ejemplo, 1 bar de presión absoluta y temperatura de 20 °C). Para pasar de un caudal expresado en condiciones normales (ej. Nm³/s) a las condiciones estándar de trabajo (l/s) se emplea la siguiente expresión:

$$Q_{fad} = Q_n \times \frac{273 + T_{fad}}{273} \times \frac{1,013}{P_{fad}}$$

Donde:

Q_{FAD} es el caudal de aire suministrado en las condiciones de trabajo estándar (l/s)

Q_N es el caudal en condiciones normales (NI/s)

T_{FAD} es la temperatura de entrada estándar al compresor (20 °C)

T_N es la temperatura normal de referencia (0 °C)

P_{FAD} es la presión de entrada estándar al compresor (1 bar (a))

1,013 es la presión de referencia normal (1,013 bar (a))

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 (°C):

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

Donde:

T = temperatura absoluta [K]

t = temperatura centígrada [°C]

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·K).

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

c_p = calor específico a presión constante

c_v = calor específico a volumen constante

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, aumentar la temperatura. A efectos prácticos, se emplea habitualmente un valor medio.

Para los líquidos y sustancias sólidas c_p .

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

$$P = \dot{q} \times c_p \times (T_2 - T_1)$$

Donde:

P = Potencia de calentamiento [W]

\dot{q} = caudal másico [kg/s]

c_p = calor específico [J/kg·K]

T = temperatura [K]

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: $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$.

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: $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

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)]

pN = presión normal de referencia [1,013 bar(a)]

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

4.3-CALIDAD DEL AIRE:

Los sistemas y procesos de producción modernos necesitan aire comprimido de alta calidad. Esta calidad se define en la norma internacional ISO 8573-1:2001 que califica la calidad del aire de acuerdo a los valores de suciedad (por el tamaño de las partículas sólidas suspendidas y su concentración), de agua (según el punto de rocío a presión alcanzado y el contenido de vapor de agua presente en el aire) y de aceite (por la concentración total de aceite presente en el aire en forma de aerosoles, líquidos o vapores).

Una vez definido la calidad de aire que se requiere según la aplicación, entonces se hace necesario someter al flujo de aire a un proceso de tratamiento mediante etapas de filtrado, separación de agua y secado que consiga unos niveles de suciedad, contenido en agua y aceite que queden por debajo de los límites establecidos.

A continuación se muestra la tabla que define la calidad del aire clasificándolo en diferentes clases según la normativa vigente:

Calidad del aire comprimido, según ISO 8573-1

CLASE	PARTÍCULAS SÓLIDAS Número máximo de partículas por m ³			HUMEDAD Punto de rocío a presión (°C)	ACEITE Concentración total mg/m ³ (aerosoles, líquidos o vapores)
	0,1-0,5 µm	0,5-1,0 µm	1,0-5,0 µm		
1	100	1	0	-70	0,01
2	10000	1000	10	-40	0,1
3	-	10000	500	-20	1
4	-	-	1000	3	5
5	-	-	20000	7	-
6	-	-	-	10	-

Tabla 1. Calidad del aire comprimido según ISO 8573-1

De esta forma para designar la clase de pureza del aire comprimido se debe seguir el siguiente formato:

ISO 8573-1 X.Y.Z,

Donde:

X es la cifra que indica la clase de partículas sólidas, según la Tabla 1 anterior,

Y es la cifra que indica la clase de humedad, según la Tabla 1 anterior,

Z es la cifra que indica la clase de aceite, según la Tabla 1 anterior.

4.4-FUNDAMENTOS TERMODINÁMICOS:

A continuación seguimos con una pequeña introducción a los fundamentos de la termodinámica, que ayude a entender mejor el principio de funcionamiento de los equipos que constituyen un sistema de aire comprimido cualquiera (compresores, secadores...).

El primero lo constituye la ecuación general de los gases (y el aire está constituido por una mezcla de gases, entre los que destaca el nitrógeno en un porcentaje del 78% y el oxígeno en el 21%), por lo que la siguiente formulación le es también de aplicación. La ecuación que relaciona presión, volumen y temperatura de un gas es la siguiente:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Donde:

P es la presión absoluta del gas (Pa)

V es el volumen que ocupa (m^3)

n es el número de moles (es el cociente entre masa del gas / peso molecular ó atómico del gas)

R es la constante de los gases ($8,314 J/mol \cdot K$)

T es la temperatura absoluta (K).

De la anterior expresión se deduce que si se hace aumentar la presión de un gas en mayor proporción a la que disminuye su volumen, como ocurre en la cámara de un compresor de aire, entonces la temperatura de ese gas aumenta. Por eso, a la salida de un compresor el aire está más caliente.

Según la expresión anterior en un proceso isotérmico ($T=cte.$) las relaciones entre presión y volumen deben cumplir siempre la siguiente expresión:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

que es conocida como Ley de Boyle.

Por otro lado, también se deduce que si se mantiene la presión constante (isobara) el volumen de un gas cambia en proporción directa a como lo hace su temperatura, es decir,

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

que es conocida como Ley de Charles

Por último, otro aspecto que debe ser considerado en los sistemas de aire comprimido es la presencia de agua en el aire. En efecto, el aire exterior de la atmósfera puede ser considerado como una mezcla entre aire seco y vapor de agua. La cantidad o el porcentaje de vapor de agua presente en el aire se denomina humedad relativa. Los extremos estarán en el aire seco (contenido cero de agua) y en el aire saturado (cantidad máxima de agua que puede contener ese aire).

La capacidad del aire para contener agua depende de la temperatura, aumentando cuando esta aumenta, es decir, que un aire caliente puede contener más vapor de agua que un aire frío, pero a medida que este aire se enfría su capacidad para retener la humedad se hace menor por lo que empezará a condensar gotitas de agua conforme la temperatura del aire baje.

Precisamente, el punto de rocío (PR) es esa temperatura a la que se satura el aire, es decir, la temperatura a la que el vapor de agua presente alcanza su presión de saturación. Si sigue bajando la temperatura por debajo de la temperatura de rocío entonces comienza a condensar agua, dado que el aire no tiene capacidad de contener esa humedad.

En la siguiente tabla se muestra los diferentes valores de la temperatura de rocío, según la humedad relativa y temperatura ambiental del aire a presión atmosférica:

		Humedad Relativa (%)																
		20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%	100%
Temperatura (°C)	40°	18	16	19	21	24	26	28										
	39°	18	15	18	20	23	25	27	28									
	38°	12	14	17	20	22	24	26	27									
	37°	11	13	16	19	21	23	25	26	28								
	36°	10	12	15	18	20	22	24	25	27	28							
	35°	9	11	15	17	19	21	23	24	26	27	28						
	34°	8	10	14	16	18	20	22	23	25	26	27	28					
	33°	7	10	13	15	17	19	21	22	24	25	26	27	28				
	32°	6	9	12	14	16	18	20	21	23	24	25	26	27	28			
	31°	5	8	11	13	15	17	19	20	22	23	24	25	26	27			
	30°	4	7	10	12	15	17	18	20	21	22	23	25	26	27	28		
	29°	4	6	9	11	14	16	17	19	20	21	22	24	25	26	27	28	
	28°	3	5	8	10	13	15	17	18	20	20	21	23	24	25	26	27	28
	27°	2	4	7	9	12	14	16	17	19	20	20	22	23	24	25	26	27
	26°	1	3	6	8	11	13	15	16	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	25°	1	3	6	8	10	12	14	15	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	24°	0	2	5	7	9	11	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	23°	0	1	4	6	8	10	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23
	22°	-1	1	3	5	7	9	11	12	13	15	16	17	18	19	20	21	22
	21°	-2	0	2	5	6	8	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	21
20°	-3	-1	2	4	6	7	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	20	

Tabla 2. Temperatura de rocío a presión atmosférica

La Tabla 2 es muy sencilla de entender. Por ejemplo, supongamos un aire exterior con una temperatura ambiente de 25 °C y una humedad relativa del 65%. Según la Tabla 2 le correspondería un punto de rocío de 18 °C, es decir, que para que se produzcan condensaciones de agua en ese aire su temperatura debería bajar hasta los 18 °C.

La anterior definición del punto de rocío está referida a la presión atmosférica, pero igualmente existe un punto de rocío cuando la presión a la que se encuentra el aire es superior a la atmosférica. Como se puede apreciar en la siguiente tabla, conforme aumenta la presión, la temperatura del punto de rocío también se hace mayor.

PUNTO DE ROCÍO PARA DISTINTOS VALORES DE PRESIÓN - EN °C										
PRESIÓN ATMOSF	1 ATM.	2 ATM.	3 ATM.	4 ATM.	5 ATM.	6 ATM.	7 ATM.	8 ATM.	9 ATM.	10 ATM.
+5	+16	+23	+28	+32	+35	+39	+41	+44	+46	+48
0	+11	+17	+22	+25	+29	+32	+35	+37	+39	+41
-5	+6	+11	+15	+19	+22	+25	+27	+30	+31	+33
-10	-1	+4	+9	+12	+15	+18	+20	+22	+24	+26
-15	-7	-2	+2	+5	+8	+10	+13	+15	+16	+18
-20	-12	-3	-4	-1	+1	+4	+5	+7	+9	+11
-25	-18	-13	-10	-7	-5	-3	-1	0	+2	+3
-30	-23	-19	-15	-11	-9	-9	-7	-6	-5	-4
-35	-28	-24	-21	-19	-17	-15	-13	-12	-11	-10
-40	-33	-29	-27	-25	-22	-21	-19	-18	-17	-16
-45	-39	-35	-32	-30	-28	-27	-26	-24	-23	-22
-50	-44	-40	-38	-35	-34	-32	-31	-30	-29	-28
-55	-49	-46	-43	-41	-40	-38	-37	-35	-34	-34
-60	-54	-51	-49	-47	-45	-44	-43	-42	-40	-40
-65	-59	-56	-54	-52	-50	-49	-47	-46	-46	-45
-70	-65	-60	-59	-57	-56	-54	-53	-52	-51	-50
-80	-75	-75	-72	-70	-68	-65	-65	-65	-65	-65
-90	-85	-83	-82	-81	-80	-79	-78	-77	-76	-75

PUNTO DE ROCÍO PARA DISTINTOS VALORES DE PRESIÓN - EN °C										
PRESIÓN ATMOSF	11 ATM.	12 ATM.	15 ATM.	20 ATM.	25 ATM.	30 ATM.	40 ATM.	50 ATM.	100 ATM.	150 ATM.
+5	+30	+32	+36	+42	+47	+52	+59	+65	+103	+115
0	+23	+24	+29	+35	+39	+44	+50	+56	+94	+105
-5	+14	+16	+20	+26	+31	+36	+42	+48	+83	+94
-10	+7	+9	+13	+19	+24	+29	+35	+41	+72	+83
-15	+1	+2	+5	+11	+16	+21	+27	+33	+62	+71
-20	-4	-3	+1	+6	+11	+16	+22	+28	+52	+61
-25	-9	-6	+2	+7	+12	+17	+23	+29	+42	+50
-30	-13	-10	+1	+6	+11	+16	+22	+28	+32	+40
-35	-17	-14	-1	+4	+9	+14	+20	+26	+22	+30
-40	-21	-18	-4	-1	+4	+9	+15	+21	+14	+20
-45	-25	-22	-7	-4	-1	+4	+10	+16	+9	+12
-50	-29	-26	-10	-7	-4	-1	+11	+17	+10	+12
-55	-33	-30	-13	-10	-7	-4	+12	+18	+11	+12
-60	-37	-34	-16	-13	-10	-7	+13	+19	+12	+13
-65	-41	-38	-19	-16	-13	-10	+14	+20	+13	+13
-70	-45	-42	-22	-19	-16	-13	+15	+21	+14	+13
-80	-53	-50	-29	-26	-23	-20	+17	+23	+16	+13
-90	-61	-58	-36	-33	-30	-27	+19	+25	+18	+13

Tabla 3. Puntos de rocío para distintos valores de presión

4.5-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.

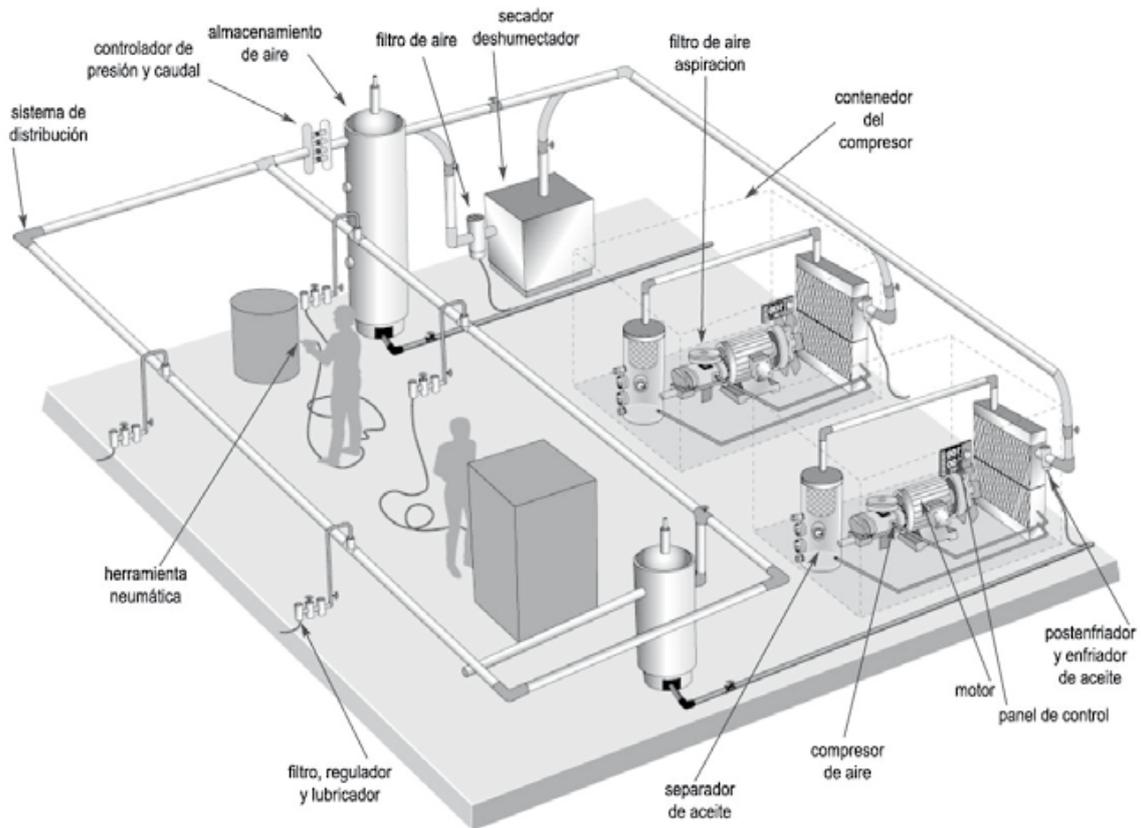
En realidad, la mayor parte de las instalaciones de aire comprimido, aunque en su concepción más elemental responden a este esquema, presentan una complejidad bastante más elevada.

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:

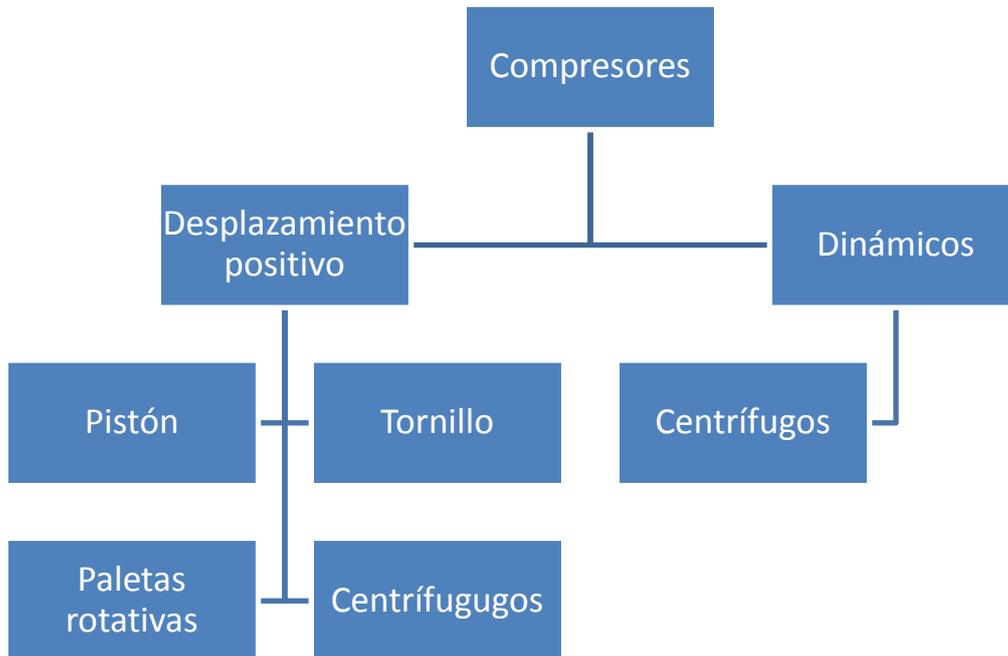


Compresores:

El compresor es el elemento encargado de tomar el aire exterior que está a presión atmosférica (aprox. 1 bar) para elevarla según las necesidades de consumo o de uso a que se destine este aire comprimido (ej. para el accionamiento de utillajes, mecanismos, o bien de control o medida, accionando válvulas y otros dispositivos).

Según el principio de la termodinámica que se emplee, hay dos grandes familias de compresores de aire:

- Compresores de desplazamiento positivo, donde el aire se confina en un volumen interior de la máquina que posteriormente se reduce de dimensión por el desplazamiento de alguna de sus paredes, con el consiguiente aumento de la presión del aire retenido en su interior. Este tipo de compresores ofrecen caudales de aire no demasiado altos, pero permiten obtener relaciones de presión más elevadas.
- Compresores dinámicos o turbocompresores, en este caso, los responsables de elevar la presión del aire son unos álabes que giran a gran velocidad, y que transmiten esta velocidad al aire que toman del exterior. Posteriormente este aire pasa a otra cámara o difusor donde el aire baja bruscamente su velocidad, transformándose toda la energía cinética adquirida en presión estática. Este tipo de compresores son capaces de proporcionar mucho caudal de aire, aunque a presiones más moderadas que el tipo anterior.



A continuación se realiza un estudio de las distintos tipos de compresores que componen las dos grandes familias antes descritas.

Compresores de desplazamiento positivo:

- Compresores de pistón

El compresor de pistón es uno de los diseños más antiguos de compresores, pero sigue siendo en la actualidad el más versátil y eficaz. Este tipo de compresor funciona mediante el desplazamiento de un pistón por el interior de un cilindro accionado por una varilla de conexión o biela y un cigüeñal.

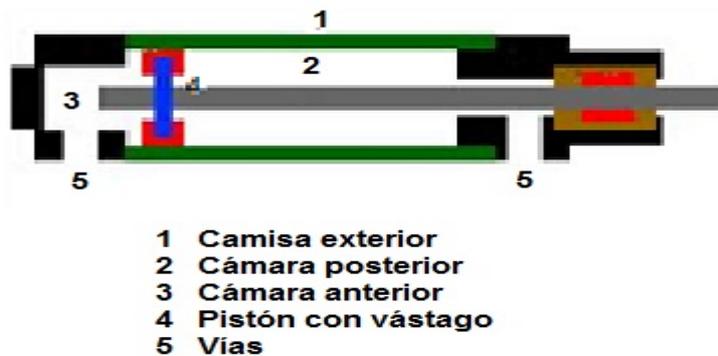
En los compresores de aire de pistón, el aire es comprimido en una cámara definida por la pared de un cilindro y el pistón. La posición del pistón, conectado a la biela, está controlada por el cigüeñal. Cuando el cigüeñal gira, el pistón se mueve hacia abajo, aumentando el tamaño de la cámara, por lo que a través de una válvula de aspiración llena de aire el interior de la cámara. Cuando el pistón alcanza su posición más baja en el cilindro, invierte su dirección y se mueve hacia arriba, reduciendo el tamaño de la cámara a la vez que aumenta la presión del aire en su interior. Cuando el pistón alcanza su posición máxima en el cilindro, el aire comprimido es descargado a través de la válvula de descarga hacia el depósito de acumulación.

Si sólo se usa un lado del pistón para la compresión, entonces se trata de un compresor de simple efecto,



Compresor de pistón de simple efecto

Por otro lado, si se utilizan ambos lados del pistón, las partes superior e inferior, entonces se trata de un compresor de doble efecto,



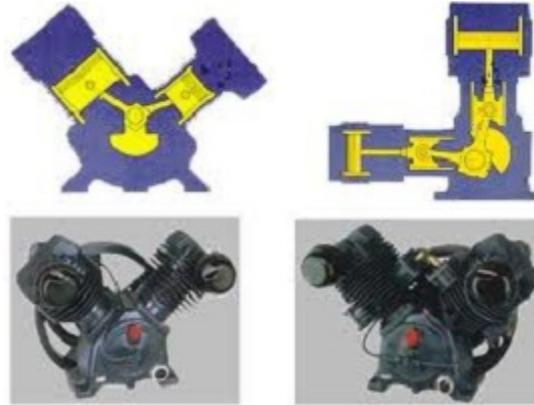
Compresor de pistón de doble efecto

La versatilidad de los compresores de pistón es muy extensa. Permite comprimir tanto aire como gases, con muy pocas modificaciones. El compresor de pistón es el único diseño capaz de comprimir aire y gas a altas presiones.

Los compresores de pistón pueden ir lubricados con aceite, o también existen diseños que permiten su funcionamiento libre de aceite. En estos casos, los pistones disponen de segmentos o aros de PTFE o carbón, y además las paredes del pistón y cilindro pueden ir dentadas, similar a los compresores de laberinto.

Otra opción en los compresores de pistón es la de emplear más de un pistón (por ejemplo, dos pistones) por lo que la compresión se realiza en varias etapas alcanzando mayores niveles de compresión. Después de cada etapa de compresión el aire se enfría antes de pasar a la siguiente etapa de alta, con lo que se mejora la eficiencia del proceso.

En el caso de compresores de dos pistones, la configuración en "V" es la más habitual para el caso de compresores de pequeño tamaño, mientras que la configuración en "L" (un pistón en posición vertical y el otro en horizontal) es también un diseño muy utilizado. En este caso el pistón vertical es el de baja presión y el horizontal el de alta.

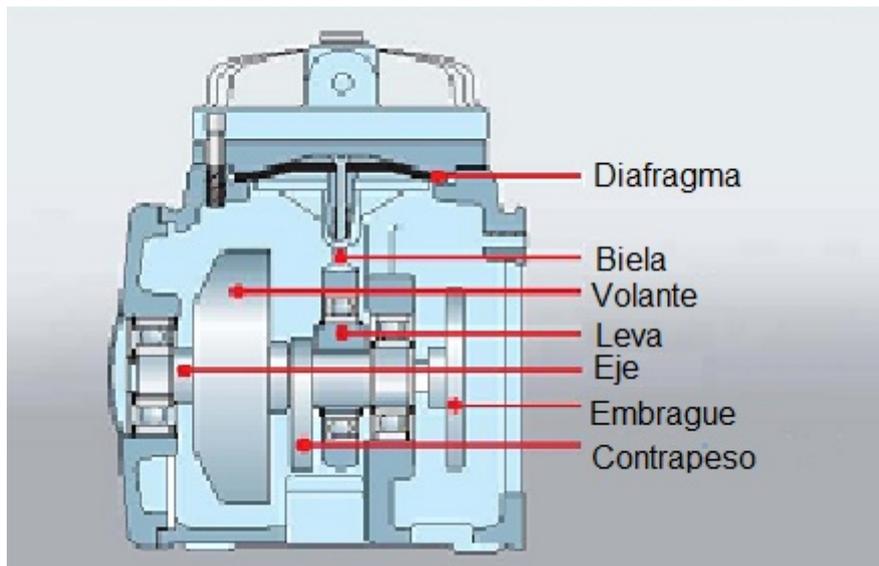


Compresores de doble pistón

Por su diseño, los compresores de aire de pistón logran producir altas presiones en volúmenes relativamente pequeños, por lo que tienen mucha aplicación en actividades domésticas e industriales ligeras.

Generalmente, como rodamientos principales del cigüeñal, se utilizan los rodamientos rígidos de bolas, mientras que para la biela, se utilizan rodamientos o cojinetes de fricción. En ambos casos, los rodamientos utilizados deben ser capaces de soportar temperaturas muy elevadas que se originan en los compresores de pistón por las elevadas relaciones de compresión que se alcanzan.

Por último, están los compresores de diafragma mecánico. Este tipo de compresores se emplean para aplicaciones de pequeños caudales y bajas presiones o también como bombas de vacío. En este caso, un cigüeñal comunica el movimiento alternativo a través de una biela al diafragma, tal como se indica en la siguiente figura.



Compresor de diafragma

- Compresores de tornillo

El compresor de tornillo es un compresor de desplazamiento que se constituye de dos rotores en forma de tornillo paralelos y que giran en sentido contrario uno del otro, quedando todo el conjunto encerrado dentro de una carcasa.



Vista interior de un compresor de tornillo

El incremento de presión en el aire se consigue gracias al movimiento rotatorio a contrasentido de los dos rotores que hace disminuir gradualmente el espacio encerrado que queda entre las hélice.



Rotores de un compresor de tornillo

La relación de presión dependerá de la longitud y paso del vástago del tornillo, así como la forma dada al difusor donde se descarga el aire. Asimismo, la relación de presión máxima estará limitada por el incremento de temperatura que se origina con la compresión de tal forma que no afecte a la alineación de los rotores. Por ello, cuando se necesite de grandes relaciones de compresión se deberá utilizar varias etapas de compresión (en cada etapa, un compresor de tornillo), intercalando equipos de refrigeración del aire a la salida de cada etapa.



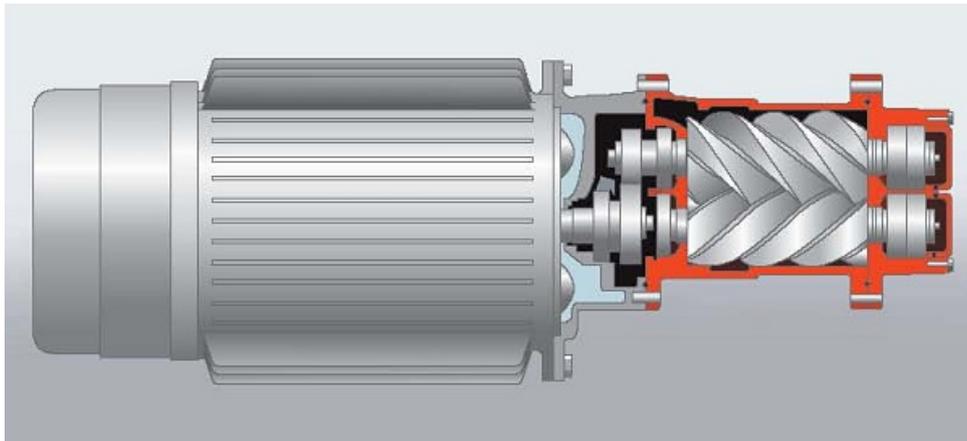
Compresor de tornillo de una etapa

El compresor de tornillo no está equipado con válvulas y no existen fuerzas mecánicas que puedan crear algún desequilibrio, por lo que los rotores pueden girar a grandes velocidades y generar grandes caudales para unas dimensiones relativamente pequeñas del compresor.

La única fuerza que se produce en este tipo de compresores es una fuerza axial a lo largo del eje de los rotores producida por la diferencia de presiones del aire entre la entrada y la salida.

Por otro lado, estos rodamientos van situados fuera de la carcasa, y como tampoco existe contacto de la carcasa con los rotores, ni entre los rotores entre sí, no se necesita sistema de lubricación en este tipo de compresores, y por lo tanto, el aire comprimido producido es libre de aceite.

No obstante, también se fabrican compresores de tornillos lubricados mediante la inyección del líquido lubricante (generalmente aceite, aunque también se puede emplear agua o polímeros) a través de las paredes de la cámara de compresión o carcasa, como se ve en la figura siguiente sombreado de rojo. Con ello se consigue reducir el incremento de temperatura que se produce con la compresión, y conseguir grandes relaciones de compresión (de hasta 14 y 17 bares) en una sola etapa, aunque a costa de perder eficiencia.



Compresor de tornillo lubricado

Los compresores de tornillo están ganando popularidad con respecto a los compresores de pistón alternativos, debido a su funcionamiento silencioso y a su suministro continuo, que se une a sus otras muchas ventajas, como puedan ser una mayor fiabilidad y eficacia.

- Compresores de paletas rotativas

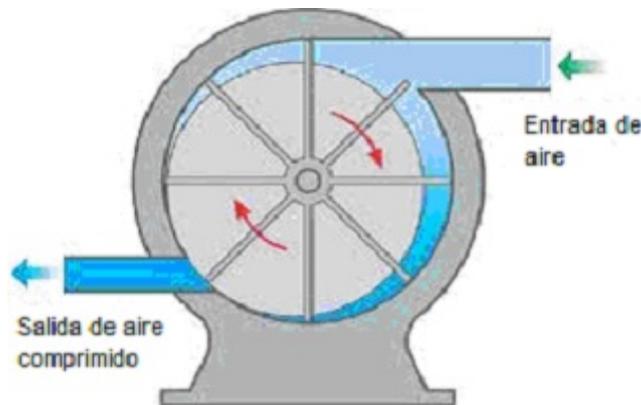
El compresor de paletas rotativas, basado en una tecnología tradicional y experimentada, se mueve a una velocidad muy baja (1450 rpm), lo que le otorga una gran fiabilidad. Son también muy silenciosos y proporcionan un caudal prácticamente constante.

Hay dos grupos de compresores de paletas rotativas, el primero lo forman los compresores de paleta en seco, los cuales van exentos de aceite pero sólo pueden operar con presiones bajas de hasta 1,5 bar. El otro grupo, el mayoritario, lo forman los compresores rotativos de paletas lubricadas, y estos ya sí pueden alcanzar presiones finales mayores, de hasta 11 bar.

Los compresores rotativos de paleta tienen generalmente un rendimiento superior a los compresores de tornillo, generalmente con una diferencia en cuanto a eficiencia de un 25% en favor del compresor de paletas.

El principio de funcionamiento es muy simple. El rotor, la única pieza en movimiento constante, dispone de una serie de ranuras con paletas deslizantes que se desplazan por su interior. Las paletas se realizan de una aleación especial de fundición, y van lubricadas en aceite como el resto de componentes, cuando son compresores lubricados.

El rotor, que está montado con cierta excentricidad dentro de la carcasa cilíndrica o estator, al girar genera una fuerza centrífuga que desplaza a las paletas de las ranuras contra las paredes de la carcasa formándose células individuales de compresión. La rotación reduce el volumen de la célula, por lo que se consigue aumentar la presión del aire contenido.



Compresor de paletas rotativas

El calor que genera la compresión se controla mediante la inyección de aceite a presión, necesario para la lubricación del rotor y las paletas.

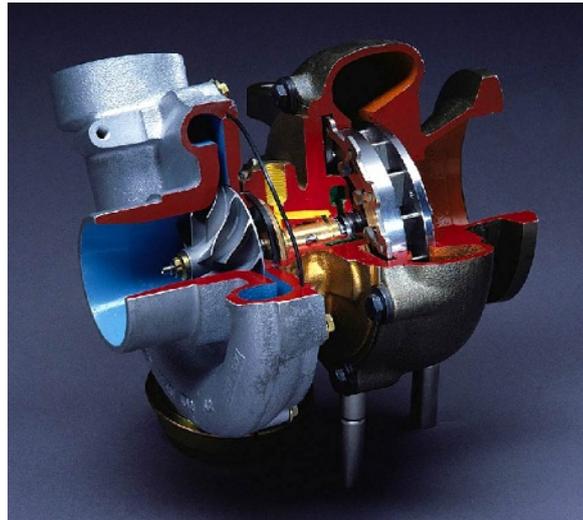
El aire a alta presión se descarga cuando las paletas en su rotación pasan por el puerto de salida. Junto al aire se arrastran restos de aceite procedentes de la lubricación que deben ser eliminados por el separador de aceite a situar aguas abajo.

Compresores dinámicos o turbocompresores:

La otra gran familia de compresores la constituyen los compresores dinámicos o turbocompresores. Los compresores dinámicos a su vez se dividen en dos grandes grupos, según la dirección de salida del flujo de aire: radiales (centrífugos) o de flujo axial. Los compresores dinámicos permiten ofrecer un flujo continuo y suelen ser compresores muy eficientes si trabajan dentro de sus condiciones de diseño, dado que al tener pocas piezas en movimiento, se reduce mucho las posibles pérdidas debido a la fricción y al calentamiento de las mismas. No obstante su rendimiento depende mucho de las condiciones exteriores, así un cambio en la temperatura de entrada del aire respecto a sus condiciones de diseño que indique la hoja de especificaciones del compresor hacen variar significativamente su eficiencia final.

- Compresores centrífugos

Son compresores dinámicos donde la descarga final del aire se realiza en sentido radial. En cada etapa de compresión en este tipo de compresores el flujo de aire entra por el centro de un rodete dotado de álabes. El rodete va montado sobre un eje que gira a gran velocidad, y debido a la fuerza centrífuga impulsa al aire hacia la periferia del rodete. Posteriormente, este aire que sale radial y a gran velocidad va a parar a la carcasa o difusor en forma de espiral donde toda la energía cinética del aire se transforma en energía potencial en forma de presión.



Compresor centrífugo

Generalmente, los compresores centrífugos constan de 2 ó 3 etapas de compresión, con refrigeración intermedia. En este tipo de máquina el régimen de giro que alcanza el eje es muy elevado (entre 15.000-100.000 rpm), por lo que los cojinetes empleados serán de altas prestaciones, generalmente cojinetes de fricción lisos y lámina de aceite para lubricación.

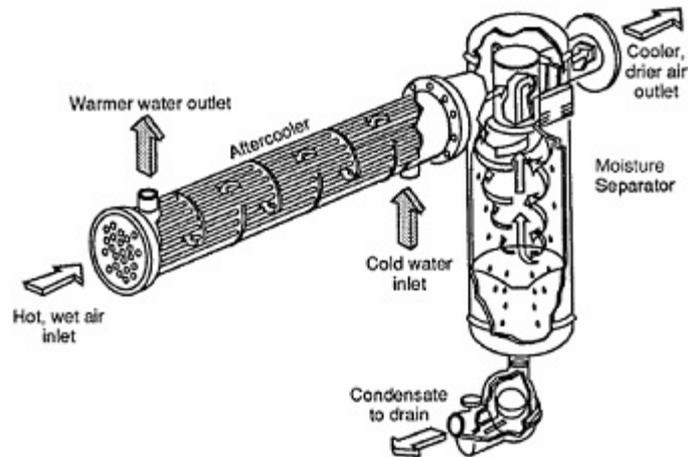
No obstante, estos compresores trabajan exentos de aceite, dado que la lubricación se limita a los cojinetes que se sitúan en los extremos del eje fuera del contacto con el flujo de aire.

[Equipo de refrigeración posterior \(Aftercooler\):](#)

El flujo de aire, una vez sale del compresor, además de salir a mayor presión, también sale a mayor temperatura (oscila según el grado de compresión entre 70 °C y los 200 °C). El aire a mayor temperatura también aumenta su capacidad de contener agua, pero conforme se vaya enfriando toda esta agua irá condensando y si no se ha extraído previamente terminará en el interior de la instalación y llegará hasta los puntos de consumo, con el riesgo que ello conlleva, no sólo en cuanto a durabilidad de la instalación y sus equipos (riesgo de oxidación), sino por el peligro de formación de plagas de microorganismos y el consiguiente riesgo de enfermedades.

Por ello, para evitar posibles condensaciones se coloca, nada más salir del compresor, un enfriador (aftercooler). El aftercooler no es más que un intercambiador de calor, que puede

funcionar bien con agua o bien con aire como fluido refrigerante. En la figura siguiente se muestra un esquema del dispositivo.



Aftercooler con deshumidificador incorporado

Justo detrás del enfriador, se coloca un deshumidificador que recoja lo antes posible el condensado producido. Este sistema ofrece una eficiencia entre el 80-90%, por lo que habrá que tener en cuenta la presencia todavía de agua en la instalación. Así, en el siguiente equipo, que suele ser el depósito de acumulación, habrá que dotarle de una válvula en su fondo para que siga drenando el agua que no se ha eliminado con el deshumidificador.

Depósito de acumulación:

En todo sistema de aire comprimido es habitual la colocación de un depósito de acumulación de aire que alimente a las unidades de consumo. En una instalación con un compresor tipo todo / nada donde no exista un sistema de regulación de su velocidad que pueda acomodar la producción de aire a las necesidades de consumo, el depósito de acumulación funciona como un depósito pulmón, que permita reducir el número de arranques del compresor para hacer frente a la demanda de aire comprimido cada vez que se produzca. Generalmente es recomendable que un compresor tenga un régimen de arranques y paradas que se sitúe entre las 5-10 veces / hora.

El volumen de acumulación del depósito vendrá determinado por la capacidad del compresor, el sistema de regulación que se disponga y del modelo de consumo que va a seguir la instalación, es decir, si se tiene un consumo regular o por el contrario va a ser irregular con largos periodos de consumo moderado y periodos cortos con picos de elevado consumo. En caso de existir varios compresores que den servicio a la misma instalación, será las características del compresor de mayor capacidad el que condicione las características del depósito.

En la siguiente figura se muestra un depósito vertical dotado de las bocas de entrada y salida de aire, boca de inspección, manómetro de medida de la presión interior, válvula de seguridad y válvula de desagüe o grifo de purga en la parte inferior del depósito.



Depósito de acumulación vertical

La válvula de seguridad estará regulada a no más de un 10% por encima de la presión de trabajo y deberá poder descargar el total del caudal generado por el compresor. Deberá contar además con un dispositivo de accionamiento manual para poder probar periódicamente su funcionamiento.

Cuando el tanque se instala en el exterior y existe peligro que la temperatura ambiente se sitúe por debajo de 0º C, el manómetro y la válvula de seguridad, para evitar problemas de congelación, se deberán instalar en el interior y disponer de tuberías que los conecte con el depósito exterior. Estas tuberías deberán tener pendiente hacia el depósito de modo que sean de auto drenaje.

En los depósitos de tamaño pequeño la inspección se realizará por medio de una simple boca bridada de 100 a 150 mm de diámetro, mientras que en los de tamaño mayores las bocas de inspección serán del tipo entrada de hombre (460 a 508 mm de diámetro).

Las tuberías para el control (regulación) deberán estar conectadas al depósito en un punto donde el aire sea lo más seco posible.

El filtro con válvula de purga permitirá drenar el agua y aceite acumulado en el fondo del depósito.

Para el cálculo del Volumen (V) del depósito de acumulación es habitual el empleo de la siguiente expresión que relaciona las condiciones de funcionamiento del compresor con el consumo de aire de la instalación:

$$T = \frac{V \times (P1 - P2)}{C * Patm}$$

Donde:

- T es el tiempo en minutos que transcurre entre arranques consecutivos del compresor, es decir, el tiempo que transcurre entre pasar de la presión máxima en el depósito (P_1) a la presión mínima (P_2) de tarado que produce el arranque del compresor. El número de arranques / hora que resulta óptimo para cada compresor es un dato que puede ser consultado en su hoja de especificaciones.
- $P_1 - P_2$ es la diferencia de presiones máxima y mínima alcanzada en el interior del depósito.
- C es el consumo de aire en condiciones normales (CN) de la instalación (m^3 /minuto).
- P_{atm} es la presión atmosférica.

Por otro lado, el depósito de acumulación va a ser un punto donde el aire irá acumulándose a la vez que enfriándose, y por lo tanto, con la segura probabilidad que se produzcan condensaciones. De esta manera, como ya se ha dicho, habrá que disponer de un drenaje en la parte inferior del depósito que evacue el agua que se vaya condensando en su interior.

Generalmente esta agua estará contaminada de aceite procedente de la lubricación del compresor, si es del tipo lubricado con aceite, por lo que no se podrá verter directamente a un desagüe sino que habrá que conducirla hacia un separador aceite-agua que extraiga la fracción de aceite contenido.

En muchas ocasiones, sobretodo en instalaciones con necesidades no muy grandes o en compresores portátiles, el depósito de acumulación va incorporado como un elemento más del compresor, como se aprecia en la figura siguiente.



Compresor con depósito integrado

Decir también que el depósito de acumulación cumple una misión amortiguador, dado que aísla el resto de la instalación de las pulsaciones en el caudal del aire producida a la salida del compresor, sobretodo de los compresores alternativos o de pistón, ofreciendo un caudal regular y uniforme, sin fluctuaciones.

Por último, recordar que los depósitos de acumulación de aire comprimido es un aparato a presión, y por lo tanto deberá cumplir con la reglamentación específica de aparatos a presión válido en cada país.

Filtros:

Como ya se ha dicho, el aire es una mezcla incolora, inodora e insípida de muchos gases, principalmente nitrógeno y oxígeno. Pero además, el aire se contamina de forma natural con partículas sólidas, como polvo, arena, hollín y cristales de sal, dependiendo del entorno y la altitud donde se encuentre la instalación. El vapor de agua es otro ingrediente natural que se puede encontrar en cantidades variables en el aire, además de restos de aceites que provengan de la lubricación del compresor.

Cuando se comprime el aire, aumenta la concentración de la humedad y de todos estos contaminantes, que si no se eliminan y permanecen en el sistema, producirán un efecto negativo sobre los equipos neumáticos, causando paradas de producción, productos defectuosos y reducción de la vida útil de los equipos, además de problemas higiénicos que pueden causar la proliferación de microorganismos por la presencia de humedad y otros contaminantes como aceites en los conductos del sistema de aire comprimido.



Filtro de aire

Resulta muy conveniente situar los filtros previos a los puntos de consumo, de manera que adecuen perfectamente su sistema de filtrado a los valores admisibles en cuanto contenido de aceite y de partículas, así como de vapor de agua antes de que el aire alcance el punto final de consumo.

-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.

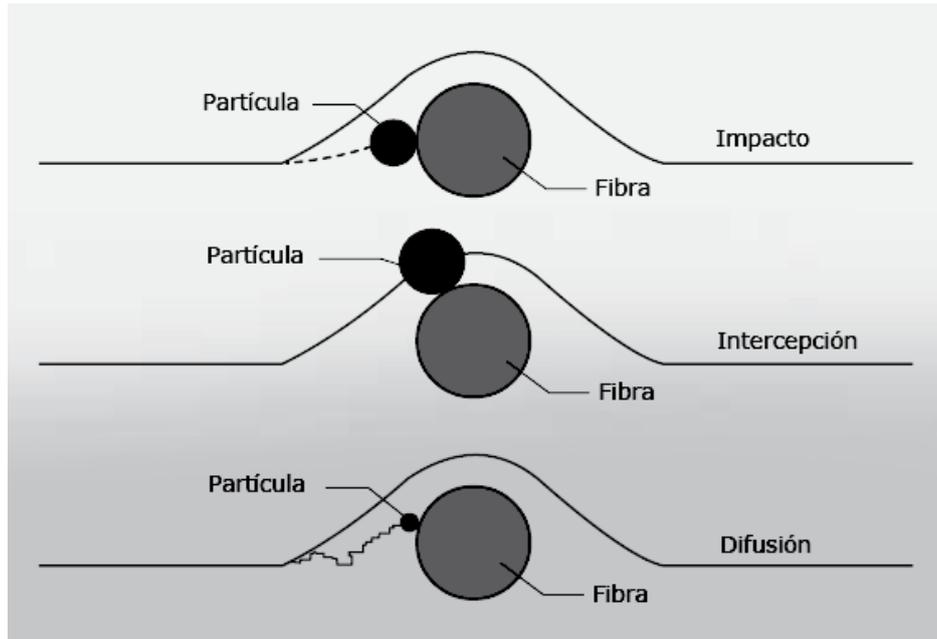
Las partículas menores de 1 mm se recogen sobre materiales fibrosos por tres mecanismos físicos: impacto inercial, intercepción y difusión.

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). 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 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.

-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.

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.

Secadores:

El contenido de humedad del aire o de un gas comprimido se expresa normalmente por su punto de rocío, PR, en °C, es decir y tal como se ha descrito anteriormente, es la temperatura a la que tendría que enfriarse el aire para que el vapor de agua contenido en él condense.

Los fabricantes de secadores para aire comprimido, para especificar la eficacia de un secador, usan la terminología del PR alcanzado con él para describir la sequedad del aire. Pueden dar el punto de rocío a la presión atmosférica (PR), o sea 760 mm Hg, o bien el referido a la presión de trabajo, denominado punto de rocío a presión (PRP). Este último es más alto, es decir PRP > PR, y es el que realmente deberá tenerse en cuenta, dado que el aire comprimido se emplea a presión, y por lo tanto, a la presión de trabajo es cuando pueden producirse condensaciones perjudiciales en las conducciones y en los sitios de consumo.

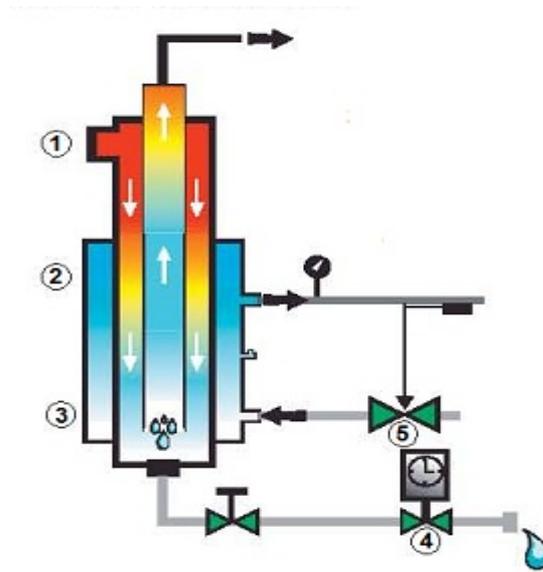
No obstante, hay muchas aplicaciones (sanitarias, equipos de laboratorio...) donde se requiere un aire de gran calidad y completamente seco. Para ello hay que someter al aire a un nuevo proceso de secado que elimine completamente el contenido de agua.

Existen varias tipologías de secadores, cada una con una complejidad y costo de instalación distinta. La variable que va a condicionar el coste y complejidad del secador necesario va a ser

el punto de rocío a presión que tenga el aire a tratar. A menor punto de rocío mayor complejidad del secador.

Básicamente existen cinco técnicas aplicables al proceso de secado del flujo de aire: mediante refrigeración con separación posterior de la humedad, aplicando sobrepresión, secado por absorción, por adsorción y secado por membrana. A continuación, se desarrolla el principio de funcionamiento de algunos de ellos:

- La técnica de secado mediante refrigeración que incluye la separación posterior del condensado obtenido o también llamado secador frigorífico, consta de un doble intercambiador que mejora la eficiencia del sistema para alcanzar la calidad de aire necesaria.



Secador frigorífico

Un intercambiador de calor tipo aire-aire (1) se utiliza para pre-refrigerar el aire caliente que sale del compresor con el flujo de aire frío que sale del secador.

Otro intercambiador tipo aire-refrigerante (2) refrigera el aire hasta la temperatura de punto de rocío a presión necesaria.

Un separador de humedad (3) recoge el agua que se vaya condensando a la vez que dispone de una válvula de drenaje (4) que evacue el condensado.

La presión o temperatura del refrigerante que condiciona la intensidad del refrigerador (2) es controlada por una válvula de expansión (5) que se gobierna automáticamente según la calidad de aire requerida.

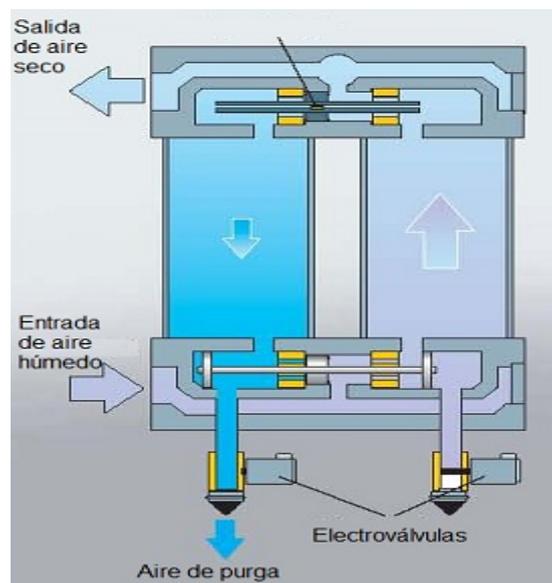
- El secado por sobrepresión es otro de los métodos aplicados para secar el flujo de aire. Es un método sencillo pero incurre en un alto costo energético, por lo que sólo es aplicable cuando se mueven caudales pequeños.

Básicamente consiste en comprimir el aire a mayor presión de la necesaria, con lo que se consigue aumentar la concentración de agua. Posteriormente se enfría la masa de aire,

condensando el agua contenida. Ahora sólo queda expandir el aire hasta la presión requerida, con lo que se consigue una calidad de aire excelente con un punto de rocío a presión más bajo.

- El secado por absorción es una tecnología poco empleada que sólo permite reducir el punto de rocío de forma limitada. Básicamente consiste en emplear un material absorbente que capture las moléculas de vapor de agua. Es un proceso químico que utiliza como material absorbente cloruro sódico o ácido sulfúrico por lo que los riesgos de corrosión con este método son elevados. Como se dijo no se utiliza mucho esta forma de secar el aire.

- La tecnología del secador por adsorción también es muy simple. Consiste en hacer pasar el aire húmedo a través de un lecho con material que sea higroscópico, es decir que tenga tendencia por absorber el agua del ambiente.



Secador de adsorción regenerado por purga

Evidentemente, con el paso del tiempo el material acabará saturándose de agua, por lo que deberá regenerarse para volver a tener la capacidad de adsorción de la humedad ambiente.

Es por ello que este tipo de secadores disponga de dos torres relleno del material higroscópico. Así mientras una torres funciona reteniendo la humedad del flujo de aire, la otra torre estará en proceso de regeneración del material higroscópico, invirtiéndose el funcionamiento de cada torre cuando la torre que está trabajando termine por saturarse.

-Sistema de purga como sustituto o complemento de los secadores:

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:

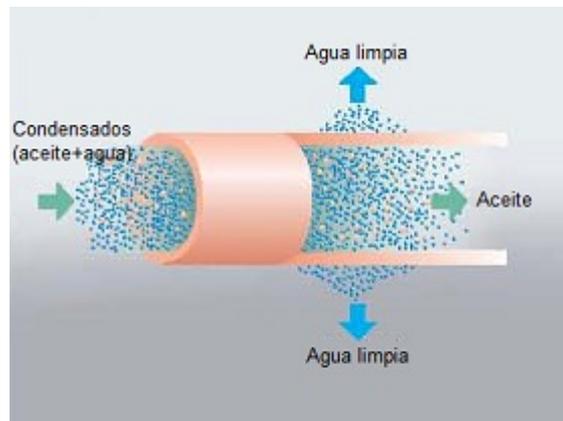
- De sensor electrónico de nivel
 - o Sistema de control inteligente que detecta y descarga condensado solocuando está presente.
 - o No producen pérdidas de aire.
 - o Son muy fiables y precisan muy bajo mantenimiento.
- Temporizados
 - o Son los más populares.
 - o Descargan mediante dos puntos programados: duración y frecuencia de descarga.
 - o Para un funcionamiento eficiente requieren de constantes reajustes de sus parámetros en función de las condiciones ambientales y de operación.
- Manuales
 - o Requieren continua intervención humana.
 - o Suelen degenerar en purga continuada con las correspondientes pérdidas de aire.
- De flotador mecánico
 - o Suelen trabajar bastante bien.
 - o Precisan de un mantenimiento regular para prevenir su bloqueo.
 - o 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.

Separadores agua / aceite:

La fracción de condensado que decante en el fondo de los depósitos de acumulación, así como la fracción separada en los filtros separadores de agua, resulta ser un efluente acuoso con contenidos en aceite, sobretodo si se utilizan compresores lubricados con aceite.

La reglamentación vigente en la mayoría de los países impide el vertido en la red pública de saneamiento de agua con contenidos en aceite, por lo que previo a su vertido, habrá que someter al agua recogida a un proceso de separación, que permita recuperar el contenido de aceite y almacenarlo de forma independiente, y poder así verter el agua limpia resultante a la red de saneamiento. El aceite separado será retirado por un gestor autorizado para el tratamiento de este tipo de residuos.

Toda esta labor la desempeña un tipo de equipos llamados separadores de aceite/agua, como pueden ser los filtros de membrana.



Filtro de membrana

El principio de funcionamiento de un filtro de membrana es muy sencillo. La estructura de constitución de la membrana es tal que deja pasar a las moléculas de pequeño tamaño (agua limpia), mientras que retiene en su interior las moléculas de mayor tamaño (aceite) que son separadas del flujo y conducidas hasta un contenedor para su almacenamiento.

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.

- 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 600mm 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 en (mm)	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150
Schedule 40	15,8	21	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	73,7	97,2	122,3	146,4
Schedule 160	11,7	15,6	20,7	29,5	34	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	107,5	131,7	159,3

Tabla 4

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.,

5º-DIMENSIONADO Y PUESTA EN MARCHA DE LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO:

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 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.

Para realizar un buen diseño de un sistema de aire comprimido, éste debe cumplir con tres objetivos básicos: que la pérdida de carga sea mínima, disminuir las pérdidas o fugas en el sistema, y realizar un diseño tal que se facilite el drenaje del agua que se condense en el interior del circuito.

La red de distribución de aire comprimido deberá dimensionarse de tal forma que la caída de presión máxima entre la salida del compresor y el punto de consumo más lejano sea como máximo de 0,1 bar. A esta caída de presión habría que añadirle las pérdidas finales originadas en la manguera flexible de conexión y otros conectores con el instrumento o utensilio que constituye el punto de consumo.

La mejor forma de implantar la línea de distribución es formando un anillo cerrado alrededor de la zona de consumo de aire, del que cuelgan los ramales hasta los puntos de consumo final. Con ello se consigue una alimentación uniforme dado que cada punto recibe el aire desde dos direcciones, aunque los consumos sean intermitentes.

Por último, decir que en todo diseño de un sistema de aire comprimido se recomienda seguir la siguiente secuencia lógica de etapas:

- 1.- Identificar los accesorios, herramientas y equipos consumidores de aire comprimido, señalando su localización en planta y determinando las condiciones de su consumo, tales

como: caudal de aire y presión de suministro o de trabajo del equipo, máximo nivel de humedad admitido en el aire, de partículas y de contenido de aceite;

2.- Establecer el porcentaje de tiempo de funcionamiento de cada consumidor y el número de consumidores que pueden trabajar de forma simultánea en cada línea de distribución y en la línea principal;

3.- Estimar las posibles pérdidas por fugas, incorporándolo en el cálculo;

4.- Realizar el cálculo de la caída de presión máxima para cada punto final de consumo. El mayor valor obtenido será el que condicionará las prestaciones del compresor;

5.- Selección de los restantes elementos del sistema (compresor, depósito, equipos de tratamiento, etc.) y diseño final del piping de la red.

5.1-ESTIMACIÓN DE CONSUMOS:

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.

Como nota extraída de la experiencia, decir que instalaciones bien conservadas presentan normalmente fugas que rondan entre el 2 y el 5%. Instalaciones con varios años de servicio

pueden llegar a tener fugas del orden del 10%. Si además, las condiciones de mantenimiento no son del todo correctas, éstas pueden llegar a alcanzar valores del 25%.

Por otro lado, es habitual colocar en los puntos finales de consumo elementos como filtros y reguladores de presión que adecuen las características del aire a las especificaciones del equipo.



Regulador de presión y filtro

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 más 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.

5.2-CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA:

Toda la presión a la salida del compresor no se puede utilizar, dado que debido al rozamiento del aire con las paredes de la tubería por donde circula hasta llegar a los puntos de consumo, más los efectos de estrangulamientos que se originan en las válvulas de paso, los cambios de dirección en el flujo en los codos, todo ello repercute en pérdidas a través de un aumento en la temperatura del aire que se transforma finalmente en una pérdida de presión estática en el flujo.

Como ya se apuntó anteriormente, toda red de distribución de aire comprimido debe dimensionarse de tal forma que la caída de presión máxima entre la salida del compresor y el punto de consumo más lejano sea como máximo de 0,1 bar. En la siguiente tabla se indican los valores recomendados de pérdida de carga en cada zona de una instalación fija de aire comprimido:

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	0,01 bar

Tabla 5. Distribución de caídas de presión en instalación de tuberías fijas

Existe una formulación matemática, la ecuación de Darcy-Weisbach, que permite calcular la pérdida de carga en un tramo longitud de tubería mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = f \times \frac{L \times V^2}{D \times 2 \times g}$$

Donde:

Δp es la pérdida de carga medida según la altura manométrica (m.c.a.)

L es la longitud de tramo de la tubería (m)

D es el diámetro interior de la tubería (m)

v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)

g es la aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

f es el es el factor de fricción de Darcy-Weisbach.

De la anterior expresión todos los parámetros son conocidos salvo el factor de fricción (f). En efecto, la velocidad del aire por la tubería (v) está relacionada con el caudal o flujo de aire (Q), que es un dato conocido proveniente del consumo necesario de cada punto de suministro.

En efecto:

$$Q = v \cdot A$$

Donde:

Q es el caudal volumétrico o flujo de aire (m³/s)

v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)

A es el área de la sección interna de la tubería ($\pi \cdot D^2 / 4$) (m²)

En las instalaciones de aire comprimido la velocidad máxima recomendada para la circulación del aire por las tuberías está entre los 5-10 m/s, por lo que conocido el caudal (Q) necesario para el consumo y tomando una velocidad de circulación en ese intervalo, se obtiene de la expresión anterior el diámetro interior de la tubería (D). Por lo tanto es el factor de fricción (f), la gran incógnita a calcular.

El factor de fricción (f), es un parámetro adimensional que depende del número de Reynolds (R_e) del fluido (en este caso, del aire) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r)

$$f = f(R_e, \epsilon_r)$$

donde el número de Reynolds (R_e) viene expresado por la siguiente formulación:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde:

ρ la densidad del fluido, en este caso del aire ($\rho_{aire} = 1,18 \text{ kg/m}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$)

v es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s)

D es el diámetro interior de la tubería (m)

μ es viscosidad dinámica del fluido, en este caso del aire ($\mu_{aire} = 1,76 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$)

Por otro lado, la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r) viene dada en función de la rugosidad absoluta (K) del material del que está fabricada la tubería y de su diámetro interior (D) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\epsilon_r = \frac{k}{D}$$

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES

Material	K (mm)	Material	K (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Tabla 6. Valores de rugosidad absoluta para distintos materiales

Por otro lado, en el transporte de fluidos por el interior de tuberías, y el aire es un fluido, existen dos régimen: laminar y turbulento. Para cada fluido, y para una sección de tubería, a una temperatura determinada, existe una velocidad crítica (v_c) por debajo de la cual el régimen es laminar. Este valor crítico que marca la transición entre los dos regímenes, el laminar y el turbulento, se corresponde con un $Re = 2300$, aunque en la práctica, entre 2000 y 4000 la situación es bastante imprecisa. Por lo tanto, en función del valor del número de Reynolds (Re) se tiene que:

- $Re < 2000$: Régimen laminar.
- $2000 < Re < 4000$: Zona crítica o de transición.

- $R_e > 4000$: Régimen turbulento.

Este concepto es importante conocerlo, porque la expresión para calcular el factor de fricción (f) es distinta según si el régimen es laminar o turbulento. Así se tiene que:

- **Régimen laminar**

En este caso el factor de fricción (f) depende únicamente del número de Reynolds a través de la ecuación de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Expresión que resulta sencilla de aplicar para calcular el factor de fricción (f) en función del Reynolds (R_e).

- **Régimen turbulento**

Para el régimen turbulento este cálculo ya no es tan inmediato dado que el factor de fricción (f) depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería. En este caso existen diversas formulaciones que pueden ser utilizadas para el cálculo del factor de fricción:

Ecuación de Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \times \log_{10} \left(\frac{K/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \times \sqrt{\lambda}} \right)$$

Y otras como la ecuación de Barr, la ecuación de Miller o la ecuación de Haaland.

Afortunadamente, además de estas expresiones existen representaciones gráficas y ábacos empíricos que nos permiten calcular cómodamente el factor de fricción (f). Uno de ellos es el Diagrama de Moody que es la representación gráfica en escala doblemente logarítmica del factor de fricción (f) en función del número de Reynolds (R_e) y de la rugosidad relativa de la tubería (K/D), según se representa en la siguiente figura:

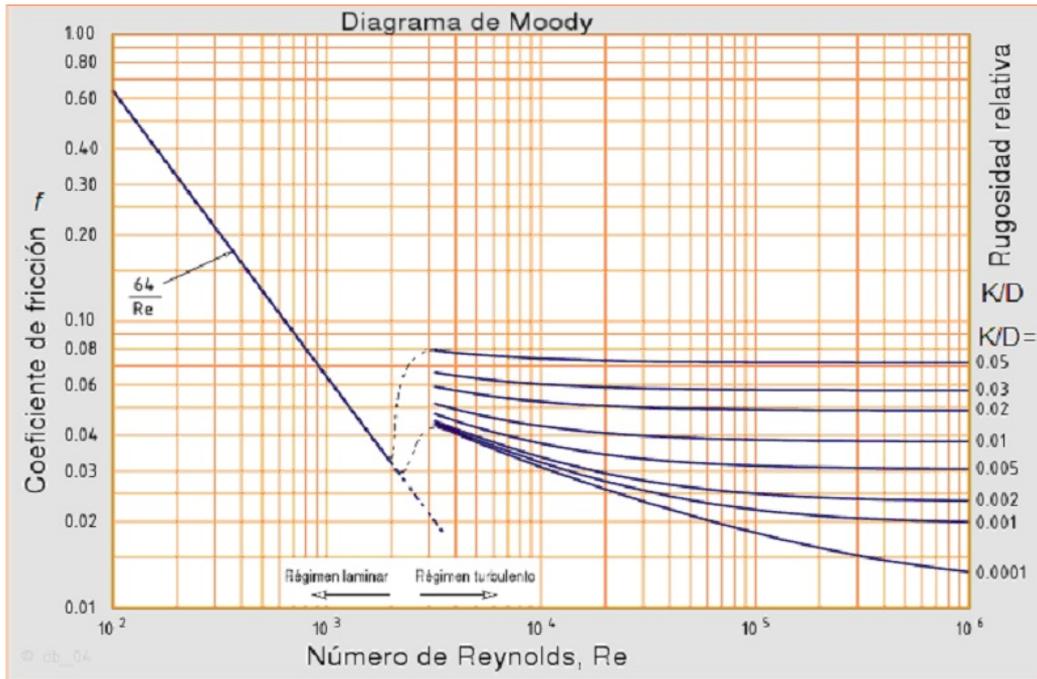
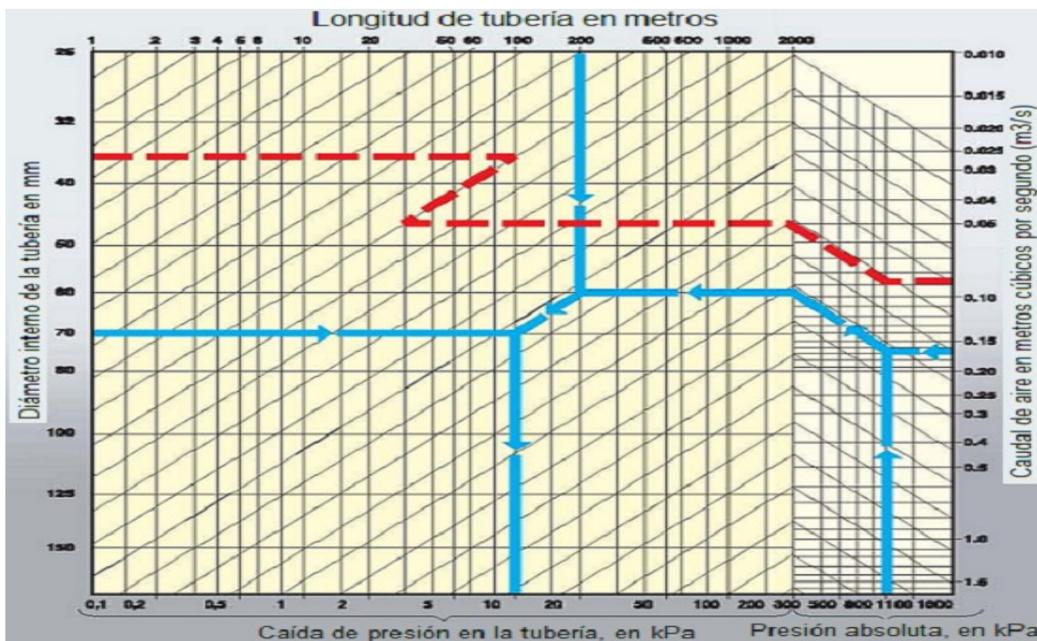


Diagrama de Moody

No obstante, existen diagramas empíricos, que suministran la mayoría de casas comerciales, y que permiten obtener ya directamente la caída de presión en tramos rectos de tuberías en función de la longitud de tubería considerada, su diámetro interior, el caudal de aire que circula y su presión, como se demuestra en el siguiente diagrama:

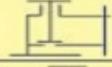
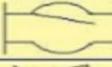
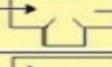
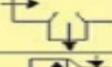
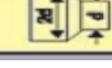


Caída de presión en tubería recta

Nótese que 1 bar = 100 kPa

Así pues, la ecuación de Darcy-Weisbach proporciona, como ya se vio, la expresión para calcular la pérdida de carga en cada tramo recto de tubería. Para calcular la pérdida de carga en otras situaciones (codos, derivaciones en T, bifurcaciones, reducciones, válvulas...) se sustituye cada accesorio de estos por unas longitudes de tubería equivalente, para posteriormente calcular su pérdida de carga como si se tratara de tramos rectos de tubería.

A continuación se muestra una serie de tablas donde se incluyen las longitudes de tubería equivalente para cada accesorio:

Longitud equivalente de tubería en metros											
Componentes	Diámetro interior de tubería en mm (d)										
	25	40	50	80	100	125	200	250	300	400	
Válvula de bola abierta 100% 	0.3 5	0.5 8	0.6 10	1.0 16	1.3 20	1.6 25	1.9 30	2.6 40	3.2 50	3.9 60	5.2 80
Válv. diafragma abierta 100% 	1.5	2.5	3.0	4.5	6	8	10	-	-	-	-
Válv. angular abierta 100% 	4	6	7	12	15	18	22	30	36	-	-
Válvula de globo 	7.5	12	15	24	30	36	45	60	-	-	-
Válvula antirretorno de clapeta 	2.0	3.2	4.0	6.4	8.0	10	12	16	20	24	32
Codo R=2d 	0.3	0.5	0.6	1.0	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.6	4.8
Codo R=d 	0.4	0.6	0.8	1.3	1.6	2.0	2.4	3.2	4.0	4.8	6.4
Ángulo 90° 	1.5	2.4	3.0	4.5	6.0	7.5	9	12	15	18	24
T, salida en línea 	0.3	0.4	1.0	1.6	2.0	2.5	3	4	5	6	8
T, salida angular 	1.5	2.4	3.0	4.8	6.0	7.5	9	12	15	18	24
Reductor 	0.5	0.7	1.0	2.0	2.6	3.1	3.6	4.8	6.0	7.2	9.8

Longitudes equivalentes de accesorios

5.3-DIMENSIONADO DE LA RED DE TUBERÍAS:

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 unsecador/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.

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.

Las tuberías deben estar ampliamente dimensionadas, preparando próximas ampliaciones. Desde el punto de vista de la explotación, no existe ningún riesgo en que la tubería quede sobredimensionada; la caída de presión será menor y la tubería intervendrá como depósito de aire.

Para el cálculo del diámetro, se basará en la siguiente fórmula, obtenida del fabricante.

$$D = \sqrt[5]{\frac{1,6 \times 10^3 \times L \times Q^{1,85}}{P \times \Delta P}}$$

Q: caudal en m³/s

P: Presión en Pa.

ΔP : Caída de presión que se considerará 10.000 Pa.

L: Longitud en m

La pérdida de presión no debe sobrepasar un 2% de la presión de trabajo. La caída de presión en un tubo recto se calcula por la fórmula:

$$\Delta P = \frac{\beta \times v^2 \times L}{R \times T \times D}$$

ΔP = Caída de presión en atm o bar.

P = presión en bar.

R= constante del gas, equivalente a 29,27 para el aire.

T= temperatura absoluta (t+273).

D= diámetro de la tubería en mm.

L= longitud de la tubería en m.

β =Índice de resistencia, grado medio de rugosidad, variable con la cantidad suministrada G.

G = cantidad de aire suministrado en Kg/h = Q (m³/min)1,3·60

V= velocidad del aire en m/s.

La velocidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q \times 1000}{60 \times (P + 1) \times S_{tubo}}$$

S= sección del tubo en cm².

Q: caudal en m³/s.

El cálculo de las longitudes equivalentes consiste en la sustitución de cada uno de los accesorios presentes en la instalación tales como codos, válvulas, etc. por la longitud ficticia de un tramo recto. Es necesario conocer las pérdidas que se producen en los accesorios, esto se realiza añadiendo un suplemento de longitud a la tubería que compense la pérdida ocasionada por dichos elementos.

Primero se obtendrá G, para continuación entrar en la tabla y obtener β.

G	β	G	β	G	β	G	β
10	2,03	100	1,45	1000	1,03	10000	0,73
15	1,92	150	1,36	1500	0,9	15000	0,69
25	1,78	250	1,26	2500	0,89	25000	0,64
40	1,66	400	1,18	4000	0,84	50000	0,555
65	1,54	500	1,16	5000	0,78	100000	0,52

Tabla 7.

Generalmente habrán unas condiciones de diseño como una caída de presión inferior a 0,1 Bar, o una velocidad inferior a 8 o 15 m/s según el tipo de tubería.

Se sustituirán las expresiones de la caída de presión y la velocidad y en la fórmula del cálculo del diámetro y se despejará éste de dicha expresión siendo la única incógnita. El diámetro de la tubería deberá cumplir con las condiciones impuestas por la instalación, en casa de que no las cumpliese se debería aumentar el diámetro.

5.4-CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE FUGAS:

El parámetro que nos indica el estado de nuestra instalación con respecto a las fugas, es el coeficiente de fugas, que nos relaciona la variación real de la presión con la teórica supuesta a partir de los datos de los componentes de los fabricantes. Si nuestra instalación funciona y está bien calibrada el coeficiente de fugas estará entorno a 1, siendo la variación de presión real y teórica igual. Por el contrario, cuanto mayor sea el coeficiente de fugas, mayor será la cantidad de fugas en nuestra instalación. El coeficiente de fugas es un término adimensional.

$$\text{Coef. Fugas} = \frac{\Delta P_{\text{real}}(\text{bar})}{\Delta P_{\text{teórica}}(\text{bar})} = \frac{P * D - \bar{P}_{ki}}{\Delta P_{\text{fric}} + \Delta P_{\text{enf}} + \Delta P_{\text{filtros}}} \cong 1$$

Siendo cada uno de los siguientes elementos:

ΔP_{real} : la variación en bares entre la presión del depósito y la presión media en los puntos de consumo medido en bares.

$\Delta P_{\text{teórica}}$: es la suma de las pérdidas de presión debido a la fricción en las tuberías y la disminución de presión del aire al pasar por el enfriador y los filtros medido todo ello en bares.

PD: es la presión en el depósito de acumulación o calderín en bares..

\bar{P}_{ki} : es el valor estadístico del cociente entre el sumatorio del producto de caudal por presión en la salida de cada punto de consumo entre el sumatorio de caudales en todas los puntos de consumo.

$$\bar{P}_{ki} = \frac{\sum P_{ki} * Q_{ki}}{\sum Q_{ki}} \text{ en bares.}$$

ΔP_{fric} : son las pérdidas de presión debido a la fricción que se produce entre el aire y las paredes de las tuberías. Se mide en bares.

ΔP_{enf} : variación de la presión entre la entrada y la salida del enfriador. Se mide en bares.

$$\Delta P_{\text{enfriador}} = \frac{(P_{\text{entrada}} - P_{\text{salida}})}{P_{\text{entrada}}} \times 100$$

ΔP_{filtro} : variación de la presión entre la entrada y la salida de un filtro, habrá que tener en cuenta todos los filtros de la instalación. Se medirá en bares.

$$\Delta P_{\text{filtro}} = \frac{(P_{\text{entrada}} - P_{\text{salida}})}{P_{\text{entrada}}} \times 100$$

Según el fabricante se producirá una caída de presión en el aire al atravesar el filtro; cuando la caída sea superior a anunciada por el fabricante será el momento de cambiar el filtro.

Para la detección de las fugas habrá que hacer un análisis detallado de la instalación, lo cual requerirá el cese de la actividad durante el tiempo que dure la prueba. Se analizará una salida con el resto de salidas cerradas y se medirá la caída de presión; se repetirá el proceso con todas las salidas, y de esta forma podremos acotar y encontrar la zona donde se encuentra la fuga para poder repararla.

$$\Delta P_i = PD - P_{ki}$$

5.5-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.

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 más 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.

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 más 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.

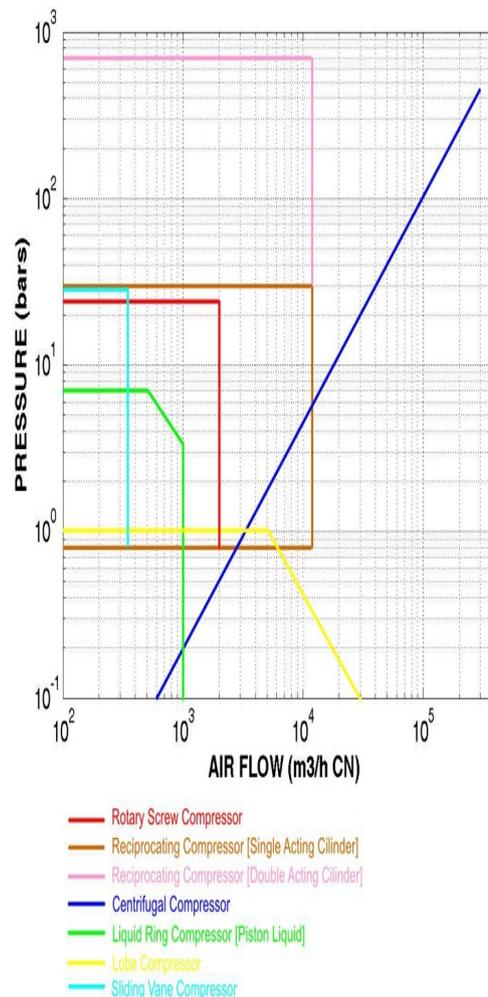
La regulación del caudal del compresor también produce variaciones de la presión y, por lo tanto, también debe ser incluida en el diseño. Tomando la presión requerida por la aplicación del consumidor final y sumándole todas las caídas de presión entre el compresor y el punto de consumo, se obtiene la presión necesaria de producción en el compresor.

Por tanto para la selección del tipo de compresor más idóneo a la instalación que se proyecte es necesario de disponer de dos datos básicos como punto de partida a la hora de iniciar su selección:

- Consumo o caudal de aire
- Presión máxima de trabajo

Con estos primeros datos se suele emplear ábacos o tablas que recomiendan la tipología de compresor más idónea según el rango de trabajo donde se encuentre la instalación a proyectar.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de gráfica que se puede utilizar para seleccionar el tipo de compresor más conveniente según los valores de caudal y presión necesarios:



Límites de uso de compresores

No obstante, el resultado anterior debe suponer el punto de partida, dado que no sólo el consumo o el rango de presiones que debe dar el compresor va a condicionar su elección, sino que hay otros factores que dependiendo del lugar donde se instale (zona residencial, zona industrial...) o el tipo de aplicación (automoción, instalación fija...) decantará la elección en uno u otro tipo que por su construcción mejor se adapte al entorno.

Así, a la hora de seleccionar el tipo de compresor habrá que tener en cuenta los siguientes condicionantes y comprobar que están incluidos en la hoja de especificaciones técnicas del compresor que se seleccione:

- Factores medioambientales, tales como si es aplicable alguna limitación de emisión sonora.
- Altitud, dado que algunos tipos de compresores los cambios de altura o de temperatura del aire de aspiración afectan significativamente a su rendimiento.
- Determinar el rango de funcionamiento, frecuencia de arranques/paradas o modalidad de trabajo en continuo.

$$\text{Factor de uso} = \frac{\text{Tiempo en carga}}{\text{Tiempo total}} \times 100$$

A mayor factor de uso, mejor dimensionado de nuestro sistema, lo normal es que el compresor trabaje entre un 40 o 60%. La decisión sobre este factor es muy importante ya que podríamos quedarnos sin presión cuando estén trabajando todos los elementos de consumo.

5.6-DIMENSIONADO DEL DEPÓSITO:

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:

$$V = \frac{0,25 \times q_c \times P_1 \times T_0}{f_{max} \times (P_v - P_l) \times t_1}$$

Donde:

V = volumen de aire del receptor [l]

q_c = capacidad del compresor [l/s]

p₁ = presión de aspiración del compresor [bar(a)]

T₁ = temperatura del aire del compresor [K]

T₀ = 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 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:

$$V = \frac{q \times t}{p_1 - p_2} = \frac{L}{p_1 - p_2}$$

Donde:

V = volumen de aire del receptor [l]

q = caudal de aire durante la fase de llenado [l/s]

t = tiempo de llenado [s]

p₁ = presión normal de trabajo en la red [bar]

p₂ = 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.

5.7-DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO:

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:

$$f_3 = f_1 - f_2$$

Siendo:

$$f2 = \frac{hsac \times Q}{100 \times f1}$$

$$f1 = \frac{Hr \times hsa \times Q}{100}$$

Donde:

f3 = caudal de condensación de agua [g/s]

f2 = caudal de agua en el aire antes de condensar [g/s]

f1 = caudal de agua remanente en el aire después de condensar [g/s]

Q = caudal de aire del compresor [l/s]

Hr = humedad relativa del aire aspirado [%]

hsaa = humedad de saturación del aire aspirado [g/l]

hsac = 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.

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.

-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.

Dimensionado del sistema de refrigeración:

Compresores refrigerados por agua:

La mayoría del aire comprimido se enfría mediante unintercooler 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)
- Sistema cerrado de recirculación de agua (que incluye un intercambiador de calor externo).

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 desecha 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.

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.

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.

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.

5.8-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 “fullyintegratedsystems” 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.

5.9-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 plantacerca 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.

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.

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.

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:

$$qv = \frac{Pv}{1,21 \times \Delta T}$$

Dónde:

qV = caudal de aire de ventilación [m³/s]

PV = caudal calorífico [kW]

ΔT = incremento permitido de temperatura [$^{\circ}C$]

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.

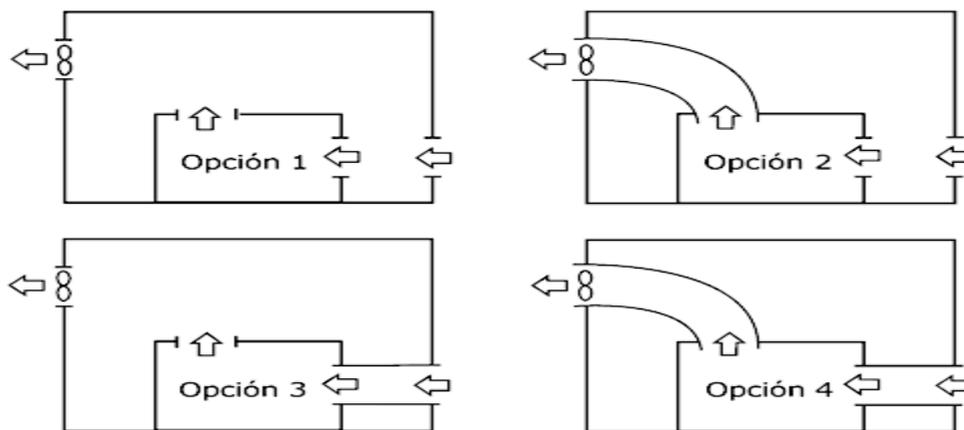
El aire de ventilación se debe de tomar desde el exterior, preferentemente sin usar conductos largos. Por otra parte, la aspiración debe ser colocada lo más bajo posible, pero sin correr el riesgo de que pueda ser obstruida por la nieve durante el invierno.

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 $^{\circ}C$ el incremento de la temperatura en la sala de compresores. Lo más adecuado es realizar un control simple de la ventilación mediante un termostato.

CAPÍTULO III: MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.

En el tercer capítulo de este proyecto trataremos sobre la importancia de las medidas de eficiencia energética, cuales son, que ventajas tienen y como nos pueden ahorrar una gran cantidad de dinero.

6º-COSTES Y OPORTUNIDADES DE AHORRO EN LAS INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO:

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.

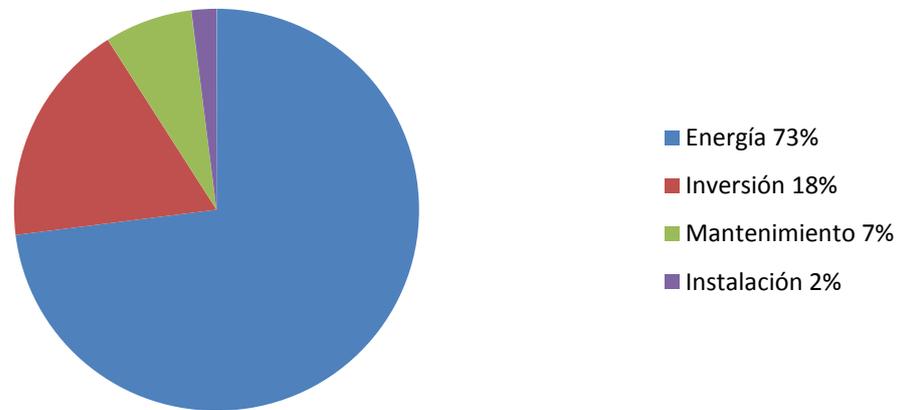
Es preciso analizar con cuidado los requisitos de las aplicaciones con objeto de seleccionar los equipos de regulación más adecuados a fin de obtener los mejores resultados. Si solo una pequeña cantidad de aire comprimido es necesario durante la noche y fines de semana, puede ser adecuado pensar en la 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.

Costes de una instalación de aire comprimido a lo largo de 10 años de vida útil



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.

6.1-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.

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.

-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:

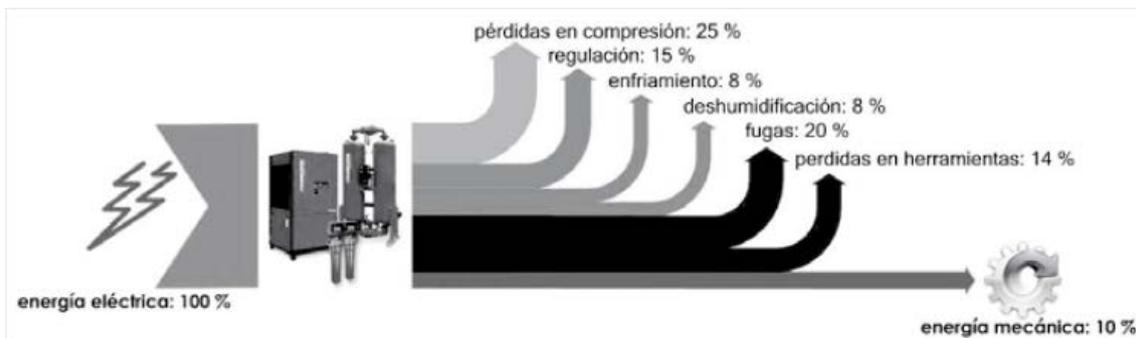
- Aire comprimido limpio, seco y estable.
- Aire comprimido entregado a la presión adecuada.
- Aire comprimido con un coste razonable.

Si la demanda se gestiona adecuadamente significa:

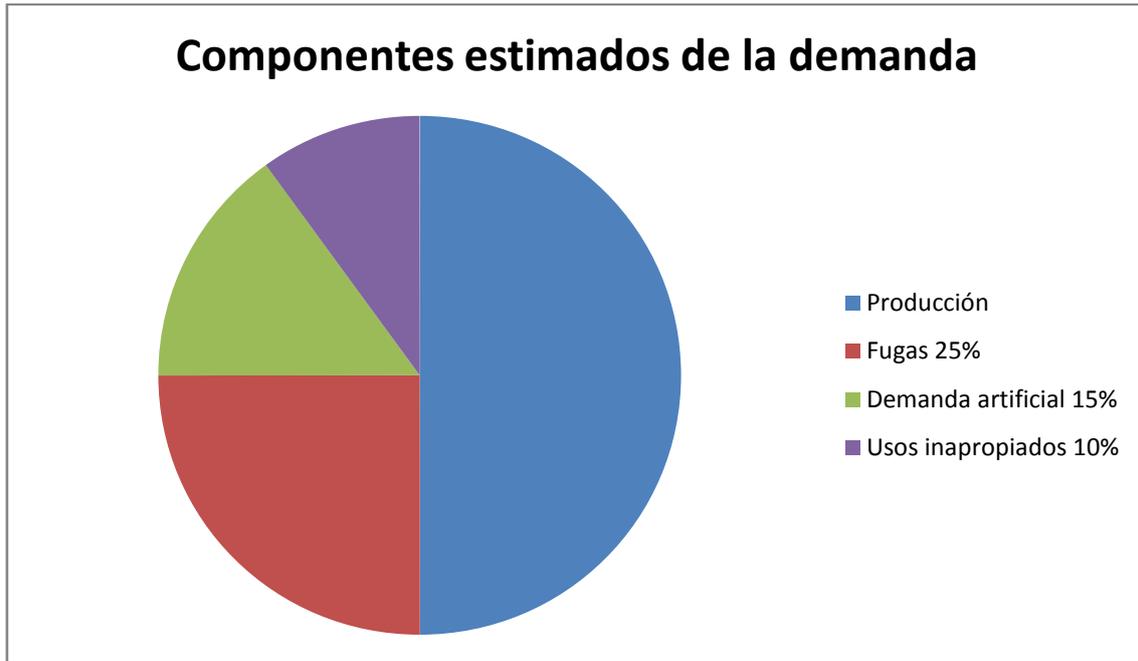
- Minimizar las pérdidas de aire.
- Usar aire comprimido únicamente en aplicaciones apropiadas.

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.



6.2-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:

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

Tabla 9.

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:

$$Fuga(\%) = \frac{T \times 100}{(T + t)}$$

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 (P1). Se detiene el sistema y se mide entonces el tiempo (t) que tarda el sistema en bajar a una presión más baja (P2), 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:

$$Fuga [l/min FAD] = \left(\frac{V \times (P1 - P2)}{t \times 1,013} \right) \times 1,25$$

Donde:

P1-P2 = 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.

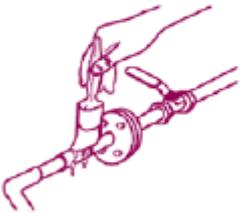
Por otra parte, las fugas de aire comprimido representan un problema de seguridad debido a factores tales como el ruido o el arrastre a gran velocidad de partículas en el ambiente. Además, tienen el agravante de interrumpir potencialmente la producción debido a fallos en el equipo y originar costes adicionales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

- Fluctuaciones de la presión del sistema. Esto puede hacer que las herramientas de aire y otros equipos operados con aire:
 - o Funcionen con menos eficiencia y puedan afectar o detener la producción.
 - o 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.
 - o 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:

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.

Las fugas en una instalación por pequeñas que parezcan a lo largo del periodo de funcionamiento de la instalación pueden acarrear una suma importante de dinero que se podría haber ahorrado. La forma más eficaz de calcular el precio del caudal de aire es mediante la relación de lo que cuesta el kWh con relación a los metros cúbicos que producimos. Para ello se usará un analizador de redes que nos proporcionará la energía gastada en un periodo de tiempo, caudalímetros en los puntos de consumo nos indicarán el gasto de aire en ese periodo de tiempo.

$$\text{KWh/m}^3 = \left[\frac{\text{KWh}}{V(\text{m}^3)} \right] (\text{mes}) \text{ / Toda mejora irá encaminada a hacer menor la relación Euro/m}^3.$$

$$\text{Euro/m}^3 = \text{Kwh/m} \times \text{Precio kw} (\text{€m}^3)$$

El caudal perdido será igual a la diferencia entre el caudal comprimido por el compresor menos el sumatorio de todos los caudales en los puntos de consumo.

$$\text{Caudal perdido (t)} = (Q_{\text{entrada}} - \sum Q_{\text{salida en puntos de consumo}})$$

El dinero perdido será el producto de este caudal perdido (medido en m^3) por el precio que cuesta un m^3 producido.

$$\text{Euros}(t) = \text{Caudal perdido}(t) \times T(t) \times \text{Euro/m}^3$$

7º-MEDIDAS DE EFICIENCIA ENERGÉTICAS:

7.1-FUGAS ASOCIADAS A LA PURGA DE AGUA EN EL SISTEMA:

Como hemos visto, 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

Tabla 10.

(*) 1 cfm=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 la 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.

7.2-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 más 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.

7.3-RECUPERACIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA:

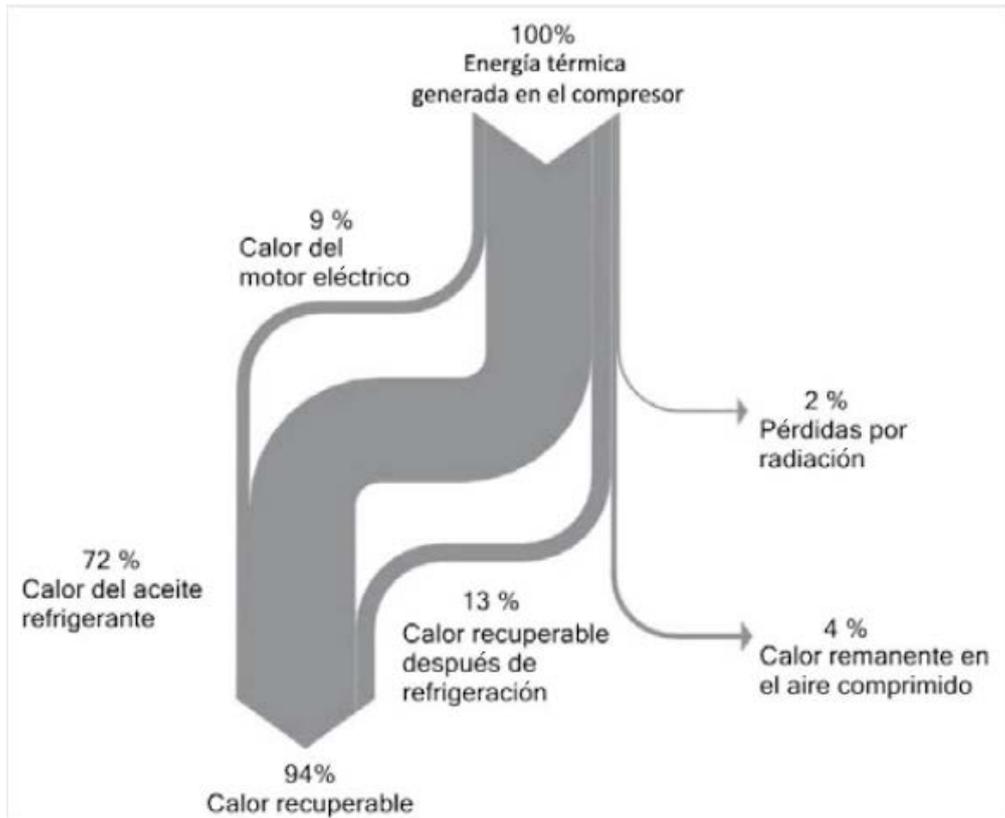
Se pueden obtener ahorros significativos mediante la recuperación de calor de los compresores.

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% permanecen 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.



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.

Empleo del calor recuperado:

Típicos usos para calentamiento de aire incluyen:

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

Fig. 24 Diagrama de Sankey de flujo térmico en un compresor

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.

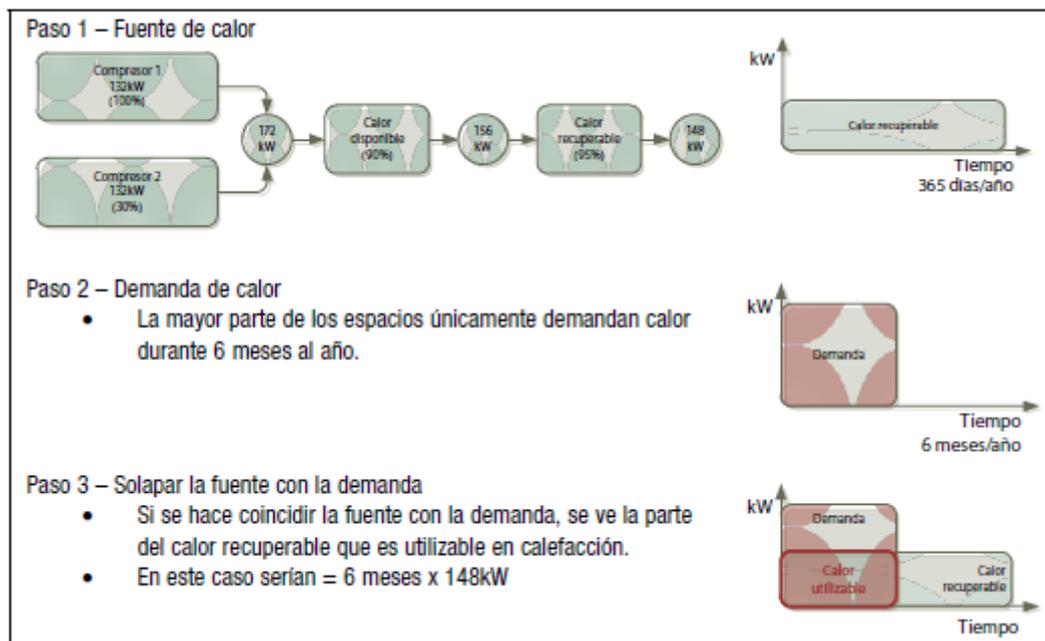
Factores a considerar:

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. 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.

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.

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.

-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.

7.4-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.

7.5-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.

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.

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.

7.6-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.

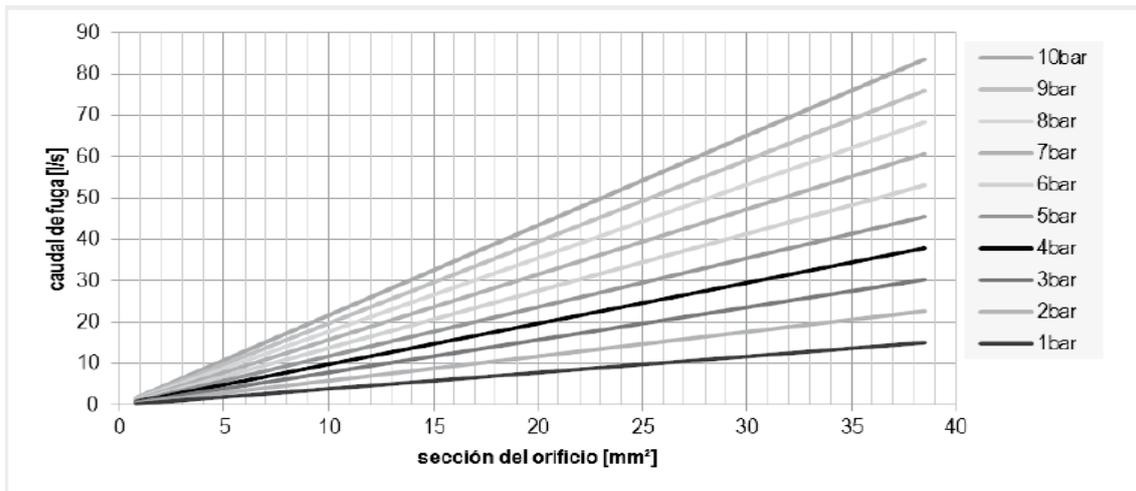
7.7-CONTROL DE LA DEMANDA ARTIFICIAL:

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.

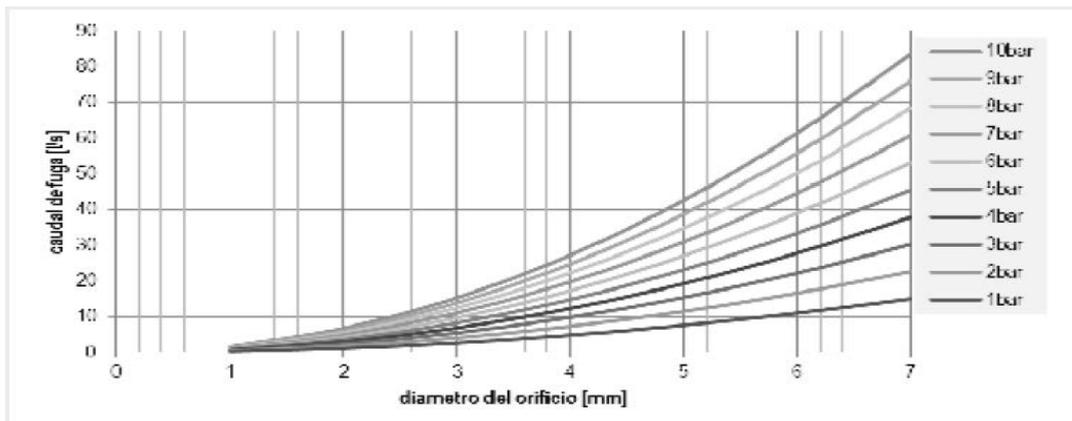
Es común escuchar la frase: “sube la presión que necesito más aire”, y conforme a las leyes de la física, en realidad lo que ocurre es que al subir la presión el compresor entrega más aire y todos los usuarios, incluidas las fugas, consumen más aire.

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:

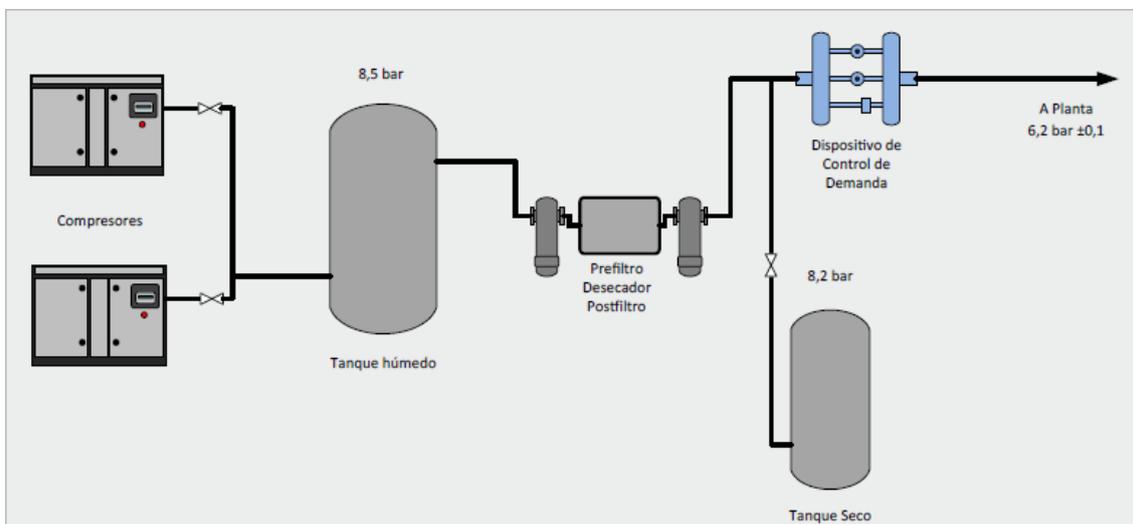


Por ejemplo: si se aplican 7bar(g) a un orificio de \varnothing 4mm, el consumo de aire en ese orificio es de 19,86 l/s., si se baja la presión a 5bar(g), el consumo en el mismo orificio es tan solo 14,89 l/s, es decir, a 7bar(g) este usuario requiere un 33,4% más de volumen de aire para operar. Al presurizar 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.



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.

7.8-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.

7.9-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 conexionar equipos para la recuperación del calor residual que generan.

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:

$$\text{Ahorrando anualmente (€)} = W \times \frac{P}{\epsilon}$$

Donde:

TR = periodo de demanda de energía recuperada [h/año]

K1 = periodo de trabajo en carga del compresor [h/año]

K2 = periodo de trabajo en descarga del compresor [h/año]

Q1 = potencia refrigerante disponible en carga [kW]

Q2 = potencia refrigerante disponible en descarga [kW]

ep = 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.

- 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.

Por último quedaría comentar la medida de eficiencia energética sobre las ventajas que ofrece un sistema de control informático sobre la instalación, pero esta medida será considerada a parte.

CAPÍTULO IV: SISTEMA AGROMÓTICO PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN INSTALACIONES DE AIRE COMPRIMIDO.

En este capítulo nos centraremos en concreto en lo que es la monitorización y control de un sistema a través de un sistema SCADA, sus ventajas y las posibilidades que permite dicho sistema para la obtención de una industria más eficiente. También se presentará un ejemplo sobre cómo se ha implementado uno de estos sistemas, programado en el programa LabView en una industria agroalimentaria, así como las conclusiones obtenidas de dicho proyecto.

8º-MONITORIZACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO 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.

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 asíen 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.

8.1-CONCEPTOS BÁSICOS DEL SISTEMA SCADA:

Los sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Adquisition) son aplicaciones de software, diseñadas con la finalidad de controlar y supervisar procesos a distancia. Se basan en la adquisición de datos de los procesos remotos.

Se trata de una aplicación de software, especialmente diseñada para funcionar sobre ordenadores en el control de producción, proporcionando comunicación con los dispositivos de campo (controladores autónomos, autómatas programables, etc.) y controlando el proceso de forma automática desde una computadora.

Además, envía la información generada en el proceso productivo a diversos usuarios, tanto del mismo nivel como hacia otros supervisores dentro de la empresa, es decir, que permite la participación de otras áreas como por ejemplo: control de calidad, supervisión, mantenimiento, etc.

Cada uno de los items de SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de datos) involucran muchos subsistemas, por ejemplo, la adquisición de los datos puede estar a cargo de un PLC (Controlador Lógico Programable) el cual toma las señales y las envía a las estaciones remotas usando un protocolo determinado, otra forma podría ser que una computadora realice la adquisición vía un hardware especializado y luego esa información la transmite hacia un equipo de radio vía su puerto serial, y así existen muchas otras alternativas.

Las tareas de Supervisión y Control generalmente están más relacionadas con el software SCADA, en él, el operador puede visualizar en la pantalla del computador de cada una de las estaciones remotas que conforman el sistema, los estados de ésta, las situaciones de alarma y tomar acciones físicas sobre algún equipo lejano, la comunicación se realiza mediante buses especiales o redes LAN.

Todo esto se ejecuta normalmente en tiempo real, y están diseñados para dar al operador de planta la posibilidad de supervisar y controlar dichos procesos.

Estos sistemas actúan sobre los dispositivos instalados en la planta, como son los controladores, autómatas, sensores, actuadores, registradores, etc. Además permiten controlar el proceso desde una estación remota, para ello el software brinda una interfaz gráfica que muestra el comportamiento del proceso en tiempo real.

Generalmente se vincula el software al uso de una computadora o de un PLC, la acción de control es realizada por los controladores de campo, pero la comunicación del sistema con el operador es necesariamente vía computadora. Sin embargo el operador puede gobernar el proceso en un momento dado si es necesario.

Un software SCADA debe ser capaz de ofrecer al sistema:

- Posibilidad de crear paneles de alarma, que exigen la presencia del operador para reconocer una parada o situación de alarma, con registro de incidencias.
- Generación de datos históricos de las señales de planta, que pueden ser volcados para su proceso sobre una hoja de cálculo.
- Ejecución de programas, que modifican la ley de control, o incluso anular o modificar las tareas asociadas al autómata, bajo ciertas condiciones.
- Posibilidad de programación numérica, que permite realizar cálculos aritméticos de elevada resolución sobre la CPU del ordenador.

Existen diversos tipos de sistemas SCADA dependiendo del fabricante y sobre todo de la finalidad con que se va a hacer uso del sistema, por ello antes de decidir cuál es el más adecuado hay que tener presente si cumple o no ciertos requisitos básicos:

- Todo sistema debe tener arquitectura abierta, es decir, debe permitir su crecimiento y expansión, así como deben poder adecuarse a las necesidades futuras del proceso y de la planta.
- La programación e instalación no debe presentar mayor dificultad, debe contar con interfaces gráficas que muestren un esquema básico y real del proceso.

- Deben permitir la adquisición de datos de todo equipo, así como la comunicación a nivel interno y externo (redes locales y de gestión)
- Deben ser programas sencillos de instalar, sin excesivas exigencias de hardware, y fáciles de utilizar, con interfaces amigables para el usuario.

Funciones principales del sistema:

Supervisión remota de instalaciones y equipos: Permite al operador conocer el estado de desempeño de las instalaciones y los equipos alojados en la planta, lo que permite dirigir las tareas de mantenimiento y estadística de fallas.

Control remoto de instalaciones y equipos: Mediante el sistema se puede activar o desactivar los equipos remotamente (por ejemplo abrir válvulas, activar interruptores, prender motores, etc.), de manera automática y también manual.

Además es posible ajustar parámetros, valores de referencia, algoritmos de control, etc.

Procesamiento de datos: El conjunto de datos adquiridos conforman la información que alimenta el sistema, esta información es procesada, analizada, y comparada con datos anteriores, y con datos de otros puntos de referencia, dando como resultado una información confiable y veraz.

Visualización gráfica dinámica: El sistema es capaz de brindar imágenes en movimiento que representen el comportamiento del proceso, dándole al operador la impresión de estar presente dentro de una planta real. Estos gráficos también pueden corresponder a curvas de las señales analizadas en el tiempo.

Generación de reportes: El sistema permite generar informes con datos estadísticos del proceso en un tiempo determinado por el operador.

Representación de señales de alarma: A través de las señales de alarma se logra alertar al operador frente a una falla o la presencia de una condición perjudicial o fuera de lo aceptable. Estas señales pueden ser tanto visuales como sonoras.

Almacenamiento de información histórica: Se cuenta con la opción de almacenar los datos adquiridos, esta información puede analizarse posteriormente, el tiempo de almacenamiento dependerá del operador o del autor del programa.

Programación de eventos: Esta referido a la posibilidad de programar subprogramas que brinden automáticamente reportes, estadísticas, gráfica de curvas, activación de tareas automáticas, etc.

Transmisión de la información:

Los sistemas SCADA necesitan comunicarse vía red, puertos GPIB, telefónica o satélite, es necesario contar con computadoras remotas que realicen el envío de datos hacia una

computadora central, esta a su vez será parte de un centro de control y gestión de información.

Para realizar el intercambio de datos entre los dispositivos de campo y la estación central de control y gestión, se requiere un medio de comunicación, existen diversos medios que pueden ser cableados (cable coaxial, fibra óptica, cable telefónico) o no cableados (microondas, ondas de radio, comunicación satelital).

Cada fabricante de equipos para sistemas SCADA emplean diferentes protocolos de comunicación y no existe un estándar para la estructura de los mensajes, sin embargo existen estándares internacionales que regulan el diseño de las interfaces de comunicación entre los equipos del sistema SCADA y equipos de transmisión de datos.

Un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas y procedimientos que permite a las unidades remotas y central, el intercambio de información. Los sistemas SCADA hacen uso de los protocolos de las redes industriales.

La comunicación entre los dispositivos generalmente se realiza utilizando dos medios físicos: cable tendido, en la forma de fibra óptica o cable eléctrico, o radio. En cualquiera de los casos se requiere un MODEM, el cual modula y desmodula la señal.

Algunos sistemas grandes usan una combinación de radio y líneas telefónicas para su comunicación. Debido a que la información que se transmite sobre un sistema SCADA debería ser pequeño generalmente la velocidad de transmisión de los modem suele ser pequeño. Muchas veces 300bps (bits de información por segundo) es suficiente.

Pocos sistemas SCADA, excepto en aplicaciones eléctricas, suelen sobrepasar los 2400bps, esto permite que se pueda usar las líneas telefónicas convencionales, al no superar el ancho de banda físico del cable.

Comunicaciones:

En una comunicación deben existir tres elementos necesariamente:

- Un medio de transmisión, sobre el cual se envían los mensajes
- Un equipo emisor que puede ser el MTU
- Un equipo receptor que se puede asociar a los RTU's.

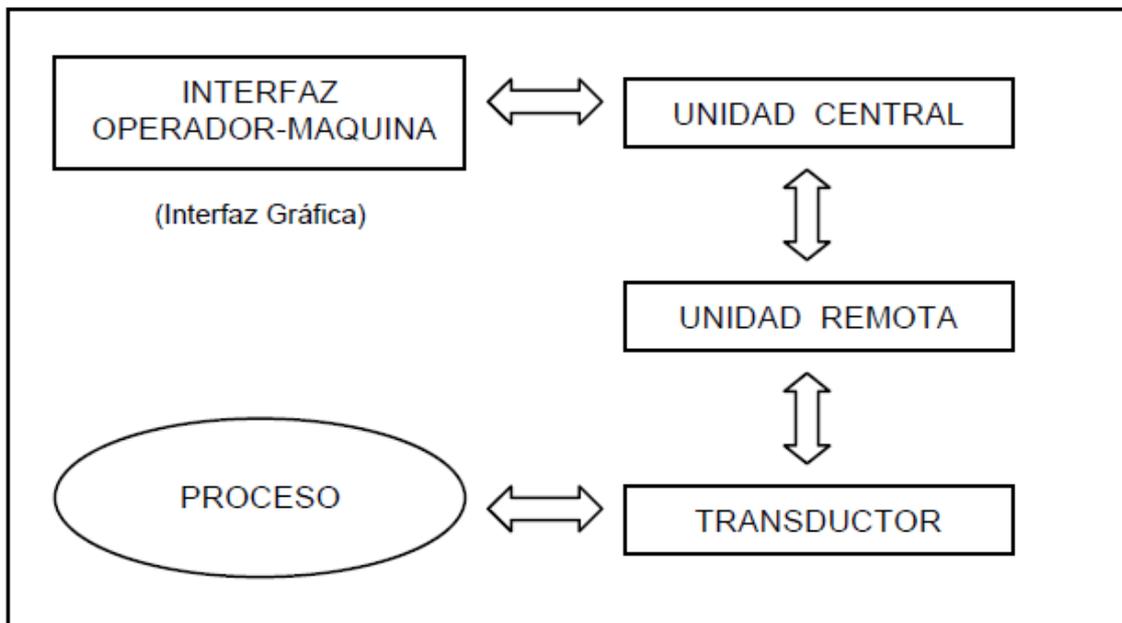
En telecomunicaciones, el MTU y el RTU son también llamados Equipos terminales de datos (DTE, Data Terminal Equipments). Cada uno de ellos tiene la habilidad de generar una señal que contiene la información a ser enviada.

Asimismo, tienen la habilidad para descifrar la señal recibida y extraer la información, pero carecen de una interfaz con el medio de comunicación.

Elementos del sistema:

Un sistema SCADA está conformado por:

- Interfaz Operador Máquinas: Es el entorno visual que brinda el sistema para que el operador se adapte al proceso desarrollado por la planta. Permite la interacción del ser humano con los medios tecnológicos implementados.
- Unidad Central (MTU): Conocido como Unidad Maestra. Ejecuta las acciones de mando (programadas) en base a los valores actuales de las variables medidas. La programación se realiza por medio de bloques de programa en lenguaje de alto nivel (como C, Basic, etc.). También se encarga del almacenamiento y procesado ordenado de los datos, de forma que otra aplicación o dispositivo pueda tener acceso a ellos.
- Unidad Remota (RTU): Lo constituye todo elemento que envía algún tipo de información a la unidad central. Es parte del proceso productivo y necesariamente se encuentra ubicada en la planta.
- Sistema de Comunicaciones: Se encarga de la transferencia de información del punto donde se realizan las operaciones, hasta el punto donde se supervisa y controla el proceso. Lo conforman los transmisores, receptores y medios de comunicación.
- Transductores: Son los elementos que permiten la conversión de una señal física en una señal eléctrica (y viceversa). Su calibración es muy importante para que no haya problema con la confusión de valores de los datos.



Esquema de los elementos de un SCADA

La RTU es un sistema que cuenta con un microprocesador e interfaces de entrada y salida tanto analógicas como digitales que permiten tomar la información del proceso provista por

los dispositivos de instrumentación y control en una localidad remota y, utilizando técnicas de transmisión de datos, enviarla al sistema central.

Un sistema puede contener varios RTUs; siendo capaz de captar un mensaje direccionado hacia él, decodificando lo actuando, respondiendo si es necesario, y esperar por un nuevo mensaje

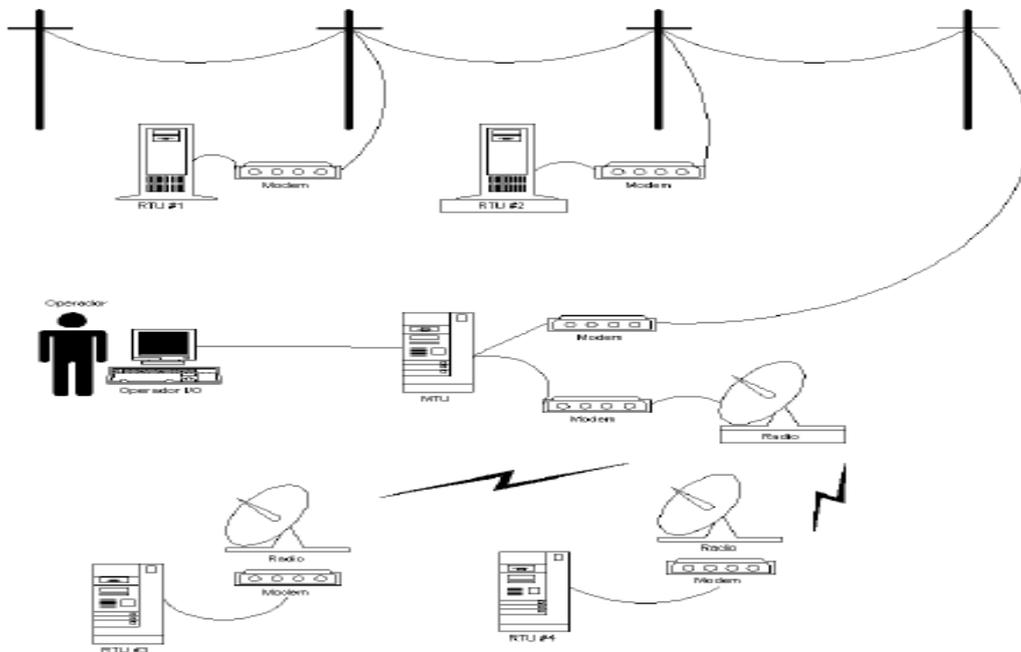
La MTU, bajo un software de control, permite la adquisición de la data a través de todas las RTUs ubicadas remotamente y brinda la capacidad de ejecutar comandos de control remoto cuando es requerido por el operador.

Normalmente el MTU cuenta con equipos auxiliares como impresoras y memorias de almacenamiento, las cuales son también parte del conjunto MTU.

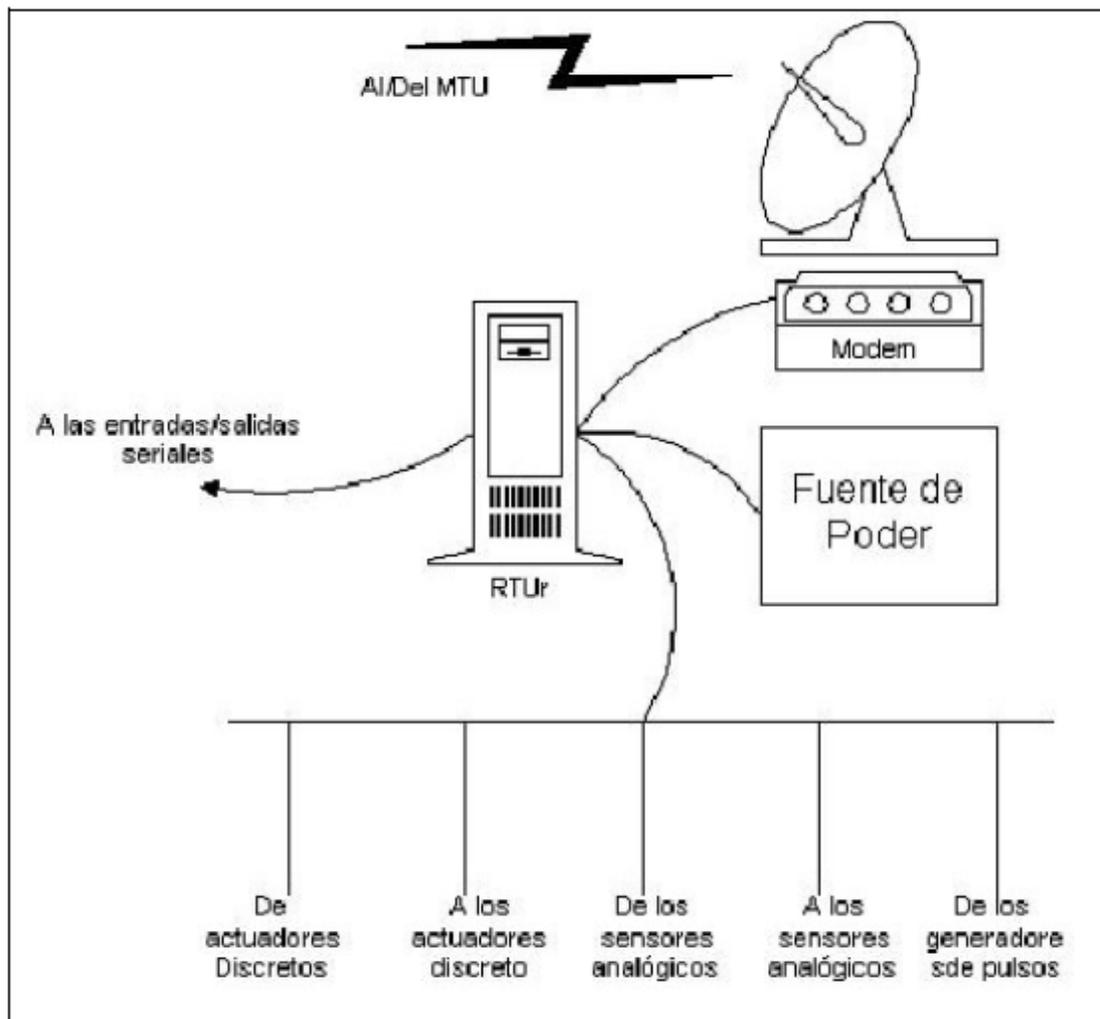
En muchos casos el MTU debe enviar información a otros sistemas o computadoras. Estas conexiones pueden ser directas y dedicadas o en la forma de una red LAN.

La conexión entre el RTU y los dispositivos de Campo es muchas veces realizados vía conductor eléctrico. Usualmente, el RTU provee la potencia para los actuadores y sensores, y algunas veces éstos vienen con un equipo de soporte ante falla en la alimentación de energía (UPS, uninterruptiblepowersupply).

La data adquirida por la MTU se presenta a través de una interfaz gráfica en forma comprensible y utilizable, y más aún esta información puede ser impresa en un reporte.



Esquema conexiones de un sistema SCADA



Esquema de conexiones de la RTU

Período de Escaneo:

Uno de los aspectos importantes que debe ser considerado es el tiempo de escaneo de los RTU's por el MTU, que se define como el tiempo que demora el MTU en realizar una comunicación con cada uno y todos los RTU's del sistema. Uno de los factores que determina el tiempo de escaneo es el número de RTU's, en general a mayor número de RTU's mayor el tiempo de escaneo.

Un segundo factor a ser considerado es la cantidad de datos a ser transmitido el cual puede variar entre un par de estados a cientos de estados lo cual incrementa el tiempo de escaneo.

Otro factor importante es el número de bits por segundo que puede soportar el medio de transmisión el cual determina el material del medio y el tipo de modulación. Así como el MTU busca y encuentra cada RTU, el RTU busca y encuentra cada sensor y actuador a los cuales está conectado. Esta búsqueda se realiza amucha mayor velocidad del MTU hacia los RTU.

Dispositivos de Campo y Cableado:

Los dispositivos de campo con los que se dispone en un sistema SCADA son de diversos tipos y en cada uno de ellos existen parámetros de selección, desde el rango de trabajo, precisión, dimensiones, precio, etc., los cuales hacen que cada sistema sea un caso particular aunque todos ellos tienen siempre características comunes.

Un detalle que a veces no se toma en cuenta es que los sensores actuadores y el cableado entre ellos también cuesta, generalmente cuestan tres o cuatro veces más que el RTU mismo, UPS, y equipos de comunicaciones para un lugar determinado.

Otro punto importante es que un sensor cuya lectura puede ser leída directamente por el operador humano, generalmente cuesta menos que un sensor cuya lectura debe ser leído por un RTU, esto es sencillamente por el sistema de acondicionamiento que debe ser usado.

Aún más, un costo adicional debe ser incorporado por el cableado de los equipos hacia el RTU. Alambre de cobre es usado generalmente, porque las señales son generalmente de bajo voltaje. En muchas aplicaciones, un blindaje debe ser adicionado sobre el hilo de cobre para prevenir interferencia electromagnética o ruido sobre la señal. Esto generalmente se manifiesta como un recubrimiento de PVC flexible sobre los conductores.

Generalmente los dispositivos de campo no suelen tener borneras suficientes como para poder realizar todos los empalmes necesarios para el funcionamiento del sistema, deben utilizarse cajas de paso o cajas terminales donde se pueden realizar las uniones de los puntos que se desean empalmar.

Muchas veces los cables deben llegar al RTU y salir de él, en ese caso siempre se tiene un tablero de conexiones cerca al equipo que puede incluir pequeños elementos de mando y supervisión como displays, pulsadores, leds indicadores e inclusive albergar otros dispositivos como fuentes y dispositivos de protección y control auxiliar.

Todos estos dispositivos deben estar debidamente documentados. Esto se realiza mediante planos y manuales de instrucciones. Además todas las licencias, software y protocolos de operación deben ser adjuntados.

El costo de los trabajos de ingeniería puede llegar a representar el 50% del costo total del proyecto a diferencia de proyectos no automatizados donde puede llegar a 10% o 15%.

Los requerimientos de mantenimiento para un sistema SCADA no son muy diferentes de los requerimientos de mantenimiento de otra alta tecnología de sistemas de control. Los equipos de comunicación, modems, radio y drivers de protocolo no son la excepción. Calibración, validación, y servicio de estos equipos requieren equipo especial y entrenamiento de personal calificado. Este tipo de servicio suele ser muy especializado y uno debe prever este tipo de gastos de mantenimiento.

Los sensores y actuadores generalmente tienen un comportamiento en donde su eficiencia va disminuyendo con respecto al tiempo debido a efectos de desgaste y condiciones ambientales.

El ingeniero debe prever la posibilidad de un control manual en caso de reemplazo del equipo para no interferir con el sistema.

En conclusión el mantenimiento de ésta clase de sistemas suele depender de la magnitud del proyecto pero en general se debe brindar un mantenimiento general regular una o dos veces al año mínimo, donde se verifiquen los parámetros de calibración, se realicen pruebas dinámicas y estáticas a los equipos y se observe el estado físico de los mismos.

8.2-SOFTWARE SCADA

A continuación se muestra una lista de algunos software SCADA y su fabricante:

- AimaxDesin Instruments S. A.
- CUBE Orsi España S. A.
- FIX Intellution.
- Lookout National Instruments.
- LabView National Instruments.
- Monitor Pro Schneider Electric.
- ScadaInTouch LOGITEK.
- SYSMAC SCS Omron.
- Scatt Graph 5000ABB.
- WinCC Siemens.
- Coros LS-B/Win Siemens.
- CIRNET CIRCUTOR S.A.
- FIXDMACS Omron-Intellution.
- RS-VIEW32 Rockwell
- GENESIS32 Iconics

Introducción a LabView de National Instruments:

LabVIEW es una herramienta diseñada especialmente para monitorizar, controlar, automatizar y realizar cálculos complejos de señales analógicas y digitales capturadas a través de tarjetas de adquisición de datos, puertos serie y GPIBs (Buses de Intercambio de Propósito General).

Es un lenguaje de programación de propósito general, como es el Lenguaje C o Basic, pero con la característica que es totalmente gráfico, facilitando de esta manera el entendimiento y manejo de dicho lenguaje para el diseñador y programador de aplicaciones tipo SCADA.

Incluye librerías para la adquisición, análisis, presentación y almacenamiento de datos, GPIB y puertos serie. Además de otras prestaciones, como la conectividad con otros programas, por ejemplo de cálculo, y en especial Matlab.

Está basado en la programación modular, lo que permite crear tareas muy complicadas a partir de módulos o sub-módulos mucho más sencillos. Además estos módulos pueden ser usados en otras tareas, con lo cual permite una programación más rápida y provechosa.

9º-LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMA DE CONTROL EN INSTALACIONES INDUSTRIALES:

Para la obtención de una buena gestión y optimización energética de una instalación de aire comprimido es fundamental conocer el estado y la situación de trabajo de dicha instalación. Actualmente, los procesos de mejora energética se basan en un ciclo de 4 pasos PDCA (Plan, Do, Check, Act o Planificar, hacer, comprobar, actuar) con el objetivo de ahorrar costes a través de un menor consumo energético.

La gestión de la energía comienza con la monitorización de los parámetros clave de la instalación a través de dispositivos de medición. Para ello se requeriría sensores de flujo, sensores de punto de rocío, amperímetros y uno para registrar, interpretar y diagnosticar el sistema.

Las pérdidas de aire en una instalación a presión, conducen a un consumo extra de energía, un aumento de la humedad y por tanto de la corrosión, de ahí la importancia de medir constantemente los parámetros significativos de nuestra instalación. Una vez instalados los distintos sensores de medición el estado de la instalación se hace evidente. Las principales pérdidas se suelen producir en los codos, filtros etc tras la localización de las pérdidas más evidentes, al controlar el estado de la instalación de forma continua, se pueden localizar las pérdidas que son más difíciles de situar, como las pequeñas grietas.

El control continuo permite la monitorización de los distintos estados de la instalación como por ejemplo a plena carga o estado de funcionamiento estacionario.

Con toda la información conseguida, se podrá conocer el estado de la instalación y la elaboración de planes energéticos optimizados y así como la selección de futuras mejoras para la detección de las pérdidas y la optimización energética de la instalación.

Tras la instalación de sensores, el estudio de las pérdidas y la propuesta de mejoras queda la evaluación de la instalación nueva, en comparación con la anterior, comparando cuales son las pérdidas energéticas y económicas, así como la elaboración de un plan de mantenimiento a raíz del control y la monitorización instantánea que nos permite el software instalado.

9.1-IMPLANTACIÓN DE MEDIDAS DE MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las medidas de ahorro y eficiencia energética, tanto de carácter técnico como de gestión, se clasifican estableciendo un criterio de “Impacto” y otro de “Dificultad” que, conjuntamente, proporcionan una visión de las medidas a realizar y permite priorizarlas.

La definición de los criterios de priorización es la siguiente:

IMPACTO

Grado de incremento en la eficiencia estimado que produce la implantación de la medida identificada.

Para evaluar el Impacto de una medida se tendrá en cuenta:

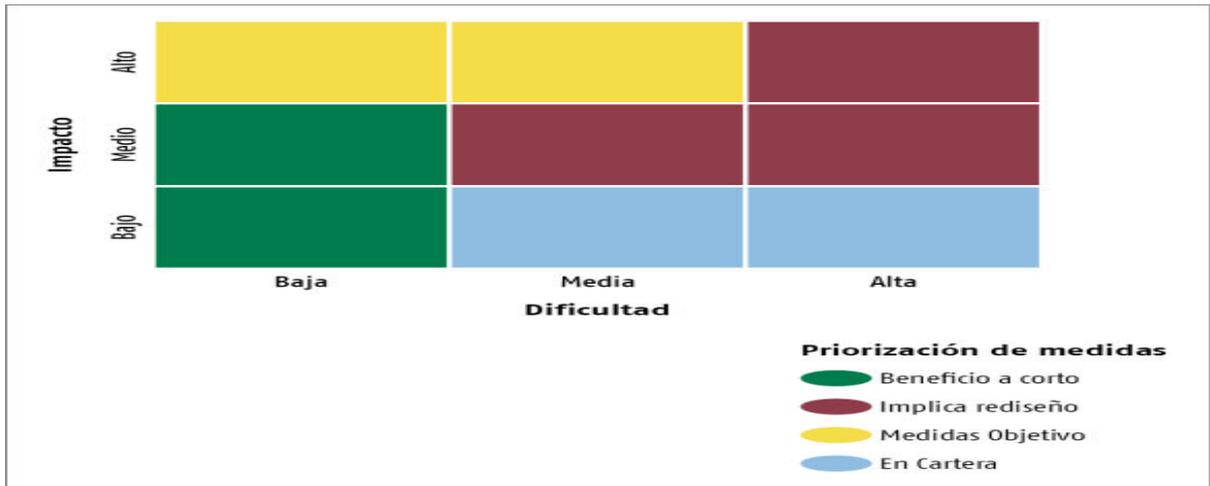
- El ahorro energético estimado
- El ahorro económico total estimado
- Ahorro económico medio unitario estimado
- La relevancia de la medida en términos de imagen
- Potencial de la medida para contribuir al desarrollo de una cultura de ahorro y eficiencia energética
- Potencial para la extensión de la medida a otras secciones / instalaciones del cliente
- Capacidad de la medida de contribuir a la mejora de la eficiencia energética global del cliente
- Plazo de retorno

DIFICULTAD

Grado de complejidad técnica u organizacional para implantar la medida.

Para evaluar la dificultad de la medida se tendrá en cuenta:

- Características técnicas de la medida.
- Departamentos y personal de la empresa cliente a involucrar para la implantación de la medida
- Profundidad en el desarrollo de la medida
- Amplitud del alcance de aplicación.
- Requisitos de información o datos necesarios para la implantación



Las pérdidas cuestan mucho dinero, pero pueden reducirse:

Las pérdidas de aire son inevitables en un sistema de aire comprimido. A menudo, representan una fuente significativa de energía perdida en un sistema de aire comprimido industrial. Una planta típica que no se haya mantenido bien es probable que tenga **pérdidas de un 20 %** o más altas.

Si bien las pérdidas pueden venir de cualquier parte del sistema, las áreas de problemas más comunes son:

- Acoplamientos, mangueras, tubos y accesorios.
- Reguladores de presión.
- Enfriadores.
- Filtros.
- Equipos no operando.

Ya que las pérdidas son casi imposibles de ver, por lo que deben usarse otros métodos para localizarlas. Mediante los sistemas de control automático podemos conocer el estado de la instalación y acotar el lugar de la fuga; estos sistemas nos ayudan a realizar un mantenimiento preventivo, permitiéndonos solucionar los problemas en su origen, antes de que sean mayores.

10º-EJEMPLO PRÁCTICO:

En este proyecto se ha desarrollado un sistema agromótico para el desarrollo de una gestión eficiente de la energía en las instalaciones de aire comprimido.

Dicho sistema, programado y diseñado a través del programa LabView nos permite evaluar el estado y con ello el grado de eficiencia energética de las instalaciones de aire comprimido basándose en todos los cálculos teóricos anteriormente expuestos.

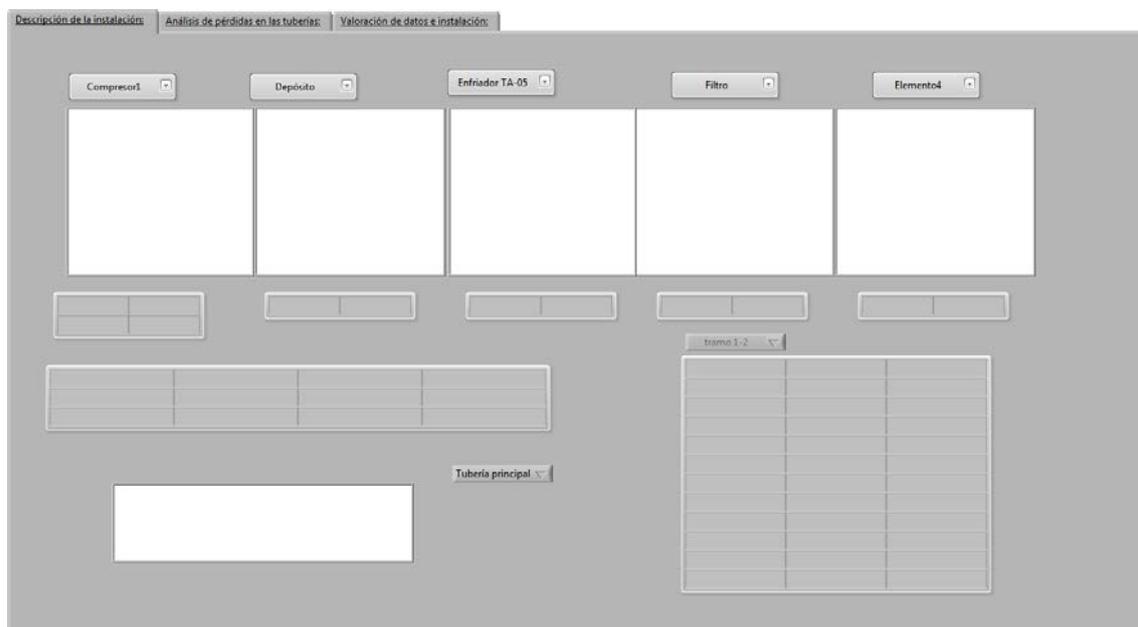
Para este proyecto se va a presentar una simulación de una industria con 5 puntos de consumo, quedando pendiente para un futuro proyecto la comparación con unos parámetros reales.

Uno de los objetivos principales de este SCADA en cuanto a su programación y diseño ha sido la búsqueda de la versatilidad y que el programa pueda ser instalado en diversas instalaciones teniendo que hacer unos ajustes de programación mínimos, orientados todos ellos a las particularidades de cada instalación.

Con respecto a los cálculos programados, este sistema calcula las pérdidas de presión en las distintas líneas y el coeficiente de fugas, parámetro más representativo para conocer el estado de una instalación.

La interfaz está dividida en tres pantallas. La primera define la instalación, los elementos que contiene así como información representativa de ellos, los distintos tipos de tuberías y así como los tramos que conforman la instalación.

Primera ventana vacía:



Ventana con la descripción completa de la instalación.

Descripción de la instalación: Análisis de pérdidas en las tuberías: Valoración de datos e instalación:

Compresor1
Depósito
Enfriador TA-05
Filtro
Elemento4

Compresor1	10 CV
Compresor2	20 CV

Depósito	2000 l
----------	--------

Enfriador TA-	Inc P 0,07bar
---------------	---------------

Filtro	0,05
--------	------

Elemento4	e1
-----------	----

Tubería principal	tubos estrados de acero	Diametro: 100mm	Longitud: 30m
Tubería secundaria	tubos estrados de acero	Diametro: 80mm	Longitud: 30m
Tubería de distribución	tubos estrados de acero	Diametro: 50mm	Longitud: 6m

tramo 1-2		
tramo 1-2	tubería principal	longitud: 5m
tramo 2-3	tubería secundaria	longitud: 5m
tramo 3-4	tubería	de distribución
tramo 2-5	tubería principal	longitud: 25m
tramo 5-6	tubería secundaria	longitud: 5m
tramo 6-7	tubería	distribución
tramo 6-8	tubería secundaria	longitud: 5m
tramo 8-9	tubería	distribución
tramo 8-10	tubería secundaria	longitud: 5m
tramo 10-11	tubería	distribución
tramo 10-12	tubería secundaria	longitud: 10m
tramo 12-13	tubería	distribución

Tubería principal

La segunda pantalla presenta el esquema unifilar de la instalación así como las distintas líneas que la componen, mostrando los valores de los sensores y permitiendo el chequeo de la instalación de una forma rápida y sencilla. En esta ventana también se encuentran las alarmas para la revisión de filtros y del enfriador cuando ellos la caída de presión es superior a la que indica el fabricante.

Ventana con la información de los sensores y el estado de los filtros y el enfriador.

Descripción de la instalación: Análisis de pérdidas en las tuberías: Valoración de datos e instalación:

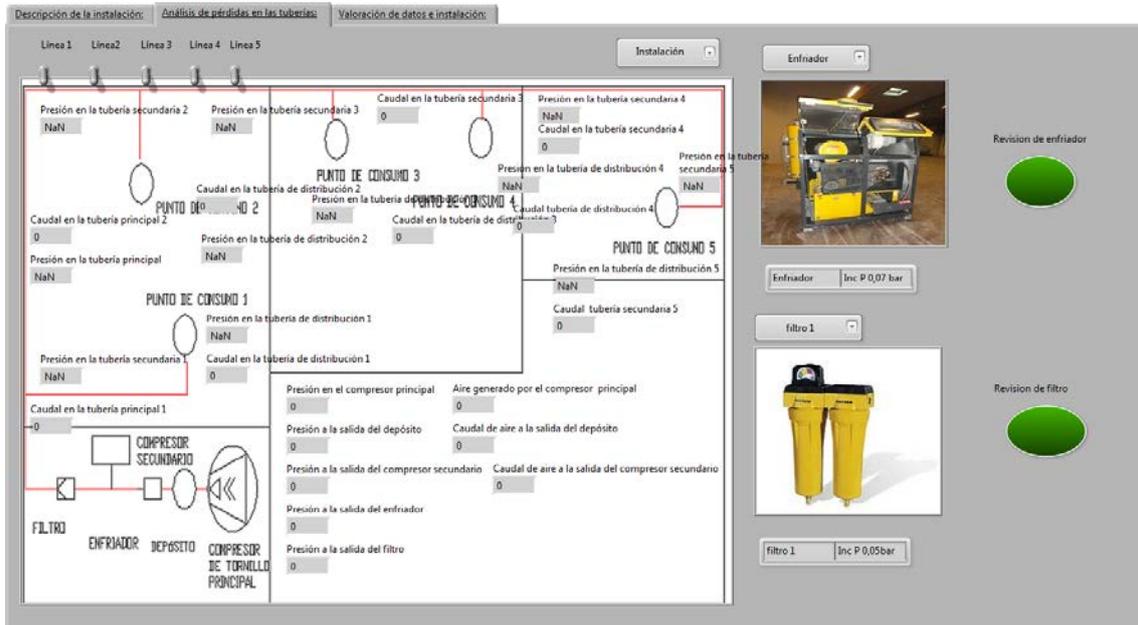
Linea 1
Linea 2
Linea 3
Linea 4
Linea 5
Instalación
Enfriador

Presión en la tubería secundaria 2	Presión en la tubería secundaria 3	Caudal en la tubería secundaria 3	Presión en la tubería secundaria 4
0	0	0	0
			Caudal en la tubería secundaria 4
			0
			Presión en la tubería de distribución 4
			0
			Presión en la tubería de distribución 5
			0
			Caudal tubería de distribución 5
			0
			Presión en la tubería de distribución 1
			0
			Caudal en la tubería de distribución 1
			0
			Presión en el compresor principal
			0
			Aire generado por el compresor principal
			0
			Presión a la salida del depósito
			0
			Caudal de aire a la salida del depósito
			0
			Presión a la salida del compresor secundario
			0
			Caudal de aire a la salida del compresor secundario
			0
			Presión a la salida del enfriador
			0
			Presión a la salida del filtro
			0

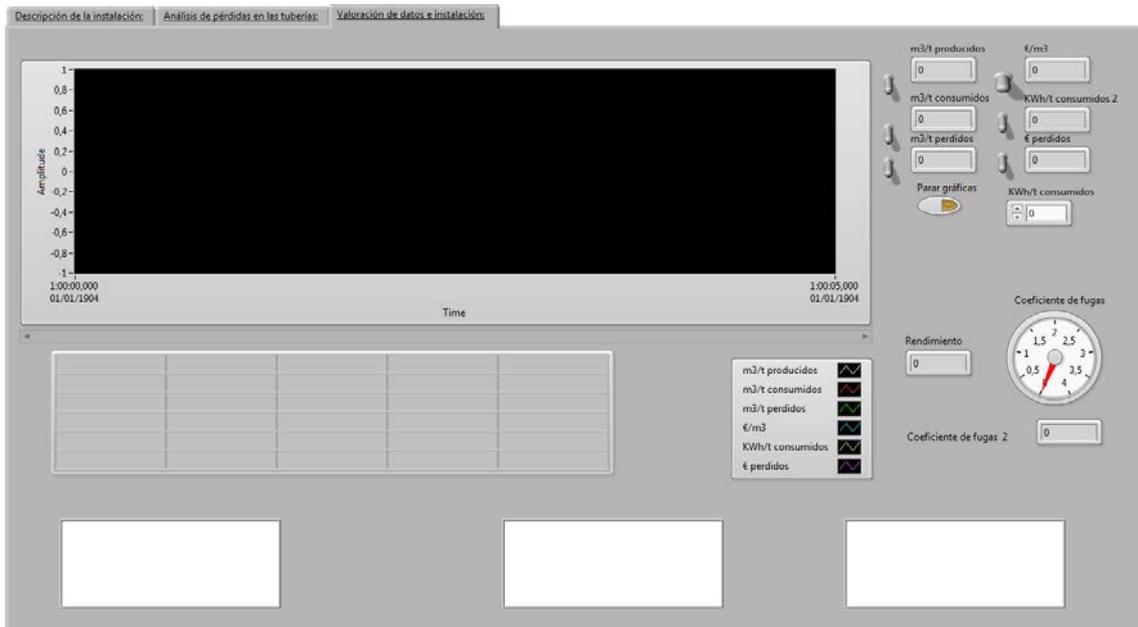
Revisión de enfriador

Revisión de filtro

En la pantalla se observa el esquema unifilar así como las alarmas de los filtros y el enfriador.

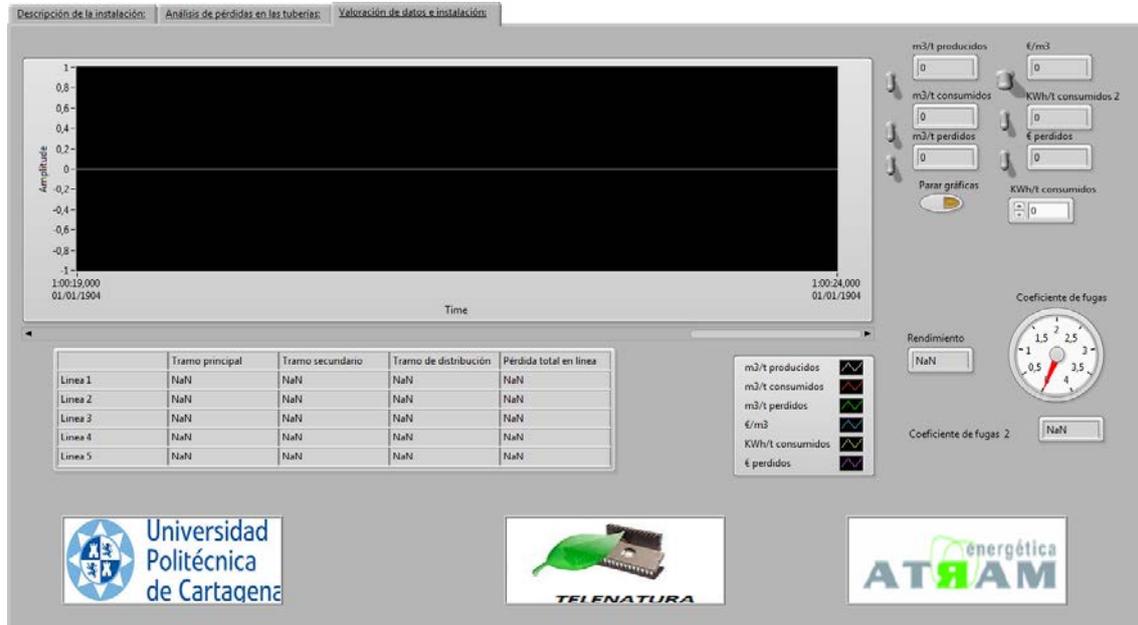


La tercera ventana incluye una tabla con la información de las pérdidas de presión, así como el valor del coeficiente de fugas, el rendimiento y un selector de gráficas que nos permitirá ver la variación del consumo así como las pérdidas de aire comprimido o económicas.



Podemos observar la gráfica así como los indicadores de producción, el coeficiente de fugas y una tabla con la información de pérdidas de presión en las distintas líneas.

También se puede personalizar con las imágenes de las empresas colaboradoras o con la imagen del cliente.



En resumen:

- El SCADA desarrollado nos permite realizar una perfecta descripción de la instalación, con todos sus elementos, dispositivos y sensores.
- Nos permite calcular las pérdidas de presión en las tuberías y a su vez poder acotar las posibles fugas de la instalación para la realización de su mantenimiento.
- Nos informa del coeficiente de fugas, parámetro fundamental para definir el estado de la instalación.
- La posibilidad de llevar un seguimiento sobre la producción, las pérdidas y el consumo por medio de gráficos y excels.

11º-CONCLUSIONES:

Los sistemas automáticos de gestión y control para instalaciones industriales y en general, de cualquier índole no solo representan el presente y futuro próximo sino que debido a sus ventajas son imprescindibles para el buen funcionamiento de la instalación que monitorizan.

Así por ejemplo, una fuga de aire comprimido de dos milímetros puede suponer un gasto extra de 500€ al cabo de un año; mediante sistemas como el aquí propuesto, al operario se le notificaría de la pérdida de presión y caudal y podría acotar la zona de la avería donde realizar el mantenimiento.

El sistema realizado correspondería a una primera versión, basada en los cálculos teóricos expuestos anteriormente quedando pendiente la realización de una prueba en unas instalaciones reales para comprobar el grado de representación real que presenta así como de las posibles modificaciones que hubiese que realizar.

Durante la realización del programa, se ha buscado siempre que el sistema sea lo más versátil posible, pudiendo instalarse en el mayor número de instalaciones de aire comprimido con el menor número de modificaciones posibles sobre la programación.

El sistema cumple con las necesidades básicas que puede necesitar una instalación, como pueden ser la descripción de ésta, el estado en el que se encuentra y el cálculo de las pérdidas que se producen en el sistema.

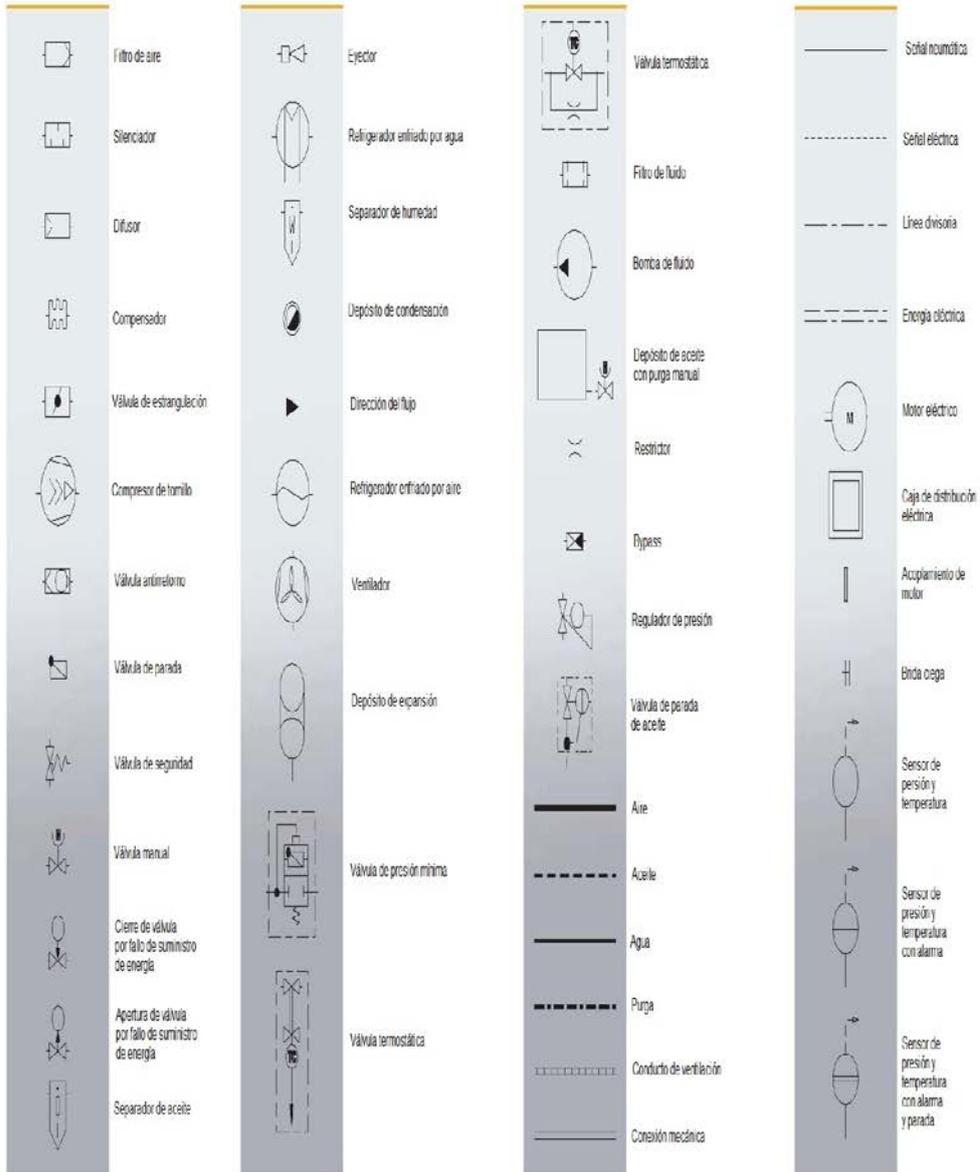
En definitiva, el desarrollo de sistemas de control, como los SCADA, para las instalaciones industriales es un claro avance para poder realizar de forma óptima la actividad industrial, permitiendo aumentar la eficiencia y reduciendo los costes así como permitiendo llevar un control más exhaustivo y una respuesta más rápida ante cualquier evento.

CAPÍTULO V: BIBLIOGRAFÍA

Se expone la bibliografía empleada para el desarrollo de este proyecto.

- *Kaeser compressors*
COMPRESSED AIR ENGINEERING
- *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
- *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía IDAE*
GUÍA TÉCNICA COMPRESORES Y SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO
- *Junta de Castilla y León*
Manual técnico de aire comprimido
- *Manual de ahorro y eficiencia energética del sector. Centrales Hortofrutícolas.*
- www.marcaespana.es
- www.magrama.gob.es (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente)
- *Protocolo Internacional de Medida y Verificación EVO.*

12º-ANEXOS:



Símbolos de elementos en instalaciones de aire comprimido:

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

Longitudes equivalentes de accesorios de tubería.

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

Tabla de propiedades del aire a presión atmosférica.

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

Propiedades del aire para condiciones estándar a nivel del mar.

T [°C]	T [K]	P _{vs} [hPa]	H _a [g/m ³]
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

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

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	Coficiente 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

Magnitudes y sus unidades más habituales.

