

50521  
20



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

PROPUESTA DE EVALUACIÓN Y ANÁLISIS ENERGÉTICO PARA OPTIMIZAR  
SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO EN LA INDUSTRIA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

P R E S E N T A :

JORGE GALLARDO QUIROZ



MEXICO, D.F. MARZO

2003

A



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/001/03**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: GALLARDO QUIROZ JORGE**  
P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. René de la Mora Medina</b>
<b>Vocal:</b>	<b>M. en I. Francisco Martín Mendoza Méndez</b>
<b>Secretario:</b>	<b>I.Q. Rafael Sánchez Dirzo</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.Q. Guillermo Gaspar Grimaldo</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**  
**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**  
México, D. F., 22 de Enero de 2003

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA**

3

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis Padres:

*José Gallardo M.  
Guadalupe Quiroz M.*

*Por la oportunidad de estudiar y el tiempo que esperaron para que terminara la carrera.*

A mis hermanos:

*Juana, Ma. de Jesús, Carlos, Ma. Eulalia, Salvador,  
Raquel, Soledad, José, Rafael y Héctor.*

*Por la confianza que me han tenido y por su apoyo.*

*Gracias a mis Amigos: los que han estado siempre.*

Gracias a los integrantes de mi Jurado:

*I.Q. René de la Mora Medina, I.Q. Cuauhtemoc Lagos Chávez, I.Q. Rafael Sánchez Dirzo,  
I.Q. Guillermo Gaspar Grimaldo, M. en I. Francisco M. Mendoza Méndez*

*Así como a I.Q. Domínguez Ortiz B, I.Q. Jorge Tamayo O., I.Q. Roberto Ramírez T.*

*Por sus comentarios y sugerencias para mejorar este trabajo, y por el tiempo que dedicaron a éste.*

Gracias:

*A esta Facultad de Estudios Superiores Zaragoza por la oportunidad que me brindó para seguir estudiando.*

*A todos los profesores que me dieron clases, por sus enseñanzas y consejos para ser mejor.*

*A toda la banda, compañeros y borrachos, no doy nombres para no omitir a ninguno.*

C

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



*"La cultura se adquiere leyendo libros; pero el conocimiento del mundo, que es mucho más necesario, sólo se alcanza leyendo a los hombres y estudiando las diversas ediciones que de ellos existen."*

**Lord Chesterfield**

---

UNAAI- FES ZARAGOZA

D

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



**PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO  
PARA OPTIMIZAR SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO EN  
LA INDUSTRIA**

UNAM- FES ZARAGOZA

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

E



INDICE

INDICE

Pag.

RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
CAPITULO I. EL AIRE Y SU IMPORTANCIA INDUSTRIAL	5
1.1 La Neumática	5
1.2 Propiedades del Aire Comprimido	6
1.3 Fundamentos Físicos	7
1.4 Las Leyes de los Gases	8
1.5 El Ciclo de Carnot	9
CAPITULO II. EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO	13
II.1 Servicios para la Planta	13
II.1.1 Servicios Primarios	13
II.1.2 Servicios Secundarios	13
II.1.3 El Aire para la Planta	14
II.1.4 Aire para Instrumentos	14
II.1.5 Aire de Servicio para la Planta	14
II.2 Componentes del Sistema de Aire Comprimido	15
II.3 Características del Aire Comprimido	18
CAPITULO III. IMPORTANCIA ENERGETICA	19
III.1 Importancia del Uso Correcto de la Energía en los Sistemas de Aire Comprimido	19
III.2 Gastos en electricidad por el Compresor	22
III.3 Medidas de Ahorro en Diagnósticos Energéticos	23
CAPITULO IV. PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO EN SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO	25
IV.1 Evaluación Energética	25
IV.2 Procedimiento para Realizar una Evaluación en Sistemas de Aire Comprimido	26
IV.3 Etapas en una Evaluación Energética	28
IV.4 Cuestionario de Evaluación	29
CAPITULO V. PROGRAMA PARA IDENTIFICAR LAS OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGIA	34

TEST CAN  
FALLA DE ORIGEN



	Pag.
<b>CAPITULO VI. MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR ENERGIA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO</b>	<b>37</b>
VI.1 Reparación de las Fugas de Aire Comprimido	38
VI.2 Uso de Presiones Bajas	42
VI.3 Uso de Compresores Pequeños a Carga Completa	42
VI.4 Uso del Aire del Exterior para el Compresor	43
VI.5 Preeenfriamiento del Aire	44
VI.6 Recuperación del Calor de Compresión	44
VI.7 Uso de Motores de Alta Eficiencia	46
VI.8 Apagado del Compresor Durante los Periodos de Ocio	48
VI.9 Uso de Postenfriador en Secadores de Aire	48
VI.10 Pérdidas de Presión en Tuberías y Accesorios	49
VI.11 Mantenimiento del Sistema de Compresión de Aire	50
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>52</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS</b>	
A TERMINOLOGIA USADA EN EL AIRE COMPRIMIDO	56
B TIPOS DE COMPRESION	59
C GENERADORES DE AIRE COMPRIMIDO	60
D CASO DE APLICACION	68
E AUDITORIA ENERGETICA	82
F DIAGRAMA SANKEY PARA EL AIRE COMPRIMIDO	85
G FACTORES DE CONVERSION	87

TRABAJOS CON  
FALLA DE ORIGEN



## INDICE DE FIGURAS, GRAFICAS Y TABLAS

Figuras	Pag.
Figura 1. Presión atmosférica.	7
Figura 2. Compresibilidad del aire.	8
Figura 3. Ciclo de Carnot.	10
Figura 4. Componentes de un sistema de aire comprimido.	17
Figura 5. Pérdidas de presión en las partes de una instalación de aire comprimido.	50
<b>Gráficas</b>	
Gráfica 1. Representación del desglose de consumo de demanda en % de energía eléctrica debido al aire comprimido.	20
Gráfica 2. Gastos ocasionados por el compresor.	22
<b>Tablas</b>	
Tabla 1. Desglose consumo de demanda en % de energía eléctrica.	20
Tabla 2. Porcentaje del consumo de energía eléctrica por el aire comprimido por grupo industrial.	21
Tabla 3. Pérdida de potencia por fugas.	40
Tabla 4. Proporción de fuga de aire comprimido.	41
Tabla 5. Comparación de los gastos de un motor estándar con uno de alta eficiencia.	47



## RESUMEN

En la actualidad, las compañías responsables toman muy en cuenta la eficiencia energética y, dado que los sistemas de aire comprimido representan aproximadamente el 10% del consumo de la energía de los procesos de fabricación, el ahorro potencial es muy importante. Sin embargo, el ahorro energético requiere necesariamente la adopción de sistemas eficientes.

Generalmente, se considera que el aire comprimido es un servicio auxiliar. Dependiendo de la aplicación, la calidad y la disponibilidad del aire comprimido pueden afectar significativamente a la producción principal de la planta. Sin embargo, como servicio auxiliar, rara vez suele recibir la atención que merece.

Con una inspección adecuada, podemos detectar mejoras sin inversión relacionadas con la gestión de compresores, la planificación y el mantenimiento, que se traducen en ahorros energéticos de hasta un 10%. Por ejemplo, la reducción de la presión de operación nos da ahorros energéticos de hasta 4%; la instalación de una toma de aire del exterior de la nave, puede representar ahorros del 3%. Con ayuda de personal capacitado en energía se puede profundizar el análisis energético detectando mejoras que requieran una inversión moderada y algunas con inversiones considerables, no obstante los ahorros energéticos que podemos alcanzar con la aplicación de estas medidas representan hasta el 25% de la energía consumida y la recuperación de los costos de inversión no sobrepasan los 3 años en la mayoría de los casos. Por ejemplo, el cambio de un motor convencional por un motor de alta eficiencia puede representar ahorros de hasta 80.000 kWh/año y el tiempo de recuperación de la inversión puede llegar a ser de 1 año.

El esfuerzo de gestión y las inversiones financieras en conservación de energía no sólo darán lugar a un posible aumento de beneficios y de competitividad en los mercados nacional e internacional, sino que seguirán dando beneficios mucho después de que se hayan recuperado las inversiones de capital. Cuando se produzcan los aumentos inevitables de precios de los combustibles y de la energía, las fábricas que administren a conciencia la energía se hallarán en mejores condiciones para absorber el impacto, a lo que se vendrá a añadir su menor dependencia de la energía y eso tenderá a hacerla menos vulnerable durante periodos de escasez de combustible.



## INTRODUCCION

La situación energética actual, reclama una mayor economía de nuestros recursos potenciales (petróleo, agua de ríos y mares, pozos geotérmicos, etc.). Hoy en día, debido a los cambios políticos y sociales, ninguna industria puede pasar por alto la idea del ahorro de energía en su empresa, ya que la demanda de energía va en aumento año con año y junto con éste, el consumo de los recursos potenciales para su generación.

La energía eléctrica no es un recurso natural, es un bien que produce el hombre y que, por sus características físicas, no es posible almacenar, la producción de electricidad se da a partir de energéticos primarios como son: combustibles fósiles, el agua, el combustible nuclear o el calor geotérmico.

La capacidad con que cuenta actualmente el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), que incluye a CFE, LFC y PIE's (Productores Independientes de Energía), es de 37.022.3 MW (*fuentes: SENER*). La demanda de energía eléctrica se ha ido incrementando de tal manera que no será difícil alcanzar esta cifra en los próximos años.

Otro aspecto muy importante es la optimización del sistema eléctrico existente, con el fin de hacer un uso eficiente de la capacidad instalada y minimizar el costo del suministro eléctrico. A todo esto, la respuesta está en la mente de todos: en el presente hay que ahorrar la energía disponible, ya que mañana puede ser que esta energía sea inferior a la demanda.

Por ello, se han ido estableciendo programas del uso racional de la energía en el sector industrial para hacer un uso eficiente de la energía y así optimizar el rendimiento de los equipos y por ende, de la planta.

En una planta de proceso los servicios son una parte tan indispensable como en una ciudad, y varios de estos requieren de insumos energéticos, entre estos se encuentra el aire comprimido. Si bien hay industrias en las que no se considera un servicio primario, hay ocasiones en las que es un elemento indispensable para poder cumplir con diversas tareas, por ejemplo: pistolas para pintar, cilindros neumáticos de simple y doble acción, sistemas de control neumáticos, gatos neumáticos, chorros de enfriamiento, etc.

El aire a presión es una forma de energía utilizada frecuentemente en la industria por sus características favorables (es inofensiva, no es nociva y es de usos múltiples).



Es utilizado generalmente, como un medio de transmisión de energía para propósitos múltiples, señalándose como principales usos los siguientes:

- Energía para movimiento de herramientas y equipos.
- Energía para manejo de materiales, en cuanto a transporte, distribución colección de polvos, etc.
- Energía para control y operación de procesos o equipos (energía potencial, inversa con respecto a presión atmosférica), para manejo de materiales, crear atmósferas especiales en procesos, etc.

La energía potencial en el aire comprimido al liberarse de manera controlada y rígida, cumple el propósito requerido.

Como en toda conversión de energía en condiciones reales, existen pérdidas en el proceso, las cuales se busca minimizar para lograr un rendimiento óptimo de la planta.

El rendimiento de una instalación de aire comprimido de algunos factores como son:

- Buen funcionamiento de los equipos (mecánica y energética).
- Optimización de la cantidad de aire perdido por fugas y escapes.
- Eliminación de pérdidas excesivas de carga que afectan la potencia de las herramientas y equipos.
- Selección y funcionamiento óptimo de los equipos consumidores de aire comprimido.
- Transmisión de energía con un mínimo de pérdidas.

El sistema neumático presenta, generalmente, los siguientes problemas:

- De diseño de red.
- De funcionamiento de herramientas y máquinas.
- De mantenimiento.

Estos problemas se traducen en mayores costos de operación, mantenimiento y energía, y por supuesto en menor rendimiento.

Al analizar los costos de una instalación de aire comprimido sobre su lapso de vida, se observa que la parte de los gastos en electricidad, o sea los costos de operación, son excesivamente altos. Los gastos en electricidad ascienden hasta el 83% del total de los gastos de una instalación de aire comprimido, mientras que las aportaciones de capital representan solamente un 13% y los de mantenimiento apenas un 4%. Por esta razón, es necesario llevar a cabo en cada empresa un estudio de la eficiencia en el uso racional de energía en las instalaciones de aire comprimido y así poder reducir los gastos en electricidad. Una mínima alza en los gastos de mantenimiento permite reducciones considerables en los gastos de energía.

En esta investigación sobre los sistemas de aire comprimido se demostrará que se puede reducir sustancialmente los costos del consumo de electricidad al incrementar su eficiencia.



Los componentes más eficientes y el mantenimiento mejorado son elementos clave para cumplir con este objetivo.

El análisis de la eficiencia en uso racional de energía debe considerar la demanda de aire comprimido, así como las partes individuales de una instalación, es decir, el generador del aire comprimido (compresor), la distribución y acumulación del aire comprimido (conexiones y recipiente = tanque) y las herramientas empleadas.

Algunas de las recomendaciones para un funcionamiento óptimo del sistema incluyen:

- Eliminar todas las fugas de aire que se presentan en la red de distribución. Las fugas pueden alcanzar hasta un 50% de la capacidad instalada en instalaciones descuidadas. Con una inversión moderada deben limitarse a menos del 5%.
- Eliminar líneas de distribución que no sean necesarias.
- Limpieza periódica de los filtros de aire.
- No use aire comprimido para ventilación o limpieza.
- Controlar las mediciones de consumo para corregir anomalías.
- Determine la presión mínima requerida para la operación satisfactoria de todos los equipos y efectuar su control.
- Dimensione correctamente el tamaño de las líneas.
- Apague los compresores cuando no se requiera aire comprimido.
- La temperatura del aire de aspiración no debe ser mayor a la recomendada por el fabricante.
- Instalar separadores de condensado y drenajes en los extremos de los ramales con el fin de eliminar la necesidad de soplar las líneas para extraer el agua.



## CAPITULO I. EL AIRE Y SU IMPORTANCIA INDUSTRIAL

La sencillez en la operación, la disponibilidad, la facilidad y la seguridad en el manejo de las herramientas y elementos neumáticos han propiciado la gran utilización de la energía de presión contenida en el aire comprimido.

### 1.1 La Neumática.

El aire es una de las formas de energía más antiguas que conoce el hombre y que aprovecha para reforzar sus recursos físicos.

De los antiguos griegos procede la expresión "Pneuma", que designa la respiración, el viento y, en filosofía, también el alma.

Como derivación de la palabra "Pneuma" se obtuvo, entre otras cosas el concepto Neumática que trata los movimientos y procesos del aire.

La neumática constituye una herramienta muy importante dentro del control automático en la industria.

Aunque los rasgos básicos de la neumática se cuentan entre los más antiguos conocimientos de la humanidad, no fue sino hasta el siglo pasado cuando empezaron a investigarse sistemáticamente su comportamiento y sus reglas. Sólo desde aproximadamente 1950 se puede hablar de una verdadera aplicación industrial de la neumática en los procesos de fabricación.

Es cierto que con anterioridad ya existían algunas aplicaciones y ramos de explotación como por ejemplo en la minería, en la industria de la construcción y en los ferrocarriles (frenos de aire comprimido).

La intervención verdadera y generalizada de la neumática en la industria no se inició, sin embargo, hasta que llegó a hacerse más marcada la exigencia de una automatización y racionalización en los procesos de trabajo.

A pesar de que esta técnica fue rechazada en un inicio, debido en la mayoría de los casos a falta de conocimiento y de formación, fueron ampliándose los diversos sectores de aplicación.



En la actualidad, ya no se concibe una moderna explotación industrial sin el aire comprimido. Este es el motivo de que en los ramos industriales más variados se utilicen aparatos neumáticos.

## 1.2 Propiedades del aire comprimido

Causará asombro el hecho de que la neumática se haya podido expandir en tan corto tiempo y con tanta rapidez. Esto se debe, entre otras cosas, a que en la solución de algunos problemas de automatización no puede disponerse de otro medio que sea más simple y más económico.

Pero, ¿Cuáles son las propiedades del aire comprimido que han contribuido a su popularidad?

- Abundante: Está disponible para su compresión prácticamente en todo el mundo, en cantidades ilimitadas.
- Transporte: El aire comprimido puede ser fácilmente transportado por tuberías, incluso a grandes distancias. No es necesario disponer tuberías de retorno.
- Almacenable: No es preciso que un compresor permanezca continuamente en servicio. El aire comprimido puede almacenarse en depósitos y tomarse de éstos. Además, se puede transportar en recipientes.
- Temperatura: El aire comprimido es insensible a las variaciones de temperatura, garantiza un trabajo seguro incluso a temperaturas extremas.
- Antideflagrante: No existe ningún riesgo de explosión ni incendio; por lo tanto, no es necesario disponer instalaciones antideflagrantes, que son caras.
- Limpio : El aire comprimido es limpio y, en caso de faltas de estanqueidad en elementos, no produce ningún ensuciamiento. Esto es muy importante por ejemplo, en las industrias alimenticias, de la madera, textiles y del cuero.
- Velocidad : Es un medio de trabajo muy rápido y, por eso, permite obtener velocidades de trabajo muy elevadas. (La velocidad de trabajo de cilindros neumáticos pueden regularse sin escalones.)
- A prueba de sobrecargas: Las herramientas y elementos de trabajo neumáticos pueden llegar hasta su parada completa sin riesgo alguno de sobrecargas.

Para delimitar el campo de utilización de la neumática es preciso conocer también las propiedades adversas.

- Preparación: El aire comprimido debe ser preparado, antes de su utilización. Es preciso eliminar impurezas y humedad (al objeto de evitar un desgaste prematuro de los componentes).





- Compresible : Con aire comprimido no es posible obtener para los émbolos velocidades uniformes y constantes.
- Fuerza: El aire comprimido es económico sólo hasta cierta fuerza. Condicionado por la presión de servicio normalmente usual de 700 kPa (7 bar), el límite, también en función de la carrera y la velocidad, es de 20.000 a 30.000 N (2000 a 3000 kPa).
- Escape : El escape de aire produce ruido. No obstante, este problema ya se ha resuelto en gran parte, gracias al desarrollo de materiales insonorizantes.
- Costos: La energía utilizada para la compresión es cara; este elevado costo puede compensarse en su mayor parte optimizando el sistema de aire comprimido y mejorando la eficiencia de compresión.

### 1.3 Fundamentos físicos

La superficie del globo terrestre está rodeada de una envoltura aérea. Esta es una mezcla indispensable para la vida y tiene la siguiente composición: Nitrógeno aprox. 78% en volumen Oxígeno aprox. 21% en volumen. Además contiene trazas, de bióxido de carbono, argón, hidrógeno, neón, helio, criptón y xenón.

Como sobre la tierra todo está sometido a la presión atmosférica no notamos ésta. Se toma la correspondiente presión atmosférica  $P_{amb}$  como presión de referencia y cualquier divergencia de ésta se designa de sobrepresión  $P_e$ .

La siguiente figura lo visualiza.

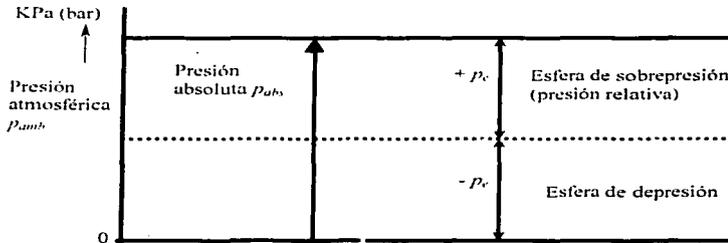


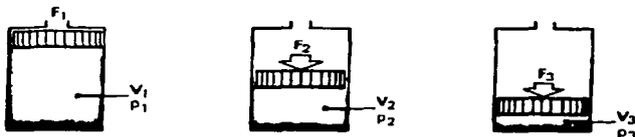
Figura 1. Presión atmosférica.



La presión de aire no siempre es la misma. Cambia según la situación geográfica y el tiempo. La zona desde la línea del cero absoluto hasta la línea de referencia variable se llama esfera de depresión (-P<sub>e</sub>) la superior se llama esfera de sobrepresión (+P<sub>e</sub>). La presión absoluta P<sub>abs</sub> consiste en la suma de las presiones -P<sub>e</sub> y +P<sub>e</sub>. En la práctica se utilizan manómetros que solamente indican la sobrepresión (+P<sub>e</sub>).

#### *El aire es compresible*

Como todos los gases, el aire no tiene una forma determinada. Toma la del recipiente que lo contiene o la de su ambiente. Permite ser comprimido (compresión) y tiene la tendencia a dilatarse (expansión).



*Figura 2. Compresibilidad del aire*

#### **1.4 Las Leyes de los Gases**

Las primeras tres leyes cubren condiciones en las que la cantidad de masa o aire es constante.

##### *Ley de Boyle*

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{Ec. 1}$$

La ley básica cubre la relación entre los cambios de presión y volumen cuando la temperatura permanece constante:

##### *Ley de Charles*

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Ec. 2}$$





Las fórmulas básicas indicadas cubren los cambios en presión y volumen causados por los cambios de temperatura. Un cambio de presión se calcula para un sistema en el que el volumen es constante.

#### *Ley de los Gases Combinados*

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} \quad \text{Ec. 3}$$

La fórmula básica arriba indicada combina las leyes de Charles y de Boyle para cubrir los cambios de todas las variables.

#### *Ley General de los Gases o Ecuación de Estado de un Gas Ideal*

$$mR = \frac{PV}{T} \quad \text{Ec. 4}$$

Esta fórmula incluye el efecto de la masa.

La parte derecha de la ecuación es la misma que la Ley de los Gases Combinados.

### 1.5 El ciclo de Carnot

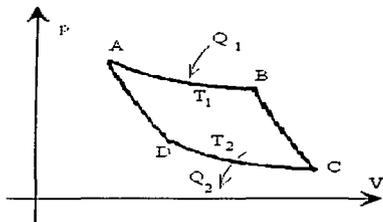
La experiencia enseña que las máquinas térmicas que operan tomando cierta cantidad de calor a una temperatura  $T_2$  y lo ceden a otra menor  $T_1$ , convierten únicamente una fracción de calor absorbido en trabajo, y se deduce teóricamente que incluso una máquina ideal, en condiciones ideales, no es capaz de convertir en trabajo más de una parte del calor absorbido, y esa fracción depende de las temperaturas de operación, pero es independiente de la naturaleza de la máquina. En otras palabras, existe una limitación natural de convertibilidad de calor en trabajo.

Para establecer lo anterior, supongamos la secuencia de operación denominada ciclo de Carnot.

Se define ciclo de Carnot como un proceso cíclico reversible que utiliza un gas perfecto, y que consta de dos transformaciones isotérmicas y dos adiabáticas. La representación gráfica del ciclo de Carnot en un diagrama p-V es la siguiente:

La expresión matemática que representa cualquiera de las transformaciones del ciclo esta dada por la primera ley de la termodinámica.

$$\Delta U = Q - W$$



A-B Proceso isotérmico

B-C Proceso adiabático

C-D Proceso isotérmico

D-A Proceso adiabático

Figura 3. El Ciclo de Carnot.

En cualquier ciclo, tenemos que obtener a partir de los datos iniciales:

La presión, volumen de cada uno de los vértices.

El trabajo, el calor y la variación de energía interna en cada una de las etapas.

El trabajo total, el calor absorbido, el calor cedido, y el rendimiento del ciclo.

Las etapas del ciclo

**Transformación A->B (isotérmica)**

La presión  $p_n$  se calcula a partir de la ecuación del gas ideal (Ec. 4).  $p_n v_n = nRT_1$

De la ecuación de la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta U = Q - W \quad \text{Ec. 5}$$

Para un proceso isotérmico reversible:

$$\text{Variación de energía interna} \quad \Delta U_{A \rightarrow B} = 0 \quad \text{Ec. 6}$$

$$\text{Trabajo} \quad W'_{1 \rightarrow n} = nRT_1 \ln \frac{v_n}{v_1} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{Calor} \quad Q_{1 \rightarrow n} = W'_{1 \rightarrow n} \quad \text{Ec. 8}$$

**Transformación B->C (adiabática)**

La ecuación de estado adiabática es  $pV^\gamma = cte$  o bien,  $TV^{\gamma-1} = cte$ . Se despeja  $v_c$  de la ecuación de la adiabática  $T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$ . Conocido  $v_c$  y  $T_2$  se obtiene  $p_c$ , a partir de la ecuación del gas ideal  $p_c v_c = nRT_2$ .

$$\text{Calor } Q_{B \rightarrow C} = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

$$\text{Variación de energía interna } \Delta U_{B \rightarrow C} = nc_v(T_2 - T_1) \quad \text{Ec. 10}$$

$$\text{Trabajo } W'_{B \rightarrow C} = -\Delta U_{B \rightarrow C} \quad \text{Ec. 11}$$

**Transformación C->D (isotérmica)**

De la ec. 5:

$$\text{Variación de energía interna } \Delta U_{C \rightarrow D} = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

$$\text{Trabajo } W'_{C \rightarrow D} = nRT_2 \ln \frac{v_D}{v_C} \quad \text{Ec. 13}$$

$$\text{Calor } Q_{C \rightarrow D} = W'_{C \rightarrow D} \quad \text{Ec. 14}$$

**Transformación D->A (adiabática)**

Se despeja  $v_D$  de la ecuación de la adiabática  $T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1}$ . Conocido  $v_D$  y  $T_2$  se obtiene  $p_D$ , a partir de la ecuación del gas ideal.  $p_D v_D = nRT_2$

$$\text{Calor } Q_{D \rightarrow A} = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

$$\text{Variación de energía interna } \Delta U_{D \rightarrow A} = nc_v(T_1 - T_2) \quad \text{Ec. 16}$$

$$\text{Trabajo } W'_{D \rightarrow A} = -\Delta U_{D \rightarrow A} \quad \text{Ec. 17}$$

Para el ciclo completo:

*Variación de energía interna*

$$\Delta U = \Delta U_{B \rightarrow C} + \Delta U_{D \rightarrow A} = 0 \quad \text{Ec. 18}$$

En un proceso cíclico reversible la variación de energía interna es cero

*Trabajo*

$$W' = W'_{A \rightarrow B} + W'_{B \rightarrow C} + W'_{C \rightarrow D} + W'_{D \rightarrow A} = nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_B}{V_A} \quad \text{Ec. 19}$$

Los trabajos en las transformaciones adiabáticas son iguales y opuestos. Por otra parte, podemos establecer a partir de las ecuaciones de las dos adiabáticas y la relación entre los volúmenes de los vértices, lo que nos conduce a la expresión final del trabajo total del ciclo.

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D} \quad \text{Ec. 20}$$

*Calor*

En la isoterma  $T_1$  se absorbe calor  $Q > 0$  ya que  $v_B > v_A$  de modo que  $Q_{ABS} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A}$

En la isoterma  $T_2$  se cede calor  $Q < 0$  ya que  $v_D < v_C$

**Rendimiento del ciclo**

Se define rendimiento como el cociente entre el trabajo realizado y el calor absorbido

$$\eta = \frac{W'}{Q_{ABS}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \text{Ec. 21}$$



## CAPITULO II. EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

A una planta de proceso los servicios le son tan indispensables como a una ciudad y, en la planeación de una planta, forman una parte tan importante como el diseño de las unidades de proceso.

### II.1 Servicios para la Planta

Los servicios se pueden dividir en servicios primarios y servicios secundarios.

#### II.1.1 Servicios primarios

Los servicios que son vitales para la operación de una planta se llaman servicios primarios.

- Agua
- Combustible
- Vapor de fuerza y de proceso
- Almacenamiento y movimiento de materias primas y productos

#### II.1.2 Servicios secundarios

Los servicios secundarios son importantes para la planta, pero no son vitales para el funcionamiento de la misma.

- Servicios de mantenimiento
- Edificios de la planta
- Calzadas de la planta
- Servicios de vías férreas
- Protección contra incendios
- Sistemas de drenajes y eliminación de desechos de la planta
- Aire para la planta
- Seguridad en la planta

Cabe aclarar que la clasificación de los servicios depende de las necesidades de la empresa y pueden variar dependiendo de lo que produzca la planta en cuestión.



### II.1.3 Aire para la Planta

En muchas plantas químicas algunos procesos requieren alimentación de gases comprimidos a presiones elevadas. La estación de compresores es una planta dentro de otra planta, que tiene máquinas complicadas y caras, que requieren no únicamente de operación práctica sino también de los conocimientos de la ingeniería para su selección e instalación.

El diseño de los compresores es más complicado que el de una bomba debido a la compresibilidad de los gases.

Es difícil e inadecuado generalizar acerca del uso de diferentes tipos de equipo para una aplicación específica. Deben hacerse estudios económicos para cada caso y no deben olvidarse los costos de mantenimiento en la selección del compresor.

Se distinguen dos tipos de aire para la planta:

### II.1.4 Aire para Instrumentos

Para una operación adecuada de los sistemas neumáticos, se debe suministrar un aire seco y limpio y por esta razón la tubería de distribución debe estar separada de los sistemas de aire de la planta. El sistema ideal debe tener, por separado, sus compresoras y receptores de aire y algún tipo de unidad regeneradora deshidratadora.

Los sistemas de distribución de la planta para el aire de instrumentos deben ser operados a presiones sobre 45 a 50 lb/plg<sup>2</sup> de modo que los cabezales de distribución no sean mayores de 3 o 4 plg de tamaño nominal. Una presión usual es del orden de 75 a 85 lb/plg<sup>2</sup>. La presión del aire para instrumentos dentro de un área de proceso no necesita ser mayor de 35 a 40 lb/plg<sup>2</sup>.

Como una precaución contra la humedad, debe habilitarse una pierna de goteo justamente antes del reductor de presión o de la válvula de bloqueo del área. Es una práctica estándar el colocar en cada instrumento una válvula reductora por separado, con filtro y purga, para mantener constante la presión de suministro de aire.

Casi todos los problemas de mantenimiento diferentes al desgaste mecánico pueden ser eliminados si el suministro de aire es limpio y está libre de humedad. La tubería de distribución debe ser galvanizada y la tubería de transmisión de aire a los instrumentos debe ser de cobre o de aluminio, de diámetro pequeño, generalmente de 3/3 plg (9.6 mm) de diámetro exterior como máximo.

### II.1.5 Aire de Servicio para la Planta

El uso por parte de las plantas de proceso del aire comprimido como fuente de energía para equipo continúa en aumento. Para todos tipos de trabajo se diseñan herramientas accionadas por aire. Son sencillas de controlar y pueden ser utilizadas en áreas peligrosas.

Por lo tanto, en las plantas modernas generalmente se instala un sistema de servicio de aire. La tubería corre sobre rampas junto con la tubería de proceso y en todas las áreas requeridas se



localizan ramales de la tubería principal. El aire comprimido puede distribuirse por toda la planta en un solo sistema o puede suministrarse en cada área mediante compresores individuales. El aire de servicio para la planta y el aire para instrumentos corren por sistemas separados. La presión manométrica del aire de servicio se mantiene de 100 a 125 lb/plg<sup>2</sup>, mientras que la del aire para instrumentos no necesita exceder de 35 a 40 lb/plg<sup>2</sup>. El aire de servicio para la planta algunas veces se utiliza, en emergencias, como aire para instrumentos aunque, en tales casos, primero debe pasar por el correspondiente secador.

## II.2 Componentes del Sistema de Aire Comprimido

Los componentes típicos de un sistema de aire comprimido son:

**El filtro de entrada:** Quita las impurezas mecánicas del aire de entrada al compresor.

**El compresor:** Comprime el aire a un volumen pequeño, mientras aumenta la presión.

**El motor:** Proporciona la fuerza o el movimiento al compresor.

**Control del compresor:** Dirige el rendimiento del compresor. Puede ser un microprocesador, de base electromecánica o neumática. Los controles avanzados incluyen protección de la máquina y manejo de información.

**Postenfriador:** La condensación deja el aire caliente y mojado. El postenfriador baja la temperatura de salida del aire del compresor y quita agua que se condensa como aire frío.

**El separador:** Quita los líquidos del aire comprimido.

**El receptor:** Almacena una reserva grande de aire comprimido para mantener un flujo listo a la planta.

**El filtro de la línea de aire:** Quita sólidos y líquidos del aire comprimido vertido. Puede ponerse a lo largo del sistema.

**El secador.** Ayuda a eliminar alguna humedad restante en el aire comprimido usando un condensador refrigerado o un desecante. Los condensadores refrigerados enfrían el aire para condensar el vapor de agua en un líquido que pueda drenarse entonces del sistema. El desecante son polvos o geles que quitan el agua absorbiéndola.

**Trampa de condensados:** Recolecta y descarga líquido que se condensa fuera de la línea de aire. Parte integral de postenfriadores, secadores y separadores.



## EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

**La tubería de distribución:** Enlaza los componentes. Distribuye el aire de un cabezal principal a líneas ramales y subcabezales para dejarlos caer en los puntos conectados a las herramientas individuales.

**Regulador de presión:** Controla la presión del aire y el flujo hasta los puntos individuales de uso.

### **Lubricación:**

Constituye el último tratamiento a la entrada de la máquina. El lubricador tiene por objeto mezclar con aceite para aumentar la vida y rendimiento de los elementos neumáticos, ya que se disminuye el rozamiento y se evita la oxidación.

El aire entra en el lubricador, que contiene aceite, haciéndolo subir por un tubo, cayendo a continuación en forma de gotas. Estas gotas son pulverizadas y transportadas por el aire de salida.

### **Válvulas:**

Existen muchas clases de válvulas entre las que destacan:

#### ***Válvula antirretorno.***

Permiten la circulación del aire comprimido en un único sentido, quedando bloqueado el paso en sentido contrario.

Para que pueda producirse corriente de aire será necesario que la presión que ejerza éste sea mayor que la fuerza que opone el muelle.

#### ***Válvula reguladora unidireccional.***

Sirve para regular el caudal de aire comprimido en una sola dirección. Cuando el aire circula en un sentido, puede regularse mediante el tornillo desde un valor cero al valor máximo.

Si el aire circula en sentido contrario, la presión levanta la junta dejando el paso libre.

#### ***Válvula de simultaneidad (válvula Y):***

Cuando la válvula recibe presión por las entradas de izquierda y la de la derecha, deja pasar la presión por la salida de arriba.

### **Cilindros neumáticos:**

Son elementos de movimiento rectilíneo alternativo que transfieren la energía contenida en el aire comprimido en energía mecánica.

Disponen de un tubo cilíndrico cerrado, dentro del cual hay un émbolo que se desplaza fijo a un vástago que lo atraviesa.

Todos cilindros deben disponer de las juntas necesarias para evitar las fugas de aire comprimido.

Hay varios tipos de cilindros, los básicos son de efecto simple y de doble efecto.

- *Cilindro de efecto simple:*

Es aquél que realiza un trabajo en un solo sentido. Es decir, la presión del aire desplaza al émbolo o pistón retrocediendo por una fuerza externa o un muelle.

- *Cilindro de doble efecto:*

Es aquel que se puede realizar trabajo en ambos sentidos. En este caso, el émbolo o pistón delimita ambas cámaras independientes.

El avance y retroceso del pistón, y por tanto del vástago, se produce por la presión que ejerce el aire en cualquiera de las dos caras del pistón.

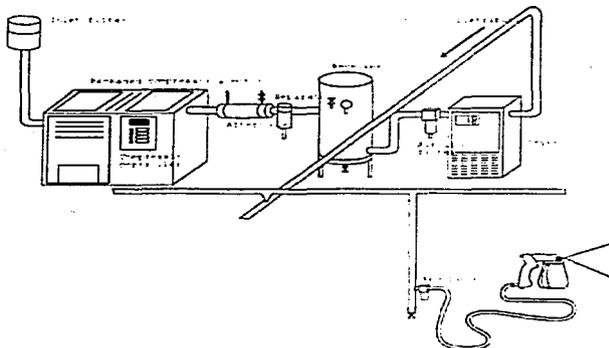


Figura 4. Componentes de un sistema de aire comprimido.

En varios puntos del sistema se deben tomar las precauciones necesarias para eliminar la humedad condensada. Los depósitos de aire localizados en cada área de uso fuerte aumentarán el volumen del sistema y representan puntos de separación o condensación para la humedad. Esta puede ser manualmente o por medio de trampas.



### 11.3 Características del Aire Comprimido

Antes de iniciar el proyecto de una instalación de aire comprimido tenemos la responsabilidad de planearnos seriamente como tendrá que ser el aire que suministremos a la instalación, ya que, obviamente, estará en función del tipo de industria que vayamos a estudiar, para decidir respecto a características de los compresores, tratamiento del aire y seleccionar los demás elementos que formarán parte del conjunto global de la instalación.

Hemos de aclarar que el aire comprimido estará permanentemente contaminado por tres causas:

- **Tamaño de partículas:** Es aceptable un tamaño máximo de partícula de 40 micrómetros en el sistema de aire comprimido o para dispositivos neumáticos. Para dispositivos neumáticos que requieren aire con tamaño menor de partícula de 40 micrómetros deberá tener filtración adicional para atrapar el tamaño de partícula límite para el dispositivo. Subsecuente a cualquier mantenimiento o modificación del sistema de aire comprimido, deberá verificarse que el tamaño máximo de partículas sea menor de 40 micrómetros.
- **Contenido de lubricante:** El contenido de lubricante deberá ser tan cercano a cero como sea posible, y bajo ninguna circunstancia deberá exceder 1 ppm p/p ó v/v. Cualquier lubricante en el sistema de aire comprimido se deberá evaluar para verificar compatibilidad con el dispositivo neumático que utiliza el aire. El uso de lubricantes automáticos está altamente a discusión.
- **Contaminantes:** El aire de instrumentos debe estar libre de contaminantes corrosivos y de gases riesgosos, los cuales podrían afectar el suministro de aire al instrumento. La entrada del sistema de aire debe monitorearse para detectar contaminantes. Si existe contaminación en la zona de entrada de aire del compresor, la toma debe moverse a diferente elevación o locación libre de contaminación.

Estos agentes que contiene el aire comprimido, son perniciosos en mayor o menor grado según la aplicación a que va destinado, aunque por experiencia se recomienda, aún a costa de incrementar los presupuestos, el efectuar un tratamiento del aire comprimido en todos los casos, pues es más barato acondicionar el aire comprimido que sufrir averías o un mal funcionamiento de los equipos neumáticos.

UNAL-FES ZARAGOZA  
F. L. DE ORIGEN



## CAPITULO III. IMPORTANCIA ENERGETICA

En muchas industrias, el aire comprimido es fuente de energía, la fuerza motriz básica de todos o gran parte de sus aparatos y máquinas. Sin embargo, no es raro encontrar instalaciones de aire comprimido escasas para la función a que van destinadas, o inadecuadas por su estado de desgaste, o por el hecho de que se utilicen por encima del fin para el que originalmente fueron diseñadas, que ocasionan graves descensos de producción.

### III.1 Importancia del uso correcto de la energía en sistemas de aire comprimido

En varias ocasiones se atribuye a las herramientas los defectos de la instalación, cuando estas son simples receptoras del aire comprimido que se les suministra a baja presión y en malas condiciones.

El usuario de una red de aire comprimido empieza a preocuparse por su situación cuando nota ciertos signos evidentes de carencia de aire o de falta de potencia y rendimiento en sus equipos neumáticos, cuyo testimonio queda reflejado en la caída de presión que se acusa. El incremento en el consumo de energía eléctrica o desgastes prematuros de piezas son otros de los síntomas que pregonan el estado deficiente de la instalación.

Cuando así ocurra, es forzoso examinar de inmediato la instalación de aire comprimido, por que:

- a) La tubería esta mal dimensionada para el consumo actual y, por tanto, tiene excesiva caída de presión. La capacidad que se le reclama a la tubería no está de acuerdo con el diámetro que tiene.
- b) Presenta fugas de aire, bien en la red, bien en equipos, mangueras, etc.
- c) Necesita un compresor adicional. Es decir, la planta generadora de aire comprimido es escasa o incorrecta.

De acuerdo a un estudio realizado por el INEGI a varias industrias químicas y alimenticias en el año de 1992, el aire comprimido consumía hasta el 15% del total de la energía consumida por una planta (Tabla 1). La tabla 2 muestra una relación de los grupos industriales con mayor consumo de energía eléctrica para la producción de aire comprimido en los Estados Unidos.

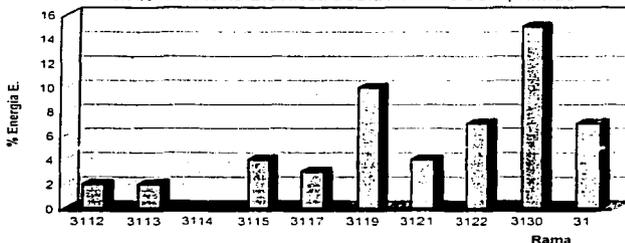




Tabla 1. Desglose de consumo de demanda en % de Energía Eléctrica

Rama	Refrigeración	Aire comprimido	Bombos	Ventilación	Otros motores	Alumbrado	Calentamiento	Diversos	Total
3112	57	2	5	0	19	12	0	5	100
3113	27	2	24	6	40	2	0	0	101
3114	0	0	0	0	98	2	0	0	100
3115	1	4	4	4	78	3	5	0	99
3117	0	3	10	5	79	3	0	0	100
3119	50	10	10	10	15	5	0	0	100
3121	1	4	4	10	78	2	0	0	99
3122	0	7	1	1	88	2	0	0	99
3130	35	15	15	8	21	2	0	0	100
31	14	7	9	7	60	3	1	0	101

Gráfico 1. Representación del Desglose de consumo de demanda en % de Energía Eléctrica debido al Aire Comprimido



(FUENTE: CONAE. *Perfiles Energéticos de la Industria Química y Alimenticia*. Secretaría de energía; Comisión Nacional para el Ahorro de Energía; Comisión de la Unión Europea. México, 1995.)

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Tabla 2. USO DE LA ENERGIA EN LOS SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO POR GRUPO INDUSTRIAL.

NIC	Grupo Industrial	Sistema de aire comprimido GWh/año	Sistema total de motores GWh/año	Aire comprimido como % usado del sistema de motor	Aire comprimido como % de uso de la Energía Eléctrica total
28	Químicos y productos relacionados	39,960	144,362	27.7 %	20.1%
33	Industrias de metales primarios	12,609	87,935	14.3%	8.3%
29	Petróleo y Productos de carbón	7,930	51,938	15.3%	15.9%
32	Equipo de transporte	5,519	29,549	18.7%	14.0%
30	Caucho y productos plásticos Misceláneos	4,767	36,610	13.0%	10.9%
26	Papel y productos Relacionados	4,533	99,594	4.6%	3.7%
36	Electrónica y otros equipos eléctricos	3,008	13,243	22.7%	9.1%
20	Alimentos y Productos Semejantes	2,898	37,797	7.7%	4.5%
22	Productos de fabrica de tejidos	2,392	16,750	14.3%	7.2%
24	Productos de madera y Madera aserrada	1,901	22,946	8.3%	8.7%
34	Productos fabricados de metal	1,777	7,296	24.4%	5.2%
35	Maquinaria industrial y equipo	1,172	7,378	15.9%	3.6%
38	Instrumentos y productos relacionados	721	6,487	11.1%	4.9%
32	Productos de piedra, arcilla, y vidrio	566	2,231	25.4%	1.6%
25	Mobiliaria y adornos	460	3,694	12.5%	6.9%
27	Impresión y publicación	437	5,961	7.3%	2.5%
23	Ropa y otros productos textiles	398	1,168	34.1%	5.1%
31	Cuero y productos de cuero	1	491	0.3%	0.2%
20-39	Producción total	91,050	575,428	15.8%	10.0%

Fuente: Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services. Office of Industrial Technologies Energy Efficiency and Renewable Energy U.S. Department of Energy  
[www.oit.doe.gov/bestpractices](http://www.oit.doe.gov/bestpractices)

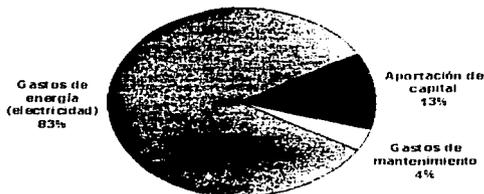


Es importante conocer los gastos que ocasiona el sistema de aire comprimido para poder llevar a cabo una administración de la energía y poder controlar los costos de energía. Además, es necesario conocer tanto los costos, así como los usos de la energía para comprender mejor la manera en como se emplea la energía y poder así poder identificar las áreas de mayor consumo, y las áreas de mayor desperdicio de energía. Una vez identificadas estas áreas podemos buscar los ahorros potenciales.

### III.2 Gastos en electricidad por el Compresor

La distribución de aire comprimido en una planta requiere equipo costoso (compresores) que consume cantidades significativas de electricidad y que necesita mantenimiento frecuente.

Los gastos en electricidad por el compresor ascienden hasta el 83% del total de los gastos de una instalación de aire comprimido, las aportaciones de capital representan solamente un 13% y los de mantenimiento apenas un 4%, por esta razón, es necesario llevar a cabo un estudio de la eficiencia en el uso racional de energía en las instalaciones de aire comprimido y así poder reducir los gastos en electricidad y optimizar el funcionamiento del compresor y, en general, del sistema de aire comprimido, ya que una mínima alza en los gastos de mantenimiento permite reducciones considerables en los gastos de energía.



*Gráfico 2. Representación de los gastos ocasionados por el compresor.*

Generalmente, los productores son rápidos para identificar pérdidas de energía en las superficies calientes y procuran el aislamiento de estas superficies. Pero, por alguna razón, no son sensibles cuando se trata de ahorrar aire comprimido. La única ocasión en que las fugas de aire y los filtros de aire sucios toman alguna atención, es cuando el aire y las pérdidas de presión interfieren con la operación normal de la planta.



Una porción significativa de la energía gastada asociada con los sistemas de aire comprimido puede ser evitada poniendo en práctica algunas de las recomendaciones que aquí se explican.

La energía gastada en los sistemas de aire comprimido debido a una mala instalación y mal mantenimiento puede cuantificarse en más del 50% de la energía consumida por el compresor. Cerca de la mitad de esta energía se puede ahorrar practicando medidas de conservación de la energía.

Cerca Del 80 al 93% de la energía eléctrica usada en compresores industriales de aire es convertida en calor. En muchos casos, un apropiado diseño de una unidad recuperadora puede recuperar cerca del 50 al 90% de esta energía térmica disponible y utilizarla para calentar aire o agua.

### III.3 Medidas de ahorro en los diagnósticos energéticos

Algunas medidas que comúnmente se usan para reducir costos de compresión de aire en una planta son: reparación de fugas de aire; uso de presiones más bajas a la entrada del compresor; utilizar un compresor pequeño a carga completa en lugar de uno grande a parte de su carga; reducir la temperatura del medio en la entrada del compresor (es preferible tomar aire del exterior de un lugar aislado de la planta); recuperación del calor de compresión y motores de alta eficiencia; apagar el compresor durante los periodos que no se necesita; usar un post-enfriador para reducir costos de refrigeración en secadores de aire comprimido; reducir pérdidas en los sistemas de tubería debido a válvulas, codos, obstrucciones, rugosidades, cambio de diámetro, etc., y un mantenimiento apropiado de los compresores, accesorios y los sistemas de tubería (óxido, válvulas rotas y anillos desgastados causan ineficiente operación del compresor. También los filtros obstruidos, secadores, etc., que dejan caída de presión y gasto).

Estas medidas se explicarán más adelante.

Se estima que el porcentaje de ahorros en aire comprimido que incluye el ahorro obtenido al nivel de gestión energética y el nivel de potencial viable de ahorros puede ser de hasta un 30% para el año 2005 en México.

#### *Los Ahorros Energéticos a nivel de gestión energética*

Aire comprimido, ahorros de hasta un 10%

- Eliminación de fugas
- Reducción de la presión de operación y las cantidades de aire comprimido
- Ajuste de las bandas entre compresores y motores
- Purga de condensados en el sistema de distribución
- Cierre de zonas del sistema de distribución en periodos de no-utilización



*Intensidad energética a nivel potencial viable de ahorros*  
Aire comprimido, ahorros de hasta un 25%

- Cambio de la carga de aire para carga de aire más frío
- División del sistema de distribución a zonas que se pueden cerrar individualmente
- Suministro descentralizado en lugar de distribución a larga distancia
- Uso de compresores de varios pasos con enfriadores entre los compresores
- Uso de almacenamiento de aire comprimido si las cargas fluctúan
- Cambio de los equipos de uso de aire comprimido para equipos que funcionan directamente con electricidad
- Suministro a las necesidades de aire comprimido desde compresores que operan al nivel de presión correspondiente
- Cambio de transmisión por banda eficiente entre compresores y motores

*(FUENTE: CONAE. Perfiles Energéticos de la Industria Química y Alimenticia. Secretaría de energía; Comisión Nacional para el Ahorro de Energía; Comisión de la Unión Europea. México, 1995.)*

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



## CAPITULO IV. PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO

Una evaluación energética del sistema de aire comprimido puede reflejar los verdaderos costos de la compresión del aire e identificar oportunidades para aumentar la eficiencia y la efectividad.

### IV.1 Evaluación Energética

Consiste en la recolección de datos sobre el suministro y consumo de todas las formas de energía con el propósito de evaluar las posibilidades de ahorro de energía y la cuantificación de las mismas, así como para determinar la conveniencia de la oportunidad económica de ejecutarla.

Para llevar a cabo la evaluación energética en los sistemas de aire comprimido es necesario considerar los siguientes pasos:

1. Es importante al comenzar, tener conocimiento de la instalación a la cual se le aplicara la evaluación, por lo que es necesario saber de antemano el número de herramientas que lo emplean y cuáles son las necesidades de aire comprimido que se tienen en la planta.
2. Aplicación de un cuestionario en el cual queden reflejados todos los valores correspondientes al caudal y a las pérdidas de presión permisibles en cada elemento integrante de la instalación, facilitando con ello la visión en conjunto del límite de pérdida de presión con que habremos de contar y la suma del caudal de aire que necesitamos

### CUESTIONARIO PARA EL ESTUDIO DE UNA INSTALACIÓN DE AIRE COMPRIMIDO.

#### A) Consumo de aire.

Número de máquinas o herramientas	Características	Consumo unitario, ft <sup>3</sup> /min	Consumo total, ft <sup>3</sup> /min	Tiempo de utilización en horas	Trabajo continuo (c) o intermitente (i)	Presión de trabajo, en psi
<b>Resumen</b>						



PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO  
EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



B) Pérdidas de presión.

Número	Designación	Psi
	Refrigerador posterior (agua o aire/aire)	
	Secador de aire (frigorífico o de absorción)	
	Filtro separador (cerámico o centrífugo)	
	Secadores por delieuescencia	
	Red de aire comprimido (tuberías)	
	Equipos de acondicionamiento (filtro-regulador-lubricador)	
Resumen		

3. Establecer los consumos individuales de aire de cada una de las máquinas neumáticas (consumo específico). Teniendo en consideración que, este dato en absoluto es real, puesto que cada herramienta tiene un tiempo de inactividad, según la índole de su trabajo, que llamamos *coeficiente de utilización*.
4. Multiplicando este coeficiente de utilización por el consumo total de cada herramienta nos dará el consumo real.
5. Evaluar el promedio ponderado de los coeficientes de utilización obteniéndose *el coeficiente de simultaneidad* de la utilización del aire comprimido en la planta industrial.

Al ir a proyectar la red de distribución de aire comprimido es necesario: primero, estudiar todas las aplicaciones del aire comprimido y pasarlas a un plano de planta, en donde se dejarán localizadas

IV.2 Procedimiento para Realizar una Evaluación en Sistemas de Aire Comprimido

1. Recolección de información básica e inventario de los equipos consumidores de aire comprimido.
  - Identificación de las áreas principales de producción y uso de aire comprimido.
  - Identificación de las fuentes de producción de aire comprimido.
  - Identificación de los consumidores de aire comprimido, capacidad instalada y horas de operación.
  - Información histórica de facturas de suministro de energía y de demanda de aire comprimido.

TRABAJO CON  
FALLA DE ORIGEN



2. Elaborar balances de energía, con el objeto de conocer la distribución de aire comprimido a lo largo del proceso o en las diferentes áreas, es decir la caracterización de la carga. Esto incluye:
  - Toma de datos
  - Registros y mediciones puntuales
  - Todas las mediciones y registros de aire comprimido deben estar referidas a un mismo periodo de tiempo y expresados en las mismas unidades.
3. Determinar la incidencia del consumo de aire comprimido y de energía eléctrica de cada equipo o grupo de equipos en el consumo total y por lo tanto en el costo total.
4. Obtener índices de consumo de aire comprimido y consumos eléctricos los cuales pueden ser usados para determinar la eficiencia energética de las operaciones y consecuentemente, el potencial de ahorro de energía. Índices típicos:
  - Consumo específico de aire comprimido
  - Consumo específico de electricidad
  - Factor de carga
5. Determinar los potenciales de ahorro de energía por equipos, áreas o centros de costos, mediante la evaluación técnica detallada en los diferentes campos, como:
  - a. Sistemas eléctricos: evaluación de la transformación de cargas eléctricas, sistema tarifario, generación propia.
  - b. Sistemas mecánicos: evaluación del sistema de aire comprimido, manejo de aire.
  - c. Sistemas térmicos: sistemas de recuperación de calor residual, sistemas de refrigeración y aire acondicionado.
6. Identificar las medidas apropiadas de ahorro de energía.
7. Evaluación de los ahorros de energía en términos de costos. Se lleva a cabo una evaluación económica que permite realizar un análisis en función de los desembolsos requeridos para poner en práctica las recomendaciones.

Después de la evaluación y teniendo como base las conclusiones y recomendaciones de la misma, se ejecuta un Plan de Acción. Estos resultados deben ser conocidos por todo el personal de la empresa porque de esta manera comienza a crearse un buen ambiente de motivación y concientización. Así mismo, debe completarse con cursos de capacitación dirigidos al personal, y de incentivos. Lo que incidirá en mayores rendimientos del mismo.



### IV.3 Etapas en una Evaluación Energética

#### Evaluación Preliminar

- Observación visual por las instalaciones para determinar oportunidades evidentes de ahorro
- Entrevista con responsables de operación y mantenimiento → conocer el proceso e identificar equipos de mayor consumo energético
- Determinar el consumo específico de energía a partir de datos de producción y facturas de energía
- Primera evaluación de eficiencia energética → comparación de consumo específico con valores de referencia
- Identificación de otras posibles oportunidades de reducir costos energéticos
- Elaboración de reporte para la dirección de la empresa
- Preparación de plan de trabajo para una evaluación detallada

#### Evaluación Detallada

- Observación de prácticas de operación y mantenimiento de las instalaciones
- Medición de parámetros operacionales con instrumentación fija existente y equipos de medición portátiles
- Compilación de posibles medidas de eficiencia energética
- Evaluación del potencial de reducción del consumo y costo de la energía para cada medida identificada
- Estimación del costo de ejecución de las medidas
- Evaluación económica de cada medida (tiempo de retorno de la inversión)
- Selección/priorización de las medidas evaluadas según nivel de inversión, rentabilidad y facilidad de ejecución
- Elaboración de reporte para la dirección de la empresa
- Preparación del plan de acción para la puesta en marcha de las medidas recomendadas

Como opción, se puede incluir asistencia en implementación de recomendaciones y evaluación de sus efectos.



#### IV.4 Cuestionario de Evaluación

A continuación se presenta un cuestionario el cual nos puede ayudar en la recolección de datos del sistema de aire comprimido, así como de su consumo de energía eléctrica. Se incluyen también preguntas relacionadas con el mantenimiento del sistema y sobre programas de ahorro de energía en la planta, con el objeto de identificar los potenciales de ahorro energético y, evaluar las oportunidades de ahorros energéticos para, entonces, aplicar un plan de acción dependiendo de los recursos con que se cuente.

##### Evaluación General del Sistema de Aire Comprimido en una Planta

###### *I. Monitoreo del Sistema de Aire Comprimido*

Objetivo: Conocer un poco de información sobre la empresa y su sistema de aire comprimido.

1. ¿Tiene un sistema de aire comprimido para proporcionar energía en su proceso de producción?

SI  NO

2. ¿Cuál es su puesto?

3. ¿Cuál es el producto principal que se produce en su planta?

4. ¿Cuántos días a la semana promedio operan para la producción?

5. ¿Cuántas horas por día promedio?

###### *II. Descripción del Sistema de Aire Comprimido*

Objetivo: Conocer las características del sistema de aire comprimido de la planta.

1. ¿Cuántos compresores tiene su sistema de aire comprimido?

2. ¿Cuál es la potencia total de estos compresores?

3. ¿Qué tipo de dispositivos usa para controlar el sistema de aire comprimido?

4. ¿Tiene o usa un esquema del sistema controlador sólo, o tiene controles que se conectan a un sistema de computadoras?



**III. Encargado del Sistema de Aire Comprimido**

1. ¿Quién es el responsable en su organización para la dirección y mantenimiento de aire comprimido?

2. ¿Cuál es el objetivo primario del aire comprimido?

3. ¿Tiene otros objetivos?

4. ¿Tiene un contrato de servicio de aire comprimido o para los componentes del sistema de aire comprimido?

SI  NO

5. Si es así, ¿quién proporciona el servicio?

6. ¿Que servicios le proporcionan bajo el contrato?

- descubrimiento de fugas
- reparación de las fugas
- supervisión de la energía
- perfil de carga
- mantenimiento preventivo de los compresores
- mantenimiento preventivo de auxiliares
- valoración de controladores y equipo
- emergencias
- otro (especifique)

**IV. Prácticas de Mantenimiento.**

1. ¿Que actividades de mantenimiento se efectúan regularmente en el equipo de aire comprimido?

2. En general, ¿Qué tan frecuente realiza usted el mantenimiento?

Anual  Cada seis meses  Cada cuatro meses  Mensual  Semanal

3. ¿Quién realiza estas actividades?

4. ¿Tiene algún programa de rutina de detección o prevención de fugas en su planta?

SI  NO

5. ¿Que actividades realiza como parte de éste programa?

6. ¿Quién realiza estas actividades?



PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO  
EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



7. En los últimos 12 meses, ¿ha estado su sistema de aire comprimido bajo mantenimiento o reparaciones no programadas?

SI  NO

8. ¿Si es así, durante cuanto tiempo estuvo parado el sistema?

9. ¿Se ha presentado alguno de los siguientes problemas en la operación de sus sistema de aire comprimido en los últimos 12 meses?

- presión inadecuada en el sistema
- presión inadecuada en puntos específicos del sistema
- exceso de humedad en el aire comprimido
- exceso de aceite en el aire
- anomalías en los filtros de aire

**1. Manejo del Sistema de Monitoreo.**

1. En los últimos 2 años, ¿ha medido cualquiera de las cantidades siguientes con respecto a su sistema de aire comprimido?:

- Rendimiento en los motores del compresor
- Consumo eléctrico del motor del compresor semanal o mensualmente
- Niveles de presión y
- Fugas de aire comprimido

2. ¿Se ha desarrollado un perfil de carga para su sistema de aire comprimido, es decir a preparado análisis de cómo varía el rendimiento de su sistema durante una semana típica?

SI  NO

3. ¿Quién llevo a cabo este desarrollo?

4. ¿Se ha evaluado la efectividad de su sistema de control del compresor en los últimos 2 años?

SI  NO

5. ¿Ha realizado evaluaciones para instalar o reemplazar controladores del motor del compresor o en otros equipos neumáticos?

SI  NO

**VI. Sistema de Evaluación Energética.**

1. ¿Ha realizado o emprendido un estudio sobre como hacer su sistema de aire comprimido más eficaz energéticamente?

SI  NO



PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO  
EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



2. ¿En que año se inició el estudio?	
3. ¿Quién realizó el estudio?	
4. ¿Qué elementos se incluyeron en el estudio?	
- Estimación del uso de la energía en el sistema de aire comprimido	<input type="checkbox"/>
- Perfil de carga basado en medidas del sistema	<input type="checkbox"/>
- Identificación de usos innecesarios o impropios del aire comprimido	<input type="checkbox"/>
- Estimación de pérdidas debido a fugas	<input type="checkbox"/>
- Valoración del sistema de control	<input type="checkbox"/>
- Valoración del sistema de distribución para caídas de presión y su eficacia	<input type="checkbox"/>
- Valoración de equipo auxiliar como separadores, filtros y secadores	<input type="checkbox"/>
- Valoración de la capacidad de almacenamiento de aire	<input type="checkbox"/>
- Recomendaciones para mejoras	<input type="checkbox"/>
- Estimación de costos y economía de la energía para las medidas recomendadas	<input type="checkbox"/>
- Otros (especifique)	<input type="checkbox"/>
5. ¿Ha llevado a cabo cualquiera de las medidas recomendadas en la evaluación del sistema de aire comprimido?	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
6. ¿Cuál es la razón principal para que no se haya llevado a cabo cualquiera de estas medidas?	
7. ¿Qué medidas ha llevado a cabo?	
- Reducción de fugas	<input type="checkbox"/>
- Cambios en los controles del compresor	<input type="checkbox"/>
- Mejoras en los equipos auxiliares al sistema	<input type="checkbox"/>
- Reducción de uso de aire comprimido innecesario	<input type="checkbox"/>
- Cambios en el sistema de distribución	<input type="checkbox"/>
- Aumento en la capacidad de almacenamiento	<input type="checkbox"/>
- Equipo de recuperación de calor	<input type="checkbox"/>
- Otros (especifique)	<input type="checkbox"/>
8. ¿Tiene a su personal entrenado sobre la eficacia del sistema de aire comprimido?	<input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> NO
9. ¿Quién lo capacitó?	

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



PROPUESTA DE EVALUACION Y ANALISIS ENERGETICO  
EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



Este cuestionario de control hará resaltar los puntos débiles y fuertes para un programa de administración de la energía.

Un punto débil que se encontrará en muchas empresas es la falta de información estadística sobre el uso de la energía en sus diferentes actividades, departamentos o secciones.

Después de haber recolectado la información y analizado el uso de la energía y sus costos, el paso siguiente es examinar las diferentes maneras en que se puede mejorar la evaluación energética e identificar las oportunidades de ahorro de energía.

TRABAJO CON  
FALLA DE ORIGEN



## CAPITULO V. PROGRAMA PARA IDENTIFICAR LAS OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGIA

La recolección de datos para un control energético son útiles para conocer el deterioro de la planta a medida que envejece. El consumo de energía eléctrica y aire comprimido puede disminuir, aumentando la eficiencia y optimizando el consumo en los equipos neumáticos.

La elaboración de un programa de ahorro energético en los sistemas de aire comprimido, como el que se muestra a continuación, ayudará a establecer metas en el consumo de energía, uso y costo del aire comprimido a la planta.

Los resultados de las actividades realizadas nos permiten tener un buen conocimiento de la situación energética de la planta. Por un lado la identificación de puntos débiles con respecto al suministro y uso de energía en la planta y, por otro lado, la experiencia ganada, conducen a proponer diferentes medidas de mejoramiento.

### Programa para Identificar las Oportunidades de Ahorro de Energía

#### Registro del Consumo de Energía Eléctrica

1. Elabore un análisis detallado de la energía consumida durante el año anterior
2. Revise los registros de consumo y determine si la información adecuada se encuentra disponible (datos estadísticos)
3. Elabore un diagrama Sankey (ver Anexo A. Terminología usada para el aire comprimido)
4. Compare el consumo con:
  - a. Otros lugares
  - b. Otros periodos
  - c. Presupuesto



PROGRAMA PARA IDENTIFICAR LAS  
OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGÍA



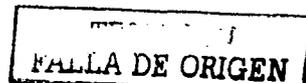
5. Compare para cada operación o actividad de aire comprimido el consumo estándar con el consumo actual e identifique pérdidas y mejoras
6. Verifique las lecturas de los contadores contra los registros
7. Verifique los registros contra la facturación

Mantenimiento

1. Revise los informes del personal de mantenimiento
2. Determine si se debe trabajar en base a un mantenimiento planificado y si no, ¿por qué?
3. Verifique que todos los mecanismos y equipos de control funcionen bien y que se prueben frecuentemente
4. Considere que otros instrumentos adicionales podrían ser útiles para medir y controlar parámetros importantes (por ejemplo, de temperatura, presión, flujo y humedad)
5. Determine si el mantenimiento es adecuado (por ejemplo, la lubricación, los filtros, válvulas)
6. Considere como podría mejorarse el mantenimiento
  - más personal técnico capacitado
  - cambios de diseño
7. Revise el almacenamiento de aire comprimido y su manejo
8. Considere si las temperaturas y las presiones de los equipos son adecuadas o excesivas.

Personal

1. Considere si los trabajadores de mantenimiento están adecuadamente entrenados y motivados en el uso racional y ahorro de la energía
2. Consulte propaganda sobre conservación de energía:
  - Revistas
  - Circulares
  - Sugerencias de empleados
  - Pláticas y cursos
  - Participación en grupos





#### Inversiones de Capital

1. Revise los proyectos de inversión en aire comprimido y energía eléctrica
2. Revise argumentos a favor y en contra de las inversiones
3. Reconsidere la renovación de los motores de los compresores o del compresor completo
4. Considere la posibilidad de reemplazar los motores convencionales por motores de alta eficiencia
5. Considere la posibilidad de modificaciones a la planta para
  - enfriar el aire de entrada al compresor
  - recuperación del calor de desecho
  - instalar controles automáticos
6. Considere el almacenamiento de aire comprimido para los periodos de alta demanda
7. Considere el cambio de equipo de lubricación por sistemas actuales de lubricación automática
8. Considere otras posibilidades para reciclar energía

Habiendo evaluado cuidadosamente las sugerencias, debería formularse una lista de medidas y objetivos para la empresa, siendo este un paso que puede hacerse en colaboración con la misma gerencia de la empresa. Esta lista debe contener todas las medidas formuladas en un orden de prioridad de acuerdo a los resultados de las evaluaciones.



## CAPITULO VI. MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR ENERGIA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO

En el capítulo III se mencionó ya la importancia energética que representa el sistema de aire comprimido dentro de una empresa y la manera en que están distribuidos los costos de la instalación de un compresor.

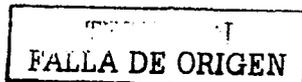
El uso de una evaluación energética nos ayuda a identificar las ineficiencias del sistema. Si un sistema presenta deficiencias en diseño o de suministro de aire, se encuentra operando pobremente o poco satisfactoriamente. Esta evaluación nos indicará los puntos débiles del sistema y nos dará medidas con las cuales se pueden obtener ahorros tanto en la compresión de aire, como en la distribución del mismo hasta los sitios de uso. Algunas de las más comunes son:

- reparación de fugas de aire
- uso de presiones más bajas
- uso de un compresor pequeño a carga completa en lugar de uno grande a parte de su carga
- uso de aire del exterior de la nave para la compresión
- preenfriamiento del aire
- recuperación del calor de compresión
- uso de motores de alta eficiencia
- apagar el compresor durante los periodos que no se utilice
- usar un post-enfriador para reducir costos de refrigeración en secadores de aire comprimido
- reducir pérdidas en los sistemas de tuberías y accesorios
- mantenimiento del sistema de compresión de aire

Los resultados por la aplicación de las medidas que resulten de la evaluación energética se verán reflejados en el óptimo funcionamiento del sistema de compresión y distribución del aire comprimido y, consecuentemente, la correcta operación de los equipos neumáticos.

Los ahorros que se obtienen siguiendo estas medidas pueden alcanzar hasta el 25% del total de la energía consumida.

A continuación se describen las medidas recomendadas:





## VI.1 Reparación de las fugas de aire

Las fugas de aire asociadas con los sistemas de aire comprimido son la causa más simple de pérdidas de energía en las plantas industriales. Se requiere energía para comprimir el aire, de esta manera, la pérdida de aire comprimido es pérdida de energía para la planta. Un compresor debe trabajar más y por largo tiempo para compensar la pérdida de aire, y debe usar más energía en el proceso. En varias plantas estudiadas en EE.UU., se reveló que más del 40% del aire comprimido se pierde a través de las fugas.

Un silbido de fugas de aire puede escucharse algunas veces aún en plantas de producción con alto nivel de ruido. Sin embargo, estos no reciben a menudo atención. Debido a estas fugas, se presentan caídas de presión en las máquinas y herramientas neumáticas que lo utilizan.

Hasta ahora una respuesta frecuente a tal problema es instalar un compresor más grande encargado de checar el sistema y encontrar el problema.

Las fugas de aire, en general, aparecen en juntas, conexiones con pestañas, codos, reducciones, expansiones bruscas, tallos de válvulas, filtros, mangueras, válvulas check, válvulas de alivio, extensiones y el equipo conectado a las líneas de compresión de aire.

Una buena práctica es checar las juntas para apretarlas periódicamente. Las fugas de aire también ocurren comúnmente en los puntos finales de uso o donde las tuberías de aire comprimido se conectan al equipo. Debido a la frecuente apertura y cierre de las tuberías de aire comprimido en estos puntos las juntas se desgastan rápidamente, en este caso es necesario reemplazarlas periódicamente.

Hay muchas formas de detectar fugas de aire en un sistema de aire comprimido. Quizás la manera más simple sea escucharlas. Otra forma de detectar las fugas de aire, especialmente las pequeñas, es probar el área sospechosa con agua y jabón y mirar las burbujas de jabón. Este método no es obviamente práctico para un sistema grande con muchas conexiones. Una manera moderna de checar fugas de aire es usar un detector acústico de fugas, el cual consiste de un micrófono direccional, amplificadores, filtros de audio e indicadores digitales.

Una forma práctica de cuantificar fugas de aire en una planta de producción total es dirigir una prueba de caída de presión. La prueba se conduce deteniendo todas las operaciones que usan el aire comprimido, y apagar el compresor y cerrar todas las válvulas de alivio de presión. De esta manera, cualquier caída de presión en las líneas de aire comprimido es debida a los efectos acumulativos de las fugas de aire.

Una fuga de aire comprimido puede ser modelada como flujo a través de un nodo convergente. Una ecuación utilizada para calcular el flujo de aire a través de la fuga es la siguiente:

$$M = 0.532 * A * P_0 / T_0$$



MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR  
ENERGIA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



Donde:

M = flujo másico de aire, en lb<sub>m</sub>/s

A = área de la fuga, en pulg<sup>2</sup>

P<sub>0</sub> = Presión del sistema, en lb<sub>m</sub>/plg<sup>2</sup> absoluta

T<sub>0</sub> = Temperatura del sistema, en °Rankine

Ejemplo de una fuga típica de 1/8 de pulgada:

Diámetro de la fuga = 1/8 pulg = 0.125 pulg

Área de la fuga = A = 0.0123 pulg<sup>2</sup>

Presión Barométrica = 14.7 psia

Presión del sistema = P<sub>0</sub> = 100 psig = 114.7 psia

Temperatura del sistema = T<sub>0</sub> = 70 °F = 530 °Rankine

Usando la ecuación anterior:

$$M = 0.532 * (0.0123) * 114.7/530$$

$$M = 0.0326 \text{ lb}_m/\text{s}$$

Convirtiendo a ft<sup>3</sup>/min:

$$\text{El aire a } 70 \text{ °F y } 14.7 \text{ psia pesa } 0.07494 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$(0.0326 \text{ lb}_m/\text{s})(60 \text{ s}/\text{min}) / 0.07494 \text{ lb}_m/\text{ft}^3 = 26.1 \text{ ft}^3/\text{min}$$

Esta fuga de 1/8" gasta 26.1 pies cúbicos por minuto.

Para cálculos más rigurosos se deben tomar en cuenta la forma de la fuga y el tipo de flujo.

Otra forma de evaluar el aire comprimido que se escapa por una fuga es la siguiente:

Para compresores recíprocos, cierre el suministro de aire a todos los equipos de aire comprimido, prenda el compresor hasta que el sistema alcance la máxima presión del sistema y se apague, y anote el tiempo. Debido a las fugas de aire, la presión del sistema empezará a caer y el compresor arrancará nuevamente; anote el tiempo. Los intervalos de tiempo durante los cuales el compresor está prendido y apagado deberán registrarse por lo menos tres veces para calcular un valor promedio.

Sea T = tiempo prendido, en minutos

t = tiempo apagado, en minutos

Q = capacidad del compresor, en l / s

L = total de las fugas del sistema, en l / s

L se calcula así:

$$L = Q * T / (T+t)$$



Con compresores de paletas rotativas o compresores tornillo, se carga el sistema durante un minuto, luego se para el compresor hasta que la presión caiga 1 bar (14.5 psi). El compresor se arranca nuevamente y se toma el tiempo necesario para que el sistema recupere 1 bar.

La tabla 4 muestra la relación que existe entre el tamaño de la fuga y la proporción de aire que escapa por el orificio. Para dar una idea más clara del gasto energético que esto implica, en la tabla 3 se dan valores estimados de la potencia que requiere el compresor para compensar el aire que escapa.

Tabla 3. PÉRDIDAS DE POTENCIA POR FUGAS.

Diámetro del orificio		Fuga de aire a 7 bar (100 psig)		Potencia requerida para comprimir el aire que escapa
mm	pulgadas	dm <sup>3</sup> /s	Scfm	kW
0.4	1/64	0.2	0.4	0.1
1.6	1/16	3.1	6.5	1.0
3.0	1/8	11.0	23.2	3.5



MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR  
ENERGIA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



TABLA 4. PROPORCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO FUGADO  
DES CUANDO ESTAN EN ESTANDBY POR MINUTO  
Condiciones Standard = 14.7 PSIA - 70.0 °F (21.1 °C)

Presión del Aire PSIG	Tamaño de la Fuga (in)										
	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
	Proporción de Fuga en SCFM										
1	0.028	0.112	0.45	1.8	7.18	16.2	28.7	45	64.7	88.1	115
2	0.04	0.158	0.633	2.53	10.1	22.8	40.5	63.3	91.2	124	162
3	0.048	0.194	0.755	3.1	12.4	27.8	49.5	77.5	111	152	198
4	0.056	0.223	0.892	3.56	14.3	32.1	57	89.2	128	175	228
5	0.062	0.248	0.993	3.97	15.9	35.7	63.5	99.3	143	195	254
6	0.068	0.272	1.09	4.34	17.4	39.1	69.5	109	156	213	278
7	0.073	0.293	1.17	4.68	18.7	42.2	75	117	168	230	300
9	0.083	0.331	1.32	5.5	21.2	47.7	84.7	132	191	260	339
12	0.095	0.379	1.52	6.07	24.3	54.6	97	152	218	297	388
15	0.105	0.42	1.68	6.72	26.9	60.5	108	168	242	329	430
20	0.123	0.491	1.96	7.86	31.4	70.7	126	196	283	385	503
25	0.14	0.562	2.25	8.98	35.9	80.9	144	225	323	440	575
30	0.158	0.633	2.53	10.1	40.5	91.1	162	253	365	496	648
35	0.176	0.703	2.81	11.3	45	101	180	281	405	551	720
40	0.194	0.774	3.1	12.4	49.6	112	198	310	446	607	794
45	0.211	0.845	3.38	13.5	54.1	122	216	338	487	662	865
50	0.229	0.916	3.66	14.7	58.6	132	234	366	528	718	938
60	0.264	1.06	4.23	16.9	67.6	152	271	423	609	828	1082
70	0.3	1.2	4.79	19.2	76.7	173	307	479	690	939	1237
80	0.333	1.34	5.36	21.4	85.7	193	343	536	771	1050	1371
90	0.37	1.48	5.92	23.7	94.8	213	379	592	853	1161	1516
100	0.406	1.62	6.49	26	104	234	415	649	934	1272	1661
110	0.441	1.76	7.05	28.2	113	254	452	705	1016	1383	1806
120	0.476	1.91	7.62	30.5	122	274	488	762	1097	1494	1951
125	0.494	1.98	7.9	31.6	126	284	506	790	1138	1549	2023
150	0.582	2.37	9.45	37.5	150	338	600	910	1315	1789	2338
200	0.761	3.1	12.35	49	196	441	781	1225	1764	2401	3136
250	0.935	3.8	15.18	60.3	241	542	964	1508	2169	2952	3856
300	0.995	4.88	18.08	71.8	287	646	1148	1795	2583	3515	4592
400	1.22	5.98	21.81	94.5	378	881	1512	2360	3302	4630	6045
500	1.519	7.41	26.55	117.3	469	1055	1876	2930	4221	5535	7661
750	2.24	10.98	43.85	173	696	1566	2783	4350	6264	8525	11136
1000	2.985	14.6	58.21	233.1	924	2079	3696	5790	8316	11318	14784

Fuente: Clean Dry Air, Inc  
www.cleandryair.com





### VI.2 Uso de presiones más bajas

El uso de presiones más bajas supone que la red de aire comprimido se encuentra en buen estado de mantenimiento y no presenta fugas. En donde se conecta equipo neumático, los ahorros en consumo y por consiguiente de energía se pueden obtener verificando que el equipo está instalado correctamente de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Generalmente se ahorra energía cuando el equipo se puede operar a presiones más bajas y especialmente cuando las condiciones de suministro son tales que la presión de salida máxima del compresor se puede reducir.

Muchos equipos se utilizan hoy en día a presiones mayores de las necesarias para su uso, por ejemplo, pistolas para pintar, chorros de enfriamiento, gatos, sistemas de control, cilindros neumáticos de acción simple y de doble acción, etc. La conexión directa de reguladores de presión estándar que mantengan la presión de suministro del equipo al mínimo necesario producen directamente considerables ahorros en el consumo de aire comprimido y de energía. Cuando el equipo que se emplea está conectado a una red de suministro cuya presión fluctúa entre 6 a 7 bar (70 a 100 psig) y la presión requerida para su funcionamiento normal es de 5.5 bar (80 psig), el potencial de ahorro de energía al regular el aire a 5.5 bar es de aproximadamente 14%, y si la presión requerida es de solamente 5 bar (70 psig), los ahorros aumentan a aproximadamente 24%.

La energía anual ahorrada como resultado de reducir la presión del compresor es determinada multiplicando el consumo de energía anual del compresor por la fracción de poder del compresor ahorrada.

Algunas aplicaciones requieren muy bajas presiones de aire comprimido. En tales casos, la necesidad puede ser encontrar un soplador en lugar de un compresor. Se puede ahorrar considerable energía, debido a que un soplador requiere una pequeña fracción de la energía necesaria por un compresor para una velocidad de flujo másico específico.

### VI.3 Uso de un compresor pequeño a carga completa

Generalmente, el personal de la planta tiene la tendencia de comprar equipo más grande que el que se necesita. Algunas razones incluyen la facilidad de expansión y para tener mayor seguridad. Algunas veces los compresores que tienen varias veces la capacidad requerida, son comprados con la percepción de que la capacidad extra puede ser necesaria algún día. El resultado de esto es un compresor que funciona intermitentemente, o uno que funcione continuamente con parte de su carga. Los compresores consumen más energía durante la operación a parte de su carga.

Algunos de los compresores tornillo ya viejos construidos antes de 1975, que faltan adecuadamente a los controles, pueden consumir más del 85% de su energía durante este estado de operación.



Un compresor que opera a parte de su carga también ocasiona que el motor opere con baja eficiencia, desde la disminución en la eficiencia del motor eléctrico, incluso cambios en los puntos de operación que disminuyen su poder de velocidad. El resultado es un motor que consume más electricidad por unidad de aire entregada, y así, el funcionamiento es más caro.

La determinación del tamaño del compresor puede realizarse consultando la necesidad de aire de los diferentes equipos. Esto se hace consultando los manuales o el catálogo de los fabricantes. Algunos son inciertos en las determinaciones existentes, sin embargo, debido a las incertidumbres en el tiempo de operación, y las fugas de aire en las tuberías, estas incertidumbres son parcialmente responsables de optar por un compresor grande, debido a que es mejor tener un compresor sobre-especificado que uno sub-especificado en su tamaño.

Algunas plantas tienen periodos de bajos requerimientos de aire comprimido. En tales casos, se puede ahorrar considerable energía operando un compresor pequeño a carga llena durante los periodos de baja demanda en vez de operar un compresor grande a parte de su carga.

La energía asociada con el apagado de un compresor grande operando a parte de su carga y operar un compresor pequeño a carga completa durante periodos de requerimientos de bajo consumo de aire comprimido es simplemente la diferencia entre la energía consumida por el compresor grande contra la energía consumida por el compresor pequeño.

#### VI.4 Uso de aire del exterior para el compresor

Es conocido que el trabajo de compresión o expansión en un dispositivo de flujo permanente tal como un compresor o una turbina es proporcional al volumen específico. Si el aire se comporta como un gas ideal, el consumo de energía por el compresor será proporcional a la temperatura absoluta del aire durante la compresión. A baja temperatura del aire, hay un trabajo de compresión menor.

La ubicación de los compresores de aire en un edificio determinado, puede tener un efecto significativo sobre el consumo de energía del compresor y la admisión de aire frío, seco y limpio, producirá una compresión más eficiente. El aire de compresión debe tomarse del exterior por que su temperatura es más baja y por lo tanto, el compresor trabajará más eficientemente. La entrada de aire debe estar protegida de la lluvia, no debe estar expuesta al sol y el aire debe ser limpio, ya que el polvo tapa los filtros y aumenta el gasto de energía. Como regla general, por cada 4 °C (7°F) de aumento de temperatura del aire de entrada, el consumo de energía para alcanzar la misma producción de aire comprimido, aumenta en 1%.

Por ejemplo, reducir la temperatura del aire a la entrada de 25 °C a 10 °C, puede reducirse la energía del compresor hasta en un 5%.





### VI.5 Preenfriamiento del aire

El preenfriamiento del aire de admisión al compresor mejora su eficiencia. Este enfriamiento, generalmente a  $-25^{\circ}\text{C}$ , se logra mediante refrigeración. A medida que la temperatura del aire disminuye, su volumen específico se reduce y entonces se entrega un mayor volumen de aire al compresor. La potencia necesaria para comprimir el aire depende en parte de su velocidad de flujo volumétrico. Por lo tanto, gracias a un preenfriamiento, se suministra una cantidad de aire mayor por unidad de potencia, esto es, se necesita menor potencia para entregar una velocidad de flujo volumétrico requerida.

El preenfriamiento del aire tiene uno de estos dos efectos:

1. La cantidad de aire suministrada aumenta, la cual puede emplearse para cubrir aumentos de demanda, debidos por ejemplo, a un aumento de la producción
2. La capacidad del compresor puede reducirse, dando lugar a una reducción de costos de energía

Con un preenfriamiento se tienen además las siguientes ventajas:

- La humedad presente en el aire se extrae por congelación produciéndose aire seco y ahorrándose energía que de otra manera se emplearía para comprimir vapor de agua.
- El polvo presente en el aire es retenido en el hielo durante el congelamiento. Este proceso actúa entonces como un filtro de aire eliminando la necesidad de un filtro de aire convencional, dando lugar a un ahorro adicional de energía y ahorro en costos de capital.
- Se eliminan postenfriadores y secadores puesto que el preenfriador desempeña estas funciones. Esto representa otro ahorro en los costos de capital y de energía.

### VI.6 Recuperación del calor de compresión

Durante la compresión la energía electromecánica proporcionada al compresor se transforma en energía de acuerdo con el primer principio de Termodinámica. El calor es transferido en su mayor parte al fluido refrigerante, mientras una fracción se dispersa por radiación y convección en el compresor y en las tuberías.

El aire atmosférico, con su temperatura ambiente, al pasar por el ciclo de compresión, aumenta su temperatura hasta límites que carecerían de utilidad si no se le refrigera entre fases para lograr aproximarse a la isoterma. Después vuelve a enfriarse para mejorar su nivel de eficiencia o para deshumidificarlo mediante los refrigeradores posteriores y secadores, en un intento de acercarlo a temperaturas que sean rentables industrialmente, siendo indispensable evacuar el calor que se vaya generando a lo largo del proceso de compresión.

En términos globales puede declararse que aproximadamente un 92% de la energía emanada de un compresor se pierde en forma de calor y podrá ser aprovechada. Únicamente alrededor de un 8% es prácticamente irrecuperable.

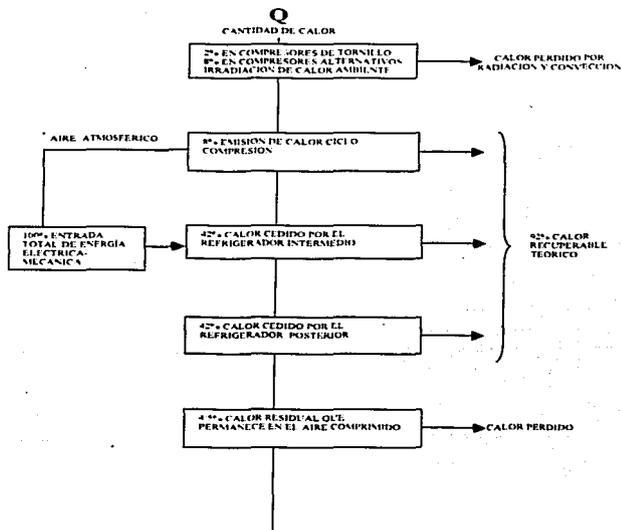




## MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR ENERGÍA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



El siguiente diagrama nos expresa con relativa claridad en que lugar se encuentran los puntos más importantes que emiten calor durante el tránsito del aire, y que pueden ser fuentes de ahorro energético.



A lo anterior, hay que añadir las pérdidas de calor del motor eléctrico de accionamiento, cuya incidencia depende de su nivel de rendimiento. Por supuesto, no es posible recuperar toda esta energía, aunque, aplicando ciertos recursos, se pueden elaborar soluciones técnicas económicamente razonables que permitan recobrar al calor que se produce durante el funcionamiento de los compresores, reduciendo considerablemente el coste de energía para calefacción de locales y calentamiento del agua para servicio sanitario, por poner un ejemplo.



Por ejemplo, suponiendo que el 80% de la energía de entrada es convertida en calor, un compresor de 150 HP puede rechazar tal calor como una resistencia eléctrica de 90 kW o un calentador de 400.000 Btu/h de gas natural cuando esta en operación.

El periodo de restitución de la inversión en las modificaciones adicionales, tuberías y controles pueden ser del orden de dos años o menos.

En la actualidad es posible conseguir unidades especiales para poder conectar a compresores equipos que permiten la recuperación continua de calor. Por ejemplo, el aceite de refrigeración que normalmente circula por un enfriador, se desvía haciéndolo pasar por un intercambiador aceite/agua, calentando así el agua para otro propósito.

#### **VI.7 Uso de motores de alta eficiencia**

Un factor importante para obtener ahorros es la selección de un motor apropiado para el compresor. Las unidades más comunes son: motor eléctrico, motor diesel, gasolina, gas y las turbinas de vapor o gas.

La mayoría de los compresores funcionan con un motor eléctrico. Entre las ventajas del motor eléctrico están su diseño compacto y su fácil manejo. El motor de combustión interna es preferible para unidades móviles, unidades de reserva de emergencia o donde no hay disponible energía eléctrica. El de turbina es preferible donde ayude a compensar el sistema de energía de la planta o donde ya se use gas o vapor.

La energía eléctrica de un motor para una salida de poder es inversamente proporcional a su eficiencia. Por lo tanto, la eficiencia debe ser una importante consideración al seleccionar el compresor y el motor. Seleccionar motores de alta eficiencia es indicado cuando los costos ahorrados justifican los costos iniciales. Este es generalmente el caso para compresores primarios en la planta.

Para mejorar la eficiencia de un motor eléctrico fue necesario optimizar su diseño y manufactura, construyéndolos con materiales de mayor calidad, como se señala a continuación:

- Utilización de acero con mejores propiedades magnéticas.
- Reducción de la distancia del entrehierro.
- Embobinado de mayor calidad del cobre.
- Utilización de ventiladores y sistema de enfriamiento más eficientes.
- Mayor vida útil del aislamiento y de los rodamientos.

El resultado ha sido, motores de alta eficiencia y por lo tanto una reducción de los costos de operación por el ahorro del consumo de energía eléctrica y de la demanda máxima.



MEDIDAS RECOMENDADAS PARA AHORRAR  
ENERGIA EN LOS SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO



En la tabla 5. Se presenta una comparación entre un motor estándar y uno de alta eficiencia y los beneficios de comprar uno de alta eficiencia.

Tabla 5. Comparación de un motor estándar con uno de alta eficiencia

CONDICIONES	COMPRESOR INEFICIENTE	COMPRESOR EFICIENTE
TARIFA CONTRATADA	OM	OM
CAPACIDAD DEL COMPRESOR TIPO TORNILLO	150 HP	150 HP
EFICIENTE RENDIMIENTO ENERGETICO CFM BHP	4.4	4.71
FAD (PIES CUBICOS POR MINUTO)	739 CFM	756.7 CFM
EFICIENCIA DEL MOTOR	93 % Efic. Estand.	95.4 % Alta Efic.
COSTO PROMEDIO DEL COMPRESOR (DOLARES)	\$ 37,893*	\$ 42,112*
DIFERENCIAL DE PRECIOS	11 %	
INCENTIVO POR COMPRESOR	\$ 7,800.00	
INCENTIVO POR EL MOTOR EFICIENTE	\$ 5,400.00	
TOTAL DEL INCENTIVO	\$ 13,200.00	
HORAS DE OPERACION DEL EQUIPO	8,000 Hrs. año	8,000 Hrs./año
AHORRO EN DEMANDA CON MOTOR EFIC.	10 kW	
AHORRO EN ENERGIA CON MOTOR EFIC.	80,000 kWh/año	
AHORRO TOTAL	\$41,924	
TIEMPO DE RECUPERACION DEL DIFERENCIAL DE PRECIOS	1 año	
TIEMPO DE RECUPERACION DEL DIFERENCIAL DE PRECIOS CON INCENTIVO	7 meses	

\* Tipo de Cambio del Dólar \$ 10.00



Los precios de dichos equipos son un promedio de los existentes en el mercado, y los precios de las tarifas son al mes de octubre de 1999.

(Fuente: FIDE. Beneficios de los motores de alta eficiencia. [www.fide.org.mx](http://www.fide.org.mx))

#### **VI.8 Apagar el compresor durante los periodos de ocio**

Es común que los compresores se mantengan operando durante las horas que no hay producción así como a la hora de la comida, noches y fines de semana. Una considerable cantidad de energía se gasta durante este periodo de espera. Este es el caso especial de los compresores tipo tornillo ya que estos consumen más del 85% de su proporción de energía en este modo.

El sistema puede apagarse manualmente en los periodos sin producción para ahorrar energía, pero puede ser mejor instalar un sistema de control on/off que apague el compresor o lo mantenga encendido si la carga se iguala a la demanda. La energía ahorrada como resultado de apagar el compresor durante las horas libres es simplemente igual a la energía usada por el compresor durante este periodo.

#### **VI.9 Uso de post-enfriador en secadores de aire comprimido**

El aire comprimido algunas veces es enfriado considerablemente por debajo de su punto de rocío en secadores refrigerados para condensar y remover una gran fracción del vapor de agua en el aire así como de otros gases no condensables tales como vapores de aceite. La temperatura se eleva considerablemente con la compresión, algunas veces excede los 250 °C a la salida del compresor cuando se comprime adiabáticamente a 700 kPa. Por lo tanto, es deseable enfriar el aire de compresión para minimizar el poder consumido por el sistema refrigerante.

Algunos secadores de aire comprimido limitan la temperatura máxima a la entrada del secador a 40°C. El enfriamiento puede hacerse con agua o aire ambiente, y el calor recogido por el medio enfriante usado para calentar lugares, calentamiento de agua de alimentación o calentamiento relacionado con el proceso. El calor gastado por el post-enfriador puede también ser usado para regeneración del aire re-calentado y secado dejado por el sistema de refrigeración para incrementar la velocidad de flujo volumétrico o el aire comprimido y para posteriormente reducir la humedad relativa.

El aire comprimido en plantas industriales es secado por diferentes razones.

Algunas plantas pueden tolerar humedad en el aire, y simplemente recolectan y remueven la humedad en estaciones recolectoras. No son necesarios los costos de secado del proceso en este caso. Otras plantas pueden trabajar bajo estrictas líneas orientadas sobre la humedad del aire comprimido que puede traer complicaciones con las especificaciones del equipo de producción de aire comprimido.



Algunas veces se remueve la humedad en operaciones sencillas para prevenir un congelamiento en invierno de la humedad en las tuberías del aire comprimido, y se bloquee el aire comprimido. Pero tales problemas pueden ser resueltos por simples y económicos medios tales como aislamientos de las tuberías de aire comprimido.

#### **VI.10 Pérdidas de presión en tuberías y accesorios**

El aire comprimido no es otra cosa que una fuente de energía utilizable mediante su expansión debiendo conseguir que la conserve hasta llegar a los elementos que la van a usar.

Nunca olvidemos que no es igual presión de aire en el compresor que presión de aire en el puesto de aplicación. Hemos de tener presente que entre el grupo compresor y el sitio de aplicación, donde la fuerza neumática ha de prestar un servicio, se encuentra un depósito de aire, las unidades de depuración y una vasta red de tuberías que distribuyen el aire comprimido por toda la planta industrial, añadiendo los acoplamientos rápidos, filtros, mangueras, conexiones, etc., que impiden el logro de conseguir que toda la energía (presión) se transmita íntegramente a la máquina cuyo fin es utilizarla. Ahora bien, lo que sí es posible es limitar esas pérdidas de presión a unos valores relativamente pequeños y que sean admisibles en la práctica.

Se recomienda que la caída de presión del total de la instalación se establezca en un máximo de 0,6 bar hasta 1 bar.

No es económico montar tuberías insuficientemente calibradas. Nunca quedará debidamente subrayada la gran importancia que tiene cuidar extremadamente el cálculo de las tuberías de aire comprimido, ya que hemos de asegurarnos que la energía neumática que se gasta se materialice efectivamente en el trabajo de la herramienta, único medio de que una instalación de aire comprimido sea rentable.

Una instalación de tuberías contiene, corrientemente, codos, curvas, variaciones de diámetro, válvulas, etc., obstáculos que contribuyen a la creación de una pérdida de presión suplementaria. Si hay contados accesorios en una instalación, puede prescindirse de calcular la pérdida de presión que presentan para efectos de cálculo rápido, pero, si en el sistema aparece un número considerable, es indispensable tenerlos en cuenta.

La transportación de cualquier material involucra costos, y la transportación de aire comprimido desde el sitio de origen al lugar de aplicación no es la excepción. Una parte de este costo es debido a la energía gastada como resultado de las pérdidas de presión en la red de tuberías. La pérdida de presión ocurre principalmente por menor tamaño o deficiente diseño del sistema de tuberías. Un sistema deficiente de tuberías puede ser el resultado de una falta de conciencia de su impacto o una incapacidad para servir el incremento del sistema de carga debido a un crecimiento inesperado de la planta.

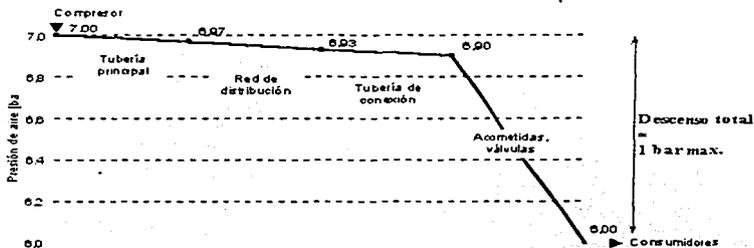


Figura 5. Pérdidas de Presión en las partes de una instalación de aire comprimido

#### VI.11 Mantenimiento del sistema de compresión de aire

Un monitoreo constante y mantenimiento periódico para prevenir mal el funcionamiento de un compresor con anillo pistón roto o una válvula o tubería obstruida, fugas en válvulas, en filtro, inter/post-enfriador o en ambos. Esta reducción de flujo puede ocasionar una pérdida monetaria, la cual puede ser valuada de la misma manera que una fuga de aire.

Además de los puntos mencionados se deben tomar en cuenta los siguientes para ahorrar energía:

##### Tanques

La utilización de tanques de almacenamiento de gran capacidad, esto es, de 1 a 1.5 ft<sup>3</sup> de almacenamiento por cada 10 ft<sup>3</sup>/min. de capacidad del compresor, son una manera apropiada de soportar aumentos en la demanda de aire comprimido o los picos de demanda sobre los pequeños compresores existentes de bajo consumo de energía. En puntos en los cuales se tienen súbitamente altas demandas de aire comprimido, se puede colocar un tanque extra cerca del punto de toma de aire comprimido para evitar aumentar la capacidad de producción de aire.

##### Controles

El sistema de control que gobierna la operación del compresor debe ajustarse a las necesidades y si estas cambian, el sistema de control debe también reajustarse.

La mayoría de los compresores funcionan la mayor parte del tiempo por debajo de su plena capacidad. Todos tienen alguna forma de control que varía el volumen de aire suministrado para atender el consumo de modo que se mantenga constante la presión de suministro. Debe tenerse en



cuanta que un compresor parcial o totalmente descargado consume hasta el 75% de la potencia a plena capacidad, debido al factor de potencia. El cual puede caer hasta 0.2, dando lugar a una baja eficiencia del motor.

Si la carga se puede ajustar más exactamente a la capacidad del compresor, la eficiencia del compresor será mayor y menor será la cantidad de energía que se desperdicia.

Gracias a los recientes desarrollos de la electrónica y microelectrónica se han desarrollado sistemas de control baratos y más confiables que permiten que un motor convencional de inducción opere a velocidad variable con alta eficiencia.

#### *Instrumentación*

Todos los instrumentos deben ser precisos, controlados regularmente y con buen mantenimiento para permitir que el control de las presiones y temperaturas lleven a una operación eficiente. Debe tomarse en cuenta que la instalación de instrumentos innecesarios en los equipos y tubería produce una caída de presión.

El registro de las lecturas periódicas de estos instrumentos también es un medio útil para mantener la eficiencia.

#### *Equipo de lubricación*

La lubricación del equipo neumático debe ser cuidadosa, instalando equipo especial de lubricación y no depender de un operario que inyecte el aceite. El equipo de lubricación debe recibir el mantenimiento adecuado y recargarse con aceite limpio del tipo recomendado por los fabricantes de herramientas de aire comprimido. Además de reducir la fricción y por consiguiente el consumo de energía, la lubricación previene el desgaste de sellos y otras partes, previniendo así, el gasto excesivo de energía debido al consumo de aire o a fugas.



## CONCLUSIONES

Cada vez se ha vuelto más importante la correcta explotación de nuestros recursos energéticos, ya que un mal aprovechamiento de ellos nos lleva a costos más altos de producción.

El aire comprimido está presente en prácticamente todas las industrias y es un gran consumidor de energía. Analizando individualmente las partes que componen el sistema de aire comprimido podremos encontrar potenciales viables de ahorro de energía que, sin duda, el resultado se verá reflejado tanto en el consumo de energía eléctrica, así como en el óptimo funcionamiento del sistema de aire comprimido.

Por ejemplo, la reducción de la presión de operación en los puntos finales de uso nos da ahorros energéticos de hasta 4%; la instalación de una toma de aire del exterior de la nave, puede representar ahorros del 3%. Con ayuda de personal capacitado en energía se puede profundizar el análisis energético detectando mejoras que requieran una inversión moderada y algunas con inversiones considerables, no obstante los ahorros energéticos que podemos alcanzar con la aplicación de estas medidas representan hasta el 25% de la energía consumida y la recuperación de los costos de inversión no sobrepasan los 3 años en la mayoría de los casos. Por ejemplo, el cambio de un motor convencional por un motor de alta eficiencia puede representar ahorros de hasta 80,000 kWh/año y el tiempo de recuperación de la inversión puede llegar a ser de 1 año.

Si tenemos en cuenta que el costo de operación en energía eléctrica del compresor representa hasta el 83% de los costos totales, y que además el sistema de aire comprimido consume hasta el 20% de la energía eléctrica total de la planta, hablar de ahorros del 20% al 40% por la aplicación de las medidas aquí explicadas puede resultar una idea muy atractiva.

El uso del cuestionario para la evaluación general del sistema de aire comprimido expuesto en el capítulo IV, es útil para identificar las oportunidades de ahorro de energía. Así mismo, la formulación de un programa de ahorro de energía, como el expuesto en el capítulo V, nos ayuda a localizar puntos débiles del sistema para establecer metas y lograr hacer más eficiente el sistema y optimizar su funcionamiento analizando también las opciones de inversión a corto, mediano y largo plazo.

Algunos de éstos puntos importantes que hay que considerar al realizar el análisis, ya que son de los más costosos, son:



## CONCLUSIONES



- Identificación y reparación de fugas
- Apagado del compresor el tiempo que no se utiliza
- Uso de variadores de velocidad
- Recuperación del calor de compresión
- Reemplazo de compresores y motores de alta eficiencia cuando el compresor está muy dañado o muy viejo y en instalaciones nuevas
- Realizar un mantenimiento programado para evitar el mal funcionamiento de partes y equipos del sistema

La aplicación de estas y otras medidas puede llevarnos a ahorros desde un 20%, llegando en algunos casos a alcanzar más del 40% cuando se trata de plantas con compresores e instalaciones muy gastadas o descuidadas.

Intentar dar instrucciones cubriendo todos los tipos de industria y cubriendo todas las clases de producción que existen nos llevaría demasiado lejos. Sin embargo, esta propuesta de evaluación en el sistema de aire comprimido constituye una guía práctica para la industria en materia de ahorro de energía. Asimismo es una plataforma para profundizar en otros estudios y en el diseño de propuestas de ahorro de energía, tal como la recuperación del calor de combustión.

Este trabajo actualmente sirve de base en la creación de un nuevo módulo tecnológico que se desarrolla en la CONAE dedicado al estudio del aire comprimido en la industria. Como caso de aplicación de este trabajo, en el anexo D se muestran los datos y resultados obtenidos de una empresa que solicitó a la CONAE una evaluación a su sistema de aire comprimido.

Cabe mencionar que la empresa es extranjera y todo el contacto fue por medio de la CONAE a través de la red de Internet, por lo que toda la recolección de datos corrió a cargo de la empresa y la evaluación y recomendaciones se realizaron únicamente con la información que enviaron.



## BIBLIOGRAFIA

**Libros:**

Carnicer Royo, Enrique. **Aire Comprimido**. Ed. Parainfo. Madrid España, 1991.

Faires, V. M. **Termodinámica**. Ed. UTHEA-Noriega Editores. México, 1993.

Himmelblau, D. M. **Principios y cálculos Básicos de la Ingeniería Química**. 14ª Reimpresión. Ed. C.E.C.S.A.. México, 1995.

Rase, H.F. y Barrow, M.H. **Ingeniería de Proyectos para Plantas de Proceso**. 4ª Impresión. Compañía Editorial Continental, S.A.. México, 1977.

**Perfiles energéticos de la Industria Química y Alimenticia**. Secretaría de Energía: Comisión Nacional para el Ahorro de Energía: Comisión de la Unión Europea. México, 1995.

Perry, R. H.; Green D. W. **Manual del Ingeniero Químico**. 6ª Edición. Edit. McGraw-Hill, México, 1992.

Reay, David A. **Guía para el Ahorro de Energía en la Industria**. International Research & Development Co. Ltd., Newcastle-Upon-Tyne. England, 1977.

**Sumer Study on Energy Efficiency in Industry**. Proceedings, Vol. I y II. American Council for an Energy Efficiency. ACEEE 2001.

**Revistas:**

**Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services**. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U. S. Department of Energy.

**Reduce Compressed Air Costs**. Y. A. çengel. University of Nevada at Reno; B. G. Shiva Prasad, Dresser-Rand Co., Painted Post, New York; and R. H. Turner and Y. çerci. University of Nevada at Reno. Hydrocarbon Processing, Diciembre de 2000. Vol. 79. No.12.

**Internet:**

Aire Comprimido. [WWW]. Mayo 08. 2002. Disponible en:  
[www.ebookstech.com/samples/Alsina/saaSam.pdf](http://www.ebookstech.com/samples/Alsina/saaSam.pdf)

Auditoria Energética. [WWW]. Agosto 12. 2002. Disponible en:  
[www.sky.net.ec/energia/E\\_01\\_audito.PDF](http://www.sky.net.ec/energia/E_01_audito.PDF)

Auditorias Energéticas. [WWW]. Diciembre 04. 2002. Disponible en:  
[www.enec.hr/cliente/ahorrarenergia/auditorias.ppt](http://www.enec.hr/cliente/ahorrarenergia/auditorias.ppt)

Beneficios de los Motores de Alta Eficiencia. [WWW]. 19 Agosto. 2002. Disponible en:  
[www.fide.org.mx/programas/programas/incentivos/motor.html](http://www.fide.org.mx/programas/programas/incentivos/motor.html).

¿Cuándo Utilizar Compresores de Aire Eficientes?. [WWW]. 19 Agosto. 2002. Disponible en:  
[www.fide.org.mx/programas/programas/incentivos/compres.html](http://www.fide.org.mx/programas/programas/incentivos/compres.html).

Eficiencia en los Sistemas de Aire Comprimido. [WWW]. Septiembre 23. 2002. Disponible en:  
[www.mem.gob.pe/pac/lefi/sum\\_lee.htm](http://www.mem.gob.pe/pac/lefi/sum_lee.htm)

Energías Renovables y Eficiencia Energética. [WWW]. Agosto 14. 2002. Disponible en:  
[www.sky.net.ec/energia/E\\_04\\_Compres.pdf](http://www.sky.net.ec/energia/E_04_Compres.pdf)

Energy Smart Compressed Air Systems. [WWW]. Agosto 15. 2002. Disponible en:  
[www.seav.vic.gov.au/index.html](http://www.seav.vic.gov.au/index.html)

Formulación de un Programa de Conservación de la Energía. [WWW]. Julio 25. 2002. Disponible en: [www.fao.org/doerep/t0269s/t0269S.htm](http://www.fao.org/doerep/t0269s/t0269S.htm)

Generación y Distribución de Aire a Presión. [WWW]. Agosto 19. 2002. Disponible en:  
[www.mem.gob.pe/pac/url/PAEIE.htm](http://www.mem.gob.pe/pac/url/PAEIE.htm)

Instrument Air Quality Standard. [WWW]. Septiembre 09. 2002. Disponible en:  
[www.cleandryair.com](http://www.cleandryair.com)

Neumática. [WWW]. Mayo 06. 2002. Disponible en: [www.sapiens.itgo.com/neumatica/](http://www.sapiens.itgo.com/neumatica/)

Reducing Energy and Costs. [WWW]. Agosto 14. 2002. Disponible en:  
[www.cleandryair.com](http://www.cleandryair.com)

System Leaks in Compressed Air Systems. [WWW]. Agosto 14. 2002. Disponible en:  
[www.cleandryair.com](http://www.cleandryair.com)

The Total Cost of Compressed Air. [WWW]. Agosto 14. 2002. Disponible en:  
[www.cleandryair.com](http://www.cleandryair.com)



ANEXO A

**TERMINOLOGIA USADA EN EL AIRE COMPRIMIDO**

- **Adiabático.** Un proceso que ocurre en un sistema cerrado con una superficie impenetrable al calor se llama proceso adiabático, y es uno en el que no puede haber flujo de calor.
- **Aire atmosférico de referencia.** Aire atmosférico convenido al cual se corrigen los valores de especificación, así como los resultados de test determinados en otras atmósferas. En neumática se utiliza 1 atmósfera, 20°C y 65% de humedad relativa.
- **Aire libre.** Aire en condiciones atmosféricas a la entrada del compresor.
- **Capacidad del compresor.** Es la cantidad de volumen de gas comprimido suministrado en el punto de descarga, referido a las condiciones de entrada, normalmente expresado en términos de aire libre suministrado.
- **Coefficiente de utilización.** En la determinación de la capacidad del compresor necesaria para alimentar una herramienta, máquina o un grupo de accionamientos neumáticos, intervienen, aparte del consumo específico del aparato, el tiempo que el componente neumático está parado por la índole de su trabajo. Esta margen de operación intermitente, o factor de servicio, se denomina coeficiente de utilización y varía conforme la prestación de cada herramienta, máquina o accionamiento.
- **Coefficiente de simultaneidad.** Cuando hay en funcionamiento diversas herramientas o, en general, todos los equipos que integran una industria, el promedio de los coeficientes de utilización de cada una de ellas nos dará una cifra denominada coeficiente de simultaneidad.
- **Compresor.** Aparato que genera un flujo de aire a una presión determinada.
- **Compresión Multietapas.** Compresión desde una presión inicial hasta una presión final, mediante etapas intermedias de compresión, con enfriamiento entre etapas.
- **Condensado.** Líquido formado a partir del vapor de agua existente en el aire comprimido, debido a un descenso en la temperatura del aire comprimido y/o a un aumento de presión.
- **Consumo específico.** Es el consumo unitario de aire comprimido de cada máquina o herramienta.
- **Depósito de aire.** Recipiente para almacenar aire comprimido, también llamado acumulador de aire.



- Diagrama Sankey. Representación gráfica del consumo de energía en un sistema, a manera de franjas que representan, según su anchura, la cantidad de energía correspondiente, según su dirección, al destino final de esa energía.
- Eficiencia volumétrica. Es la relación entre el aire libre suministrado por el compresor y el desplazamiento del compresor. Se expresa en forma de porcentaje.
- Enfriamiento. Disipación del calor existente en el aire comprimido.
- Enfriamiento intermedio. Disipación del calor del aire comprimido entre dos etapas de compresión.
- Filtro. Equipo que separa materias extrañas del aire comprimido.
- Humedad relativa. Es la relación entre la cantidad de vapor de agua existente en un determinado volumen de aire a una temperatura y presión, y la cantidad de vapor de agua que ese volumen puede contener a la misma temperatura y presión. Se expresa en forma de porcentaje.
- Isotérmico. Expansión o compresión conseguida sin cambio de temperatura.
- Ley de Boyle. Si la temperatura de una cantidad dada de gas se mantiene constante, el volumen de éste varía en razón inversa a la presión absoluta durante un cambio de estado.

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

- Ley de Charles. A presión constante, el volumen de una determinada masa de gas varía directamente con la temperatura.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} ; \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

- Ley de los gases ideales. A partir del trabajo de Boyle y Charles, los científicos desarrollaron la relación que ahora se conoce *ley del gas perfecto* o *ley del gas ideal*.

$$PV = nRT$$

- Lubricador. Dispositivo que introduce una cantidad controlada de lubricante en el medio de trabajo.



- Presión absoluta. Es la presión resultante de sumar la presión atmosférica más la presión manométrica.
- Presión atmosférica. Es la presión existente en la región donde se quiere medir por medio de un barómetro (también llamada *presión barométrica*). Es conveniente fijar un valor de referencia para esta presión, que es (según distintos sistemas de unidades y a 0 °C o 32 °F)

$$\begin{aligned}1 \text{ atm} &= 760 \text{ mm Hg} \\ &= 14.7 \text{ lbf/plg}^2 \\ &= 1.0132 \text{ bar}\end{aligned}$$

- Presión manométrica. Mide la presión con referencia a la presión atmosférica. Cuando no se indica la compresión, la presión expresada en "bar" se asume que es manométrica.
- Punto de rocío. Temperatura a la cual el aire, a la presión considerada, está completamente saturado de vapor de agua.
- Regulador del compresor. Dispositivo acoplado al compresor que permite controlar el flujo suministrado.
- Regulador de presión. Aparato que reduce la presión de la línea de aire comprimido y la mantiene constante a pesar de posibles variaciones en la presión de entrada o en el caudal que circula a través del mismo.
- Secador. Equipo que reduce el contenido de vapor de agua (humedad) existente en el aire comprimido.
- Separador de condensado. Elemento que separa el agua condensada del aire comprimido.
- Temperatura absoluta. Es la temperatura medida desde el cero absoluto (0 K).
- Temperatura ambiente. Es la temperatura existente en el entorno en el que el equipo trabaja.
- Válvula de seguridad. Aparato que limita el máximo de presión de un sistema y descarga a la atmósfera en el caso de que se supere.



## ANEXO B

## COMPARACION ENTRE LOS DIVERSOS TIPOS DE COMPRESION

Es manifiesta la necesidad de conocer el rendimiento de los compresores y, para ello, reflejar de una manera matemática o gráfica el trabajo de compresión. Esta se verifica de acuerdo con la fórmula  $PV^n = \text{cte.}$  pudiendo variar el exponente  $n$  según sea la evolución del gas.

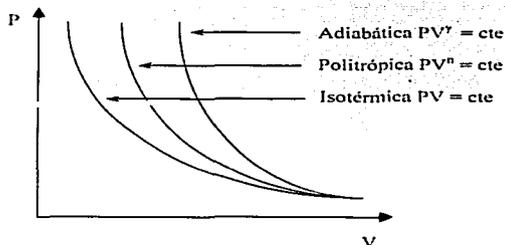
- *La evolución isotérmica*, que es una evolución a temperatura constante. Todo el calor producido se disipa y la transformación sigue la ley de Mariotte:  $PV = \text{cte.}$  La potencia mínima necesaria es la requerida por la compresión isotérmica.
- *La evolución adiabática*, que se efectúa sin ningún cambio de calor con el exterior. El calor originado por la compresión permanece en el gas y la transformación sigue la ley:  $PV^\gamma = \text{cte.}$   $\gamma = 1.4$  para el aire.
- *La evolución politrópica*, que corresponde mucho más a la realidad y en la que se intercambia únicamente una parte del calor producido. Esta transformación se sitúa entre una transformación isotérmica y una adiabática.

Responde a la ley  $PV^n = \text{cte.}$  con  $1 < n < 1.4$ .

Se admite como valor promedio 1.3 a 1.35.

El proceso politrópico es una expresión generalizada de todos los procesos posibles, donde  $n$  es el exponente politrópico, pudiendo tomar un valor cualquiera, pero que no varía una vez fijado.

La siguiente figura personifica las curvas sobre el plano PV correspondientes a las tres transformaciones para una misma masa de gas y partiendo de las mismas condiciones iniciales.



Gráfica comparativa de las transformaciones



## ANEXO C

## GENERADORES DE AIRE COMPRIMIDO

Para producir aire comprimido se utilizan compresores que elevan la presión del aire al valor de trabajo deseado. Los mecanismos y mandos neumáticos se alimentan desde una estación central. Entonces no es necesario calcular ni proyectar la transformación de la energía para cada uno de los consumidores. El aire comprimido viene de la estación compresora y llega a las instalaciones a través de tuberías.

Los compresores móviles se utilizan en el ramo de la construcción o en máquinas que se desplazan frecuentemente.

En el momento de la planificación es necesario prever un tamaño superior de la red, con el fin de poder alimentar aparatos neumáticos nuevos que se adquieran en el futuro. Por ello, es necesario sobredimensionar la instalación, al objeto de que el compresor no resulte más tarde insuficiente, puesto que toda ampliación ulterior en el equipo generador supone gastos muy considerables.

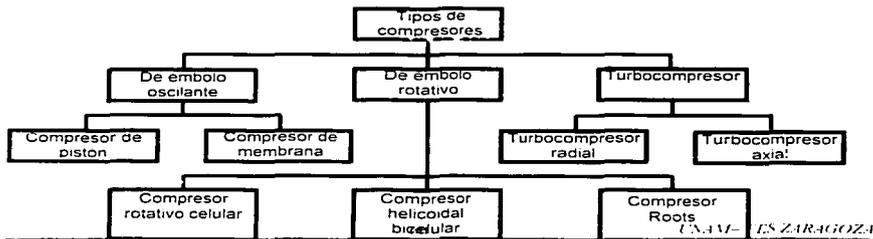
Es muy importante que el aire sea puro. Si es puro el generador de aire comprimido tendrá una larga duración. También debería tenerse en cuenta la aplicación correcta de los diversos tipos de compresores.

**Tipos de compresores**

Según las exigencias referentes a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se pueden emplear diversos tipos de construcción. Se distinguen dos tipos básicos de compresores:

El primero trabaja según el principio de desplazamiento. La compresión se obtiene por la admisión del aire en un recinto hermético, donde se reduce luego el volumen. Se utiliza en el compresor de émbolo (oscilante o rotativo).

El otro trabaja según el principio de la dinámica de los fluidos. El aire es aspirado por un lado y comprimido como consecuencia de la aceleración de la masa (turbina).





### Compresores de émbolo

Compresor de émbolo oscilante. Este es el tipo de compresor más difundido actualmente. Es apropiado para comprimir a baja, media o alta presión. Su campo de trabajo se extiende desde unos 1.100 kPa (1 bar) a varios miles de kPa (bar).

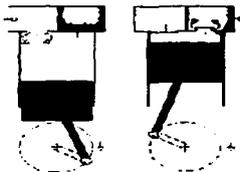


Figura 1: Compresor de émbolo oscilante

Para obtener el aire a presiones elevadas, es necesario disponer varias etapas compresoras. El aire aspirado se somete a una compresión previa por el primer émbolo, seguidamente se refrigera, para luego ser comprimido por el siguiente émbolo. El volumen de la segunda cámara de compresión es, en conformidad con la relación, más pequeño. Durante el trabajo de compresión se forma una cantidad de calor, que tiene que ser evacuada por el sistema refrigeración.

Los compresores de émbolo oscilante pueden refrigerarse por aire o por agua, y según las prescripciones de trabajo las etapas que se precisan son:

hasta	400 kPa (4 bar), 1 etapa
hasta	1,500 kPa (15 bar), 2 etapas
más de	1,500 kPa (15 bar), 3 etapas o más

No siempre resulta económico, pero también pueden utilizarse compresores:

de 1 etapa	hasta	1,200 kPa (12 bar)
de 2 etapas	hasta	3,000 kPa (30 bar)
de 3 etapas	hasta	22,000 kPa (220 bar)



### Compresor de membrana

Este tipo forma parte del grupo de compresores de émbolo. Una membrana separa el émbolo de la cámara de trabajo; el aire no entra en contacto con las piezas móviles. Por tanto, en todo caso, el aire comprimido estará exento de aceite. Estos compresores se emplean con preferencia en las industrias alimenticias farmacéuticas y químicas.

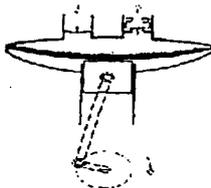


Figura 2. Compresor de membrana

### Compresor de émbolo rotativo

Consiste en un émbolo que está animado de un movimiento rotatorio. El aire es comprimido por la continua reducción del volumen en un recinto hermético.

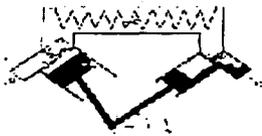


Figura 3. Compresor de émbolo rotativo de dos etapas



### Compresor rotativo multicelular

Un rotor excéntrico gira en el interior de un cárter cilíndrico provisto de ranuras de entrada y de salida. Las ventajas de este compresor residen en sus dimensiones reducidas, su funcionamiento silencioso y su caudal prácticamente uniforme y sin sacudidas.

El rotor está provisto de un cierto número de aletas que se deslizan en el interior de las ranuras y forman las células con la pared del cárter. Cuando el rotor gira, las aletas son oprimidas por la fuerza centrífuga contra la pared del cárter, y debido a la excentricidad el volumen de las células varía constantemente.

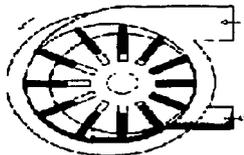


Figura 4. Compresor rotativo multicelular

### Compresor de tornillo helicoidal, de dos ejes

Dos tornillos helicoidales que engranan con sus perfiles cóncavo y convexo impulsan hacia el otro lado el aire aspirado axialmente.

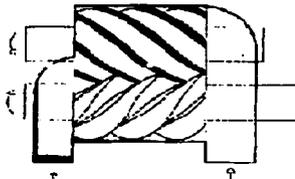


Figura 5. Compresor de tornillo helicoidal



### Compresor Rotos

En estos compresores, el aire es llevado de un lado a otro sin que el volumen sea modificado. En el lado de impulsión, la estanqueidad se asegura mediante los bordes de los émbolos rotativos.

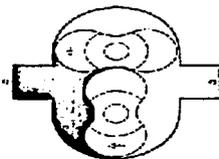


Figura 6. Compresor Roots

### Turbocompresores

Trabajan según el principio de la dinámica de los fluidos, y son muy apropiados para grandes caudales. Se fabrican de tipo axial y radial. El aire se pone en circulación por medio de una o varias ruedas de turbina. Esta energía cinética se convierte en una energía elástica de compresión. La rotación de los alabes acelera el aire en sentido axial de flujo.



Figura 7. Turbocompresor de flujo axial

Aceleración progresiva de cámara a cámara en sentido radial hacia afuera; el aire en circulación regresa de nuevo al eje. Desde aquí se vuelve a acelerar hacia afuera.



Figura 8. Turbocompresor radial



En el siguiente diagrama (figura 9), están indicadas las zonas de cantidades de aire aspirado y la presión para diferentes tipos de compresores.

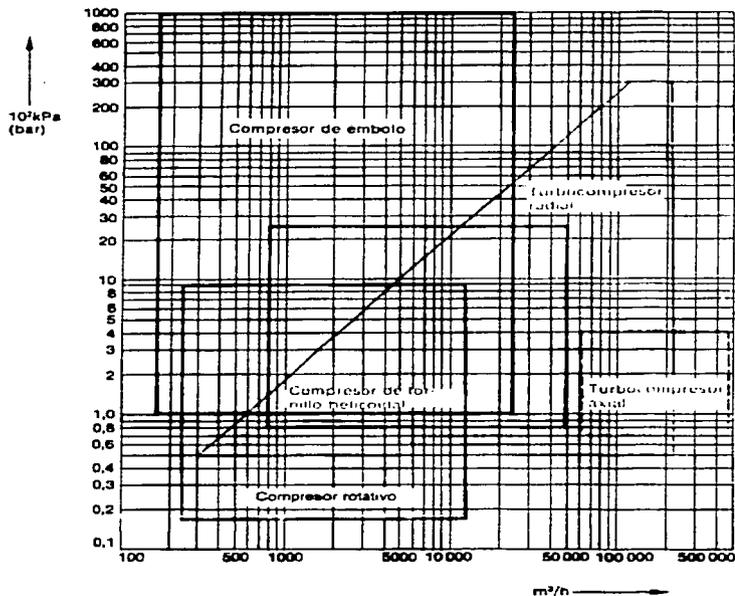


Figura 9. Flujo y presión de operación de compresores. (Tomado de *Manual de neumática de FMA Pokorny*. Disponible en: [www.sapiens.itgo.com/neumatica](http://www.sapiens.itgo.com/neumatica))



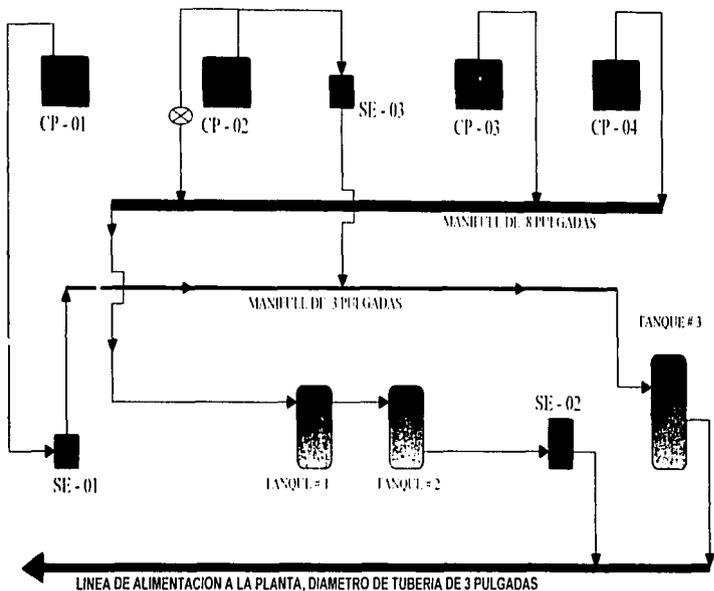
## VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRINCIPALES TIPOS COMPRESORES DE AIRE

COMPRESOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Reciprocante	Bajo consumo de energía Conveniente para altas presiones Fácil ajuste	Fuerzas oscilantes Alta temperatura de salida Alto mantenimiento Ruidoso Relativamente caro
Veletas	Construcción simple Silencioso Partículas compactas en el aire	Rango de capacidad limitado Debe estar incorporado Residuos de aceite en el aire
Tornillo	Silencioso y de operación simple Baja temperatura de salida Uso ligero Simple para el uso de recuperador de calor Compacto	Alto uso de energía Debe estar incorporado Residuos de aceite en el aire
Centrífugo	Bajo uso de energía Grandes capacidades Silencioso Capacidad controlable	Sensible a la suciedad en el aire Costo relativamente alto

## ASPECTOS A CONSIDERAR CUANDO SE CUANTIFICA EL CAMBIO DE UN COMPRESOR

- ¿La caída de presión en la tubería es la óptima?
- ¿El compresor fue especificado para el flujo correcto?
- ¿Es realmente necesario comprimir a la presión de diseño?
- ¿Se justifica un compresor más eficiente?
- ¿Puede reducirse la temperatura de succión?
- ¿Existe potencial para operación a velocidad variable?
- ¿Puede utilizarse venas guía de entrada, como parte del sistema de control?
- ¿Se justifica utilizar secadoras de alta eficiencia?
- ¿Es aplicable la utilización de compresores booster?
- ¿Pueden independizarse los circuitos de distribución?
- ¿Se cuenta con suficientes elementos de medición, para prevenir problemas de mantenimiento y operar el sistema en condiciones óptimas.?





TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

DIAGRAMA DE INSTALACION DE COMPRESORES PARA LA PRODUCCION DE AIRE COMPRIMIDO

**FALTA  
PAGINA**

**70**

**DATOS TECNICOS DE COMPRESORES**

MARCA	CODIGO	POTENCIA	PRESION DE OPERACION	TEMPERATURA	CAPACIDAD EN CFM SEGUN PLACA	CAPACIDAD EN ft <sup>3</sup> /min - m <sup>3</sup> /min REAL PRODUCIDA
Ingersoll Rand	CP-01	50 HP	125 PSIG	198 °F	194	164 ó 4.64
Sullair	CP-02	60 HP	125 PSIG	194 °F	254	212 ó 5.996
Sullair	CP-03	50 HP	125 PSIG	194 °F	210	198 ó 5.60
Sullair	CP-04	50 HP	125 PSIG	194 °F	210	198 ó 5.60

**SECADOR 01 - INGERSOLLRAND**

MAX-INLET TEMP °F	AIR	130
MIN-MAX AMBIENTE °F	TEMP.	40-120
MAX-INLET PRESSURE PSI	AIR	250
POTENCIA HP		1.5

**TANQUE #1 Y #2**

CAPACIDAD	120 GAL
PRESION	200 PSI
TEMPERATURA	250°F

**TANQUE #4 Y #5**

CAPACIDAD	80 GAL
PRESION	200 PSI
TEMPERATURA	250°F

**SECADOR 02 - SULLAIR**

MIN-MAX PRESSURE	AIR	14.5 PSIG 174 PSIG
MAX AIR IN TEMP °F		60-140
MIN AMBIENTE TEMP.		5 °C - 41 °F

**SECADOR 03-SULLAIR**

PRESION SUCCION	60 PSI
PRESION INLET AIR	115 PSI
TEMP. INLET AIR	108 °F
PRESION OUTLET AIR	115 PSI

**TANQUE #3**

CAPACIDAD	240 GAL
PRESION	200 PSI
TEMPERATURA	250°F



## ANEXO



MAQUINA	CARACTERISTICAS	CONSUMO UNITARIO m <sup>3</sup> /min	TIEMPO DE UTILIZACION EN HORAS	TRABAJO CONTINUO (C) O INTERMITENTE (I)	PRESION DE OPERACION EN PSI
Heat and control #1	PROCESADORAS	1.35	660	C	105
Freidor Salbo	PROCESADORAS	1.35	660	C	100
Freidor Pitman	PROCESADORAS	1.35	660	C	90
Freidor electrico de frituras de maiz	PROCESADORAS	1.35	660	C	105
Freidor Herrera	PROCESADORAS	1.35	660	C	50
Heat and control #2	PROCESADORAS	1.35	660	C	100
Extrusora Dixie #1	PROCESADORAS	1.35	660	C	105
Extrusora Dixie #2	PROCESADORAS	1.35	660	C	90
Extrusora Maddox	PROCESADORAS	1.35	660	C	50
MRP # 26	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
MRP # 25	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
MRP # 24	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
MRP # 23	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
SDC # 18	EMPACADORAS	0.24	660	C	80
SDC # 17	EMPACADORAS	0.24	660	C	80
SDC # 16	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
WDM # 15	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
WDM # 14	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
WDM # 13	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
WDM # 12	EMPACADORAS	0.24	660	C	80
WDM # 11	EMPACADORAS	0.21	660	C	70
CYC # 10	EMPACADORAS	0.21	660	C	70
CYC # 09	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
CYC # 08	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
CYC # 07	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
MTP # 06	EMPACADORAS	0.26	660	C	90
MTP # 05	EMPACADORAS	0.21	660	C	70
MTP # 04	EMPACADORAS	0.21	660	C	70
WDM # 03	EMPACADORAS	0.24	660	C	110

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



En un análisis realizado previamente la empresa se encontró lo siguiente:

#### POTENCIAL DE AHORRO

1.- El sistema se encuentra en condiciones óptimas de trabajo, de acuerdo a la **eficiencia** de los generadores **Sullair** obtenida, la cual varía entre **85.33** y **89.54%**, y la del compresor **Ingersoll Rand** obtenida que varía de **81.5** a **87.6 %**, indica que el sistema esta trabajando de acuerdo a los estándares de calidad necesarios, y que las pérdidas energéticas actuales son las debidas a la fricción del sistema, la expansión de las unidades, no se tienen caídas de presión considerables. Por lo tanto no se encuentra una medida de ahorro, ya que no hay un sistema energético desbalanceado.

2.- Debido a que las **eficiencias** de los equipos se encuentran casi a su **tope** y considerando la expansión futura de la planta en maquinaria que demandará flujo de aire comprimido, es recomendable y prudente la compra de **dos unidades** de **50 Hp** para hacerle frente a la demanda futura.

Tabla resumen de inversión necesaria.

Equipo Necesario	Inversión en \$	Periodo de recuperación en años
Compresores de 50 hp	68,000	1.8
Tanque de 600 galones	4,000	0.9
Accesorios para líneas	500	0.03
Instalación de Equipo	1,750	0.4
Seguridad Industrial	600	0.063
<i>Total</i>	<b>74,850</b>	<b>3.193</b>

IMPRESO CON  
ELA DE ORIGEN



El análisis realizado de acuerdo a los datos que enviaron es el siguiente:

### EVALUACION DE LA CAPACIDAD ACTUAL DE LOS COMPRESORES

Datos técnicos de compresores

MARCA	CODIGO	POTENCIA	PRESION DE OPERACION	TEMPERATURA	CAPACIDAD EN CFM SEGUN PLACA	CAPACIDAD EN ft <sup>3</sup> /min - m <sup>3</sup> /min REAL PRODUCIDA
Ingersoll Rand	CP-01	50 HP	125 PSIG	198 °F	194	164 ó 4.64
Sullair	CP-02	60 HP	125 PSIG	194 °F	254	212 ó 5.996
Sullair	CP-03	50 HP	125 PSIG	194 °F	210	198 ó 5.60
Sullair	CP-04	50 HP	125 PSIG	194 °F	210	198 ó 5.60

Evaluación Preliminar de la Capacidad de los Compresores

Tipo	Cantidad	Caudal (m <sup>3</sup> /min)	Fac. Uso	Fac. Simultaneidad	Caudal Total (m <sup>3</sup> /min)
Procesadoras	9	1.35	1	0.74	8.991
Empacadoras	12	0.26	1	0.71	2.215
Empacadoras	1	0.34	1	0.95	0.323
Empacadoras	3	0.24	1	0.87	0.626
Empacadoras	4	0.21	1	0.84	0.706
<b>TOTAL</b>					<b>12.861</b>

Se supone un factor de uso de 1 ya que se dice que el todas las máquinas del proceso trabajan de manera continua, aunque este valor no es real.

Suponemos un 50% más por concepto de futuras ampliaciones:

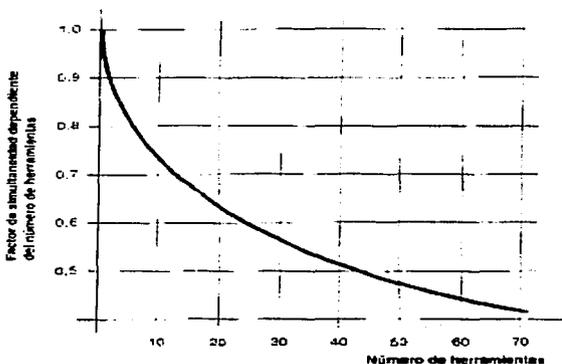
$$\begin{array}{r} 12.861 \\ +6.431 \\ \hline 19.292 \text{ m}^3/\text{min} \end{array}$$

La suma de la capacidad real producida por los cuatro compresores es de : **21.836 m<sup>3</sup>/min**, por lo tanto el sistema cuenta con un sobre diseño en capacidad del 50%. **No se está considerando la posibilidad de fugas.** Si se consideran fugas en el sistema este porcentaje de sobrediseño es menor.



Nota: El factor de Simultaneidad se calculó de la siguiente figura.

#### FACTOR DE SIMULTANEIDAD DEPENDIENTE DEL NUMERO DE HERRAMIENTAS



*(Tomado del Manual del Aire Comprimido. CentralAir. Especialistas en Aire Comprimido)*

Esta gráfica solo considera tipos, no marcas de máquinas y herramientas, y se basa en el consumo específico de las mismas.

Por otro lado, dadas las dimensiones de los depósitos de aire, la capacidad de estos es muy inferior a la demanda de aire en la planta. Por lo que suponemos que solamente sirven para absorber las pulsaciones de aire e igualar las cargas de aire de las líneas.

No se pudo comprobar si la potencia de los compresores es la adecuada debido a que no se enviaron los datos relacionados con la caída de presión, tanto en el sistema de distribución, así como en los equipos auxiliares del compresor.

La potencia del compresor se calcula entonces así:

$$\text{Potencia} = Q * \Delta P$$



Es importante conocer no solo si la capacidad de los compresores es la correcta, si no también si la potencia de los compresores es la adecuada para el sistema.

Además, dependiendo de la potencia y capacidad del compresor, pueden encontrarse diferentes tipos de compresores tal como se vio en el Anexo C.

Antes de realizar cualquier compra, deberíamos preguntarnos si las eficiencias son reales, ya que el consumo de aire de las máquinas y herramientas actuales no alcanza el 70% de la capacidad actual de los compresores, por lo que se recomienda un análisis más a detalle del sistema con el fin de encontrar fugas de aire y otras causas de desperdicio de energía.

Por ello, se dieron recomendaciones apropiadas para su sistema de aire comprimido. Cabe mencionar que la planta cuenta con una vida de alrededor de 30 años, por lo que se considera vieja y en donde es posible encontrar grandes potenciales de ahorros energéticos. Todas estas recomendaciones y algunas otras se mencionan en el capítulo VI de este trabajo.

### RECOMENDACIONES PARA SU SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Debido a que la producción del aire comprimido no es barata, es muy importante racionalizar la utilización de los compresores. En general, el rendimiento de los compresores es muy bajo, pues la mayor parte de la energía de compresión se convierte en calor. Además, algunas prácticas muy comunes que son irracionales desde el punto de vista energético son:

- Selección de una presión mayor a la de trabajo realizado por el aire comprimido
- Funcionamiento en vacío de los compresores
- Inadecuada capacidad de reserva de aire para puntas de consumo
- Mantenimiento inadecuado de la red de distribución de aire con fugas elevadas
- Utilización del aire comprimido para fines diferentes a los de producción

Estos aspectos deben revisarse cuidadosamente con el propósito de evitarlos o corregirlos.

Análisis	Resultados Inmediatos	Acción
¿Se ha informado al personal de su empresa el costo del aire comprimido?	La divulgación del costo del aire comprimido es muy importante para concienciar al personal sobre la necesidad de ahorrar energía.	
¿La presión de operación del aire comprimido es lo más baja posible, compatible con la red y los equipos consumidores?	Conviene comprobar la presión mínima de trabajo de los equipos conectados y las pérdidas de presión en la red. La presión de compresión puede ajustarse.	



¿El aire que se comprime se toma del exterior de la nave?	<p>El consumo de energía se incrementa al aumentar la presión del aire comprimido. Por ejemplo, si se trabaja a 6 bar en lugar de a 7 bar, el ahorro de costos energéticos puede ser de un 4%.</p> <p>En donde sea posible se harán las tomas de aire del exterior.</p> <p>Los costos operativos bajan al aspirar aire más frío, hasta en un 3%. Sin embargo, hay que prestar atención a la composición del aire del exterior, para filtrarlo adecuadamente.</p>
¿Utiliza el aire comprimido para otros fines?	<p>Debe evitarse el uso inadecuado del aire comprimido, por ejemplo en pistolas de rociado para limpieza, acondicionamiento de lugares, etc.</p>
Ajuste de bandas y correas entre compresores y motores.	<p>Ayudará en la correcta utilización de la energía para la compresión.</p>
Cierre de zonas del sistema de distribución en periodos de no utilización.	<p>Se evitan despilfarros de energía ocasionados por el uso del compresor y por fugas de aire comprimido.</p>
¿Existen tuberías o ramales de tuberías de aire comprimido que no se utilizan actualmente?	<p>Conviene localizar las tuberías de aire no utilizadas en la actualidad. Si está seguro de que no se van a volver a utilizar, desmantelar los circuitos, cortar la conexión y hacerla estanca, ya que las tuberías y ramales no utilizados y que no están aislados se presurizan y vacían cada vez que se presuriza/despresuriza el sistema de aire.</p> <p>Estas tuberías pueden ser una fuente potencial de fugas.</p>
¿Funcionan los compresores en vacío durante mucho tiempo?	<p>El funcionamiento de los compresores en vacío es caro. Hay varias comprobaciones necesarias:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ajuste correcto de los temporizadores.</li><li>• Puesta en marcha solo cuando hay demanda.</li><li>• Parada de los compresores si no hay demanda durante un periodo prolongado.</li></ul>
¿Existe un programa periódico de detección y reparación de fugas?	<p>La mayor proporción de pérdidas del aire se pueden atribuir a las fugas. Debería existir un sistema efectivo para detectar las fugas y repararlas. La detección de fugas es más fácil cuando no hay demanda de aire y no hay ruidos en la fábrica. El oído y la comprobación de los empalmes, conectores, medidores, mangueras, y juntas de cilindros permite detectar las fugas.</p>



Análisis	Resultados a Corto Plazo	Acción
¿Se controla la pérdida de carga en los filtros de aire?		Comprobar periódicamente el estado de limpieza de los filtros de aire así como la pérdida de carga en el filtro para evitar desperdicio de energía.  Los filtros sucios incrementan el consumo energético y el consumo de aire. También se deben limpiar los filtros reutilizables y sustituir los desechables.
¿Se inspecciona y mantiene apropiadamente el sistema de tratamiento de aire?		Comprobar la frecuencia de la sustitución y/o limpieza de los filtros (pre y post filtros)  Comprobar los secadores de aire y controladores.  Comprobar la limpieza de intercambiadores.  El mantenimiento incorrecto del sistema de tratamiento de aire implica un incremento del consumo de energía que puede llegar a ser hasta de un 30%.
¿Se ha comprobado el funcionamiento apropiado de las purgas de agua?		Revisar el sistema de purgas. Si el mantenimiento es inadecuado, la fuga de aire por el purgador puede ser considerable.
¿Ha considerado alternativas eléctricas a las herramientas neumáticas?		Analizar los trabajos efectuados y las herramientas neumáticas empleadas. Estudie si hay herramientas eléctricas que efectúan el mismo trabajo.  En algunos casos las herramientas eléctricas permiten un ahorro en costos operativos de hasta un 60%
¿Su sistema de drenaje de purgas es manual?		La automatización del drenaje de agua mejora la operación del sistema y reduce los costos por fugas, ya que el drenaje manual de agua es poco eficiente pues da lugar a fugas de aire por su duración y por la frecuencia con que se dejan abiertas.
¿Se recupera el calor de refrigeración de los compresores?		En los compresores refrigerados por aire se puede analizar si es fácil conducir el aire templado y recuperar el calor para ayudar en las operaciones de secado o en la calefacción de las naves en

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



	<p>invierno, actuando indirectamente como una cortina de aire.</p> <p>Recuerde que la energía asociada con la refrigeración de los compresor es muy importante.</p>
¿Esta identificado por zonas la utilización del aire comprimido en la empresa?	<p>Se deben considerar algunas razones que justifiquen la zonificación de la empresa por sus características distintivas respecto al consumo de aire.</p>
- Por horarios de demanda	<p>Analizar si hay áreas donde no se usa todo el día, uso con horario predeterminado y utilización aleatoria o con programación muy variable.</p> <p>En la llegada del aire a estas zonas instale válvulas de corte de aire, mejor si son automáticas temporizadas.</p> <p>El llenado de las tuberías y el mantenimiento de la presión cuando no hay demanda de aire implica pérdidas por fugas.</p>
- Por niveles de presión diferentes	<p>Analizar la presión mínima de funcionamiento en las distintas zonas de la fábrica. Restrinja el suministro de aire a presión elevada lo más posible, sólo a las áreas que realmente lo necesitan.</p> <p>Puede instalar válvulas reductoras de presión por zonas.</p> <p>Debe evitarse que el consumidor que requiere la presión más alta fije toda la del sistema. Al trabajar a presiones escalonadas se reduce el consumo de energía, de aire y por fugas.</p>
- Grandes demandas puntuales	<p>Considerar la instalación de un acumulador al menos de la mitad de la demanda total de aire comprimido.</p>

ESTA TESIS DEBE SER CON  
DE LA BUENA CALIDAD DE ORIGEN



## Resultados a Largo Plazo

Análisis	Acción
¿El almacenamiento de aire es de la capacidad adecuada?	<p>Analizar si la capacidad de los depósitos de aire es adecuada a sus pautas de consumo. Este análisis requiere cierta especialización.</p> <p>Una capacidad de almacenamiento inadecuada, implica que los compresores entran en carga/descarga con una frecuencia elevada, provocando puntas de demanda eléctrica que se traducen en mayor consumo de energía.</p>
¿La presión de compresión es excesiva para la de trabajo?	<p>Compruebe que el diseño de la red de distribución de aire sea correcta y adecuada a su demanda.</p> <p>El paso de aire por las tuberías y los accesorios, originan una caída de presión. Cuando es excesiva, el gasto de energía aumenta considerablemente.</p>
¿La calidad del aire es la adecuada al uso?	<p>Considere el nivel de calidad requerido en su fábrica en función del trabajo desarrollado. Si es excesiva, analice si le interesa cambiar la planta de tratamiento.</p> <p>Si necesita más de un tipo de aire en su planta, tal vez le interese analizar la conveniencia de disponer de sistemas de tratamiento separados y distribuciones separadas.</p> <p>La reducción de costos del tratamiento puede compensar la inversión de separación de sistemas según la calidad requerida, en lugar de preparar todo el aire con la máxima calidad.</p>
¿Existen algunos equipos que trabajan en horarios mas prolongados o a presión distinta que el resto de la fábrica?	<p>Tuede analizari si existe parte de la fábrica con pauta de demanda de aire comprimido (tiempos, modulación y presiones) muy diferentes a la del resto del sistema, estudie el beneficio obtenido al instalar un compresor local para esa parte de la fábrica.</p> <p>El compresor trabajará más cerca de sus condiciones óptimas sin perjudicar el trabajo de conjunto de la fábrica.</p>



¿Trabajan sus compresores mucho tiempo en vacío?	Revisar si los compresores trabajan controlando la demanda, apagándose automáticamente después de un tiempo determinado en vacío.  En función del tipo de trabajo y la demanda, el tiempo de funcionamiento en vacío puede ser el 60%
¿En compresores refrigerados por agua recupera el calor del agua de refrigeración del aceite, del preenfriador y del postenfriador?	Analizar en dónde se puede utilizar la energía disponible en el agua de refrigeración. Recuerde que la mayor parte de la energía eléctrica consumida en la compresión se transforma en calor. La instalación del sistema de recuperación de esa energía debe considerarse.  Con el agua de refrigeración se pueden obtener caudales de agua cuyo valor varía en función de la potencia del compresor.
¿Conoce la curva de demanda? ¿Dispone de un PLC para controlarla o dispone de compresores de velocidad variable?	Analizar la operación de su sistema de aire comprimido para registrar y conocer la curva de comportamiento de la demanda de aire.  Contacte con un asesor para realizar mediciones y para analizar la viabilidad de aplicar compresores nuevos con variación de la velocidad para modular la demanda o de un PLC en compresores existentes para un mismo fin.  El ahorro obtenido por instalar compresores de velocidad variable depende del consumo.

Si analizamos el sistema de aire comprimido más a detalle podremos encontrar, sin duda, la aplicación de varias de estas medidas potenciales.



## ANEXO E

## AUDITORIA ENERGETICA

El siguiente cuestionario es útil cuando se requiere hacer una auditoria energética de primer nivel o preliminar (AEP) para el aire comprimido.

La AEP utiliza sólo los datos disponibles y no requiere instrumentación sofisticada; se realiza en un corto período de tiempo. El típico resultado de la AEP es un conjunto de recomendaciones de bajo costo y acción inmediata, así como una recomendación de un análisis más profundo de la situación energética, es decir una auditoria energética detallada.

**Evaluación de Conservación de la Energía en Sistemas de Aire Comprimido**

Nombre de la Compañía: \_\_\_\_\_

Lugar: \_\_\_\_\_

Personal Entrevistado: \_\_\_\_\_

**Sección I. Control de la Energía**

1. ¿Quién es el responsable por la administración de la energía?

Nombre: \_\_\_\_\_

Posición en la empresa: \_\_\_\_\_

Informa a: \_\_\_\_\_

Tiempo parcial o completo: \_\_\_\_\_

Formación profesional, experiencia relacionada con la energía: \_\_\_\_\_

Personal a cargo: \_\_\_\_\_

2. ¿Cómo se analiza y supervisa el consumo de energía? (Marque X)

Desde la dirección de la empresa o en el sitio de consumo

De manera continua o periódica

De acuerdo a un programa o irregularmente

3. ¿Si periódicamente, cuando fue la última vez? \_\_\_\_\_

4. ¿Cómo se analiza el consumo de energía? (Marque X)

Por departamentos

Por productos

Mensualmente o por número de días laborables (o turnos)

Por costos

5. ¿Identifica el análisis la relación entre el consumo de energía y el nivel de producción (de actividad)?  SI  NO**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



6. ¿Qué unidades se emplean? (es conveniente convertir el consumo de diferentes tipos de energía en una unidad única, también de dinero)

7. a) ¿Cuales son las condiciones en las que se hacen las lecturas de los contadores?  
(Esta pregunta incluye: ¿Con qué frecuencia se leen los contadores, hay contadores internos, qué registros se llevan?)

b) ¿Es adecuada la instalación de los contadores internos?

c) ¿Debería implantarse un sistema de administración de la energía?

8. ¿Existe un estimado de costos/presupuesto de energía?

9. ¿Se han establecido estándares, esto es, de consumo de energía para cada proceso o para cada edificio o planta?

10. ¿Es comparable el consumo de energía con el de:

periodos anteriores	<input type="checkbox"/>	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	NO SE
otros lugares	<input type="checkbox"/>	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	NO SE
otras compañías	<input type="checkbox"/>	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	NO SE
otras industrias	<input type="checkbox"/>	SI	<input type="checkbox"/>	NO	<input type="checkbox"/>	NO SE

(La comparación debe tener en cuenta las condiciones del clima y los días trabajados).

11. ¿Ha establecido la administración metas?

12. ¿Considera la administración la información sobre consumo de energía como parte esencial del sistema de información de la administración?  SI  NO  
Si no, ¿por qué no?

13. ¿Qué campañas de educación o propaganda dirigida a los empleados se han adelantado para promover la conservación de energía?

14. ¿Hay recuperación de calor del aire?  SI  NO

15. ¿Hasta que punto el mantenimiento que se realiza es un mantenimiento planificado?

16. ¿Qué tan frecuente se inspeccionan o prueban las diferentes clases de equipos?

17. ¿Quién controla el presupuesto de gastos?



18. ¿Existe ya y/o está considerada una lista de inversiones de ahorro de energía, con cálculos detallados de costos de retorno de inversión?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
Si no, ¿Por qué?		
19. Se ha hecho un diagrama Sankey?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
<b>SECCION II. Uso Eficiente de la Energía</b>		
1. ¿Que tarifas se emplean?		
2. ¿Cuándo se revisaron por última vez?		
3. ¿Puede reducir la demanda máxima?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> NO SE
4. ¿Se pueden mejorar los factores de potencia?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> NO SE
5. ¿Durante que periodos opera el aire comprimido?		
Horas al día		
Días al año		
6. ¿Se emplean controles apropiados para regular la demanda de aire comprimido? ¿De que tipo?		
7. ¿Cuales son las áreas de mayor consumo de aire comprimido?		
8. ¿Que medidas se han considerado para ahorrar energía y optimizar la distribución de aire comprimido?		
9. ¿Se recupera el calor de compresión?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
10. ¿Se ha verificado la eficiencia de los compresores?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
11. ¿Se han ajustado las temperaturas del aire comprimido para el proceso al nivel mínimo requerido?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
12. ¿Se mantiene la purga de los equipos en un nivel óptimo?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
13. ¿Están operando correctamente los equipos de refrigeración?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO
14. ¿Hay fugas de aire comprimido?	<input type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> NO SE



ANEXO F

**DIAGRAMA SANKEY PARA EL AIRE COMPRIMIDO**

Este diagrama nos muestra la distribución energética en la compresión de aire y el por qué de la importancia de optimizar los recursos energéticos.

Reducir la cantidad de energía eléctrica que consume el compresor es muy difícil, lo que si se puede lograr es recuperar y evitar pérdidas en algunas partes de la distribución.

Podemos apreciar que la mayor parte de la energía consumida por el compresor se transforma en calor, el cual se puede recuperar para darle un uso dentro de la planta. Si sólo se desecha a la atmósfera, resulta un costo muy significativo desperdiciado.

Otro punto muy importante en donde podemos evitar el desperdicio de la energía, y por consiguiente de dinero, es en la detección y reparación de fugas.

Aplicar cualquiera de estas medidas de ahorros energéticos, nos dará beneficios económicos que se verán reflejados en el pago por el consumo de los recursos energéticos utilizados.

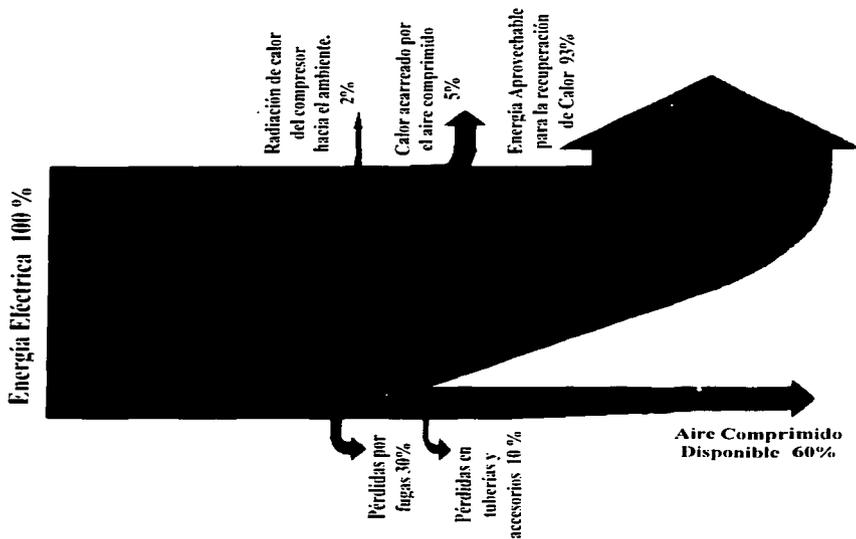


Diagrama Sankey de la distribución de la energía en la compresión y distribución de aire.



## ANEXO

## ANEXO G

## FACTORES DE CONVERSION

Debido a que el uso de la energía solo puede comprenderse cuando el consumo de energía se da en las unidades de energía apropiadas, se muestran a continuación equivalencias de algunas unidades de energía frecuentemente empleadas y unidades relacionadas.

VOLUMEN	Metro cúbico (m <sup>3</sup> )	Unidad Final
1 cf = 1 ft <sup>3</sup>	2.8317*10 <sup>-02</sup>	m <sup>3</sup>
1 gal	3.7850*10 <sup>-03</sup>	m <sup>3</sup>
1 bbl = 42 gal	1.5876*10 <sup>-01</sup>	m <sup>3</sup>
MASA	Kilogramo (kg)	
1 Tonelada (t)	1.000*10 <sup>3</sup>	kg
1 lb	4.5359*10 <sup>-01</sup>	kg
1 kg	2.2046	Lb
DENSIDAD	kg m <sup>-3</sup>	
1 lb/gal	1.1983*10 <sup>-2</sup>	kg/m <sup>3</sup>
1 lb/ft <sup>3</sup>	16.0185	kg/m <sup>3</sup>
ENERGÍA	Joule (J)	
1 cal	4.1868	J
1 Btu	1.0551	J
1 TEP	4.1868	J
1 kWh	3.6000	J
1 kJ	0.9478	Btu
1 Btu ft <sup>2</sup>	3.7260*10 <sup>-1</sup>	J/m <sup>2</sup>
ENTALPIA	J/kg	
1 kcal/kg	4.1868*10 <sup>3</sup>	J/kg
1 Btu/lb	2.3260*10 <sup>3</sup>	J/kg
1 kJ/kg	0.4299	Btu/lb
POTENCIA	Watt (W)	
1 cal/s	4.1868	W
1 kcal/h	1.1630	W
1 Btu/s	1.0551	W
1 Btu/h	2.9308*10 <sup>-01</sup>	W
1 BHP = 34.5 lb/h vapor	9.8109*10 <sup>3</sup>	W
1/h vapor = 63.90 BHP	0.6269*10 <sup>6</sup>	W

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN