



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN  
DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA  
LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES**

**Kevyn Julio Juárez Najarro**

Asesorado por el Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma

Guatemala, julio de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN  
DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA  
LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KEVYN JULIO JUÁREZ NAJARRO**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS ANIBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucia Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Veliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Luis Alfredo Asturias Zúñiga
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 27 de octubre de 2011.



**Kevyn Julio Juárez Najarro**



Guatemala, 08 de abril de 2014  
REF.EPS.DOC.500.04.14.

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Rodríguez Serrano.

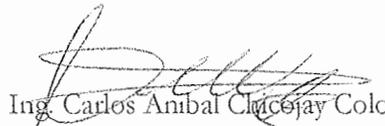
Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Kevyn Julio Juárez Najarro** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. 200714420, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES.**

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

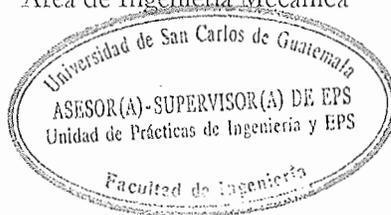
Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

  
Ing. Carlos Anibal Cluccejay Coloma  
Supervisor de EPS  
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo  
CACC/ra





Guatemala, 08 de abril de 2014  
REF.EPS.D.197.04.14

Ing. Julio César Campos Paiz  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Presente

Estimado Ingeniero Campos Paiz:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Kevyn Julio Juárez Najarro** quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor - Supervisor de EPS, en mi calidad de Director apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,  
"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Silvio José Rodríguez Serrano  
Director Unidad de EPS



SJRS/ra



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.El.Mecánica 92.2014  
Guatemala 23 de abril de 2014

Ingeniero  
Silvio José Rodríguez Serrano  
Director  
Unidad de EPS  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Rodríguez:

Por este medio le informo que el tema del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.) **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES** presentado por el estudiante **Kevyn Julio Juárez Najarro**, previo a optar al título de ingeniero Mecánico, ha sido autorizado por esta Dirección

Sin otro particular.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Julio César Campos Paiz  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Mecánica

MA Ing. Julio César Campos Paiz  
DIRECTOR  
Esc. Ingeniería Mecánica

c.c: Archivo

JC/mjm



**USAC**

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.129.2014

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Supervisor, con la aprobación del Director del Departamento de EPS, del trabajo de graduación titulado **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES** del estudiante **Kevyn Julio Juárez Najarro, carnet No. 200714420**, procede a la autorización del mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

MA Ing. Julio César Campos Paiz  
DIRECTOR  
Esc. Ingeniería Mecánica

Guatemala, julio de 2014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE CRITERIOS PARA SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO PARA LA INDUSTRIA EN GUATEMALA, EN KAESER COMPRESORES**, presentado por el estudiante universitario **Kevyn Julio Juárez Najarro** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, julio de 2014



/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por todas las bendiciones que me regala en la vida. Y me ha permitido culminar esta meta.

### **Mis padres**

Audie Antonio Juárez Sánchez y Miriam Yolanda Najarro López, gracias por todo su esfuerzo y sacrificio, con su ejemplo me han enseñado valores que llevaré toda la vida. Qué Dios los bendiga.

### **Mis abuelos**

Julio Juárez, Alicia Sánchez, Anselmo Najarro y Virgilia López, por su cariño y oraciones que me acompañan siempre.

### **Mis hermanos**

Audie, Steaven y Randy Juárez Najarro, que con su ejemplo me han enseñado que toda meta se puede lograr con esfuerzo y fuerza de voluntad.

### **Mis tíos**

Por su apoyo y ayuda incondicional a lo largo de mi vida.

### **Mis primos**

Por los momentos gratos que hemos compartido.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad de San Carlos de Guatemala** Casa de conocimiento. Grande entre las del mundo.

**Facultad de Ingeniería** Donde forjé mis conocimientos.

**Mis amigos** Por los momentos que compartimos a lo largo de la formación académica.

**Kaeser Compresores de Guatemala** Gracias por darme la oportunidad de formarme laboralmente, y por capacitarme profesionalmente en el extranjero.

**Mis amigos y compañeros de Kaeser Compresores** Gracias por las palabras de apoyo que me brindaron para lograr esta meta.

**Ingeniero asesor** Ingeniero Carlos Anibal Chicojay Coloma. Por compartir sus conocimientos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	VII
GLOSARIO .....	IX
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Justificación .....	1
1.2. Kaeser Compresores de Guatemala .....	2
1.2.1. Descripción general .....	2
1.2.2. Meta.....	3
2. FASE DE INVESTIGACIÓN .....	5
2.1. Clasificación industrial .....	5
2.1.1. Definición de clasificación industrial .....	5
2.1.2. Objetivos de la clasificación.....	6
2.1.3. Principios de clasificación .....	6
2.2. Descripción de los 10 tipos de industrias.....	7
2.2.1. Industria farmacéutica y usos medicinales .....	7
2.2.2. Caucho y plástico .....	8
2.2.3. Minerales no metálicos .....	10
2.2.4. Metales: hierro y acero .....	11
2.2.5. Productos de madera .....	13
2.2.6. Producción de papel y procesos de imprenta.....	14

2.2.7.	Productos textiles .....	16
2.2.8.	Productos alimenticios .....	17
2.2.9.	Producción de bebidas.....	22
2.2.10.	Industria de la construcción.....	23
3.	FASE TÉCNICO PROFESIONAL .....	25
3.1.	Análisis de demanda de aire .....	25
3.1.1.	Objetivo .....	25
3.1.2.	Proceso de determinación de la demanda de aire .....	27
3.1.3.	Principales unidades de medida en el análisis de demanda de aire comprimido .....	28
3.1.4.	Instrumentación y equipo de medición .....	28
3.1.5.	Proceso estructurado hacia un sistema de aire comprimido de bajo consumo energético .....	35
3.2.	Descripción de las principales especificaciones técnicas en sistemas de aire comprimido.....	37
3.2.1.	Presión máxima.....	38
3.2.2.	Caudal.....	38
3.2.3.	Potencia eléctrica consumida.....	39
3.2.4.	Energía específica.....	39
3.3.	División de la demanda de aire comprimido.....	40
3.3.1.	Carga base.....	40
3.3.2.	Carga media.....	41
3.3.3.	Carga pico .....	41
3.4.	Calidad del aire ambiental en Guatemala .....	42
3.5.	Sistemas de tratamiento de aire comprimido .....	44
3.5.1.	Objetivo del proceso de tratamiento del aire comprimido.....	45

3.5.2.	Calidad del aire comprimido .....	46
3.5.2.1.	Norma de Calidad de Aire ISO 8573 ...	46
3.5.2.2.	Clases de calidad del aire comprimido .....	50
3.5.2.3.	Niveles de calidad del aire comprimido .....	51
3.5.2.4.	Calidad del aire comprimido con compresores libres de aceite .....	53
3.5.2.5.	Calidad del aire con compresores enfriados por aceite .....	54
3.5.3.	Efectos de contaminantes en el aire comprimido ...	55
3.5.4.	Elementos del sistema de tratamiento .....	56
3.5.4.1.	Separadores .....	56
3.5.4.2.	Secadores .....	60
3.5.4.3.	Filtros .....	76
3.5.5.	Proceso de determinación del sistema de tratamiento .....	84
3.5.6.	Criterios de selección del sistema de tratamiento de aire comprimido .....	88
3.5.6.1.	Aplicación .....	88
3.5.6.2.	Conformación del sistema de tratamiento .....	89
3.5.6.3.	Efectos del material de la tubería en el sistema de tratamiento .....	94
3.5.6.4.	Pérdida de presión: pérdida de eficiencia .....	96
3.5.7.	Clases de calidad recomendada .....	98
3.5.7.1.	Farmacéuticos y medicina .....	99
3.5.7.2.	Industria del caucho y plástico .....	100

3.5.7.3.	Minerales no metálicos.....	101
3.5.7.4.	Metales: hierro y acero .....	101
3.5.7.5.	Productos de madera .....	102
3.5.7.6.	Papel e imprenta .....	102
3.5.7.7.	Productos textiles .....	103
3.5.7.8.	Productos alimenticios .....	103
3.5.7.9.	Elaboración de bebidas .....	104
3.5.7.10.	Industria de construcción.....	105
4.	FASE DOCENCIA – APRENDIZAJE .....	107
4.1.	Planeación correcta de estaciones de aire comprimido .....	107
4.1.1.	Estableciendo la presión .....	107
4.1.2.	Ventilación: consideraciones para la ventilación adecuada en el lugar del tratamiento .....	109
4.1.3.	Almacenamiento: tamaño adecuado del tanque ...	112
4.2.	Gestión correcta del sistema de aire comprimido .....	115
4.2.1.	Costos energéticos para la generación de aire comprimido.....	115
4.2.2.	Puntos de posible mejora en sistemas de aire comprimido.....	117
	CONCLUSIONES.....	123
	RECOMENDACIONES .....	125
	BIBLIOGRAFÍA.....	127
	ANEXOS.....	129

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Registrador de datos .....	29
2.	Kilovatímetros trifásicos .....	30
3.	Transductores de presión.....	31
4.	Optoacopladores .....	32
5.	Anemómetro.....	33
6.	Veleta interna del anemómetro .....	34
7.	Separador ciclónico.....	58
8.	Métodos de secado del aire comprimido.....	62
9.	Secadores por método de absorción.....	68
10.	Diagrama de operación de secador por método de adsorción con regeneración con calefacción interna.....	72
11.	Volumen de flujo para cada método de secado según las clases de calidad conforme a la Norma ISO 8573-1 .....	76
12.	Consideraciones para el sistema de tratamiento adecuado.....	87
13.	Sistemas de tratamiento en paralelo .....	90
14.	Sistema de tratamiento con elementos con <i>bypass</i> .....	91
15.	Instalación del secador antes del tanque de almacenamiento .....	93
16.	Instalación del secador después del tanque de almacenamiento .....	94
17.	Composición de presión máxima del compresor.....	108

## TABLAS

I.	Proceso estructurado de medición.....	36
II.	Norma ISO 8573.....	47
III.	Clases de calidad según Norma ISO 8573-1.....	51
IV.	Factor por la presión a la entrada.....	65
V.	Factor por la temperatura a la entrada.....	65
VI.	Factor por la temperatura ambiente.....	66
VII.	Datos ejemplo.....	66
VIII.	Clases de calidad recomendadas.....	98
IX.	Caída de presión según elemento de tratamiento.....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cfm</b>	Cubic foot per minute
<b>\$</b>	Dólares
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>hp</b>	Horse power
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>kWh</b>	Kilowatt hora
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cúbico
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metro cúbico por hora
<b>m<sup>3</sup>/min</b>	Metro cúbico por minuto
<b>µm</b>	Micrómetro
<b>mA</b>	Miliamperio
<b>mg/m<sup>3</sup></b>	Miligramo por metro cubico
<b>Min.</b>	Minuto
<b>ppm</b>	Partes por millón
<b>psi</b>	Pounds square inch



## GLOSARIO

<b>Aire libre</b>	Aire a 1,013 mbar y 21°C, según la norma ISO R554.
<b>Ambiente</b>	Las condiciones del entorno del equipo, normalmente de temperatura, bajo circunstancias de trabajo normales.
<b>Anemómetro</b>	Instrumento de medición, que por medio de una veleta interna a una sección de tubo calibrada, sensa la velocidad del flujo, y con la cual se determina el flujo de aire en las mediciones de demanda de aire comprimido.
<b>Bypass</b>	En términos generales se refiere a un desvío, derivación de la ruta principal a una ruta más corta. En aire comprimido, se refiere a la derivación por medio de una válvula para aislar ciertos elementos del sistema de aire comprimido.
<b>Caída de caudal</b>	Caudal máximo a través de un mecanismo a una presión determinada con la válvula abierta al máximo.
<b>Caída de presión</b>	Cantidad de pérdida de presión provocada por el caudal de aire a través de un sistema.

<b>Calor</b>	Es energía transferida por una diferencia de temperatura entre dos cuerpos. No hay transferencia de masa en el proceso.
<b>Coalescente</b>	Acción que provoca la unión de pequeñas partículas transformándolas en otras de mayor tamaño.
<b>Condensado</b>	Es el líquido formado a partir del vapor de agua en el aire y vapor de aceite acarreado por el compresor; y este resulta de la caída de temperatura y/o un incremento en la presión.
<b>Demanda de aire artificial</b>	Consumo adicional de aire causado por excesiva presión en el sistema.
<b>Depósitos de purga</b>	Mecanismo para eliminar el agua condensada de un sistema, situado en la parte inferior. Generalmente van montados con válvulas de purga automática.
<b>Desecante</b>	Es una sustancia que elimina la humedad de aire. Se utiliza en secadores que utilizan el método de adsorción, este proceso involucra cierto material absorbente. Estos secadores utilizan un ciclo que puede utilizar o calor, para regenerar el material desecante, pues utilizan una parte de la energía para secar este material, haciéndolo reutilizable.
<b>Emulsión</b>	Mezcla de aceite y agua.

<b>Factor de carga</b>	Relación entre la carga del compresor promedio y la carga máxima nominal del compresor durante un periodo determinado de tiempo.
<b>Humedad</b>	En términos generales, se refiere a la cantidad de vapor de agua en la atmosfera.
<b>Humedad relativa</b>	Cantidad de vapor de agua existente en un determinado volumen de aire, en relación a la cantidad de vapor de agua necesario para saturar el mismo volumen de aire a igual temperatura.
<b>Micrón</b>	Es la unidad de medida que equivale a la millonésima parte. El símbolo científico es $\mu$ .
<b>Micro-Fog</b>	Suspensión de partículas de aceite ligeras en el aire, normalmente inferiores a $2\mu\text{m}$ , que pueden recorrer largas distancias.
<b>Oil-Fog</b>	Suspensión de partículas de aceite en el aire, más pesado y grande que Micro-Fog.
<b>Periodo de mantenimiento</b>	Período de tiempo estimado para realizar labores de protección o reparación de todos o la mayoría de elementos de las máquinas, en este caso compresores, secadores y todos los elementos de un sistema de aire comprimido.

<b>Posenfriador</b>	Intercambiador de calor montado generalmente a la salida del compresor para extraer el calor de la compresión.
<b>Presión absoluta</b>	Es la suma aritmética de la presión manométrica y la presión atmosférica. Debe ser utilizada en todos los cálculos con las leyes básicas de gases.
<b>Presión manométrica</b>	Es la presión indicada por la mayoría de instrumentos y manómetros. Esta presión permite obtener la presión absoluta.
<b>Proceso adiabático</b>	Es el proceso que ocurre sin cambio de energía.
<b>Proceso isotérmico</b>	Es el proceso en el cual no hay cambio de temperatura.
<b>Proceso isotrópico</b>	Es el proceso en el cual la entropía permanece constante.
<b>Proceso politrópico</b>	Es el proceso en el cual se consideran cambios en las características del gas durante la compresión de este.
<b>Psicometría</b>	Ciencia que se encarga de lo relacionado a las mezclas de vapor de aire y agua en la atmosfera.

<b>Punto de rocío</b>	Temperatura a la cual la humedad empieza a condensarse del aire a determinada presión. Para asegurarse que no hay humedad líquida (agua) presente en el aire comprimido, el punto de rocío debe ser menor que la temperatura más baja a la cual el sistema de compresión va a ser expuesto.
<b>Purgar</b>	Acción de evacuar cierta mezcla semilíquida de un volumen hacia el exterior de este, por medio de una válvula mecánica o electrónica. En sistema de aire comprimido se refiere específicamente a la purga de la mezcla de condensado con aceite contenida en los tanques de almacenamiento y filtros.
<b>Regeneración</b>	Proceso en el cual el material desecante de los secadores que utilizan el método de adsorción, vuelve a su estado inicial, luego de haber absorbido y retirado la humedad del aire comprimido por un proceso químico. El proceso de regeneración puede requerir calor o no para el proceso de regeneración.
<b>Regulador de presión</b>	Mecanismo conectado a un sistema para que su presión se mantenga constante mediante el control del caudal de salida a la atmósfera.
<b>Relación de compresión</b>	Es la relación entre la presión absoluta de descarga y la presión absoluta de admisión. Por lo general, se aplica a una sola etapa de compresión, pero puede aplicarse a un compresor de múltiples etapas.

<b>Saturación</b>	Ocurre cuando el vapor esta en el punto de rocío o la temperatura de saturación corresponde a la presión parcial. Un gas nunca es saturado con vapor. Sin embargo, el espacio ocupado por el gas y el vapor juntamente puede estar saturado.
<b>Secador desecante</b>	Secador que utiliza método de adsorción, y que por medio de un material desecante, absorbe el vapor de agua hasta que dicho material se satura del agua absorbida, entrando a un ciclo de regeneración del material desecante.
<b><i>Splitting</i></b>	Método que consiste en repartir los compresores de potencias iguales o parecidas o según el tipo de control para adaptarlos a las cargas base y pico en la demanda de un cliente.
<b>Unidad seca</b>	Es aquella unidad en la que no hay inyección o circulación de líquido para enfriamiento o sellamiento.
<b>Válvula de descarga</b>	Válvula conectada a la atmósfera que permite una rápida descarga de la presión del sistema.

**Válvula de máxima presión**

Mecanismo de protección utilizado para disminuir la presión de aire en un sistema de aire comprimido hasta el nivel de trabajo requerido, en esta se calibra la máxima presión soportada, para evitar accidentes o explosiones, comúnmente se instala en los tanques de almacenamiento.



## RESUMEN

Este trabajo se desarrolla en cuatro capítulos estratégicamente organizados con el fin de presentar la información de manera ordenada y comprensible. Estos cuatro capítulos son:

El capítulo I, Generalidades, presenta la información básica sobre el desarrollo general, indicando la finalidad de esta investigación. Además, se introduce al concepto del presente trabajo. Entre la información contenida en este capítulo se proporciona una descripción general de la empresa en la cual se desarrolla el trabajo y la misión de esta en la industria del aire comprimido. En este se presenta la información necesaria para la fácil introducción y comprensión del proyecto.

El capítulo II, o Fase de Investigación, trata específicamente de conocer cómo se realiza la clasificación industrial. Se incluye las normas que rigen la clasificación de industrias, principios y objetivos, se desarrollan los 10 tipos de industria incluidos en la clasificación referida. Se explica qué productos y qué actividades están consideradas en cada tipo de industria. Se eligen estratégicamente estos 10 tipos de industria, porque se considera son representativos para la industria en Guatemala. Es importante saber a qué actividad industrial se refiere cada tipo de industria descrito e incluido en el estudio.

En el capítulo III se presenta la mayor cantidad de información técnica, esta es la Fase Técnico-profesional. En esta se explica detalladamente los conceptos básicos y objetivos del análisis de demanda de aire. También se

investigan los instrumentos que se utilizan en un análisis de aire comprimido y cómo este influye en el proceso hacia un sistema de aire comprimido más eficiente. Además, se desarrolla la división de la demanda de aire en los tres tipos de carga en que se divide la demanda, explicando cada una de estas.

Seguidamente se encuentran los temas correspondientes a los sistemas de tratamiento de aire comprimido y se presenta la importancia de un sistema de tratamiento, la función de este, así como los accesorios requeridos para este. En referencia al tratamiento del aire se desarrolla el tema de la calidad del aire. Es importante para el resultado del proceso involucrado, conocer la calidad del aire que se requiere obtener de un sistema de aire comprimido; existen clases según la calidad del aire, establecidas por normas de la Organización Internacional de Estándares aplicadas al análisis y estudio de la calidad del aire.

Se desarrolla la descripción y funcionamiento de cada uno de los elementos de un sistema de tratamiento de aire. Indicando cómo afectan en la calidad de aire que el sistema entrega. Además, se incluye un cálculo de ejemplo en el que se dimensiona un secador refrigerativo, indicando los factores que afectan en este cálculo. Luego se establece el proceso de determinación del sistema de tratamiento adecuado según el tipo de industria.

Para el estudio del proceso de determinación del sistema de tratamiento del aire comprimido, se divide en cuatro títulos. El primero explica lo relativo al efecto que la aplicación en la cual se utiliza el aire comprimido tiene sobre la elección y diseño del sistema de tratamiento, para alcanzar la clase de calidad de aire. Siendo la aplicación uno de los criterios a considerar para la elección del sistema de tratamiento. En el segundo título se desarrollan distintas formas de conformar un sistema de tratamiento y los efectos que estas variaciones pueden tener en el funcionamiento del sistema de tratamiento. En el tercer título

de este se presentan los efectos que el material de la tubería del sistema de distribución puede ocasionar en el sistema de tratamiento y en la calidad de aire comprimido requerido. El último título que concluye el proceso, es la pérdida de presión, cómo se ocasiona, los efectos de esta y cómo se puede evitar.

En el capítulo IV se plantean los lineamientos generales para obtener la planeación correcta de estaciones de aire comprimido. En el capítulo IV se presenta la información concentrada en una serie de lineamientos de los procesos de planeación y gestión correcta del sistema de aire comprimido. Se desarrolla la planeación de la estación de aire comprimido, indicando valores permitidos generales para el funcionamiento óptimo, criterios y efectos en el funcionamiento de la estación de aire comprimido en la distribución, ventilación y almacenamiento de aire.

Estos criterios de planeación y gestión correcta del sistema de aire comprimido harán que los sistemas de generación, tratamiento, almacenamiento y distribución de aire comprimido sean próximos a la óptima eficiencia, generando ahorro y alta productividad en el proceso.

Finalmente se presenta un listado de conclusiones respectivas a los objetivos específicos planteados al inicio de la investigación, se determina una serie de recomendaciones basadas en las conclusiones de este trabajo. Para mayor comprensión técnica, se incluye un glosario de términos técnicos utilizados en el desarrollo del presente trabajo.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Conocer detalladamente la incidencia de los sistemas de tratamiento de aire comprimido en la industrial de Guatemala y establecer los criterios correctos para la selección del sistema de tratamiento idóneo, que considere la aplicación para la que se diseñó el sistema de aire comprimido

### **Específicos**

1. Determinar una clasificación de actividades industriales que se pueda utilizar para el análisis y utilización de criterios en la industria de Guatemala.
2. Presentar las características, función, aplicación e importancia que tiene cada componente de un sistema de tratamiento de aire comprimido.
3. Facilitar por medio de la clasificación industrial, la selección de los sistemas de tratamiento de aire comprimido idóneos según la aplicación industria.
4. Determinar la incidencia de la Norma ISO 8573-1 en la selección de sistemas de tratamiento de aire comprimido y la calidad de este.
5. Conocer la importancia del proceso de planeación, gestión y determinación correcta de los sistemas de aire comprimido.



## INTRODUCCIÓN

Guatemala, un país en vías de desarrollo con un sector industrial creciente, en el cual la industria es uno de los recursos con más potencial para generar desarrollo y riqueza. Este desarrollo solo se construye cuando se trabaja de manera inteligente, buscando propuestas innovadoras e implementando iniciativas que generen los mayores beneficios.

En el desarrollo de la presente investigación, se presentan los criterios, conceptos, cálculos y procedimientos generales aplicables al diseño y selección de sistemas de tratamiento de aire comprimido, con el objetivo de obtener la mejor calidad de aire comprimido, adecuada para una determinada aplicación.

El aire comprimido es una fuente de energía utilizada en la industria para diversas aplicaciones. La mayoría de la industria en Guatemala utiliza por lo menos un compresor de tamaño mediano en plantas de producción, además existen cientos de diferentes procesos en los que se puede aplicar el aire comprimido. Para algunas de estas aplicaciones, otras fuentes de energía pueden ser más costosas, mientras que el aire comprimido tiene ventajas que lo hacen ser un medio más eficiente de transmisión y uso de energía.

Sin embargo, el aire comprimido es generado por medio de un método de compresión, en el que un compresor succiona aire del ambiente y lo reduce en un volumen, aumentando la presión de este; el aire del ambiente comúnmente tiene varias partículas en suspensión, lo que resulta en aire comprimido contaminado. Para reducir y evitar esta contaminación es necesario utilizar un sistema de tratamiento de aire comprimido.

Un sistema de tratamiento de aire comprimido es un conjunto de elementos dispuestos de la mejor manera para que puedan cumplir con el objeto para lo que fueron diseñados, de la forma más eficiente y así poder cumplir con la calidad de aire comprimido adecuada.

Todos los elementos utilizados en el diseño de un sistema de tratamiento son de gran importancia para la continuidad del servicio, conservar la vida útil de la red de distribución y alcanzar el nivel de calidad de aire deseado. El uso de estos dispositivos en el sistema de tratamiento de aire comprimido depende principalmente de la aplicación final en la cual se utilice el aire comprimido. En esta investigación se desarrollan los criterios de selección de sistemas de tratamiento, considerando una clasificación de los tipos de industria más representativos en el uso de aire comprimido, en la industria de Guatemala.

La clasificación industrial se utiliza para facilitar el flujo de información a lo largo del desarrollo de esta investigación, esta clasificación está basada en diez tipos de industria que tienen mayor representación en Guatemala. Se describe la actividad productiva y los productos que abarca cada tipo de industria.

El interés de realizar esta investigación de los criterios de selección de sistemas de tratamiento de aire comprimido surge de la escasa información que se conoce en el medio industrial, sobre la importancia del tratamiento del aire comprimido y todos los efectos que conlleva tener aire comprimido con el nivel de pureza adecuado para determinada aplicación.

Se recomienda aplicar los criterios de selección de sistemas de tratamiento de aire en la industria, ya que presenta ciertos efectos positivos que deben ser detenidamente analizados a manera de establecer la verdadera

función, correcta aplicación y aporte de eficiencia al sistema de aire comprimido.

En el medio industrial de Guatemala, en el tema del aire comprimido, la idea de instalar un sistema de tratamiento para el aire comprimido ha generado una serie de dudas en la aplicación, por lo que se puede definir el problema con la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los criterios correctos para la selección del sistema de tratamiento idóneo, que considere la aplicación para la que fue diseñado el sistema de aire comprimido?

La utilización de un sistema de tratamiento tiene fundamento técnico en la búsqueda de reducir la contaminación del aire comprimido y obtener aire comprimido de calidad para determinada aplicación.



# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Justificación

En el medio industrial de Guatemala, en el tema del aire comprimido, la idea de instalar un sistema de tratamiento para el aire comprimido ha generado una serie de dudas en la aplicación, por lo que se puede definir el problema con la siguiente pregunta: ¿Cuáles son los criterios correctos para la selección del sistema de tratamiento idóneo, que considere la aplicación para la que se diseñó el sistema de aire comprimido?

La escasa información que se conoce en el medio industrial, sobre la importancia del tratamiento del aire comprimido y todos los efectos que conlleva tener aire comprimido con el nivel de pureza adecuado para determinada aplicación, hace que la decisión de invertir en un sistema de tratamiento no sea considerada a la hora de implementar la utilización de aire comprimido en los procesos de producción.

La decisión de utilizar sistemas de tratamiento de aire comprimido surge la mayoría de veces al descubrir los problemas consecuentes y recurrentes de contaminación que lleva al sistema de aire comprimido a no ser eficiente. La falta de tratamiento del aire comprimido provoca contaminación del aire, de los componentes de la red, de la red de distribución y de los equipos en el punto de uso; esta contaminación conlleva a fallas en todos esos elementos y las fallas requieren de mayor y constante mantenimiento; toda esta situación reduce la eficiencia de cada elemento y finalmente aumentan los costos totales en la utilización de aire comprimido.

La utilización de un sistema de tratamiento tiene fundamento técnico en la búsqueda de reducir la contaminación del aire comprimido y obtener aire comprimido de calidad para determinada aplicación.

Se trabaja y asesora al sector industrial con el fin de aumentar la eficiencia, el ahorro y la competitividad de las industrias. Los criterios de selección de sistemas de tratamiento desarrollados en este trabajo aportan al diseño de soluciones, que tienen por objeto optimizar la eficiencia y economía de los sistemas de aire comprimido en el sector industrial de Guatemala.

## **1.2. Kaeser Compresores de Guatemala**

Kaeser Compresores es una empresa multinacional privada que por medio de las subsidiarias en los 5 continentes ofrece soluciones a través de productos, servicios y sistemas completos de aire comprimido.

### **1.2.1. Descripción general**

Kaeser Compresores de Guatemala es una empresa multinacional privada que ofrece soluciones a través de productos, servicios y sistemas completos para la generación, tratamiento y suministro del aire comprimido que se emplea como fuente de energía en la industria. Dichas soluciones tienen por objeto optimizar la eficiencia y economía de los sistemas de generación de aire comprimido.

La innovación y la excelente calidad por las cuales se destacan los productos y servicios de Kaeser Compresores contribuyen para que las empresas industriales que utilizan aire comprimido afiancen las fortalezas competitivas. La comunicación y asesoría permanente con el cliente se

constituye en un aspecto fundamental para desarrollar el concepto y mejorar continuamente las condiciones económicas del cliente, así como la eficiencia, durabilidad y utilización del sistema de aire comprimido.

### **1.2.2. Meta**

“Kaeser se ha impuesto la meta de consolidar un nicho en el mercado, posicionándose como uno de los líderes mundiales en el suministro de productos y tecnología de aire comprimido y de este modo, continuar expandiendo sus ventas internacionales y el alcance de los servicios que presta en pro de la máxima satisfacción de los clientes.

Ofrecer soluciones a través de productos, servicios y sistemas completos para la generación, tratamiento y suministro de aire comprimido, que regularmente es utilizado como fuente de energía en aplicaciones industriales.”<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> [http://www.kaeser.com.gt/About\\_us/default.asp](http://www.kaeser.com.gt/About_us/default.asp). Consulta: noviembre de 2013.



## **2. FASE DE INVESTIGACIÓN**

### **2.1. Clasificación industrial**

En el presente trabajo se ha elaborado una clasificación industrial derivada de CIIU. Se han incluido diversas variaciones alternativas que por razones conceptuales no se prestan a la estructura de la CIIU. Estas variaciones en la estructura de clasificación utilizada se basan en las industrias con las cuales Kaeser Compresores trabaja y asesora en temas de aire comprimido.

#### **2.1.1. Definición de clasificación industrial**

La Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) de todas las actividades económicas es la clasificación internacional de referencia de las actividades productivas. Constituye una estructura de clasificación coherente y consistente de las actividades económicas basada en un conjunto de conceptos, definiciones, principios y normas de clasificación.<sup>2</sup>

La clasificación es un formato estándar que permite organizar la información detallada sobre la situación de una economía de acuerdo con principios y percepciones económicos.

La mayoría de los países de todo el mundo están utilizando la CIIU como la clasificación nacional de actividades económicas, por consiguiente, la CIIU ha proporcionado orientación a los países para la elaboración de clasificaciones

---

<sup>2</sup> Organización de las Naciones Unidas. Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas (CIIU), p III.

nacionales y se ha convertido en un instrumento importante para comparar a nivel internacional los datos estadísticos sobre las actividades económicas.

### **2.1.2. Objetivos de la clasificación**

El principal propósito de la clasificación es ofrecer un conjunto de categorías de actividades industriales que se pueda utilizar para la reunión y difusión de información de acuerdo con esas actividades.

Proporciona un marco general en que los datos de información relacionada pueden reunirse, analizarse y divulgarse en un formato diseñado para fines de análisis económico, toma de decisiones y elaboración de planes de mejora.

La clasificación industrial se utiliza para facilitar el ordenamiento del flujo de información que es indispensable para el análisis y asesoría de los sistemas de aire comprimido. Además, la clasificación industrial utilizada en este trabajo de investigación tiene como objetivo describir en 10 tipos a las empresas industriales en Guatemala, según la principal actividad económica a la que se dedican.

### **2.1.3. Principios de clasificación**

Todas las categorías de la clasificación son mutuamente excluyentes. Esto significa que cualquier producto contenido en un tipo de industria, no puede estar clasificado en otro, dentro de los tipos de industria previamente establecidos.

Los principios y criterios utilizados para definir y delimitar esas categorías no se han modificado respecto de las versiones anteriores de la CIIU y se basan en los insumos de bienes, servicios y productos, el proceso y la tecnología de producción, las características de los productos y el uso al que se destinan los productos.

Las actividades económicas que presentan características similares con arreglo a esos criterios se han agrupado en las mismas categorías de la clasificación industrial.

## **2.2. Descripción de los 10 tipos de industrias**

Se desarrolla la clasificación industrial en diez tipos de industria. Estos son mayoritariamente representativos para Guatemala, incluyendo a la mayoría de usuarios de aire comprimido dentro de estos diez tipos. A continuación se describen los diez tipos de industria y los productos que estos producen.

### **2.2.1. Industria farmacéutica y usos medicinales**

Esta tipo de industria comprende la fabricación de productos farmacéuticos básicos y preparados farmacéuticos. Se incluye también la fabricación de sustancias químicas medicinales y productos botánicos.

Además, este tipo de industria contiene la utilización de aire para aplicaciones hospitalarias. Toda aplicación utilizada en un centro médico, en el cual el aire es para consumo o está en contacto directo con el ser humano.

Comprende las siguientes actividades:

- Fabricación de sustancias medicinales activas que se utilizan por las propiedades farmacológicas en la fabricación de medicamentos: antibióticos, vitaminas básicas, ácido salicílico y acetilsalicílico.
- Fabricación de medicamentos: antisueros y otras fracciones de sangre vacunas medicamentos diversos, incluidos preparados homeopáticos.
- Fabricación de preparados para el diagnóstico médico.
- Fabricación de sustancias radiactivas para diagnóstico.
- Fabricación de productos de biotecnología.
- Fabricación de gasas, vendas y apósitos médicos impregnados.
- Aire médico específicamente para procesos de respiración artificial en seres humanos.
- Aire utilizado en equipo neumático que este en contacto directo con seres humanos.
- Aire utilizado para procesos de odontología.
- Procesamiento de productos botánicos para uso farmacéutico.

### **2.2.2. Caucho y plástico**

Este tipo de industria comprende la fabricación de productos de caucho y de cualquier tipo y densidad de polímeros para la fabricación de productos plástico.

La industria se define por las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación, lo que no significa que se clasifique en ella la fabricación de todos los productos hechos con esos materiales.

Esta comprende la elaboración de resinas plásticas nuevas o recicladas para obtener productos intermedios o finales, mediante procesos tales como el moldeo por compresión, extrusión, inyección o insuflación de aire comprimido y

el vaciado. La mayoría de esos procesos de producción permiten la fabricación de gran variedad de productos. Se incluyen las siguientes actividades:

- Fabricación de productos de plástico: planchas, láminas, películas, hojas, tiras autoadhesivas.
- Fabricación de productos acabados de plástico: tubos, caños y mangueras de plástico; accesorios de caños y mangueras.
- Fabricación de artículos de plástico para el envasado de productos: bolsas, sacos, cajones, cajas, garrafones, botellas de plástico.
- Fabricación artículos de plástico para construcción: puertas, ventanas, marcos, postigos, persianas y rodapiés de plástico, tanques y depósitos de plástico.
- Cubrimientos de plástico para pisos, paredes y techos, en rollos, en forma de losetas.
- Artículos sanitarios de plástico, como: bañeras, platos de ducha, lavabos, tazas de inodoros, cisternas de inodoros.
- Fabricación de servicios de mesa, utensilios de cocina y artículos de tocador de plástico rollos u hojas de celofán.
- Fabricación de cubrimientos resistentes para pisos, como los de vinilo, linóleo.
- Fabricación de diversos productos de plástico: tocados, accesorios para aislamiento, piezas de lámparas y accesorios para alumbrado, material escolar y de oficina, prendas de vestir, accesorios para muebles, estatuillas, correas de transporte y de transmisión, cintas autoadhesivas, papel de empapelar, hormas para zapatos, boquillas para puros y cigarrillos, peines, rulos, artículos de fantasía, de plástico.
- Fabricación de otros productos de caucho natural o sintético, sin vulcanizar, vulcanizado o endurecido como: planchas, láminas, tiras,

varillas y perfiles de caucho, tubos, caños y mangueras, correas y cintas transportadoras y de transmisión de caucho.

### **2.2.3. Minerales no metálicos**

Este tipo de industria comprende las actividades manufactureras relacionadas con varios materiales de origen mineral. La industria de los minerales no metálicos incluye la fabricación de vidrio y productos de vidrio como por ejemplo, vidrio plano, vidrio hueco, fibras, artículos de vidrio de uso técnico; además productos de cerámica, losetas y productos de arcilla cocida, cemento y yeso desde las materias primas hasta los artículos acabados. Se incluyen también el corte, la talla y el acabado de la piedra y otros productos minerales. Este tipo de industria incluye las siguientes actividades:

- Fabricación de clínca y cementos hidráulicos, incluidos cemento de Portland, cemento aluminoso, cemento de escoria y cemento hipersulfatado.
- Fabricación de cal viva, cal apagada y cal hidráulica.
- Fabricación de yesos con yeso calcinado o sulfato de calcio.
- Fabricación de materiales prefabricados de hormigón, cemento o piedra artificial para la construcción: losetas, losas, ladrillos, planchas, láminas, paneles y postes.
- Fabricación de componentes estructurales prefabricados para obras de construcción o de ingeniería civil, de cemento, hormigón o piedra artificial.
- Fabricación de artículos de yeso para la construcción: planchas, láminas, paneles.
- Fabricación de materiales de construcción de sustancias vegetales aglomeradas con cemento, yeso u otro aglutinante mineral.

- Fabricación de artículos de asbesto-cemento, fibra-cemento de celulosa y materiales similares: láminas onduladas, otras láminas, paneles, losetas, tubos, depósitos, pilones, lavaderos, vasijas, muebles, marcos para ventanas.
- Fabricación de otros artículos de hormigón, yeso, cemento o piedra artificial.
- Fabricación de morteros en polvo.
- Fabricación de mezclas preparadas, mezclas secas para hormigón y mortero.

#### **2.2.4. Metales: hierro y acero**

Este tipo de industria comprende las actividades de fundición y/o refinación de metales ferrosos y no ferrosos a partir de mineral y escorias de hierro, o arrabio, por medio de técnicas electrometalúrgicas y de otras técnicas metalúrgicas. Abarca también la fabricación de aleaciones y superaleaciones de metales mediante la introducción de otros elementos químicos en los metales puros. El resultado de la fundición y refinación, normalmente en forma de lingotes, se utiliza en operaciones de enrollado, estirado y extrusión para fabricar láminas, bandas, barras, varillas o alambre y en forma fundida, para fabricar piezas fundidas y otros productos de metales derivados principalmente del hierro y acero.

Esta industria comprende las operaciones de conversión por reducción de mineral de hierro en altos hornos y convertidores de oxígeno o de desperdicios y desechos de hierro en hornos de arco voltaico o por reducción directa de mineral de hierro, sin fusión para obtener acero bruto que se funde y refina en un horno de colada y después se cuela y solidifica en un moldeador continuo para obtener productos semiacabados planos o largos que se utilizan tras el

recalentamiento, en operaciones de laminado, estirado y extrusión para fabricar productos acabados como placas, láminas, bandas, barras, varillas, alambre, tubos y perfiles huecos. Se incluyen las siguientes actividades:

- Explotación de altos hornos, convertidores de acero, talleres de laminado y de acabado producción de arrabio y hierro especular en lingotes, bloques y otras formas primarias.
- Producción de ferroaleaciones.
- Producción de productos semiacabados de hierro por reducción directa de hierro y otros productos ferrosos esponjosos.
- Producción de hierro en granalla y hierro en polvo.
- Producción de acero en lingotes y otras formas primarias.
- Refundición de lingotes de chatarra de hierro o acero.
- Fabricación de productos semiacabados de acero.
- Fabricación de productos de acero laminados planos en caliente y en frío.
- Fabricación de barras y varillas de acero laminadas en caliente.
- Fabricación de barras y secciones sólidas de acero mediante estirado en frío, rectificación o torneado.
- Fabricación de alambre de acero mediante estirado o alargamiento en frío.
- Fabricación de tablestacas de acero y secciones abiertas soldadas de acero.
- Fabricación de tubos, tuberías y perfiles huecos de acero sin costura, mediante laminación, extrusión o estirado en caliente o estirado o laminación en frío.
- Fabricación de tubos y caños soldados mediante conformación en frío o en caliente y soldadura, entregados en ese estado o transformados

mediante estirado o laminación en frío o mediante conformación en caliente, soldadura y reducción.

- Fundición de productos semiacabados de hierro.
- Fundición de hierro gris.
- Fundición de productos de hierro maleable.
- Fabricación de tubos, caños, perfiles y conexiones de tubos de hierro.

### **2.2.5. Productos de madera**

Este tipo de industria comprende la fabricación de productos de madera, como maderos, tableros contrachapados, hojas de madera para enchapado, contenedores de madera, pisos de madera, armazones de madera y edificios prefabricados de madera. Los procesos de producción comprenden la transformación de la materia prima hacia productos tratados finales, estos procesos pueden ser el aserrado, la acepilladura, el recorte, el laminado y el ensamblaje de productos de madera a partir de troncos que se cortan en trozas o maderos que se pueden volver a cortar o a los que se puede dar forma con tornos u otras herramientas. Los maderos u otras formas de madera ya cortada también pueden cepillarse o aplanarse posteriormente y ensamblarse en productos acabados, como contenedores de madera. Esta industria comprende las siguientes actividades:

- Aserrado, acepilladura y maquinado de madera.
- Tableado, descortezado y desmenuzamiento de troncos.
- Secado de madera, impregnación y tratamiento químico de la madera con preservativos y otras sustancias.
- Fabricación de productos de madera utilizados principalmente por la industria de la construcción: vigas, cabrios, jabalcones, escaleras, barandales.

- Armazones de madera laminada encolada y armazones de madera prefabricados con uniones de metal.
- Puertas, ventanas, contraventanas y los marcos, tengan o no herrajes, como bisagras, cerraduras.
- Boceles, molduras, ripias y duelas de madera.
- Bloques, listones, ensamblados en tableros para pisos de parque.
- Fabricación de edificios prefabricados y componentes de los mismos, predominantemente de madera.

#### **2.2.6. Producción de papel y procesos de imprenta**

Este tipo de industria comprende la fabricación de papel y productos de papel. La fabricación de esos productos está agrupada porque abarca una serie de procesos conectados verticalmente. Es frecuente que una misma unidad realice más de una de esas actividades. Se trata esencialmente de tres actividades: la fabricación de pasta de madera entraña la separación de las fibras de celulosa de otras impurezas de la madera o el papel usado; la fabricación de papel consiste en el afieltrado de esas fibras hasta convertirlas en una lámina. Los productos de la transformación del papel se realizan con papel y otros materiales mediante diversas técnicas de corte y moldeado, incluidas actividades de revestimiento y laminado. Los artículos de papel pueden estar impresos siempre que la impresión de información no sea el objetivo principal. Se incluyen también las siguientes actividades:

- Elaboración ulterior de papel y cartón: revestimiento, recubrimiento e impregnación de papel y cartón.
- Fabricación de papel rizado o plisado.
- Fabricación de laminados de papel o cartón.

- Fabricación de papel de periódico y de otros papeles para imprimir y escribir.
- Fabricación de guata de celulosa y tiras de fibras de celulosa.
- Fabricación de papel carbón o papel de esténcil en rollos u hojas grandes.
- Fabricación de envases de papel o cartón ondulado.
- Fabricación de envases plegables de cartón.
- Fabricación de bolsas de papel.
- Fabricación de productos de papel y guata de celulosa de uso doméstico y para la higiene personal: pañuelos, toallas, servilletas y papel higiénico.
- Fabricación de vasos, platos y bandejas en materiales derivados del papel.
- Fabricación de papel para copiar o transferir y papel carbón.
- Fabricación de sobres y aerogramas.
- Fabricación de registros, libros de contabilidad, encuadernadores, álbumes y artículos de papelería similares de uso educativo o comercial.
- Fabricación de cajas, fundas, carpetas y recados de escribir que contienen un surtido de papel para correspondencia.
- Fabricación de papel de empapelar y cubrimientos similares para pared, incluido papel de empapelar textil y recubierto de vinilo.
- Fabricación de etiquetas.
- Fabricación de papel y cartón de filtro.

Esta industria comprende también la impresión de productos como periódicos, libros, revistas, formularios comerciales, tarjetas y actividades de apoyo conexas, como encuadernación, servicios de preparación de placas y formación de imágenes a partir de datos.

Las actividades de apoyo que se incluyen forman parte integrante de la industria de la impresión y esas actividades casi siempre tienen como resultado un producto que forma parte integrante de la industria de la impresión.

Los procesos utilizados en la impresión comprenden diversos métodos para trasladar una imagen desde una placa, plantilla o archivo informático a un soporte como papel, plástico, metal, materia textil o madera. El método más utilizado entraña el traslado de la imagen de una placa o plantilla al soporte mediante procedimientos litográficos, de rotograbado, serigráficos o flexográficos.

#### **2.2.7. Productos textiles**

Este tipo de industria comprende la preparación e hilatura de fibras textiles y la tejeduría y el acabado de productos textiles y prendas de vestir, así como la fabricación de artículos confeccionados de materiales textiles.

También comprende la fabricación de productos textiles, incluidas las operaciones de preparación, la hilatura de fibras textiles y la tejeduría de productos textiles. Esas operaciones pueden realizarse con diversas materias primas, como seda, lana, otras fibras de origen animal, vegetal o sintético.

Se incluye también las industrias que aplican el proceso del acabado de productos textiles y prendas de vestir, que abarca el blanqueado, el teñido, el apresto y operaciones similares. Proceso de blanqueo y teñido de fibras, hilados, tejidos, artículos textiles y prendas de vestir. Se incluyen también las siguientes actividades:

- Procesos de hilatura y fabricación de hilados e hilos para tejedura o costura, para el comercio o para procesamiento ulterior: texturización, retorcido, plegado, cableado y remojo de hilaturas filamentosas sintéticas o artificiales.
- Fabricación de tejidos anchos de algodón, lana, lana peinada o seda, incluidos los fabricados a partir de mezclas o de hilados sintéticos o artificiales.
- Procesos de apresto, secado, vaporizado, encogimiento, remallado, sanforizado y mercerizado de textiles y artículos textiles, incluidas prendas de vestir.
- Procesos de impermeabilizado, revestimiento o impregnación de prendas de vestir.
- Esta industria comprende todas las actividades de confección en todo tipo de materiales como: tela, tejidos de punto y ganchillo, de todo tipo de prendas de vestir y accesorios.
- Fabricación de calzado de materiales textiles sin aplicación de suelas.
- Fabricación de artículos de piel: prendas y accesorios de piel, artículos de piel confeccionados con pieles alargadas, planchas, cuadrados, tiras.
- Fabricación artículos diversos de piel: alfombras, paños para pulimento industrial.

### **2.2.8. Productos alimenticios**

Esta industria comprende la elaboración de los productos de la agricultura, la ganadería, la silvicultura y la pesca para convertirlos en alimentos para consumo humano o animal e incluye la producción de varios productos intermedios que no son directamente productos alimenticios. La actividad genera en muchos casos productos asociados de mayor o menor valor.

La industria alimenticia se organiza por actividades que se realizan con los distintos tipos de productos: carne, pescado, fruta, legumbres y hortalizas, grasas y aceites, productos lácteos, productos de molinería y otros productos alimenticios.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: carnes.

- Explotación de mataderos que realizan actividades de matanza, preparación y envasado de carne, por ejemplo carne de: bovino, cerdo, aves de corral, cordero o conejo.
- Producción de carne fresca, refrigerada o congelada.
- Producción de carne seca, salada o ahumada.
- Producción de productos cárnicos: salchichas, morcillas, salchichón, chorizo, mortadela y otros embutidos, patés, manteca con chicharrones, jamón cocido.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: mariscos.

- Preparación y conservación de pescado, crustáceos y moluscos: congelados, desecación, ahumado, saladura, inmersión en salmuera, enlatado.
- Producción de productos de pescado, crustáceos y moluscos: pescado cocido, filetes de pescado, caviar, sucedáneos de caviar.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: frutas, legumbres y hortalizas.

- Fabricación de alimentos compuestos principalmente de frutas, legumbres u hortalizas, excepto platos congelados o enlatados listos para consumir.
- Conservación de frutas, nueces, legumbres y hortalizas: congelación, desecación, inmersión en aceite o en vinagre, enlatado.
- Fabricación de productos alimenticios a partir de frutas, legumbres u hortalizas.
- Fabricación de jugos de frutas u hortalizas.
- Fabricación de compotas, mermeladas y jaleas.
- Elaboración y conservación de aperitivos a base de papas.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: grasas y aceites.

Esta clase comprende la elaboración de aceites y grasas crudas y refinadas a partir de productos vegetales o animales.

- Elaboración de aceites vegetales crudos: aceite de oliva, aceite de soja, aceite de palma, aceite de girasol, aceite de colza o de mostaza, aceite de linaza.
- Elaboración de harina y sémola sin desengrasar de semillas, nueces y almendras oleaginosas.
- Elaboración de aceites vegetales refinados: aceite de oliva, aceite de soja.
- Elaboración de aceites vegetales: oxidación por corriente de aire, cocción, deshidratación, hidrogenación.
- Elaboración de margarina.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: productos lácteos.

- Elaboración de leche fresca líquida pasteurizada, esterilizada, homogeneizada y/o tratada a altas temperaturas.
- Elaboración de crema a partir de leche fresca líquida, pasteurizada, esterilizada u homogeneizada.
- Elaboración de leche en polvo o condensada.
- Elaboración de leche o crema en forma sólida.
- Elaboración de mantequilla.
- Elaboración de otros productos derivados como: yogur, queso y helados.

La industria de alimentos también incluye la molienda de cereales y legumbres para producir harina o sémola, la molienda, limpieza y pulido de arroz y la elaboración de mezclas de harina o masa con esos productos. Se incluye también en esta industria la molienda en húmedo de maíz, legumbres y hortalizas, almidones y productos de almidón.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: harinas.

- Molienda de cereales: producción de harina, semolina, sémola y gránulos de trigo, avena, maíz y otros cereales.
- Molienda de arroz: producción de arroz descascarillado, molido, pulido, blanqueado, semicocido o convertido; producción de harina de arroz.
- Molienda de legumbres: producción de harina y sémola de leguminosas desecada, de raíces y tubérculos y de nueces comestibles.
- Elaboración de mezclas de harinas, masa mezclada y preparada para la fabricación de pan, galletas o panqueques.

Esta industria comprende la elaboración de productos de panadería, azúcar y productos de confitería, macarrones, fideos y productos farináceos similares, comidas y platos preparados, café, té y especias, así como de productos alimenticios perecederos y especialidades gastronómicas.

Actividades que se consideran actividades de la industria alimenticia: confitería y productos farináceos, fideos.

- Elaboración de cacao y de manteca, grasa y aceite de cacao.
- Elaboración de chocolate y productos de chocolate.
- Elaboración de productos de confitería: caramelos, turrón, confites blandos y chocolate blanco
- Elaboración de goma de mascar.
- Conservación en azúcar de frutas, nueces, cáscaras de frutas y otras partes de plantas.
- Elaboración de pastas, macarrones y fideos.

Además, se incluyen en la industria alimenticia a otros procesos y productos alimenticios como:

- Descafeinado y tostado de café.
- Producción de productos de café: extractos y concentrados de café.
- Mezcla de té y mate.
- Elaboración de extractos y preparados a base de té o mate.
- Elaboración de sopas y caldos.
- Alimentos que contienen ingredientes homogeneizados.
- Elaboración de especias, salsas y condimentos.
- Elaboración de vinagre.
- Elaboración de miel artificial y caramelo.

### **2.2.9. Producción de bebidas**

Este tipo de industria comprende la elaboración de bebidas no alcohólicas y agua mineral, la elaboración de bebidas alcohólicas obtenidas principalmente por fermentación, como cerveza y vino, y la elaboración de bebidas alcohólicas destiladas.

Actividades que se consideran actividades de la industria de bebidas:

- Elaboración de bebidas alcohólicas destiladas: whisky, coñac, ginebra o mezclas.
- Mezcla de bebidas alcohólicas destiladas.
- Producción de aguardientes neutros.
- Elaboración de vinos.
- Elaboración de bebidas alcohólicas fermentadas pero no destiladas: sidra, perada, aguamiel y otros vinos de frutas y mezcla de bebidas que contienen alcohol.
- Elaboración de vinos de baja graduación o sin alcohol.
- Elaboración de bebidas malteadas, todo tipo de cervezas de fermentación alta, negra o fuerte.
- Elaboración de malta.
- Elaboración de bebidas no alcohólicas, excepto cerveza y vino sin alcohol.
- Producción de aguas minerales naturales y otras aguas embotelladas.
- Elaboración de bebidas no alcohólicas: limonadas, naranjadas, colas, bebidas a base de jugos de frutas y aguas tónicas.

### **2.2.10. Industria de la construcción**

Este tipo de industria comprende las actividades corrientes y especializadas de construcción de edificios y obras de ingeniería civil. En ella se incluyen las obras nuevas, reparaciones, ampliaciones y reformas, la construcción in situ de edificios y estructuras prefabricadas y también la construcción de obras de carácter temporal.

Las actividades generales de construcción abarcan la construcción completa de viviendas, edificios de oficinas, locales de almacenes y otros edificios públicos y de servicios, locales agropecuarios, y la construcción de obras de ingeniería civil, como carreteras, calles, puentes, túneles, aeropuertos y otros proyectos de ordenamiento hídrico, redes de alcantarillado, instalaciones industriales, tuberías, instalaciones deportivas.

La industria de la construcción comprende la construcción de edificios completos residenciales o no residenciales, reparación de edificios y de obras de ingeniería, si sólo se realizan partes especializadas del proceso de construcción.

- Construcción de todo tipo de edificios residenciales: casas unifamiliares, edificios multifamiliares.
- Construcción de todo tipo de edificios no residenciales: edificios destinados a actividades de producción industrial como fábricas, talleres, plantas de montaje, hospitales, escuelas, edificios de oficinas.



### **3. FASE TÉCNICO PROFESIONAL**

#### **3.1. Análisis de demanda de aire**

La cantidad de *cubic feet per minute* (cfm) que van a pasar en el sistema de tratamiento afectan directamente en el cálculo de la capacidad de secado que deberá tener sobre el flujo de aire comprimido. Entre mayor sea el flujo de aire que pasa por el sistema de tratamiento, mayor cantidad de humedad tendrá que ser capaz el secador de retirar del aire comprimido. De igual forma sucede con la capacidad de los filtros, pues estos están diseñados para cierta capacidad de filtración, de lo contrario se saturan rápidamente. Es por estas razones la importancia de conocer el flujo de aire que circula por el sistema.

Realizar un análisis de demanda de aire ayuda directamente a conocer y diseñar mejor un sistema de aire comprimido. El primer paso para tener un sistema de tratamiento adecuado es tener conocimiento del comportamiento de la demanda de aire comprimido de la planta.

##### **3.1.1. Objetivo**

El principal objetivo de realizar un análisis de demanda de aire es encontrar una solución de sistema de aire comprimido perfectamente adaptada a las necesidades de cada caso y así lograr que el sistema sea capaz de alcanzar la máxima economía total, una eficiencia energética óptima, flexibilidad, disponibilidad constante, un mantenimiento fiable y la calidad de aire comprimido deseada en determinada aplicación.

La demanda de aire de cada empresa es puntualmente decisiva para calcular el sistema de tratamiento adecuado. Las necesidades particulares de cada empresa respecto al aire comprimido son decisivas para el proceso de diseño.

Para realizar este análisis se llevan a cabo una serie de mediciones y procedimientos estructurados que son requisitos para determinar correctamente los datos adquiridos del sistema de aire comprimido.

Lo primero es determinar el consumo real de aire comprimido, la demanda: realizar el análisis de demanda de aire permite determinar cuáles son los requisitos reales de producción de aire comprimido y con base en la demanda de aire se diseña el sistema de tratamiento adecuado.

Para representar de manera visual el resultado de la medición, se genera una serie de gráficas en las cuales se representa la demanda de aire total en función del tiempo. La medición se realiza en un período de tiempo establecido, por lo general de 1 a 2 semanas, durante ese tiempo se mide la demanda de aire en este tiempo, las variaciones que esta pueda presentar y cambios de presión del sistema si existieran problemas en el sistema de aire comprimido.

Seguido de esa medición, se prosigue con la determinación del consumo eléctrico total. Se genera una gráfica en la que se indica el consumo de potencia activa del compresor en función del tiempo, este tiempo es el mismo en el que se lleva a cabo la medición de demanda de aire.

Entre la información que se puede obtener de un análisis de demanda de aire están:

- Demanda de aire.
- Déficit de aire.
- Fugas.
- Punto de rocío.
- Presión antes del tratamiento, después del tratamiento, en puntos de la red y diferenciales de presión.

### **3.1.2. Proceso de determinación de la demanda de aire**

Si por algún motivo no es posible realizar el proceso de medición en una estación de aire comprimido, los factores a considerar para estimar la demanda de aire son los siguientes.

- Número de consumidores.
- Consumo de aire por unidad.
- Presión de trabajo en el punto de uso.
- Utilización: proporción de tiempo que el consumidor está en uso en un período de tiempo dado.
- Factor de utilización: número de consumidores utilizados en la misma red (basado en el comportamiento).
- Margen de fuga: 10 %, 15 %, 25 %.
- Margen para expansión sobre 5-10 años: 25 % - 50 % - 75 % - 100 %.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Kaeser Compressors, Compressed Air Seminar, p 10.

### **3.1.3. Principales unidades de medida en el análisis de demanda de aire comprimido**

En los estudios del análisis de demanda de aire, tras varias mediciones se adquieren datos, estos tienen que tener un orden, ya que cada dato tomado tiene un propósito por el cual fue medido. Las unidades de medición entre estos datos tienen que ser iguales entre sí, para no tener alteración en los estudios y las correspondientes gráficas de representación.

Se toman tres valores de cada variable en el análisis, el mínimo, el máximo y el promedio. En la medición de demanda de aire las unidades de medida de caudal son los pies cúbicos por minuto, comúnmente utilizadas en inglés cubic feet per minute (cfm) unidades que describen el caudal de aire de los tres valores de medición y en todo el análisis.

En la medición de consumo energético total las unidades de medida de potencia activa son los watts, en este caso los kilowatts (kw), la cual se usa en los tres valores de medición y en todo el análisis. En la medición de la presión del sistema las unidades de medida son las libras sobre pulgada cuadrada, comúnmente utilizadas en inglés *pounds per square inch* (psi), la cual se usa en los tres valores de medición y en todo el análisis de demanda de aire.

### **3.1.4. Instrumentación y equipo de medición**

Los instrumentos de medición a utilizar en una medición de análisis de demanda de aire, puede variar la cantidad dependiendo de la cantidad y del tipo de compresores que se van a medir. Además, la utilización de todos o solo algunos de estos instrumentos de medición depende del tipo de medición que

se requiera, según los resultados que se deseen conocer del sistema de aire comprimido. Los elementos principales del equipo de medición son:

- Registrador de datos

Es la unidad lógica donde se almacenan los datos por un tiempo. Este dispositivo tiene la capacidad de recibir señales digitales y señales análogas. Además, puede ser configurado para almacenar datos en distintas cantidades según el intervalo de tiempo previamente programado.

Figura 1. **Registrador de datos**



Fuente: Kaeser Compresores.

- Kilovatímetros trifásicos

Dispositivo eléctrico que por medio de la inducción electromagnética censa la cantidad de potencia consumida por el motor eléctrico que impulsa directamente el funcionamiento de la unidad compresora.

Este dispositivo da una señal análoga de 4-20mA. Este sensor es indispensable para conocer el costo energético que representa el equipo medido, por ejemplo un compresor o un secador, para la estación de aire comprimido.

Figura 2. **Kilovatímetros trifásicos**



Fuente: Kaeser Compresores.

- Transductores de presión

Es una herramienta de medición utilizada para conocer un parámetro físico. Este parámetro es la presión. El transductor de presión lee por medio de

un contacto eléctrico la presión de aire comprimido en determinado volumen. La señal que el transductor de presión entrega al registrador de datos, es una señal análoga de 4-20mA.

El transductor puede ser colocado en los tanques de almacenamiento o en algún punto a lo largo de la tubería de distribución de aire comprimido. Además, es recomendable conectar transductor de presión antes y después del sistema de tratamiento, esto con el fin de saber por medio del análisis de demanda de aire, la caída de presión que representa el sistema de tratamiento.

Figura 3. **Transductores de presión**



Fuente: Kaeser Compresores.

- Opto acopladores

Son dispositivos que detectan una señal y la convierten a señal digital. Estos se conectan para conocer cuando un contactor está activado y cuando esta desactivado.

Además, se conecta en forma paralela a la señal de la válvula de admisión de la succión del compresor, determinando cuando esta válvula esta activa. Estas dos señales determinan por medio de la calibración correspondiente, la entrega de aire de determinado compresor.

Este dispositivo también se puede utilizar para conocer cuando esta encendido o apagado cualquier otro equipo en el sistema de aire comprimido.

Figura 4. **Optoacopladores**



Fuente: Kaeser Compresores.

- **Anemómetro**

Es un instrumento de medición que por medio de una veleta interna a una sección de tubo calibrada, sensa la velocidad del flujo, con la cual se determina el flujo de aire en las mediciones de demanda de aire comprimido.

El anemómetro es instalado a la succión de aire, específicamente en la válvula de admisión del compresor. Se debe asegurar la instalación del

anemómetro de tal manera que no exista pérdida del flujo de aire total que para a través del anemómetro y que luego succiona el compresor.

Este dispositivo entrega una señal análoga a la unidad registradora de datos. Luego de ser calibrada la señal y comparada con otros parámetros como la señal del transductor de presión, la señal del kilovatímetro y la señal de optoacoplador; finalmente puede ser determinada la entrega de aire de determinado compresor.

La veleta interna al anemómetro debe mantenerse libre de cualquier partícula de suciedad que pueda obstruir el funcionamiento.

Figura 5. **Anemómetro**



Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 6. **Veleta interna del anemómetro**



Fuente: Kaeser Compresores.

- **Medidores de punto de rocío**

Indispensable para conocer si el sistema de tratamiento está trabajando efectivamente. Estos medidores se conectan a continuación del secador.

Estos medidores entregan una señal análoga al registrador de datos. Estos dispositivos tienen un rango de medición, indicando valores máximos y mínimos posibles en los cuales pueden medir. Medido en grados centígrados, el valor de punto de rocío cambia según las condiciones ambientales y la presión del sistema.

### **3.1.5. Proceso estructurado hacia un sistema de aire comprimido de bajo consumo energético**

El proceso de diseñar un mejor sistema de aire comprimido empieza por conocer el sistema anterior, analizar las variables medidas y la curva de demanda que está siendo requerida. Luego se procede a determinar el sistema de compresores ideal con un funcionamiento óptimo para la demanda de aire requerida.

El proceso estructurado de medición de una estación existente de compresores hacia un sistema de aire comprimido de alta eficiencia empieza por conocer el sistema de compresores antiguos, ya que estos pueden tener distintas características de control en el proceso de compresión y la potencia del motor eléctrico. Esta información para seleccionar el equipo de medición adecuado para cada sistema de aire comprimido.

El proceso continúa realizando la conexión del equipo de medición a los equipos, la cantidad de equipo de medición puede variar según sea cada caso dependiendo del tamaño del sistema y de otros factores. La medición debe ser por un tiempo mínimo de siete días, las veinticuatro horas.

A continuación se analizan y evalúan los datos medidos, observando que los valores obtenidos en la medición sean congruentes y además que todas las señales de las variables medidas se tengan durante todo el periodo medido.

Con la información obtenida se procede a graficar las curvas y determinar los valores de la demanda total de aire, el consumo de energía total y el parámetro de eficiencia, la energía específica. Los datos se comparan utilizando la demanda de aire total medida generada por el nuevo diseño propuesto de

compresores, entonces se determina si existe menor consumo energético con el nuevo sistema y si existieran posibles ahorros energéticos.

Una vez conocida la demanda de aire comprimido, finalmente se procede a diseñar el sistema de tratamiento de aire comprimido adecuado. Esta es la importancia de realizar el proceso estructurado de medición del sistema de aire comprimido.

Tabla I. **Proceso estructurado de medición**

Paso	Proceso	Figura
1	Antigua estación de aire comprimido, alto consumo energético	
2	Proceso de medición, conexión de equipo	
3	Análisis y evaluación de valores medidos	

Continuación de la tabla I

Paso	Proceso	Figura
4	Determinación de demanda total de aire, consumo energético total y energía específica	
5	Comparación entre antigua estación y nueva estación de aire comprimido	
6	Nueva estación de aire comprimido, alta eficiencia	

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Descripción de las principales especificaciones técnicas en sistemas de aire comprimido

Los sistemas de aire comprimido son analizados, calculados y diseñados por medio de variables que representan el funcionamiento de estos. Las principales variables son la presión máxima, el caudal de aire comprimido, la potencia eléctrica consumida y la energía específica.

### **3.2.1. Presión máxima**

La presión máxima es el valor máximo permitido en el rango de presión en el cual trabaja el compresor, teniendo en cuenta que dicha presión debe ser siempre superior a la presión de funcionamiento de los equipos de consumo que existen en dicha red. La presión de servicio es la suministrada por el compresor y existe en las tuberías que alimentan al punto de uso. La presión de trabajo es la presión mínima necesaria en el punto de trabajo, considerando ya las pérdidas creadas por los accesorios, sistema de tratamiento y en la red de distribución, todo esto debe soportar hasta un límite de presión permisible. Para garantizar un funcionamiento fiable y preciso es necesario que la presión tenga un valor constante.

### **3.2.2. Caudal**

También llamada entrega de aire es la cantidad de aire a presión atmosférica que un compresor es capaz de comprimir en una unidad de tiempo. Las Normas DIN 1945, parte 1, anexo F y la ISO 1217, anexo C determinan la medición correcta del caudal.

Para medir el caudal, se procede del modo siguiente: primero se miden la temperatura, la presión atmosférica y la humedad del aire a la entrada de la unidad. A continuación se mide la presión máxima de servicio, la temperatura del aire comprimido y el volumen del aire comprimido a la salida del compresor. Finalmente, el volumen  $V_2$  a la salida de aire comprimido se calcula con ayuda de la ecuación de gas ideal y las condiciones de aspiración del aire. El resultado de este cálculo será el caudal del compresor.

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

### 3.2.3. Potencia eléctrica consumida

Es la potencia que el motor de accionamiento del compresor absorbe de la red eléctrica, a una carga mecánica concreta del eje del motor (potencia suministrada por el motor). Excede a la potencia suministrada por el motor en tanto como altas sean las pérdidas eléctricas y mecánicas del mismo; por los rodamientos y el ventilador. El consumo ideal de potencia en el punto nominal P puede calcularse con la fórmula siguiente:

$$P = V_n \times I_n \times \sqrt{3} \times \cos \theta$$

Donde:

$V_n$ : voltaje nominal

$I_n$ : corriente nominal

$\cos \theta$ : factor de potencia

Estos datos comúnmente están indicados en la placa de identificación del motor eléctrico.

### 3.2.4. Energía específica

La energía específica de un compresor es la relación entre la potencia eléctrica que consume y el caudal que suministra a una presión de servicio constante. Siendo un parámetro que representa la eficiencia de un sistema.

La potencia eléctrica que consume un compresor es la suma de las potencias consumidas por todos los accionamientos que incluye el motor principal, el motor del ventilador, el de las bombas de aceite, la calefacción auxiliar y el gabinete de control. Si se necesita la energía específica para

realizar cálculos sobre economía asociada a la generación de aire comprimido, debe calcularse con el consumo eléctrico referido a toda la unidad y a determinada presión de servicio máxima.

Para calcular la energía específica se divide el consumo total de electricidad a presión máxima entre el caudal a presión máxima.

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{consumo eléctrico total}}{\text{caudal}}$$

### **3.3. División de la demanda de aire comprimido**

La demanda de aire comprimido es el volumen que en cierto tiempo consume un sistema neumático a determinada presión de trabajo. La demanda de aire comprimido puede ser representada gráficamente, luego de haber realizado el debido proceso de medición, por medio de un análisis de demanda de aire.

Un compresor puede ser suficiente para suplir cierta demanda de aire, o si la demanda de aire es grande se puede sumar la entrega de aire comprimido de varios compresores para suplir cierta demanda, a esto se le llama método de repartición de carga o *splitting*. La demanda de aire se divide en carga base, carga media y carga pico.

#### **3.3.1. Carga base**

Se entiende por carga base la cantidad de aire que necesita el sistema de manera constante. Un compresor debe ser capaz de trabajar en régimen de carga base constantemente sin ser sobre exigido.

Carga base es la demanda de aire mínima que se tiene de consumo, tal que, en todo horario de consumo de aire, sea necesario un compresor que entregue esta cantidad de aire.

En la graduación correcta de los compresores, la suma de los caudales de los compresores de carga pico debe ser mayor que el caudal del siguiente compresor de carga base. Si se utiliza un compresor para carga base con control de frecuencia variable, el campo de regulación deberá ser mayor que el caudal de la unidad que se conectaría a continuación. De otra manera no podrá garantizarse una producción económica de aire comprimido.

### **3.3.2. Carga media**

La carga media es la cantidad de aire comprimido que se necesita en momentos de transición, aumentando y disminuyendo, formando un promedio en la demanda de aire. La carga media se establece luego de pasar el límite de la carga media y se maneja el promedio arriba de la carga base. El límite superior de la carga media sería antes de pasar a los picos de carga máximos.

### **3.3.3. Carga pico**

La carga pico es el aire comprimido que se necesita en momentos concretos de consumo máximo; determina momentos críticos de demanda de aire en el sistema. El momento de carga pico y la cantidad de aire en este momento puede ser variable, ya que la demanda de aire de los consumidores puede ser diferente cada día. Los compresores que tienen instalado el control de frecuencia variable son más adecuados para este tipo de carga, ya que adecúan la velocidad según la demanda actual.

### 3.4. Calidad del aire ambiental en Guatemala

La calidad del aire ambiental que es succionado por el compresor, impacta directamente en la importancia que implica tener el sistema de tratamiento adecuado para protección de los productos.

El informe realizado por la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala en el Laboratorio de monitoreo del aire en el año 2013 indica que: “el promedio de la concentración de Partículas Totales en Suspensión medidos en las cabeceras departamentales de febrero a julio de 2013 es de 65.23  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 46.36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para partículas menores de 10 micras de diámetro en medición de 24 horas respectivamente. El promedio de Partículas Totales en Suspensión medidos en las cabeceras departamentales, levemente está por debajo del promedio registrado en la Ciudad de Guatemala en el año 2012 y las Partículas menores de 10 micras de diámetro, levemente está por encima del promedio registrado en la Ciudad de Guatemala en el año 2012.”<sup>4</sup>

Además el estudio revela que la mayor concentración de Partículas Totales en Suspensión respecto a las partículas menores de 10 micras de diámetro, se encuentra asociado a la quema de sabanas, zafra, incendios forestales, emisiones de fuentes difusas, entre otras, en las cuales la combustión generalmente es deficiente resultando partículas de mayor tamaño. Adicionalmente en la época de verano existe desgaste y arrastre de partículas provocados por el viento, particularmente proveniente de suelos sin cobertura, actividades agrícolas, entre otros.

---

<sup>4</sup> [http://www.marn.gob.gt/documentos/Primer\\_informe\\_Monitoreo\\_Deptal\\_2013\\_Final.pdf](http://www.marn.gob.gt/documentos/Primer_informe_Monitoreo_Deptal_2013_Final.pdf)

La investigación consultada también contempla las mediciones de dióxido de azufre realizadas en algunas cabeceras departamentales, señalan la presencia de este contaminante y se asume que provienen únicamente del sector transporte por el uso de hidrocarburo con contenido de azufre.

Según el informe de la Universidad de San Carlos de Guatemala define a las Partículas Totales en Suspensión (PTS) como: “aquellas partículas diminutas sólidas y líquidas presentes en el aire en gran número, originadas principalmente por procesos de combustión de productos derivados del petróleo y carbón vegetal utilizados en actividades industriales, domésticas y de transporte, así como en otros procesos industriales. También tienen origen natural en las erupciones volcánicas, procesos de erosión y en los incendios forestales. También define a las partículas menores de 10 micras de diámetro PM10 como todas aquellas partículas sólidas o líquidas dispersas en el aire con un diámetro menor a 10 micrómetros.”<sup>5</sup> Por lo regular se conforman por polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen. Se originan principalmente en los procesos de combustión industrial, doméstica y de transporte. Naturalmente se producen por erosión, erupciones volcánicas e incendios forestales.

Estas partículas de contaminación pueden ser perjudiciales para el desempeño del sistema de aire comprimido, la vida de los elementos de tratamiento puede reducirse debido a la saturación excesiva de contaminantes.

---

<sup>5</sup> [http://www.marn.gob.gt/documentos/Primer\\_informe\\_Monitoreo\\_Deptal\\_2013\\_Final.pdf](http://www.marn.gob.gt/documentos/Primer_informe_Monitoreo_Deptal_2013_Final.pdf)

### **3.5. Sistemas de tratamiento de aire comprimido**

Cualquier tipo de compresor, en la etapa de admisión funciona como una gran succionadora y absorbe partículas e impurezas que se comprimen junto al aire y luego llegarán a la red de aire comprimido si no se lleva a cabo el tratamiento correcto.

Los contaminantes pueden llegar a perjudicar seriamente un sistema de aire comprimido, si no se piensa en una manera adecuada de eliminar estos contaminantes. Las partículas distribuidas casi de forma invisible por todo el aire del entorno se convierten en una fuerza concentrada que provoca daños y destrucción a las herramientas, equipos e instrumentos que utilizan aire comprimido.

El sistema de tratamiento de aire comprimido es el conjunto de equipo diseñado y calculado para extraer y reducir determinada cantidad de contaminantes del aire comprimido. Estos contaminantes son típicamente partículas sólidas, partículas de aceite y condensado del aire comprimido. Cada elemento está diseñado para tratar cierto tipo de contaminación.

En referencia al tratamiento del aire comprimido y a la calidad del aire la pregunta es: ¿Con qué tipo de compresores se obtiene aire comprimido libre de aceite a menor costo? Independientemente de las opiniones de los distintos fabricantes, actualmente está claro que es posible producir aire comprimido de alta calidad tanto con compresores enfriados con aceite como con aquellos libres de aceite, por medio del sistema de tratamiento diseñado adecuadamente. Sin embargo, uno de los puntos decisivos al elegir y diseñar un sistema de tratamiento de aire comprimido es el factor económico.

### **3.5.1. Objetivo del proceso de tratamiento del aire comprimido**

Los resultados que el aire comprimido contaminado puede generar van desde simples contratiempos hasta fallas totales en los equipos y en consecuencia perdidas en las líneas de producción final. A continuación se presentan las principales consecuencias que el aire comprimido contaminado puede tener sobre el sistema y los procesos finales.

- Desgaste prematuro y rayado de superficies
- Óxido y corrosión en herramientas, tuberías y equipos
- Instrumentos dañados
- Superficies de pintura estropeadas
- Entorno de trabajo inseguro y desagradable
- Los sistemas se dañan y los productos se estropean
- Se generan compuestos volátiles peligrosos
- La producción se detiene y la calidad desciende

El objetivo del sistema de tratamiento es reducir la cantidad de contaminantes contenidos en el aire comprimido, de modo que el aire sea de la calidad de aire adecuada para la aplicación a la cual se utilizará el aire comprimido.

Cada elemento del sistema de tratamiento tiene una función específica para lo que fue diseñado. Evitar los efectos perjudiciales que producen los contaminantes en un sistema implica tener el sistema de tratamiento correctamente diseñado. Además, el sistema de tratamiento ayuda a mantener un sistema de distribución en óptimas condiciones, manteniendo el período de vida del material de la tubería.

### **3.5.2. Calidad del aire comprimido**

Factores contaminantes que influyen en la calidad del aire comprimido, están en todas partes, pero no deberían estar en el caudal de aire comprimido: la suciedad, la humedad, el aceite, polvo, suciedad, polen, microorganismos, humo, emisiones de gases, humedad en forma de vapor de agua, hidrocarburos no quemados suspendidos en el aire, refrigerante del compresor arrastrado a la línea, gases cáusticos como los óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y compuestos de cloro.

Entonces la calidad del aire es que tantas de estas partículas contaminantes se tienen, partículas de cualquier índole y tamaño, si están presentes representan algún grado de contaminación, que incide en la calidad del aire.

La calidad del aire comprimido se puede clasificar según Norma ISO 8573 en 10 clases según el tamaño de partículas, o en 6 niveles de tratamiento según la aplicación que tendrá el aire comprimido.

Con el tratamiento adecuado, puede alcanzarse una pureza del aire 100,000 veces más limpio que el aire que se respira en condiciones normales.<sup>6</sup>

#### **3.5.2.1. Norma de Calidad de Aire ISO 8573**

ISO (International Standards Organization) es uno de los mayores desarrolladores mundiales y editores Internacional de Normas.

---

<sup>6</sup> Según Norma ISO 8573-1:2007, p. 5.

La Norma ISO 8573 es un conjunto de documentos que especifica la cantidad de contaminación máxima permitida en un volumen de aire comprimido según la clase que se requiera.

El propósito de la Norma ISO 8573-1 es proporcionar a los usuarios de aire comprimido las directrices sobre las especificaciones más estrictas de calidad del aire para aplicaciones críticas de aire comprimido. Es un documento fácil de comprender, que combina los tres contaminantes más comunes y abundantes en el aire comprimido.

Sin un sistema de tratamiento es imposible lograr un aire comprimido que responda a las exigencias de calidad que define la Norma ISO 8573 para la calificación de aire libre de aceite, tanto en una compresión naturalmente libre de aceite como en una con aceite.

ISO 8573 consiste en 9 partes, sin embargo se analizan las cuatro primeras partes, bajo el título general Aire Comprimido en la siguiente tabla.

Tabla II. **Norma ISO 8573**

Norma ISO 8573	Contenido
Parte 1	contaminantes y clases de pureza
Parte 2	método para contenido de aceite
Parte 3	método para contenido de humedad
Parte 4	método para contenido de partículas sólidas

Fuente: elaboración propia.

- Norma de calidad de aire ISO 8573-1

ISO 8573-1 es el documento primario utilizado de la Norma ISO 8573, en esta parte se especifica la cantidad de contaminación permitida por metro cubico de aire comprimido.

ISO 8573-1 enlista los principales contaminantes como partículas sólidas, agua y aceite. Los niveles de pureza para cada contaminante se muestran por separado en la tabla Clases de Calidad del aire comprimido.

La Norma ISO 8573-1 actualmente incluye la clase cero (0) para cada tipo de contaminante. Si una aplicación requiere aire comprimido con más pureza que la mostrada en la clase 1, entonces la clase 0 permite nombrar y clasificar el sistema de tratamiento requerido. La clase 0 es siempre más estricta en todos los tipos de contaminantes que la clase 1 o cualquier otra. La clase 0 no significa cero contaminación permitida en el aire comprimido.<sup>7</sup>

- Norma de calidad de aire ISO 8573-2, método de cuantificación para contenido de aerosol de aceite

En esta parte de la norma de calidad de aire ISO 8573 especifica los métodos de prueba para análisis cuantitativo de muestras de aerosol de aceite y aceite líquido que pueden estar presentes con mayor frecuencia en el aire comprimido.

La norma mencionada define al aceite como una mezcla de hidrocarburos compuestos por seis o más átomos de carbono. Define al aerosol de aceite

---

<sup>7</sup> [www.parkerstore.jp/phj/catalog/dl.php?id=477/ISO\\_Air\\_quality\\_standards](http://www.parkerstore.jp/phj/catalog/dl.php?id=477/ISO_Air_quality_standards)

como a la mezcla de aceite líquido suspendido en un medio gaseoso teniendo velocidad de caída despreciable.

Según el inciso seis de la Norma ISO 8573-2, los métodos de prueba para análisis de muestras de aerosol de aceite y aceite líquido pueden hacerse en cualquier punto en el sistema de aire comprimido.

- Norma de calidad de aire ISO 8573-3, método de cuantificación para contenido de humedad

Esta parte de la Norma ISO 8573 provee una guía en la selección del método adecuado para medir la humedad en el aire comprimido y especifica las limitaciones de varios métodos. Los métodos para medición de contenido de agua se refieren a agua en estado de vapor.

Un parámetro importante en el cual se basa la Norma ISO 8573 parte 3 respecto a la humedad en el aire comprimido es el punto de rocío. El punto de rocío puede ser medido a presión atmosférica o bajo condiciones de presión. La presión a la cual se refiere el punto de rocío debe ser establecida.

Los métodos de medición de humedad en el aire comprimido descritos en esta norma son: método espectroscópico, método por condensación, método químico, método eléctrico, método psicométrico. Cualquiera de los métodos debe ser utilizado dentro de los límites del rango de operación de cada método.

- Norma de calidad de aire ISO 8573-4, métodos de medición de contenido de partículas sólidas

Esta norma define ocho posibles clases para aire contaminado con partículas sólidas, de la clase 0 a la 7. La clase 0 es la más pura, pero es numéricamente indefinida, se da cuando el aire comprimido es más puro que lo establecido por la clase 1. De la clase 0 a la 5 están definidas por el número de partículas en un determinado rango de tamaño, en un metro cúbico de aire comprimido. Estos métodos están descritos en la parte 4 de la Norma ISO 8573 para las clases de la 0 a la 5.

Las clases 6 y 7 describen el aire comprimido cuando presenta alta contaminación como para ser medido con un contador de partículas. Como sustituto se utilizan métodos másicos para determinar la cantidad de partículas contaminantes en el aire comprimido, de acuerdo a la Norma ISO 8573 parte 8.

### **3.5.2.2. Clases de calidad del aire comprimido**

De acuerdo con la Norma ISO 8573-1, el aire comprimido solo podrá calificarse como libre de aceite si el contenido residual, incluyendo el vapor de aceite, es inferior a  $0,01 \text{ mg/m}^3$ . Se está hablando de cuatro centésimas partes del contenido normal del aire de la atmósfera. Esta cantidad es tan ínfima, que apenas se puede medir.<sup>8</sup>

La calidad del aire de aspiración dependerá de las condiciones ambientales. El nivel de hidrocarburos puede alcanzar entre  $4$  y  $14 \text{ mg/m}^3$  en zonas normales, debido simplemente a las emisiones de la industria y del

---

<sup>8</sup> [www.parkerstore.jp/phj/catalog/dl.php?id=477/ISO\\_Air\\_quality\\_standards](http://www.parkerstore.jp/phj/catalog/dl.php?id=477/ISO_Air_quality_standards), [Consulta: enero de 2014].

tráfico. En zonas industriales, donde se utiliza aceite como medio de lubricación, de refrigeración y de procesos, el contenido de aceite mineral puede superar el 10 %. También se pueden encontrar otros elementos contaminantes como dióxido de azufre, hollín, partículas de elementos metálicos y en la mayoría de lugares de producción industrial existe polvo suspendido en el aire.

Tabla III. **Clases de calidad según Norma ISO 8573-1**

ISO 8573-1 clase	Partículas sólidas /polvo						Humedad		Aceite
	Numero máx. de partículas por m <sup>3</sup> , Ø en µm				Tamaño partículas en µm	Cant. mg/m <sup>3</sup>	Punto de rocío a la presión °C	Agua líquida en g/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>
	0.1	0.1-0.5	0.5-1	1 - 5					
0	Según especificaciones del usuario o fabricante, más estricta que la clase 1								
1	-	100	1	0	-	-	-70	-	0.01
2	-	100000	1000	10	-	-	-40	-	0.1
3	-	-	10000	500	-	-	-20	-	1
4	-	-	-	1000	-	-	+3	-	5
5	-	-	-	20000	-	-	+7	-	-
6	-	-	-	-	5	5	+10	-	-
7	-	-	-	-	40	10	-	0.5	-
8	-	-	-	-	-	-	-	5	-
9	-	-	-	-	-	-	-	10	-

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.2.3. Niveles de calidad del aire comprimido

Están tipificados seis niveles de calidad del aire comprimido, según la aplicación en la cual se utilizará. En esta medida de la calidad de aire los niveles empiezan desde uno, el nivel más bajo de calidad, aire contaminado,

hasta el nivel seis, como el nivel más alto de calidad del aire, aire eficientemente tratado. Cada nivel de calidad tiene una clase de calidad representativa.

El nivel uno es el más simple, lo cual da como resultado un aire comprimido altamente contaminado. En este nivel el sistema de tratamiento nada más lo compone un posenfriador, para reducir la temperatura a la salida del compresor y un separador de líquidos, este nivel de tratamiento representaría a la clase 4.x.x, indicando que solo en partículas sólidas alcanzaría el nivel 4.

El nivel dos es el nivel que está compuesto por un separador de líquidos, un filtro de partículas de tamaño de un micrón y un secador refrigerativo. Este nivel representa la clase 2.4.3 en calidad.

En el nivel tres el sistema de tratamiento está compuesto por un secador refrigerativo, un separador de líquidos y un filtro coalescente removedor de aerosol de aceite, removiendo hasta el 99,999 % de eliminación de aceite, además elimina partículas sólidas de 0,01 micrones. Representa una clase de calidad de 1.4.1.

El nivel cuatro es más exigente respecto a la calidad del aire comprimido. En este nivel el sistema de tratamiento está compuesto por secador refrigerativo, separador de líquidos, filtro coalescente removedor de partículas extrafinas de aerosol de aceite y filtro removedor de vapor de aceite, olores y sabores. Representa la clase de calidad 1.4.1.

El nivel cinco, es el nivel recomendado para la industria alimenticia. Contempla un nivel más riguroso en calidad de aire. Está compuesto por

secador desecante, filtro separador de líquidos, filtro removedor de partículas sólidas, filtro removedor de vapor de aceite, filtro coalescente removedor de partículas extrafinas de aerosol de aceite y filtro removedor de vapor de aceite, olores y sabores. Representa una clase de calidad de 1.2.1. o hasta 1.1.1.

El nivel seis, es el nivel que representa la máxima calidad obtenida en el aire comprimido es un sistema de aire para respiración humana. Este nivel tiene el sistema de tratamiento más completo de todos.

#### **3.5.2.4. Calidad del aire comprimido con compresores libres de aceite**

Debido a las causas de la contaminación que se han citado, no es posible que un compresor equipado tan sólo con un filtro de polvo de 3 micrones, instalado en la succión del aire del compresor, suministre aire comprimido libre de aceite. Los compresores libres de aceite no llevan más que este filtro de polvo como componente de tratamiento, el cual no es suficiente para alcanzar niveles de calidad de aire determinados.

En el proceso de compresión, un volumen de aire contaminado a presión atmosférica es reducido a un volumen menor pero a mayor presión, esto hace que también las partículas contaminantes se encuentren comprimidas en ese volumen de aire comprimido, además que durante el proceso de compresión el desgaste entre los elementos rotativos de la unidad compresora se suman a la contaminación que ahora se transporta en el sistema de aire.

Estos compresores producirán, aun así, aire contaminado con suciedad y agua y a menudo resultará más económico utilizar compresores con lubricación por aceite junto con secadores posteriores y filtros de aire estándar colocando

únicamente filtros de eliminación de partículas de aceite en los puntos del sistema en que se requiera aire libre de aceite.<sup>9</sup>

Es por estas razones que es necesario instalar equipos de tratamiento y elementos filtrantes adecuados para obtener la calidad de aire comprimido requerida, considerando cualquier tipo de compresor utilizado en la generación de aire comprimido.

#### **3.5.2.5. Calidad del aire con compresores enfriados por aceite**

En este tipo de compresores, que son los de uso más común, las sustancias agresivas son neutralizadas por el aceite lubricante que tiene también como función ser refrigerante, que arrastra además las partículas sólidas contenidas en el aire comprimido.

A pesar de que con este sistema se produce un aire comprimido de mayor pureza, tampoco se puede prescindir del tratamiento en este caso. Conforme pasa el tiempo el aceite lubricante gradualmente es afectado por el proceso de oxidación, una vez el aceite lubricante pierde las propiedades puede perjudicar la calidad del aire comprimido.

Es importante para obtener una calidad de aire comprimido requerida, que se instalen los filtros adecuados para eliminar las partículas de aceite del flujo de aire.

---

<sup>9</sup>[http://resources.norgren.com/document\\_resources/PDF\\_links/product\\_literature/brochures/airline/es\\_clean\\_compressed\\_air.pdf](http://resources.norgren.com/document_resources/PDF_links/product_literature/brochures/airline/es_clean_compressed_air.pdf), p.8, [consulta: enero de 2014].

### **3.5.3. Efectos de contaminantes en el aire comprimido**

El aceite lubricante del compresor, los hidrocarburos no quemados suspendidos en el aire del ambiente, las partículas producidas por los elementos rotativos de la unidad compresora, microbios y bacterias, partículas de polvo y otros contaminantes se concentran mucho durante el proceso de compresión. Estos contaminantes entran en el caudal de aire como gotas arrastradas y a menos que sean eliminados pasan a través del sistema de aire comprimido al sistema de distribución y al proceso de producción, llegando a los usuarios del aire comprimido.

El separador ciclónico de aire/aceite incorporado en la mayoría de los compresores de aire de tornillo rotativo elimina parte del aceite, sin embargo esto no es suficiente para obtener calidad de aire requerida para la mayoría de aplicaciones.

La contaminación por aceite puede estropear lotes de producto, reducir la calidad del acabado de las piezas, provocar coloraciones no deseadas en el producto acabado y crear un entorno de trabajo desagradable o peligroso.

La contaminación por partículas sólidas puede dañar los elementos filtrantes internos en los filtros, puede erosionar la tubería del sistema de distribución provocando desgaste excesivo en estos. Las máquinas herramientas neumáticas también pueden ser perjudicadas por las partículas sólidas, provocando la destrucción de elementos internos en estos equipos.

Cuando el aire comprimido fluye desde el compresor, este empieza a enfriarse y el vapor se condensa. Esta condensación debe ser eliminada debido a que la contaminación por humedad puede acortar el tiempo de vida de los

componentes, genera óxido y corrosión en herramientas, equipo y tuberías del sistema, además crea lodos que reducen el diámetro de la tubería; todos estos problemas causan paros en las líneas de producción que resultan costosos.

### **3.5.4. Elementos del sistema de tratamiento**

El sistema de tratamiento está conformado por varios accesorios acoplados en conjunto a la red de distribución de aire comprimido, siendo cada uno de estos accesorios de gran importancia para: la continuidad del servicio, conservar la vida útil de la red de distribución y alcanzar el nivel de calidad de aire deseado.

El uso específico de cada uno de estos accesorios en el sistema de tratamiento de aire comprimido depende principalmente de la aplicación final que vaya a tener el sistema total de generación de aire comprimido. Es recomendable que todos los sistemas de tratamiento se instalen sin *bypass*, para garantizar que el caudal fluye por la vía del tratamiento. Un sistema de *standby* de la misma capacidad debería de estar disponible en caso de falla o para practicarle servicio técnico al sistema actual.

#### **3.5.4.1. Separadores**

Los separadores son parte del sistema de tratamiento. La función primaria de un separador es la primera etapa en el proceso de extraer la mayor parte de humedad condensada en el aire comprimido. Los separadores deben ser instalados con una válvula automática de drenaje, en orden de estar continuamente evacuando el condensado de estos. Los separadores pueden ser: ciclónicos o tanques de almacenamiento.

- Ciclónicos

El separador ciclónico es un dispositivo de alta eficiencia para la separación de partículas del tamaño de arena, otros sólidos en el agua y diversos líquidos dentro de un rango de caudal fijo.

La principal función es la remoción de gran cantidad de partículas sólidas en líquidos de procesos involucrados y separación de sólidos de diferentes pesos específicos del aire comprimido. Además, proteger contra desgaste por abrasión a las superficies del posenfriador y otros elementos.

En el método de operación, la separación es realizada por medio de la fuerza centrífuga que presiona las partículas sólidas de mayor densidad y tamaño que el flujo de aire comprimido de manera espiral hacia abajo, directa a una cámara de recolección, mientras que el flujo de aire se mueve hacia arriba por el centro directo a la salida en la parte superior del separador ciclónico.

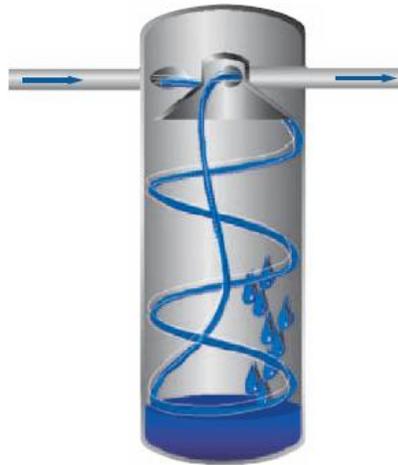
Otra función de los separadores ciclónicos es reducir la cantidad de agua y aceite por medio del efecto centrífugo, que hace impactar las gotas de agua y las partículas de suciedad contra las paredes de este.

El grado de separación que estos accesorios presentan es aproximadamente: 95 % a 6 bar, 20° C y flujo nominal. Con caída de presión mínima: 0,05 bar a flujo nominal.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Kaeser Compresores, Compressed Air Seminar, p 97.

Figura 7. **Separador ciclónico**



Fuente: Kaeser Compresores.

- **Tanques de almacenamiento**

Los tanques de almacenamiento de aire son un accesorio sugestivamente importante para los sistemas de aire comprimido, ya que tienen varias funciones adjuntas; actúan como separador y depósitos de aire a la vez. Asimismo, puede emplearse como la primera fase del proceso de separación de condensados.

El tanque de almacenamiento realiza la separación de la humedad en el aire por medio de la condensación que se produce por la diferencia de temperatura de la pared del recipiente y la temperatura del aire comprimido en el interior del tanque, creando condensado del vapor de agua que, por diferencia de densidades, se precipita al fondo del tanque donde luego se procede a la evacuación.

El tanque debe ser instalado, de preferencia, fuera del cuarto de compresores y en la sombra, para facilitar la condensación de la humedad y del aceite contenidos en el aire comprimido; además es preciso equiparlo con una válvula de drenaje en el punto más bajo para hacer la remoción de los condensados acumulados.

Los tanques deben ser dotados de manómetro, válvulas de seguridad y ser sometidos a una prueba de presión hidrostática, antes de ser usados la primera vez. El tanque en posición vertical tiene la ventaja de ocupar menos espacio físico de piso que el de posición horizontal.

Ningún tanque de almacenamiento para aire comprimido debe operar con una presión por encima de la presión máxima de trabajo permitida, excepto cuando la válvula de seguridad esté dando vacío; en esta condición, la presión no debe ser excedida en más de 6 % de su valor. Entre otras funciones el tanque de almacenamiento tiene las siguientes funciones:

- Almacenar el aire comprimido.
- Prevenir y reducir los periodos de carga y descarga de los compresores.
- Ayudar a estabilizar la presión del sistema y prevenir arranque de compresores innecesarios.
- Recolectar condensado, para eliminarlo del sistema antes del tratamiento.
- Reducir en lo posible la temperatura del aire comprimido ayudando a la eliminación de condensado.
- Compensar las fluctuaciones de presión en todo el sistema de distribución.
- Estabilizar las pulsaciones creadas por el flujo de aire.

### 3.5.4.2. Secadores

La base de todo sistema de tratamiento debe ser el secado adecuado del aire comprimido. El proceso de secado con un secador refrigerativo es en la mayoría de las aplicaciones el sistema más económico.

Los secadores de aire refrigerantes son capaces de mantener la humedad relativa por debajo del 50% en la mayoría de los entornos de plantas industriales.<sup>11</sup>

Los procesos que requieren un aire ultra seco (ISO clase 1, 2 o 3) necesitarán una solución avanzada empleando tecnología de secadores no refrigerativos.

Los secadores son elementos importantes para la manipulación del punto de rocío en un proceso. Las normas ISO clasifican un punto de rocío a presión constante a una temperatura ambiente del aire específica (25 °C). Cuando los secadores de aire mantienen la humedad relativa (HR) constante, el rendimiento del sistema de tratamiento de aire comprimido será consistente y fiable.

- Objetivo del secado

Prácticamente todos los procesos y aplicaciones requieren de la operación de secado del aire comprimido. El secado tiene como objetivo permitir el empleo satisfactorio del aire comprimido para determinada aplicación en donde

---

<sup>11</sup> [http://www.ingersollrand.pl/air/Download/G-air-treatment/AirQuality\\_07\\_SP.pdf](http://www.ingersollrand.pl/air/Download/G-air-treatment/AirQuality_07_SP.pdf), p.7, [Consulta: agosto de 2013].

la presencia de humedad en cierta cantidad no es deseable en los productos, procesos o tratamientos.

El secado del aire es importante, ya que el condensado y la contaminación en el aire influyen de manera adversa en la operación óptima de la red de distribución de aire comprimido así como en los puntos de uso.

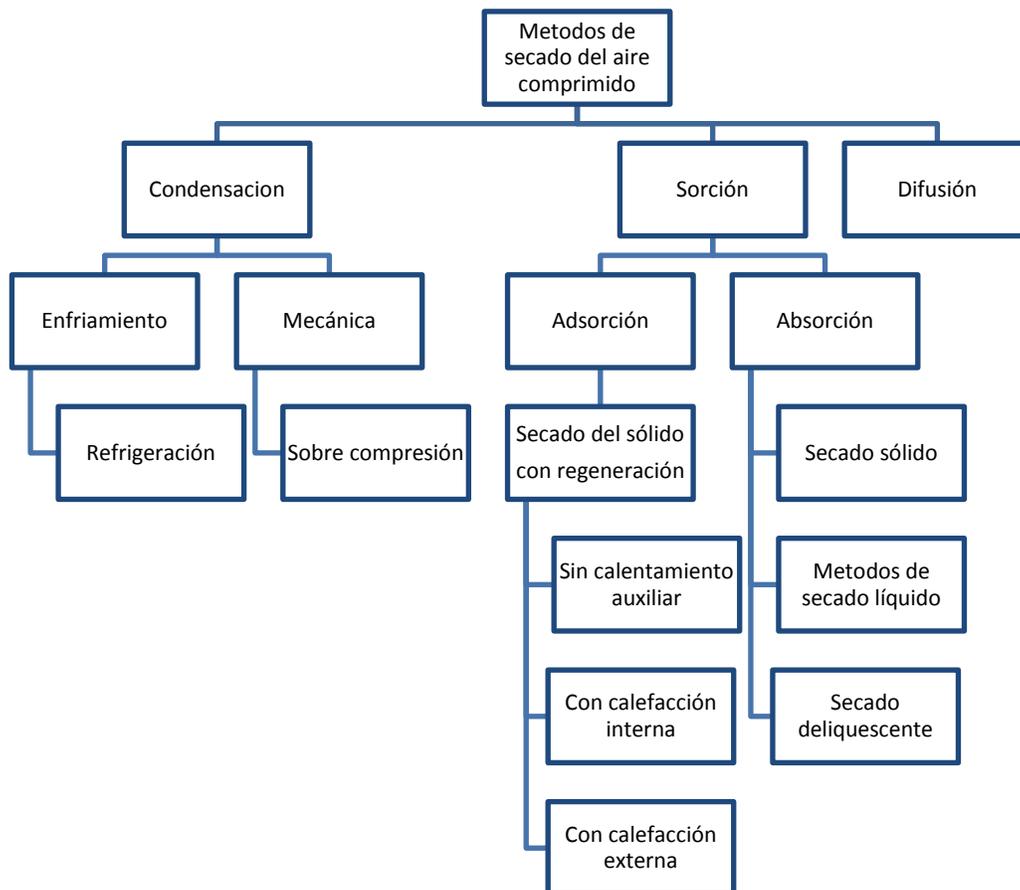
Además el condensado puede ocasionar problemas en la red como: corrosión, caídas de presión, contaminación y formación de capas de hielo. También se pueden ocasionar problemas en los puntos de uso como obstrucciones, desgaste excesivo, fallas y paros de producción.

- Métodos de secado del aire comprimido

Los métodos de secado de aire comprimido tienen distintas características, estos pueden ser utilizados según sean las condiciones en las cuales trabajen de manera óptima. El método de secado por secadores refrigerativos es el de uso más común en la industria de Guatemala.

Entre las condiciones más importantes para determinar el método de secado adecuado están la temperatura ambiental y también la temperatura de punto de rocío.

Figura 8. **Métodos de secado del aire comprimido**



Fuente: elaboración propia.

- **Secadores refrigerativos**

Estos secadores utilizan el método de deshumificación del aire comprimido por refrigeración, que consiste en someter el aire a una temperatura suficientemente baja, con el fin de que la cantidad de agua existente sea retirada en gran parte y no perjudique de modo alguno el funcionamiento de los equipos, porque, las características principales del aire indican que la capacidad del aire de retener humedad está en función de la temperatura.

Además de remover el agua, el secador refrigerativo produce en el compartimento de enfriamiento una emulsión con las partículas de aceite lubricante del compresor, ayudando a la remoción de cierta cantidad de aceite.

El método de secado por refrigeración es por la simplicidad de operación, la de mayor uso en la industria de Guatemala.

- Funcionamiento

La humedad saturada en el aire comprimido fluye a través de dos intercambiadores de calor en los cuales entrega la mayor parte del calor. El aire comprimido entra inicialmente en un preenfriador que es un intercambiador de calor, sufriendo una caída de temperatura causado por el aire que sale del enfriador principal.

En el enfriador principal el aire es enfriado aún más, pues está en contacto con el circuito de refrigeración.

Durante esta fase, la humedad presente en el aire comprimido forma pequeñas gotas de agua que son eliminadas junto con otros contaminantes líquidos por el separador, donde el agua depositada es evacuada del secador a través de una unidad drenadora automática. La temperatura del aire comprimido es mantenida entre 0,65 y 3,2 °C en el enfriador principal, por medio de un termostato que actúa sobre el compresor de refrigeración.

El aire comprimido seco se retorna nuevamente al intercambiador de calor inicial, causando el preenfriamiento en el aire húmedo de entrada, recogiendo parte del calor de este aire. El calor adquirido sirve para recuperar la energía y evitar el enfriamiento por expansión, que ocasionaría la formación de hielo, en

caso que fuese lanzado a una baja temperatura en la red de distribución, debido a la alta velocidad.

La temperatura de salida en un secador refrigerativo es aproximadamente 10°C menor a la temperatura de entrada del aire comprimido al secador y con un punto de rocío de +3 °C.

- Circuito refrigerativo

El circuito refrigerativo es hermético y consiste en un compresor, un condensador y un intercambiador de calor refrigerante/aire. El refrigerante, en forma gaseosa, es comprimido por el compresor y pasa a través del condensador en donde se enfría y se licua. Ahora, el refrigerante líquido fluye a través de la cámara de expansión del intercambiador de calor. Como en ese momento el refrigerante ya está a baja presión, este se expande y evapora otra vez extrayendo calor de los alrededores.

La fuente de calor es el aire comprimido fluyendo por la superficie del intercambiador de calor (evaporador), luego de pasar por este intercambiador de calor el refrigerante regresa hacia el compresor repitiendo el proceso.

- Factores que afectan el cálculo de secadores refrigerativos

Hay condiciones que afectan el desempeño de los secadores refrigerativos, estos son: la presión del aire comprimido a la entrada del secador, la temperatura del aire comprimido a la entrada del secador y la temperatura ambiental del lugar donde está ubicado el secador. “Los secadores refrigerativos son diseñados para condiciones estándar de presión a la entrada del secador de 7 bar, temperatura ambiente de 25° C y temperatura de aire a la

entrada del secador de 35 ° C. si estas condiciones cambiaran, entonces es necesario aplicar factores que corregirán el cálculo de la capacidad del secador para determinadas condiciones.”<sup>12</sup>

Los factores para la presión a la entrada del secador son los siguientes (kp):

**Tabla IV. Factor por la presión a la entrada**

P barg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
kp	0,75	0,84	0,9	0,95	1	1,04	1,07	1,1	1,12	1,15	1,17	1,19	1,21	1,23

Fuente: elaboración propia, con base en Kaeser Compressors, *Compress Air Treatment*.

Los factores para la temperatura a la entrada del secador son los siguientes (kti):

**Tabla V. Factor por la temperatura a la entrada**

Te (°C)	30	35	40	45	50	55
kti	1,20	1	0,83	0,72	0,60	0,49

Fuente: elaboración propia, con base en Kaeser Compressors, *Compress Air Treatment*.

---

<sup>12</sup> Kaeser Compressors, Technical file: *Compress Air Treatment*.

Los factores para la temperatura ambiente son los siguientes (kta):

Tabla VI. **Factor por la temperatura ambiente**

Tu(°C)	25	30	35	40	43
kta	1	0,99	0,97	0,94	0,92

Fuente: elaboración propia, con base en Kaeser Compressors, *Compress Air Treatment*.

○ **Calculo de ejemplo**

Si un secador refrigerativo está diseñado en condiciones estándar para secar un caudal de  $2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ , hasta un punto de rocío de +3 °C. y las condiciones son:

Tabla VII. **Datos ejemplo**

Dato	valor	factor	valor
Presión de trabajo	10bar(g)	kp	1,1
Temperatura de aire en la entrada	40 °C	Kti	0,83
Temperatura ambiente	30 °C	Kta	0,99

Fuente: elaboración propia.

Flujo máximo posible bajo estas condiciones:

$$V_{\text{operacion maximo}} = V_{\text{referencia}} \times k_p \times k_{Ti} \times k_{Ta}$$

$$V_{\text{operacion maximo}} = 2,1 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \times 1,1 \times 0,83 \times 0,99 = 1,89 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

Para las condiciones dadas solo se podrá secar un flujo de  $1,89 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$ .

- Secadores por método de absorción

Es el método en el cual se utiliza en un circuito una sustancia sólida o líquida, con capacidad de absorber otra sustancia líquida o gaseosa.

Este proceso es también llamado proceso químico de secado, pues el aire es conducido en el interior de un volumen a través de una masa higroscópica, insoluble y deliquescente que absorbe la humedad del aire ocurriendo una reacción química.

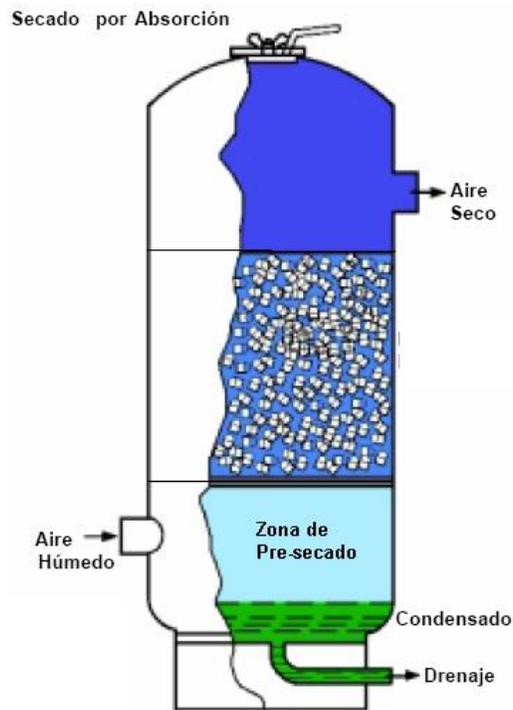
Las sustancias higroscópicas son clasificadas como insolubles cuando reaccionan químicamente con el vapor de agua, sin licuarse. Son deliquescentes cuando al absorber el vapor del agua reaccionan y se convierten en líquidas. La sustancia puede ser un desecante sólido, soluble o desecante líquido. Las principales sustancias desecantes utilizadas son: cloruro de calcio, cloruro de litio y alúmina.

Con la consecuente disolución de las sustancias, es necesaria una reposición regular; en caso contrario, el proceso sería deficiente, por eso es necesario renovar periódicamente el desecante.

Se obtiene hasta un punto de rocío de  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este método de secado se utiliza en aplicaciones de aire comprimido con baja temperatura de admisión.

La humedad retirada y las sustancias diluidas son depositadas en la parte inferior del tanque en el punto de drenaje de donde son eliminadas hacia el exterior.

Figura 9. **Secadores por método de absorción**



Fuente: Kaeser Compresores.

- Secadores por método de adsorción

Este tipo de secadores funciona por medio de un proceso físico, en el cual el vapor de agua y el desecante van juntos; es la fijación de las moléculas de una sustancia en la superficie de un adsorbente generalmente poroso y granulado, o sea, es el proceso de depositar moléculas de una sustancia en la superficie de otra sustancia, generalmente sólida.

Este método también es conocido como Proceso Físico de Secado, pero los detalles son desconocidos. Es admitido como teoría, que en la superficie de los cuerpos sólidos existen fuerzas desbalanceadas, influenciando moléculas

líquidas y gaseosas a través de la fuerza de atracción; se admite, por lo tanto, que estas moléculas son adsorbidas en las cámaras mono o multimoleculares de los cuerpos sólidos, para efectuar un balance semejante a la Ley de los Octetos de los Átomos.

El proceso de adsorción es regenerativo; la sustancia adsorbente, después de estar saturada de humedad, permite la liberación de agua cuando es sometida a un calentamiento regenerativo. El desecante debe ser regenerado periódicamente.

Los secadores por adsorción están compuestos físicamente por dos torres de igual tamaño en las cuales internamente sucede el proceso de adsorción; estas torres son utilizadas para alternar el secado y la regeneración. Las torres se encuentran llenas del material desecante, el cual tiene la capacidad de retener la humedad durante la fase de operación y de liberarla durante la fase de regeneración.

Mientras el gas a secar atraviesa una de las dos torres, el vapor de agua que contiene es retenido en el interno del material adsorbente. Al mismo tiempo el material adsorbente de la otra torre, que se encuentra saturado por el vapor de agua retenido en el ciclo previo es regenerado.

Continuamente la lógica de control automático alterna las funciones de las dos torres, de modo que el equipo pueda trabajar de manera continua sin causar interrupciones en el caudal o caídas de presión en la línea.

La duración de ambos ciclos es prácticamente la misma, si se incluyen en el de regeneración los tiempos complementarios, según el modelo, de enfriamiento, descompresión y presurización.

El punto de rocío que puede ganarse con estos deshidratadores varía según el sistema de proceso elegido, pero en términos generales fluctúa desde una exigencia mínima de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  para una presión de trabajo de 7 bar.

Los sistemas de secado por adsorción pueden clasificarse en dos grupos según el sistema de regeneración que utilizan; con calor o sin calor.

- Regeneración sin calentamiento auxiliar

Estos equipos difieren esencialmente de los demás debido a que, para la regeneración, no precisan aportación alguna de calor adicional. Son apropiados para caudales de hasta  $5\ 000\ \text{Nm}^3/\text{h}$  y garantizan una alta confiabilidad por el sencillo diseño y operación automática.

Utilizan únicamente una fracción limitada del propio caudal de fluido comprimido ya seco, que se toma a la salida del equipo y se hace circular a contracorriente por la torre en regeneración, distendido prácticamente a presión atmosférica. Luego se libera al exterior cargado de humedad.

La regeneración del desecante se logra cuando la baja tensión de vapor del fluido de barrido, al incidir sobre el adsorbente a tensión de vapor elevada al término del ciclo de secado, determina una gran transferencia de tensiones que se traduce en una efectiva desadsorción, que restaura completamente en el material adsorbente toda la capacidad para iniciar un nuevo ciclo de secado. La cantidad de aire seco consumido para la regeneración es cercana al 16 % en el proceso de purga.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> Kaeser Compresores, Compressed Air Seminar, p 110.

Los ciclos de adsorción y regeneración son particularmente rápidos, no superan los 10 minutos, incluidos todos los procesos en las torres, lo que constituye el ciclo total. De esta manera la saturación del adsorbente se realiza por capas y así se logra prolongar la vida útil. Las características primarias son:

- Sistema sujeto a daño por escarcha
  - Tolera altas temperaturas ambientales
- Regeneración con calefacción interna

Este método de secado cuenta con elementos calefactores eléctricos integrados, para calentar el aire de regeneración del desecante. La aportación de calor tiene dos fines: proporcionar el calor de desadsorción que adsorbe el vapor cuando se desprende y disminuir el nivel higrométrico del aire de barrido, en especial cuando se trata de aire húmedo.

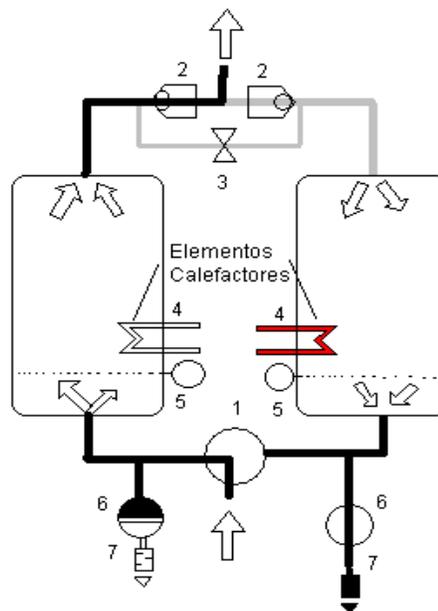
En los secadores de adsorción a regeneración por calefacción eléctrica interna y ciclo largo de inversión de torres el flujo a secar, previamente decantado de arrastres de condensados, se conduce a una de las dos torres y se somete a un proceso de adsorción del vapor de agua sobre deshidratante sólido inerte.

Simultáneamente, en la torre gemela tiene lugar la reactivación del deshidratante saturado durante el semiciclo anterior. Esta regeneración se efectúa mediante un calefactor eléctrico interno en cada torre, dispuesto dentro de un disipador de calor de modo que no se produce un contacto directo entre el deshidratante y el elemento calefactor y posibilita la extracción sin vaciar la carga de adsorbente. El vapor de agua desprendido durante la fase de

regeneración es arrastrado por una pequeña corriente del aire seco hacia el exterior del secador.

En el siguiente diagrama de operación de secadores por método de adsorción con regeneración con calefacción interna se puede observar cada uno de los elementos que tiene uno de estos secadores.

Figura 10. **Diagrama de operación de secador por método de adsorción con regeneración con calefacción interna**



1. Válvula de cambio
2. Válvulas de paso
3. Válvula de purga
4. Elementos calefactores
5. Torres de desecante
6. Desfogue de condensados
7. Silenciador

Fuente: Kaeser Compresores.

- Regeneración con calefacción externa

En este caso la regeneración del desecante sucede cuando aportando calor por medio del propio aire de barrido, que se calienta por medio de un calefactor exterior a la torre de secado. Este método es un proceso de transferencia de energía térmica, en el cual aire ambiente entra por la entrada del ventilador. La temperatura del aire se eleva cuando el aire se mueve por el calentador externo. El aire caliente se dirige a la torre de regeneración y fluye en dirección opuesta por la torre de regeneración, retirando la humedad adsorbida del desecante. La humedad del aire sale del secador por el puerto de escape equipado con un silenciador para reducir el ruido.

Este método, a diferencia de los otros métodos, solo requiere de una purga de aproximadamente 1,2 % del aire total.<sup>14</sup>

La etapa de regeneración del secador de regeneración con soplador incluye tres partes : calentamiento, enfriamiento y equilibrio de presión.

El aire de regeneración usado en la etapa de calentamiento y en unas partes de la etapa de enfriamiento se toma al ambiente. En el posterior de la etapa de enfriamiento, la cama de adsorbente tiene la temperatura baja, los adsorbentes pueden adsorber. Porque el aire ambiente es húmedo, si el aire de regeneración en el posterior de la etapa de enfriamiento todavía es aire ambiente, el adsorbente adsorbe los vapores contenidos en el aire. En el comienzo de la conmutación para adsorber, el punto de rocío de la salida de aire comprimido debe ser muy alto y aparece el vapor de pico del punto de rocío. Para evitar este fenómeno, en el posterior de la etapa de enfriamiento debe usar aire comprimido seco.

---

<sup>14</sup> Kaeser Compresores, Compressed Air Seminar, p 112.

- Secadores de membranas

El aire comprimido húmedo ingresa a la carcasa del módulo, donde entra en contacto con las fibras de la membrana. El secado se realiza mediante esta membrana que deja el paso al vapor de agua mediante diferencia de presión parcial entre la parte interior y exterior de la membrana. Las moléculas de agua se difunden a través de la pared de la membrana desde una concentración alta a una más baja y son expulsadas del secador por medio de un barrido de aire comprimido a través de las membranas.

Una mínima cantidad de este aire comprimido, ahora seco y que sirve como aire de purga es conducido hacia las fibras donde expande la presión atmosférica. El consecuente aumento en el volumen aumenta la capacidad del aire para retener agua. En combinación con la selectividad de la membrana, la diferencia del contenido de agua presente en el aire de purga y en el aire que ha de secarse hace que las moléculas de agua se dispersen, casi que exclusivamente, a través de las fibras. El aire comprimido seco y el aire de purga salen por puertos diferentes. El secador de membrana constituye un sistema de secado de fácil montaje. Se reduce el consumo de aire de drenaje en aproximadamente un 80 %. Entre las ventajas del secador de membranas están:

- Fácil instalación en la red de distribución de aire comprimido, puede instalarse en instalaciones interiores y exteriores.
- No hay influencia de la temperatura ambiente.
- Apropiado para utilizarse en zonas con peligro de explosión.

- Secador por método de sobre presión

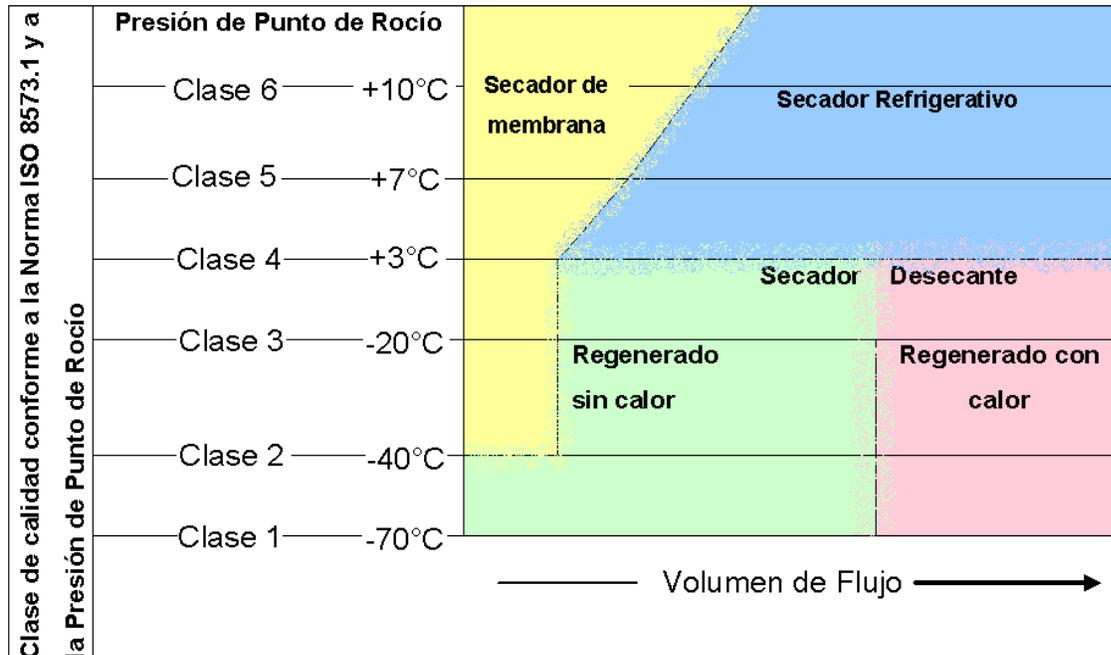
Los líquidos volátiles, incluyendo el agua, evaporarían a una velocidad muy alta sin una atmosfera rodeando al planeta. Normalmente el agua y otros fluidos evaporan lentamente, porque la evaporación de las moléculas puede regresar dentro del fluido después de chocar con moléculas de aire de la superficie del líquido. La temperatura de ebullición de un líquido es reducida si el líquido es colocado en vacío. El agua hervirá a temperatura de cuarto si se le somete a una presión de cerca de 1/40 atmósferas.

Este principio indica los usos básicos en el proceso de secado, remoción de gases para permitir evaporación o secado, particularmente a una temperatura debajo de lo usual y eliminación de gases químicamente activos.

Este método de secado consiste en la compresión del aire comprimido el cual al ser comprimido aumenta la presión, reduce el volumen y aumenta la temperatura, entonces en este punto se aplica un enfriamiento el cual produce que se reduzca la temperatura del aire y la humedad contenida en este se condense y se realice la separación de condensados, la velocidad del movimiento interno de humedad disminuye, provocando que la velocidad de secado aumente hasta que el contenido de humedad llegue a un punto de equilibrio con la humedad del aire de secado, es aquí donde el proceso de secado termina, después el aire es conducido y liberado a una presión menor a la cual fue enfriado para que se expanda y se reduzca aún más la temperatura y se aire con bajo índice de humedad.

Este método de secado es sencillo pero requiere demasiada energía en el proceso.

Figura 11. **Volumen de flujo para cada método de secado según las clases de calidad conforme a la Norma ISO 8573-1**



Fuente: elaboración propia, con base en

[http://www.kaeser.es/Products\\_and\\_Solutions/Compressed-air-treatment/Drying.asp](http://www.kaeser.es/Products_and_Solutions/Compressed-air-treatment/Drying.asp).

Consulta: noviembre de 2013.

### 3.5.4.3. Filtros

Los sistemas de aire comprimido contaminados aumentan los costos de operación al tomar energía del sistema de aire. Dando como resultado reducción en eficiencia, daños a equipos operados con aire, mayor mantenimiento y costos de reparación; reduciendo la productividad.

La apropiada selección del sistema de filtrado en el tratamiento, en conjunto con el secador adecuado, removerá estos contaminantes. Esto

permitirá al sistema de aire comprimido entregar la calidad de aire requerida para la aplicación requerida ya sea aire para fábrica, de instrumentación o para respirar.

Los filtros y separadores, son accesorios desarrollados y diseñados utilizando las últimas innovaciones y tecnologías de fabricación, los filtros ofrecen una nueva solución para la filtración de aire comprimido. Las carcasas de los filtros están diseñadas con áreas más amplias para asegurar una baja caída de presión y una fácil instalación, operación y mínimo mantenimiento. El resultado de la aplicación de un sistema de filtración es un producto de alta calidad minimizando costos de operación. Los filtros remueven más contaminantes con menos caída de presión.

Con una completa selección de tipos de filtros para aplicaciones específicas, tamaños, soporte y servicio, los filtros ofrecen una solución para todas las necesidades de calidad de aire comprimido.

Las carcasas de los filtros deben soportar esfuerzos de la presión a la cual está el aire comprimido, son fabricados de aluminio, zinc y acero de alta calidad. Recubrimiento interior y exterior con pintura electrostática a base de resinas para dar durabilidad y resistencia a la corrosión. El flujo de aire optimizado a través de la carcasa minimiza la caída de presión.

- Filtro separador centrífugo

El separador centrífugo elimina grandes volúmenes de condensado presente en el aire comprimido. El diseño mejorado incrementa el efecto centrífugo y asegura la permanente separación de condensado sobre una

amplia gama de volumen de flujo. Además, las partículas de hasta 5  $\mu\text{m}$  se eliminan del sistema en el mismo proceso.

Es recomendable usar separadores centrífugos en sistemas donde el secador refrigerativo se instala directamente a continuación del compresor de tornillo rotativo.

El separador centrífugo se instala entre el compresor y el secador refrigerativo para eliminar el condensado líquido, presente en el aire comprimido. Esto permite emplear el secador refrigerativo como un elemento de soporte para secado adicional. Esto es sumamente importante en lugares con alta temperatura ambiente, pues permite mantener la presión de punto de rocío requerida en un nivel constante. Además, otra de las ventajas presentes en los separadores centrífugos es que requieren poco mantenimiento.

A cada separador centrífugo se le debe instalar un drenaje de condensados, set completo con todos los componentes necesarios para obtener el óptimo desempeño y conservación del mismo.

- Filtros coalescentes

El aire comprimido cargado de aceite y suciedad pasa a través del filtro del interior al exterior, las partículas más gruesas de suciedad y corrosión quedan retenidas en el prefiltro. El aceite, el agua, y el resto de las partículas se dirigen al medio filtrante principal, este proporciona las dos etapas siguientes de filtración; aquí se atrapan hasta el 99,99 % de todos los gases del aceite, agua y partículas de polvo; los líquidos se adhieren a las fibras y por coalescencia de las partículas del aerosol se forman gotas, las cuales se transportan por la corriente de aire a la funda de espuma exterior que presenta una gran área

superficial. Dentro de la estructura celular de la funda, el aire y el agua se separan; el aire fluye a la parte superior, mientras que el agua y el aceite descienden por gravedad al fondo del elemento cayendo en la zona sin turbulencias de la carcasa del filtro. El agua y aceite se deben descargar continuamente por un drenaje automático sin necesidad de mantenimiento.

- Prefiltros

El filtro consiste de dos etapas, uno filtrante para eliminar partículas y el otro de medio coalescente para separar y reducir contenido de agua en el aire. Se instala después del separador o centrifugadora, antes de los filtros finos. De esta manera se garantiza una larga vida porque la mayor parte de contaminantes gruesos han sido eliminados anteriormente.

El empleo de un prefiltro coalescente permite un pretratamiento. A continuación cuando el aire pasa por el filtro coalescente se elimina tanto el agua como las sales que estén disueltas en él, ayuda mejorar la efectividad, fiabilidad y vida del sistema, suministrando aire limpio y libre de agua.

Las principales características son:

- Retienen el 99,99 % de todas las partículas mayores a 3  $\mu\text{m}$ .
- Usado como filtro para aire comprimido totalmente saturado (contenido líquido).
- Contiene cama de filtración profunda.
- El aire fluye de adentro hacia fuera, como filtro de líquidos.

Los prefiltros se pueden clasificar por filtro separador y filtro de partículas.

- Filtro separador

Instalación después del postenfriador, se instala antes de los microfiltros. Las principales características son las siguientes.

- ✓ Remoción de líquidos 99 % de agua.
- ✓ Capacidad de saturación de líquidos: 25 000 ppm w/w.
- ✓ Remoción de partículas sólidas 3 micrones.
- ✓ Paso de aceite de 5 ppm w/w.
- ✓ Caída de presión de 1 psi seco y 1,5 psi mojado.

- Filtro para partículas

Instalación después del secador refrigerativo o después de un secador refrigerativo sin calor, se instala antes de los microfiltros. Las principales características son las siguientes.

- ✓ Remoción de líquidos: 100 % de agua.
- ✓ Capacidad de saturación de líquidos 2 000 ppm w/w.
- ✓ Remoción de partículas sólidas de 1 micrón.
- ✓ Paso de aceite de 1 ppm w/w.
- ✓ Caída de presión de 1 psi seco y 2 psi mojado.

- Microfiltros

Las principales características son:

- Separación de partículas de líquido y sólido mayores a 0,01µm.
- Contenido de aceite: 0,01 – 0,001 ppm.
- Flujo de aire del interior hacia el exterior.

Los microfiltros se pueden clasificar por el microfiltro para remoción de aceite en aplicaciones estándar y microfiltro para remoción de aceite en aplicaciones críticas.

- El microfiltro para remoción de aceite en aplicaciones estándar

Instalación después de un secador refrigerativo y antes de un secador regenerativo. Las principales características son las siguientes.

- ✓ Remoción de líquidos de 99,99 % de aceites.
- ✓ Capacidad de saturación de líquidos: 1 000 ppm w/w.
- ✓ Remoción de partículas sólidas de 0,01 micrones.
- ✓ Paso de aceite 0,01 ppm w/w.

- Microfiltro para remoción de aceite aplicaciones críticas

Instalación después de un secador refrigerativo y antes de un secador regenerativo. Las principales características son las siguientes.

- ✓ Remoción de líquidos de 99,999 % de aceites.
- ✓ Capacidad de saturación de líquidos: 100 ppm w/w.
- ✓ Remoción de partículas sólidas de 0,01 micrones.
- ✓ Paso de aceite 0,001 ppm w/w.

- Filtro estéril (aséptico)

El filtro estéril está confeccionado en acero inoxidable de primera calidad. Este material inoxidable impide la proliferación de microorganismos. Los filtros estériles han sido desarrollados para aplicaciones que requieran la máxima higiene posible, resultando en una alta calidad de aire. Los elementos filtrantes se someten a varias pruebas en fábrica para garantizar la máxima seguridad de servicio. Todos los componentes de este tipo de filtros deben cumplir las normativas sobre el contacto con productos alimenticios.

Tanto el prefiltro como el velo de microfibra están hechos de borosilicato sin aglutinante. Se hace uso de todo el volumen de filtración para eliminar las bacterias y partículas. Por regla general son posibles más de 100 ciclos de esterilización a 141 °C con vapor saturado lento. La temperatura máxima de servicio admisible es de -20 a 200 °C. Las capas del medio filtrante aseguran aire 100 % estéril.

Entre las principales características del filtro estéril están, la retención de bacterias LRV mayores a 7 /cm<sup>2</sup> para tamaño de partícula de 0,01 µm de acuerdo a la prueba coliphagen de bacterias.<sup>15</sup>

En los campos de aplicación más comunes para los filtros estériles en la industria son: la alimentación, química, farmacéutica y médica y hospitalaria.

- Torre de carbón activado

Este especial accesorio del sistema de tratamiento sirve para generar aire comprimido de gran calidad y a un bajo costo de mantenimiento es instalado

---

<sup>15</sup> Kaeser Compresores, Seminario de Aire comprimido 2011, p 23.

enseguida de los procesos regulares de secado y prefiltrado, la torre adsorbente de carbón activado elimina el vapor de aceite residual que pueda permanecer en el aire. De este modo obtendrá aire comprimido de alta pureza. Entre las ventajas que presenta la torre de carbón activado están:

- El máximo contenido de aceite residual es de 0,003 mg por cada m<sup>3</sup> de aire. La capacidad adsorbente supera considerablemente el límite establecido en la clase 1 (0,01 mg/m<sup>3</sup>) de la Norma ISO 8573-1.
  - La vida útil del adsorbente de carbón activado, que por lo general sobrepasa las 10 000 horas de trabajo, se debe básicamente al amplio dimensionamiento de la torre y al sistema de circulación.
  - El equipo opera con gran desempeño en virtud del diferencial de presión tan bajo que se genera por efecto del amplio diámetro de los puertos de admisión y salida.
  - Por norma la torre de carbón activado se debe equipar con un indicador de vapores de aceite que facilita la supervisión de la operación y el mantenimiento oportuno.
- Filtro de carbón activado

Es un filtro que remueve vapores de aceite por medio de carbón activado como principal elemento de filtración. Los filtros de carbón activo son ideales para eliminar de manera controlada los vapores de aceite que queden en el aire comprimido después del secado y de la prefiltración sin necesidad de trabajos de mantenimiento constantes. Esta adsorción permite conseguir un aire comprimido de primera calidad. La instalación es después de los microfiltros y después del secador refrigerativo.

- Remoción de líquidos de 0 %.
- Capacidad de saturación de líquidos de 0 ppm w/w.
- Remoción de partículas sólidas 0,01 micrones.
- Paso de aceite de 0.003 ppm w/w.
- Caída de presión 1 psi seco, N/A mojado.
- Se recomienda que los elementos filtrantes deben ser reemplazados cada 1000 horas de operación o anualmente.
- Los filtros de carbón activado garantizan un extraordinario tratamiento de condensado de acuerdo a las más estrictas normas en materia de pureza de aire. En estos filtros se combina la larga vida útil y un magnífico desempeño.
- Estos filtros se pueden combinar con otros tipos de filtro en un sistema de tratamiento de aire, se deben instalar filtros menos finos para retener contaminantes mayores que afecten o dañen a los filtros más finos.

### **3.5.5. Proceso de determinación del sistema de tratamiento**

La calidad es un elemento de diferenciación entre las industrias líderes de un sector y es importante garantizar la calidad de los sistemas de tratamiento, máquinas y accesorios utilizados actualmente en la industria, y así lograr un alto estándar de calidad en el producto final y proteger al consumidor de posible contaminación.

Se debe prestar especial atención a la correcta elección del sistema de tratamiento de aire comprimido adecuado en cada circunstancia diferente.

A la hora de decidirse por un compresor libre de aceite o refrigerado por aceite para un uso concreto, no deberá hacerse basando la elección en la

calidad del aire que el compresor sea capaz de producir, sino considerando más bien la economía del sistema.

El aire comprimido es un medio versátil: las aplicaciones se extienden desde la utilización de aire sin tratar para soplado en lugares donde la calidad no es principal, hasta la utilización de aire comprimido absolutamente seco, exento de aceite y estéril para las industrias más exigentes en calidad y de consumo humano: farmacéuticas y de alimentación. En los campos de aplicación donde se exige un tratamiento seguro y eficiente, los usuarios confían en el sistema de tratamiento de aire comprimido de calidad.

Partiendo de las especificaciones principales como aplicación a la cual se va a utilizar el aire tratado, necesidades de calidad y el factor económico que se tenga disponible para realizar la inversión, se realiza un esquema de un tratamiento personalizado para la aplicación correspondiente.

El buen rendimiento vendrá determinado por la correcta gestión de los costos de energía y de mantenimiento, que pueden llegar a representar hasta un 90 % de los costos totales de producción de aire comprimido. El grueso de este porcentaje, del 75 % al 85 %, corresponde a los gastos de energía.

Tanto los compresores libres de aceite como los sopladores hasta 2 bar(a), son más adecuados desde el punto de vista energético en el rango de bajas presiones, desde 500 mbar(a) hasta aprox. 3 bar(a). A partir de 4 bar(a) y hasta 16 bar(a) será económicamente más conveniente elegir compresores de tornillo enfriados por aceite. Desde los 5 bar(a), la compresión con unidades libres de aceite debe ser de dos etapas para conseguir una buena relación entre la potencia consumida y el caudal de aire producido.

La gran cantidad de enfriadores que se necesitan, las altas velocidades de giro, la mayor necesidad de técnica de control, el gasto en agua para refrigeración y la alta inversión de adquisición, son algunas desventajas inminentes que hacen dudar de que la compresión sin aceite sea la más adecuada económicamente para este rango de presión.

No se debe olvidar que el aire comprimido en unidades libres de aceite y el condensado que se forma en dicha compresión son muy agresivos debido al azufre y otros contaminantes que se puedan aspirar de la atmósfera.

Los compresores de tornillo lubricados ofrecen un 10 % más de rendimiento que los compresores libre de aceite. Con el sistema de tratamiento de aire adecuado para los compresores lubricados, permite ahorrar hasta un 30 % de costos produciendo aire comprimido libre de aceite. El contenido residual de aceite que se alcanza con este sistema es de tan sólo 0,003 mg/m<sup>3</sup>, debajo del valor exigido por la Norma ISO 8573-1.

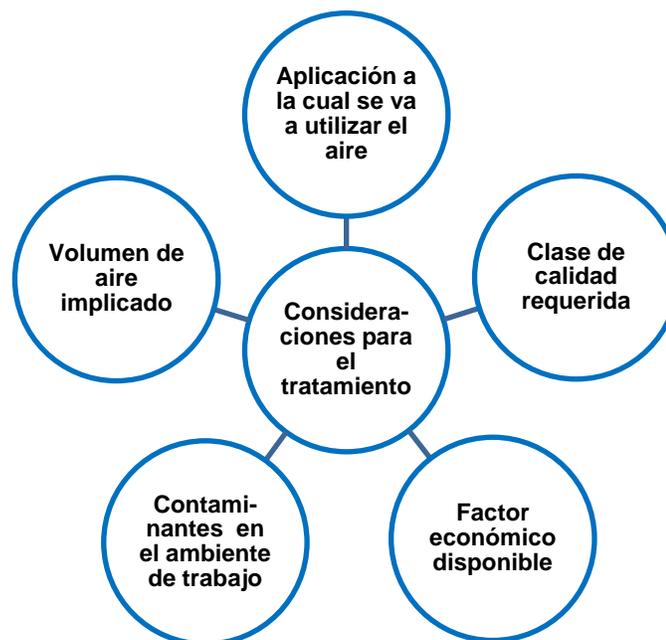
Una vez considerados todos los contaminantes, puede determinarse el grado de limpieza del aire de cada parte en una planta industrial o proceso. Únicamente mediante la utilización de los filtros correctos en el emplazamiento adecuado pueden mantenerse los costos de energía y mantenimiento al mínimo. Los filtros deben ser utilizados solo donde se requiera la calidad de aire que estos proveen sea necesaria.

El volumen de aire implicado en cada etapa debe ser siempre considerado como subdimensionado, la utilización de filtros inadecuados es una de las causas principales de incremento en costos de energía.

El sistema de tratamiento debe incluir todos los accesorios de tratamiento necesarios para conseguir aire comprimido de calidad. El diseño de este sistema es particularmente complejo, dado que dependen de varios factores que intervienen en la operación óptima de este. Estos factores son la temperatura del aire comprimido a la salida del compresor y que circula por la tubería del sistema de generación, la temperatura ambiente en la ubicación del sistema de tratamiento, la presión en la generación y el caudal de aire deseado.

La tabla de clases de calidad recomendada, muestra una lista general referente a los niveles típicos de limpieza y tratamiento requeridos por los procesos industriales comunes en Guatemala. Sin embargo, cada aplicación industrial deberá considerarse según las propias circunstancias.

Figura 12. **Consideraciones para el sistema de tratamiento adecuado**



Fuente: elaboración propia.

### **3.5.6. Criterios de selección del sistema de tratamiento de aire comprimido**

Son diversas las posibles configuraciones que se pueden dar con los elementos de un sistema de tratamiento y elegir el adecuado puede parecer una tarea difícil. Sin embargo, para implementar un sistema de tratamiento de aire comprimido es necesario guiarse por ciertos criterios para la selección de cada elemento del sistema de tratamiento. Estos criterios deben ser analizados en todo el proceso de diseño y cálculo de la estación de tratamiento.

#### **3.5.6.1. Aplicación**

La aplicación debe ser uno de los criterios principales que se deben considerar en el diseño de un sistema de aire comprimido. Dependiendo de la aplicación que tendrá el aire comprimido cambiará la configuración del sistema de tratamiento. Se pueden utilizar distintos tipos de secadores y diferentes combinaciones de filtros. La aplicación puede ser algún tipo de industria en la cual el producto para el cual la producción requiera aire comprimido sea de consumo humano por ejemplo la industria alimenticia.

Se debe considerar especialmente el aire comprimido de uso hospitalario, en el cual el aire está en contacto directamente con el usuario, ya que si no se tiene la calidad de aire adecuada, la contaminación puede estar en contacto con el organismo humano. Asimismo, la calidad del aire utilizado en aplicaciones del aire en procesos químicos y farmacéuticos debe ser alta, ya que la contaminación contenida en el aire comprimido sin tratamiento adecuado puede afectar el proceso químico de producción.

Filtros de partículas, filtros de carbón activado adsorbente y filtros estériles deben ser usados, dependiendo de la aplicación, en aire para control, aire para proceso o aplicaciones en la industria alimenticia para garantizar la calidad de aire comprimido requerida. Esto solo es posible con la combinación de filtros y secadores y aplica para todo sistema de aire comprimido estándar.<sup>16</sup>

Gracias a la correcta elección de cada elemento del sistema de tratamiento, es posible producir aire comprimido seco, libre de partículas e incluso técnicamente libre de aceite acorde a la Norma ISO 8573-1, según la aplicación en el cual se va a utilizar el aire comprimido.

### **3.5.6.2. Conformación del sistema de tratamiento**

- Sistemas de tratamiento en paralelo

Los sistemas de tratamiento en paralelo se refieren cuando dos o más conjuntos de elementos para tratar el aire comprimido están separados por una válvula al inicio y otra válvula al final de los sistemas de tratamientos, siendo posible la operación de cualquiera de los trenes de tratamiento en distintos momentos.

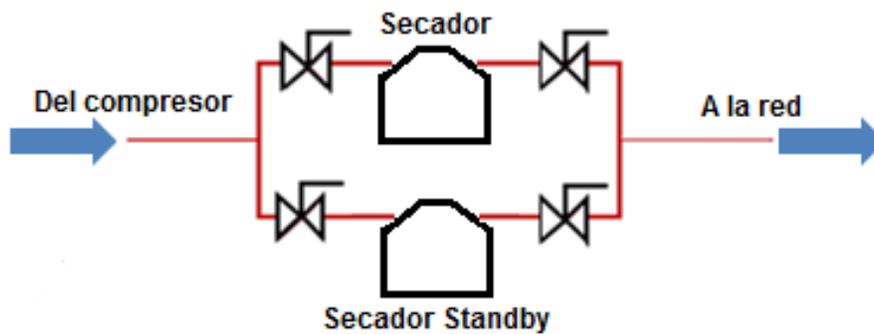
Para diseñar un sistema de tratamiento en paralelo, se deben unir conjuntamente dos o más trenes de tratamiento con la misma capacidad de tratamiento del aire, el objetivo de esto es que siempre se tenga la calidad de aire requerida en el punto de uso. Uno de los trenes de tratamiento puede encontrarse aislado, por ejemplo en período de mantenimiento, mientras que el otro equipo está en funcionamiento. Este tipo de disposición en los sistemas de tratamiento de aire comprimido es muy importante en el caso de sistemas de

---

<sup>16</sup> Kaeser Compresores, Compressed Aire Seminar, p.86.

aire comprimido que no pueden detenerse, como en plantas con procesos de producción continuos.

Figura 13. **Sistemas de tratamiento en paralelo**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Visio 2010.

- Sistemas de tratamiento con elementos con *bypass*

En los sistemas de tratamiento en el cual uno o más elementos del sistema tienen instalado un *bypass*, la calidad de aire comprimido se puede llegar a reducir.

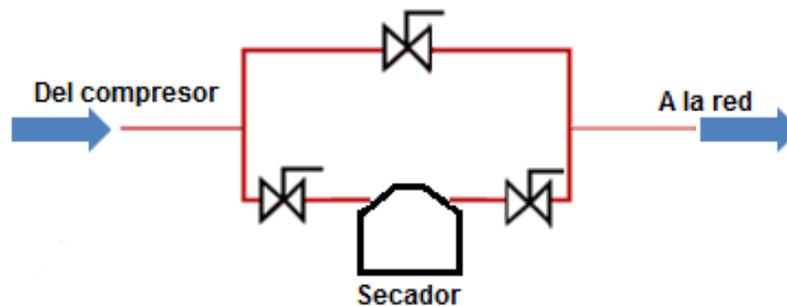
El elemento con *bypass* queda aislado del flujo de aire comprimido por medio de válvulas, una válvula instalada antes del elemento y otra instalada después de este, además otra válvula instalada en la tubería del *bypass*, como se muestra en la figura 14.

Esta configuración del sistema de tratamiento permite que el flujo de aire sea continuo en la tubería al momento de que algún elemento presente una falla o este en período de mantenimiento.

Sin embargo, cuando cierto elemento de tratamiento esta fuera de funcionamiento se altera la calidad de aire para el cual el sistema fue diseñado, presentando mayor grado de contaminación según sea el elemento aislado por el *bypass*. Se debe considerar que una vez exista contaminación en la tubería flujo abajo del sistema de tratamiento, esta contaminación va a estar presente en el punto de uso de aire comprimido y en los productos finales.

Como resultado de tener el sistema de tratamiento con elementos con *bypass*, es el flujo de aire continuo en el proceso pero con mayor contaminación en la red de distribución y alteración en la calidad de aire requerida en el punto de uso. Ningún *bypass* es permitido si la calidad de aire debe ser asegurada.

Figura 14. **Sistema de tratamiento con elementos con *bypass***



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Visio 2010.

- Instalación de secador antes del tanque de almacenamiento

En la situación cuando se instala el equipo de secado del aire comprimido antes de un tanque de almacenamiento, se derivan varios resultados de esta acción. Se tienen tanto ventajas como desventajas en la funcionalidad del sistema de tratamiento.

Entre los efectos positivos de tener la instalación de esta manera es que, ya se habrá retirado la humedad del aire comprimido al llegar al tanque de almacenamiento y estará seco. Además, no habrá precipitación condensada en el tanque de almacenamiento.

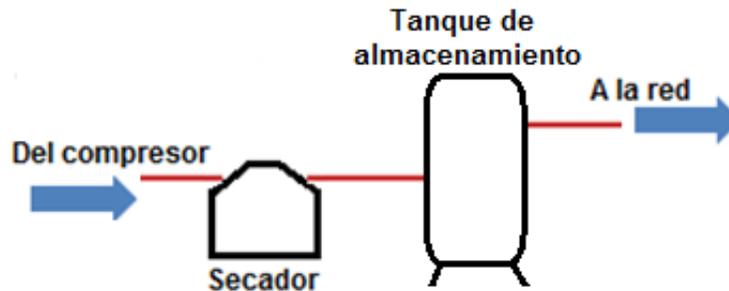
Se debe calcular en la elección del secador, que la entrega del compresor sea el caudal máximo que soporta el secador sin sobrecarga. La capacidad del secador debe coincidir con la mayor entrega del compresor.

Entre los efectos negativos de una instalación de esta manera esta la imposibilidad de secar únicamente una porción de aire, ya que todo el aire comprimido generado pasará por el secador.

El punto donde la temperatura del aire comprimido es más alta es a la salida del compresor, por lo que el aire comprimido llegará a alta temperatura en la entrada del secador. Luego del tanque de almacenamiento la temperatura del aire comprimido es menor.

Se debe tomar medidas especiales en el caso de que operen compresores de pistón, ya que se deben amortiguar las pulsaciones fuertes que estos compresores generan y puedan afectar el desempeño del secador.

Figura 15. **Instalación del secador antes del tanque de almacenamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Visio 2010.

- Instalación del secador después del tanque de almacenamiento

De otra manera, la instalación puede ser con el tanque de almacenamiento antes del secador. Dando resultados positivos y negativos en la operación del secador y en el tratamiento del aire comprimido.

Entre los efectos positivos derivados de esta configuración de instalación son que el secador puede ser diseñado para flujos parciales, siendo posible el tratamiento del aire comprimido específicamente para determinada aplicación.

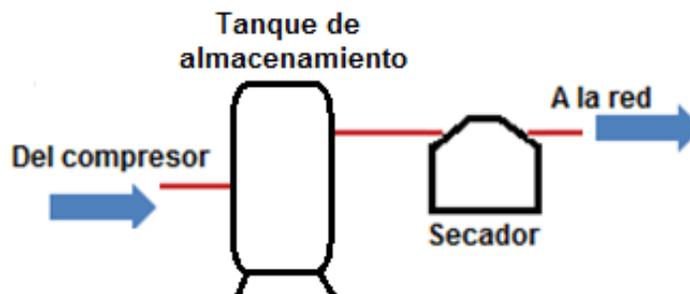
Además, la temperatura de entrada del aire comprimido es más baja en la entrada del secador si este tiene antes un tanque de almacenamiento, ya que la superficie del tanque hace una mayor área de transferencia de calor entre el exterior y el aire comprimido en el interior del tanque.

Otra de las ventajas es que, se tiene menor carga de humedad en el secador, pues aproximadamente el 70 % del condensado de mayor tamaño ya

es separado en el tanque de almacenamiento, que funciona similar a un separador ciclónico.<sup>17</sup>

Entre las desventajas de una instalación así, es que habrá condensado en el tanque de almacenamiento y este condensado debe ser evacuado constantemente para evitar problemas de corrosión interna del tanque y esto derive en mayores problemas de contaminación del aire comprimido. Otra desventaja es que el secador de aire puede ser sobrecargado si el aire comprimido es repentinamente excesivo en el tanque de almacenamiento.

Figura 16. **Instalación del secador después del tanque de almacenamiento**



Fuente: elaboración propia, con programa de Microsoft Visio 2010.

### **3.5.6.3. Efectos del material de la tubería en el sistema de tratamiento**

En la red de distribución, la textura interior del tubo determina las pérdidas por fricción. Las superficies rugosas causan un flujo turbulento, consecuentes

---

<sup>17</sup> Kaeser Compresores, Compress Air Seminar, p 289

caídas de presión y pérdida de energía. Entre más lisa sea la superficie interior del tubo menor pérdidas por fricción se tienen.

Una de las características que se deben considerar al seleccionar el material adecuado de la tubería está la resistencia a la corrosión. Existen materiales que químicamente son más vulnerables a reaccionar en la presencia de la humedad, tales como el hierro galvanizado, hierro negro; además hay tubería de otros materiales tales como el acero inoxidable, aluminio, cobre que tienen mayor resistencia a la corrosión. Sin embargo, la resistencia a la corrosión de las tuberías de acero no es mucho mejor que la del tubo de hierro negro.

La tubería de aluminio se perfila como la mejor opción, debido a que presenta menor índice de oxidación. Esta tiene un período de oxidación más prolongado, dando como resultado una superficie interna suave y lisa por más tiempo; permitiendo al flujo de aire comprimido un desplazamiento con menor resistencia. Además, la resistencia a la oxidación del aluminio complementa al sistema de tratamiento y hace más confiable el resultado en la calidad de aire requerido. Estas ventajas hacen que la tubería de aluminio sea una inversión a largo plazo.

Como consecuencia de la oxidación de la superficie interior de la tubería se reduce el diámetro interno, lo cual afecta directamente al flujo de aire que se conduce por la tubería. Esta situación incrementa la caída de presión entre un punto en la generación del aire comprimido y el punto de uso del aire comprimido. Esta oxidación contribuye a la aparición de puntos de fugas de aire, ya que las uniones son los puntos principales en donde se producen fugas.

#### **3.5.6.4. Pérdida de presión: pérdida de eficiencia**

Llevar un volumen de aire de presión atmosférica a una presión mayor que esta, requiere de energía. La energía es transferida del trabajo realizado por la unidad compresora hacia el aire, elevándolo de una presión menor a una presión mayor. Entre más grande sea la cantidad de energía que se necesite para elevar determinada presión menos eficiente es el proceso de compresión. Es por eso que el aire comprimido es una transformación de la energía; si se pierde la presión en el aire comprimido se está perdiendo energía eléctrica, la cual incrementa el costo de la generación del aire comprimido y por ende la producción.

Todo aquello que presente obstrucción o restricción causa resistencia al flujo del aire comprimido y crea una pérdida de presión en el sistema. Existen varios factores que pueden perjudicar al sistema creando pérdidas de presión.

Cada elementos del sistema de tratamiento cumple una función específica en la cual, según sea el elemento, reduce el nivel de contaminación del aire comprimido. Sin embargo, se debe considerar en el diseño del sistema de tratamiento, la pérdida de presión mínima que representa todo el tren de tratamiento y así calcular la presión requerida en el punto de uso.

Internamente en el filtro se encuentra ubicado el elemento filtrante, que es el medio en el cual a través de este fluye el aire comprimido y dependiendo del tamaño de partículas que este pueda retener, elimina la contaminación presente en el aire comprimido, luego el aire continúa fluyendo por la tubería.

En un determinado período el elemento filtrante se llega a saturar de contaminación, llegando a obstruir el flujo de aire comprimido; esta situación

crea una pérdida de presión. Es importante tener el control de los períodos de mantenimiento adecuados para cada elemento del sistema de tratamiento, y realizar el mantenimiento de estos oportunamente.

Otro de las causas por las que se puede perder presión en un sistema, es la mencionada en el título anterior: Efectos del material de la tubería en el sistema de tratamiento. Como consecuencia de la oxidación de la superficie interior de la tubería se reduce el área interna por donde puede fluir el aire comprimido, lo cual afecta directamente a la presión. Esto crea una mayor resistencia para el aire, perdiendo presión a lo largo del trayecto en la tubería de distribución.

Además del material de la tubería, es importante el diseño en la geometría de la tubería de la red de distribución. La geometría de esta tiene efecto sobre la pérdida de presión que se puede tener a lo largo de la red.

El área transversal de la tubería debe ser diseñada con base en el flujo de aire comprimido que va a circular por ahí; se debe considerar si la tubería es la línea principal o es una rama de distribución. Además se recomienda que se sobredimensione para que la sección transversal del tubo sea adecuada considerando futuro crecimiento en la demanda.

El largo total de la tubería es otra variable geométrica que también afecta a la pérdida de presión, entra más largo sea el trayecto de tubería para transportar el aire, más energía se utiliza.

Es por eso que se debe diseñar las dimensiones correctas de la tubería de distribución considerando la caída de presión mínima que se puede tener. Los accesorios instalados a lo largo de la red de distribución, tales como codos,

válvulas, tees y derivaciones, suman a la longitud equivalente total de la tubería, y además crean cierta obstrucción al flujo nominal del aire. Esta resistencia hace que el flujo pierda presión en cada accesorio por el cual pasa. Es esencial que los diámetros de los accesorios sean adecuadamente dimensionados para evitar las caídas excesivas de presión. No se deben instalar más accesorios que los mínimos necesarios para que funcione óptimamente el sistema de tratamiento y la red de distribución. La máxima caída de presión permisible en una red es menor o igual a 1,5 % de la presión de trabajo.<sup>18</sup>

### 3.5.7. Clases de calidad recomendada

Ahora que se conoce sobre los elementos que componen un sistema de tratamiento y la función que tienen y además se han desarrollado los criterios principales para elegir un sistema de aire comprimido, se recomienda una clase de calidad para los diez tipos de industria en Guatemala.

Esta recomendación de clase de calidad se hace en base al producto final en el cual se utiliza aire comprimido, esta recomendación es solo una referencia básica de tratamiento. La calidad de aire comprimido recomendada, en base a la Norma ISO 8573-1 se resume en la siguiente tabla.

Tabla VIII. **Clases de calidad recomendadas**

Tipo de Industria	Clase de Calidad		
	Vapor de Aceite	Polvo/partículas Sólidas	Humedad
Farmacéuticos y medicina	1	1	1
Caucho y plástico	2	2	4

<sup>18</sup> Kaeser Compresores, Compress Air Seminar, p 281.

Continuación de la tabla VIII

Tipo de Industria	Clase de Calidad		
	Vapor de Aceite	Polvo/partículas Sólidas	Humedad
Minerales no metálicos	5	4	4
Metales: hierro y acero	5	5	6
Productos de madera	2	3	4
Papel, imprenta	3	2	3
Productos textiles	3	3	4
Productos alimenticios	1	1	2
Elaboración de bebidas	1	1	2
Industria de construcción	4	5	4

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.7.1. Farmacéuticos y medicina

La industria de productos farmacéuticos y medicinales produce medicina que garantiza la calidad de vida. Desde las necesidades más básicas, como la salud y la higiene hasta aquéllas que permiten disfrutar de un mayor bienestar. Sin las aportaciones de esta industria, la esperanza de vida no sería alentadora para los seres humanos y es esta ciencia la que desarrolla y produce la mayoría de soluciones a la mayoría de las enfermedades.

La industria farmacéutica es una de las más delicadas y en la cual los procesos de producción requieren de la mayor calidad de aire comprimido tratado. Además, esta industria desarrolla productos para la ingesta de seres humanos.

Las principales características que se exigen en el aire comprimido para la industria farmacéutica son que el aire este limpio, seco y sin aceite. Trabajar con medicamentos delicados producidos a altas velocidades también requiere una operación y ciclos de trabajo, confiables e incesantes para proporcionar aire sin problemas a costos aceptables.

Se deben utilizar sistemas de tratamiento con los filtros más finos y así obtener la clase de calidad más alta posible; además se deben utilizar torres de carbón activado, secadores desecantes y filtros esterilizadores. En determinados casos especiales es recomendable utilizar un filtro esterilizante, instalado lo más cerca posible de la unidad consumidora. El sistema de tratamiento debe ser analizado y probado para garantizar el 100 % de calidad en el aire utilizado en los procesos de producción.

### **3.5.7.2. Industria del caucho y plástico**

La calidad de las materias primas debe someterse a varios controles de calidad. Norma internacionales especifican métodos para realizar análisis de humedad y de otros contenidos volátiles que se encuentran en el caucho o en el plástico sin tratar.

Extremadamente competitivo y altamente automatizado es el proceso en la industria del plástico, en donde la rapidez en la producción es elemental y un control de calidad estricto requiere que se utilice necesariamente un sistema de tratamiento que garantice un nivel de calidad 2, según la Norma ISO 8573-1, en partículas sólidas, al igual que en residuos de aceite.

Esta industria se basa en procesos químicos en los cuales realizan cambios de estado y de temperatura de los materiales, la contaminación

causaría deterioro del proceso y mala calidad del producto. Así al obtener aire tratado más puro y adecuado para la industria del caucho concuerda con el fin de producir productos fiables y de alta calidad.

### **3.5.7.3.      Minerales no metálicos**

En este tipo de industria no es necesaria la alta calidad del aire comprimido, pues según la Norma ISO 8573-1 solo es necesario el nivel mínimo de residuos de vapor de aceite, y una clase más en la calidad de filtros para partículas sólidas. El producto que esta industria fabrica, no es vulnerable a efectos de contaminación que le pueda transmitir el aire comprimido, utilizado en el proceso. En la industria de minerales no metálicos, en mayor proporción la producción de cementos y los derivados, son ambientes de trabajo muy hostiles y contaminados, por eso hay que utilizar un filtro de partículas grandes en la entrada o succión del compresor, sin embargo el aire comprimido en la salida contiene residuos de partículas sólidas menores y residuos de vapor de aceite del compresor siendo necesario la utilización de filtros para partículas sólidas. Sin embargo estas no afectan al producto final ni a la calidad de este.

### **3.5.7.4.      Metales: hierro y acero**

La producción de metales: hierro y acero es uno de los procesos donde menor calidad del aire comprimido se requiere en el proceso, por eso los sistemas de tratamiento son más sencillos y económicos que en otras industrias. No se rigen por altos parámetros de higiene en el proceso, ya que los contaminantes son insignificantes, no alteran el proceso. Es recomendable alcanzar niveles de clase 5 de la Norma ISO 8573-1 para los residuos de vapor de aceite y clase 5 también para las partículas de sólidos.

En la industria de metales, metalúrgica, se desarrollan procesos de transformación de metales a elevadas temperaturas, las cuales eliminan completamente los contaminantes adheridos al proceso por el aire comprimido.

#### **3.5.7.5. Productos de madera**

El tratamiento, la calidad y la confiabilidad en el aire del compresor son claves en toda operación con madera. Los fabricantes de equipo original, los fabricantes de muebles, operaciones de carpintería y una variedad de otros negocios de productos en madera reconocen que el aire comprimido y las bombas de vacío deben ser de alta calidad para funcionar. Es por eso que es recomendable alcanzar purezas clase 2 de la Norma ISO 8573-1 en residuos de aceite y de clase 3 en partículas sólidas. Las operaciones de descortezado prácticamente no producen aserrín, ya que el objetivo es dejar la madera intacta, pero sí es posible que el aire contenga tierra, cortezas y agentes biológicos en suspensión, tales como bacterias y hongos son aspirados por el compresor y necesitan ser filtrados.

#### **3.5.7.6. Papel e imprenta**

Para lograr un desempeño óptimo en las operaciones de aspersión, proceso utilizado en la industria de producción de papel y en la industria de imprenta, es necesario elegir las boquillas correctas junto con los correctos componentes del sistema de tratamiento adecuados así como establecer programas de inspección y mantenimiento.

La industria papelera usa aire comprimido sin partículas de aceite para la instrumentación, las operaciones de máquinas de papel, limpieza y las necesidades de aire de la planta en general. Es por eso que es recomendable

alcanzar purezas clase 1 de la Norma ISO 8573-1 en residuos de aceite y clase 3 en partículas sólidas. Si el sistema de aspersion no trabaja de manera adecuada, puede provocar problemas costosos como: problemas de control de calidad, paros de producción no programados, mayor tiempo de mantenimiento, incremento en el consumo de recursos.

#### **3.5.7.7. Productos textiles**

Tejeduría neumática y el hilado neumático son procedimientos que usan aire comprimido para recoger la inserción y consolidación de hilados. La mayoría de las empresas textiles dependen del aire comprimido para la producción, por eso es necesario mejorar el tratamiento del aire comprimido ya que tiene un beneficio económico significativo para la industria textil.

La contaminación por vapor de aceite, puede dar lugar a partidas enteras de producción o productos deteriorados, elevados índices de rechazo y devolución así como el tiempo perdido de producción dedicado a descontaminar el sistema de aire. Se recomienda alcanzar purezas clase 3 de la Norma ISO 8573-1 en residuos de aceite y clase 3 en partículas sólidas. Ya que los procedimientos de calidad no son muy rigurosos. Sin embargo, las industrias textiles que se arriesgan a que los productos se contaminen se pueden exponer a llamadas a revisión.

#### **3.5.7.8. Productos alimenticios**

Sin importar que se trate de una gran operación con materiales a granel o una pequeña panadería de especialidades, un constante suministro de aire de calidad sin aceite, ni agua, ni sarro de tuberías ni ningún otro tipo de contaminante resulta vital para toda planta de alimentos. Conseguir un aire

comprimido de alta calidad es extremadamente crítico cuando se trata de productos de alimentación, no solo desde el punto de vista del coste sino especialmente por que obligatoriamente deben ser productos seguros como alimento humano.

La industria de alimentos utiliza aire comprimido 100 % sin aceite para la instrumentación, las operaciones de máquinas, limpieza y las necesidades de aire de cualquier proceso de producción en la planta en general. Es por eso que es recomendable alcanzar purezas clase 1 de la Norma ISO 8573-1 en residuos de aceite y clase 1 en partículas sólidas.

#### **3.5.7.9. Elaboración de bebidas**

Independientemente de que el aire comprimido proviene entre contacto directo con el producto, o es usado para automatizar un proceso, proporciona fuente de energía, productos empaquetados, o incluso para generar otros gases en su lugar, un suministro de aire comprimido limpio, seco y fiable es esencial para mantener la calidad e higiene de la producción en niveles adecuados. Es por esto que el suministro de aire de calidad sin aceite, sin agua, sin sarro de tuberías, ni ningún otro tipo de contaminante resulta vital para toda planta de bebidas. Siendo este tipo de producción específicamente de consumo para los seres humanos, protegiendo la íntegramente la salud del consumidor ante cualquier tipo de contaminante involucrado.

Los sistemas de tratamiento deben ser diseñados de tal forma que presenten un rendimiento intransigente y confiado mientras que provén el equilibrio adecuado de calidad del aire con el menor costo de operación. Es por esta razón que el sistema de tratamiento de aire comprimido es esencial para todas las instalaciones modernas de producción de bebidas.

### **3.5.7.10. Industria de construcción**

En el área de la construcción y obra civil, la actividad que esta industria realiza, no es vulnerable a efectos de contaminación que le pueda transmitir el aire comprimido utilizado en el proceso.

En la industria de construcción, en mayor proporción la producción de cementos, derivados y pavimentos, son ambientes de producción muy hostiles y contaminados, por eso hay utilizar un filtro de partículas grandes en la entrada o succión del compresor. Es por eso que es recomendable alcanzar purezas clase 4 de la Norma ISO 8573-1 en residuos de aceite y clase 5 en partículas sólidas. Mientras que la humedad no afecta al proceso, únicamente a las instalaciones de la red de distribución o accesorios, sin embargo el tratamiento del aire comprimido utilizado es mínimo comparado con otros tipos de industria.



## **4. FASE DOCENCIA – APRENDIZAJE**

### **4.1. Planeación correcta de estaciones de aire comprimido**

Seleccionar los equipos correctos para una nueva estación de aire comprimido o para actualizar una ya existente es solo el primer paso. Estos deben estar combinados de manera tal que proporcione el mejor y más económico uso de las características. Hay una diferencia considerable en planificar o no la utilización de cada elemento en el sistema de aire comprimido.

Una estación de aire comprimido se debe planificar y no improvisar. Para el funcionamiento adecuado, se deben considerar las variables que afectan el desempeño de esta.

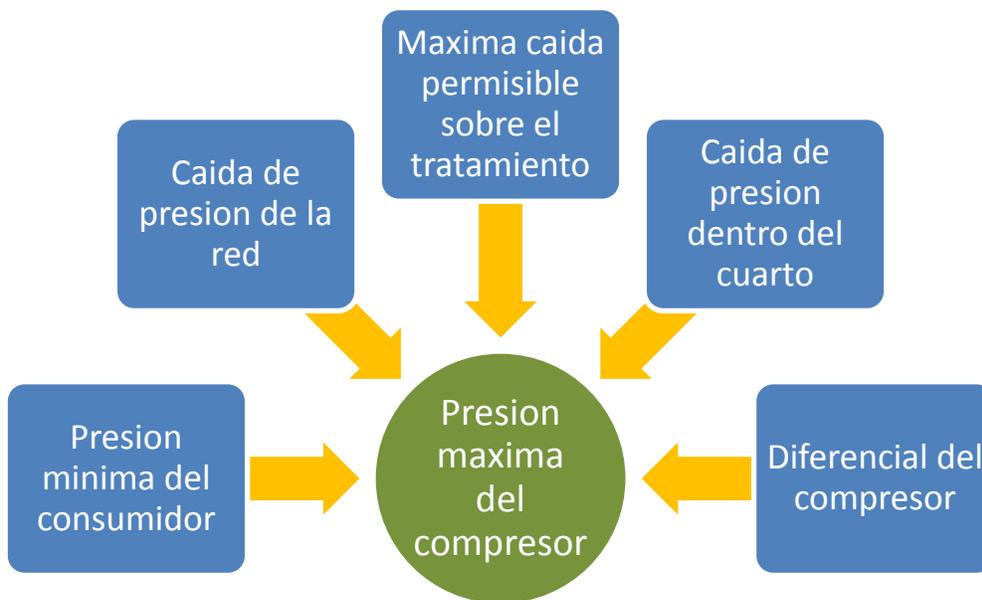
Si se planifica una nueva instalación sin los valores comparables de consumidores existentes, se debe planificar el sistema de aire comprimido con las especificaciones mínimas requeridas de los instrumentos y los equipos consumidores de aire comprimido que se van a usar. Los equipos similares pueden ser colocados en grupos y la exigencia total del grupo tomado con la consideración de factores de simultaneidad y utilización. Una de estas variables a considerar en la planificación es la presión mínima de trabajo del sistema.

#### **4.1.1. Estableciendo la presión**

En el proceso de planeación del sistema, se debe primero conocer y analizar la presión de trabajo a utilizar en el punto de uso; pues se deben considerar las caídas de presión ocasionadas por cada elemento del sistema de

aire comprimido, incluyendo la red de distribución. Estableciendo la presión máxima necesaria para que el sistema funcione sin ningún problema. La presión máxima del compresor será la suma de la presión mínima de trabajo en el punto de uso, más el diferencial del compresor, la caída de presión en la tubería dentro del cuarto de compresores, la máxima caída de presión permisible a través del sistema de tratamiento y la caída de presión en la red de distribución.

Figura 17. **Composición de presión máxima del compresor**



Fuente: elaboración propia.

Se debe poner atención específicamente en la caída de presión en el sistema de tratamiento del aire, pues algún aumento en esta diferencia de presión indicaría que hay un elemento del sistema de tratamiento con problema y esto puede repercutir en la calidad esperada del aire.

Los valores mínimos recomendados para estimar la caída de presión en el sistema de tratamiento, pueden variar según fabricante, son:

Tabla IX. **Caída de presión según elemento de tratamiento**

Elemento del sistema de tratamiento	Caída de presión mínima recomendada
Con secador refrigerativo	$\leq 0,2$ bar
Con secador desecante	$\leq 0,8$ bar
Con filtros de carbón activado	$\leq 0,6$ bar
Con filtros extrafinos	$\leq 0,6$ bar
Con filtros para partículas	$\leq 0,2$ bar
Con filtros para líquidos	$\leq 0,2$ bar

Fuente: elaboración propia.

Además, se debe conocer el consumo de aire total que se ha de utilizar en condiciones normales de operación, también es necesario determinar la presión mínima de trabajo de las unidades consumidoras. Entre menos presión sea necesaria, menor será el consumo de energía.

#### **4.1.2. Ventilación: consideraciones para la ventilación adecuada en el lugar del tratamiento**

Para poder planear la estación de compresores adecuados a la necesidad planteada por el consumidor se debe conocer ciertos datos de operación que se requieren del sistema de generación de aire comprimido. Uno de los parámetros indispensables es conocer el consumo de aire que la estación tendrá. De este cálculo se considera la necesidad de aire fresco de succión que necesita tener el cuarto de la instalación del sistema de aire comprimido.

Los compresores enfriados por aire requieren un flujo de aire de enfriamiento adecuado. La temperatura del cuarto de compresores no debe exceder de +40 grados centígrados.

En Guatemala, en especial en la Costa Sur, la temperatura puede llegar a ser elevada en ciertas épocas del año, más el calor generado por el equipo de generación y tratamiento de aire comprimido, sin una ventilación adecuada para la refrigeración de la estación de aire comprimido, se pueden presentar fallas en el funcionamiento del equipo, y afectar en la calidad del aire comprimido. Dependiendo de la cantidad y tamaño de los equipos, será necesario tener ventilación natural o ventilación forzada para la correcta refrigeración de la estación.

La ventilación natural podría ser suficiente en algunos casos, cuando la suma de la potencia de los motores eléctricos de los compresores y los equipos internos a la estación de aire comprimido no exceda de los 22 kW.<sup>19</sup>

Los compresores disipan al ambiente el 99 % del calor que producen, sin embargo los secadores refrigerativos disipan tres veces el consumo eléctrico que tienen en forma de calor al ambiente<sup>20</sup>.

Se debe tener cuidado con el flujo de calor que estos disipan y evitar dirigir este flujo de aire caliente hacia otro secador o a la succión de los compresores. Asimismo, se debe evitar que el flujo de aire caliente de los compresores se descargue sobre los secadores, elevando la temperatura de operación y afectando el desempeño de estos. En el diseño de la ventilación del cuarto se debe considerar esta situación.

---

<sup>19</sup> KAESER Compressed Air Seminar, p. 293.

<sup>20</sup> KAESER Compressed Air Seminar, p. 228.

Una mala ventilación en el cuarto, por ejemplo una puerta abierta, no garantiza en todos los casos la refrigeración de la estación de aire comprimido, si el aire fluye a través de la puerta toma la ruta más corta hacia la salida de aire sin fluir a través de los equipos.

La entrada de aire fresco debe ser siempre del lado donde la radiación solar no alumbra directamente, ya que el sol puede calentar la superficie de la entrada de aire, elevando la temperatura del aire de enfriamiento de la estación de aire comprimido.

En ocasiones donde la cantidad de calor generado por los equipos es tan grande que amerita la instalación de ventilación forzada en la estación de aire comprimido es a través de la ventilación forzada en la que el flujo de aire es controlado. La ventilación forzada se compone del cálculo e instalación adecuada de ventiladores y ductos, que en conjunto realizan la extracción y circulación efectiva del aire de enfriamiento a través del lugar.

La recirculación del aire de enfriamiento se da cuando el mismo flujo de aire que es extraído de alguna manera del lugar, es ingresado nuevamente por la ventilación de la estación o por la succión de los compresores cuando este es descargado cerca de la entrada de aire de enfriamiento de los compresores, formando un ciclo de recirculación. Se debe evitar esta situación, ya que de esta manera el aire va acumulando humedad y aumentando la temperatura, generando un ambiente no adecuado para el óptimo desempeño del equipo de aire comprimido.

La ventilación de la estación de aire comprimido puede ser diseñada con la instalación de ductos de extracción en compresores y en secadores refrigerativos. Con la ayuda de un conducto de escape, se expulsa el aire

caliente directamente al exterior de la estación. Normalmente, los ventiladores instalados de serie en la mayoría de compresores son suficientes para expulsar el aire.

En el caso de ductos para secadores, estos no deben estar apoyados directamente a la salida de aire caliente del secador. Los ductos para secadores deben ser en forma de campana de extracción, a una distancia prudencial de la salida.

Los ductos de extracción para secadores deben llevar un ventilador para que ayude al flujo de aire caliente a salir a través del ducto; ya que presión de salida del aire caliente del secador no es suficiente para que el aire sea expulsado directamente del ducto.

Los ductos deben ser diseñados lo más corto posibles. La velocidad del aire en los ductos debe ser lo más baja posible. Los ductos de extracción de aire siempre deben ser calculados y diseñados con un margen de seguridad.

Se debe planificar la ventilación óptima de la estación de aire comprimido y así evitar los efectos negativos que las altas temperaturas provocan en el sistema de tratamiento, por ejemplo que el proceso de secado no obtenga el punto de rocío adecuado, resultando en exceso de humedad y afectando también la calidad del aire comprimido.

#### **4.1.3. Almacenamiento: tamaño adecuado del tanque**

El volumen del tanque debe ser calculado según la demanda y el uso que el aire comprimido tenga, porque, si la demanda es alta y en intervalos continuos se necesita un tanque de gran capacidad, mientras en el caso

contrario, si las necesidades no exigen alta demanda y solo se requiere aire en intervalos cortos, entonces un tanque de capacidad reducida será el ideal, lo cual traería ahorro al cliente, pues no se gasta recursos económicos en equipo más costoso. A continuación se explican dos métodos de cálculo del volumen del tanque para aire comprimido.

- Volumen del tanque como amortiguador

Este método de medida es usado donde el volumen de la red de distribución es menor al 10 % del volumen del tanque receptor del aire comprimido.

El tanque de aire comprimido como amortiguador funciona de tal manera que mantiene constante la demanda de aire en la red de distribución a una presión adecuada durante cierto tiempo, luego de haber pasado este tiempo la presión se reduce pues es necesario volver a llenar el tanque de aire comprimido. El tanque se adapta a los cambios de demanda que el sistema pueda tener, manteniendo siempre la disponibilidad de aire comprimido aun cuando el sistema de generación de aire esta en vacío. El volumen adecuado para cada aplicación se calcula de la siguiente manera: es necesario conocer la demanda del aire que se requiere, el tiempo en el cual el tanque suministrará el aire a la presión adecuada, entre más tiempo se requiere que el tanque suministre aire, de mayor capacidad debe ser el tanque. Luego se establece el rango de caída de presión hasta la cual el tanque suministrará aire sin perjudicar el proceso final en el cual se esté utilizando el aire comprimido.

$$\text{Volumen del tanque} = \frac{\text{demanda de aire} \times \text{tiempo de almacenamiento}}{\text{caída de presión en el tanque}}$$

- Volumen del tanque dependiendo de la frecuencia de arranque

Tener el tamaño adecuado de almacenamiento significa ahorro para el sistema de aire comprimido, ya que entre más almacenamiento se tenga más tiempo podrá estar el compresor apagado, generando un ahorro en la energía que el compresor consumiera si este debiera estar encendido durante ese tiempo en el cual el tanque está suministrando el aire a la demanda requerida. El período en el cual el tanque suministra efectivamente aire se ve limitado por varios factores. Uno de los cuales es la presión a la cual el aire está almacenado. Ya que en varios de los procesos en los cuales se requiere aire comprimido como fuente de energía, existe equipos y maquinas neumáticas las cuales necesitan una presión mínima de trabajo para poder operar. Es por eso que cuando se demanda aire comprimido del tanque de almacenamiento este lo estará suministrando al mismo tiempo que la presión del aire interno al tanque de almacenamiento está bajando, pues se está liberando aire comprimido a las maquinas neumáticas, una vez este aire ya no tenga la presión adecuada, es necesario volver a activar los compresores. La siguiente ecuación determina el volumen del tanque por este método.

$$V_b = \frac{V \times (A - A^2)}{Z \times \Delta p}$$

$V_b$  = volumen del tanque en [m<sup>3</sup>]

$V$  = caudal de aire en [m<sup>3</sup>/h]

$\Delta p$  = diferencial de presión en [bar]

$A$  = factor de utilización =  $\frac{V_2}{V_1}$  (si  $V_2$  no es conocido o fluctúa:  $A=0.5$ )

$Z$  = frecuencia permisible del compresor conectado en operación continua o el número de arranques del motor en caso de control *on/off*.

$V_1$  = entrega del compresor en [m<sup>3</sup>/h]

$V_2$  = demanda de aire de la operación en [m<sup>3</sup>/h]

## **4.2. Gestión correcta del sistema de aire comprimido**

Utilizar aire comprimido para cualquier proceso requiere inversión de recursos generando costos para las empresas. El sistema de aire comprimido debe funcionar de manera óptima desde la generación hasta el tratamiento, cuidando todos los detalles de este.

Es importante para la gestión de un sistema de aire comprimido saber los costos energéticos que este representa, además se debe tener claro que un sistema de aire comprimido siempre se puede mejorar en algún punto.

### **4.2.1. Costos energéticos para la generación de aire comprimido**

El factor económico es un parámetro importante para la toma de decisiones en la realización de un proyecto de aire comprimido.

Un dato importante para realizar el cálculo de los costos de generación de aire comprimido es conocer cuál es la tarifa por consumo de energía eléctrica, el kWh. Un valor aproximado promedio para la industria en Guatemala, es entre \$0,15 a \$0,22. Este valor indica el costo por unidad de energía, en watts-hora, que los compresores utilizan para el funcionamiento.

Primero, es necesario conocer la energía específica que tienen los compresores del sistema de generación. La energía específica del sistema, descrita en el capítulo tres, descripción de variables técnicas; es la relación entre el consumo de potencia total y la demanda total de aire entregada por el sistema de generación, indica una medida de eficiencia tomada en cuenta en el cálculo de los costos de energía en generación de aire comprimido.

- Cálculo de la energía específica

La energía específica es un índice de eficiencia, que indica la energía necesaria por cada unidad de caudal, volumen en el tiempo, de aire producido.

Los datos requeridos para el cálculo son:

- Consumo total de potencia eléctrica, [kW]
- Entrega efectiva total de aire, [ $\frac{m^3}{min}$ ]

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Consumo total de potencia eléctrica}}{\text{Entrega efectiva total de aire}}$$

- Cálculo de costo energético por año

El costo energético que un sistema de generación de aire comprimido requiere para el funcionamiento, está dado por la multiplicación de todos los parámetros que afectan el costo de energía por año directamente para la generación de aire comprimido.

Para este cálculo es importante que se conozca la cantidad de horas que trabajan al día y la cantidad de días al año que se utilizan los compresores para generar aire comprimido. También afecta al cálculo del costo de la energía, la energía específica previamente calculada, pues un compresor con mala eficiencia tienen una energía específica alta lo cual afecta directamente en el costo de energía eléctrica que el sistema requiere para la generación de aire comprimido.

Los datos requeridos para el cálculo son los siguientes:

- Energía específica
- Demanda de aire
- Días de trabajo al año
- Horas de trabajo al día
- Precio de energía por kWh

El cálculo del costo energético por año se indica a continuación con las respectivas unidades.

$$\begin{aligned} & \text{Energía específica, } \left[ \frac{\text{kW}}{\frac{\text{m}^3}{\text{min}}} \right] \times \text{demanda de aire, } \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \dots \\ & \dots \times \text{días de trabajo al año, } \frac{\text{día}}{\text{año}} \times \text{horas de trabajo al día, } \frac{\text{h}}{\text{día}} \dots \\ & \dots \times \text{precio de energía, } \frac{\$}{\text{kWh}} = \text{costo de energía por año, } \left[ \frac{\$}{\text{año}} \right] \end{aligned}$$

#### **4.2.2. Puntos de posible mejora en sistemas de aire comprimido**

En todo sistema de aire comprimido siempre existe alguna posibilidad de mejorar algunos aspectos en la instalación, para buscar que el sistema de aire comprimido trabaje de la mejor manera posible. Una instalación óptima es aquella que cumple con todos los requisitos para que en ella se genere el mayor aprovechamiento de energía posible.

A continuación se exponen ciertas recomendaciones, ordenadas por áreas desde la generación hasta el punto del uso, con las cuales se puede obtener alguna posible mejora en los sistemas de aire comprimido.

- Generación

Es importante tener en la base de la instalación del compresor montajes antivibración, para evitar que los cimientos sufran grietas y fallas ocasionadas por la vibración de los compresores. Tener en el cuarto de compresores la cimentación adecuada para el peso de todo el equipo que soporta, normalmente el grosor de la cimentación es de 10 cm la cual puede variar según el peso neto.

Se debe instalar manguera para alta presión a la salida del compresor, ya que esta previene la transmisión de vibración hacia la tubería de distribución.

Mantener control en la temperatura ambiente del cuarto de compresores ya que por cada 4 °C más de temperatura del aire de admisión se incrementa el consumo energético en 1 %. Cuando los compresores succionan aire más frío, el cual es más denso, utilizan menos energía para elevarlo a la presión de trabajo requerida.

Analizar el lado de la generación del sistema, los tipos de compresores utilizados y ver si los controles y parámetros de operación fijados son los adecuados, así como las demás condiciones de operación. Es importante familiarizarse con las capacidades básicas del sistema y los modos de operación.

Tener control de la presión en diferentes puntos del sistema de aire comprimido, instalar manómetros, además es importante saber que por cada 2 psi de incremento en la presión en generación representa un incremento en 1% el consumo de energía del sistema.

En la instalación correcta de los compresores, el flujo de aire no debe arrojar calor de un compresor a otro. El cuarto de compresores debe tener la ventilación adecuada, para tener la temperatura de operación a la cual el sistema opera de manera óptima.

- Tratamiento del aire

Instalar los compresores en un cuarto seco, libre de polvo y contaminantes, y así tratar de evitar que la contaminación más severa llegue a la succión de aire del compresor. La temperatura ambiente donde está el cuarto no debe ser menor a +3 °C, ya que afectara en el proceso del secador refrigerativo, produciendo efectos negativos para el sistema de aire comprimido.

Importante realizar periódicamente revisión y mantenimiento a los filtros, ya que los filtros sucios o tapados ocasionan que la presión de succión baje considerablemente y que el compresor tenga que utilizar más energía para alcanzar la presión de trabajo. Por esto, mantener libres de polvo y suciedad los filtros de aire de admisión para evitar la caída de presión que se produce al restringir la entrada de aire al compresor.

En el sistema de tratamiento los secadores y filtros no deben tener *bypass*, si se quiere garantizar la calidad del aire. Si se instala *bypass*, este debe ser instalado de forma alterna a la línea principal, es decir el elemento filtrante o el secador debe ir en línea recta a la red, mientras que el *bypass* debe ser una desviación a la red principal, esto es porque el *bypass* se utilizara de manera casual y el elemento filtrante o secador de manera continua y no debe presentar caídas de presión por accesorios extras como codos, reducciones, válvulas y tees.

- Almacenamiento

Tener el tamaño adecuado del tanque de almacenamiento, calculado según lo explicado anteriormente, hace que el sistema de aire comprimido funcione de mejor manera.

Respecto al tratamiento del aire comprimido, en el almacenamiento se debe eliminar el exceso de humedad en el aire comprimido, drenando continuamente el condensado recolectado en el tanque, o instalar válvulas drenadoras automáticas en puntos de recolección de condensado.

Además, se debe evitar tener los tanques de almacenamiento apartados de los rayos del sol directamente, y a las temperaturas altas, pues el calor ocasiona que el condensado se evapore y se incorpore nuevamente al flujo del aire comprimido. Estando expuesto al sol, el aire comprimido puede aumentar considerablemente en temperatura.

Es importante para la seguridad en el cuarto de compresores, que se instalen dispositivos de control y protección para evitar sobrepresiones en los tanques de almacenamiento del sistema. Es recomendable revisar constantemente todos los dispositivos de seguridad, tales como válvulas de seguridad.

Finalmente es recomendable realizar continuamente limpieza interna a los tanques de almacenamiento e inspeccionar posibles grietas en la superficie de estos. Es más importante hacer esto, si los tanques son de hierro, la humedad ha ocasionado corrosión en estos y tienen bastante tiempo de uso.

- Distribución

Instalar en la red de distribución tomas por la parte de arriba de la tubería principal en las bajadas de aire comprimido hacia las máquinas neumáticas conectadas a la red.

La tubería de la red de distribución debe tener determinada inclinación hacia un lado para que el condensado fluya para ese lado y así instalar una válvula drenadora en ese punto.

Conozca todos los usos de aire comprimido de la demanda del sistema, las especificaciones de consumo de aire de los equipos son una buena fuente de datos para obtener los valores del volumen de aire. Además, es importante identificar con los usuarios los usos inadecuados del aire comprimido, ya que en ciertas plantas se utiliza para procesos de limpieza no permitidos.

Es recomendable elaborar un diagrama del sistema de aire comprimido de la planta que incluya compresores, líneas de suministro con las dimensiones y los usos finales, para tener una vista general del proceso completo.

Periódicamente revisar cuidadosamente el sistema de distribución en busca de problemas, como: diámetros de tubería muy pequeños, que estrechen el flujo de aire comprimido, pérdidas de presión, capacidad de almacenamiento, óxido que dañe la superficie externa y provoque fugas de aire y mal drenaje de agua condensada.

Verifique que todas las válvulas drenadoras funcionan correctamente, ya que el drenaje inadecuado de los condensados aumenta la presión a través del sistema de distribución.



## CONCLUSIONES

1. Se determina que la falta de sistemas de tratamiento en la utilización de aire comprimido, puede resultar en efectos negativos como caídas de presión excesivas, reducción del diámetro interior de la red de distribución, fallas en las herramientas y equipos neumáticos; que restan eficiencia, funcionalidad y aumenta los costos en un sistema de aire comprimido en la industria de Guatemala.
2. La contaminación en el aire comprimido perjudica el resultado y la calidad de los productos en los cuales se utiliza aire comprimido, haciendo que se pierdan grandes cantidades de producción de las empresas.
3. Las aplicaciones industriales en las cuales el aire comprimido tiene contacto con las personas, son las que necesitan de sistemas de tratamiento de aire más críticas. Aumentando la fiabilidad en la calidad del aire comprimido.
4. La clasificación de industrias en Guatemala, en diez tipos de industria desarrollados en este trabajo, incluyen la mayoría de aplicaciones del aire comprimido en la industria de Guatemala. Facilitando la selección de sistemas de tratamiento según la aplicación.

5. La importancia de planear y gestionar los sistemas de aire comprimido resulta en obtener el funcionamiento óptimo de estos. Ya que un sistema de aire comprimido es mucho más eficiente si los componentes están correctamente dimensionados y diseñados para la aplicación determinada.
  
6. La Norma ISO 8573-1 es un conjunto de documentos que especifica la cantidad de contaminación máxima permitida en un volumen de aire comprimido según la calidad que se requiera.
  
7. El propósito de la Norma ISO 8573-1 es proporcionar a los usuarios de aire comprimido las directrices sobre las especificaciones más estrictas de calidad del aire para aplicaciones críticas de aire comprimido.

## RECOMENDACIONES

1. A las empresas que utilicen aire comprimido en los procesos de producción, para que consideren seriamente implementar sistemas de tratamiento para el aire comprimido, a manera de reducir y evitar inconvenientes producidos por la contaminación del aire comprimido, y así incrementar la eficiencia del sistema de aire comprimido y productividad de la empresa.
2. A Kaeser Compresores de Guatemala continuar aplicando los criterios y fundamentos del aire comprimido en el diseño de las estaciones de aire comprimido, continuar con la excelente asesoría que hasta ahora se ha hecho con los clientes y así seguir obteniendo buenos resultados.
3. A las empresas industriales que no estén contenidas en ninguna de los tipos de industria descritos en el presente trabajo, se les recomienda que apliquen los criterios de selección de sistemas de tratamiento para el aire comprimido, que se asemejen más al tipo de producto y aplicación para el cual será útil el aire comprimido.
4. A los gerentes de producción, mantenimiento u otras personas que estén a cargo de los sistemas de aire comprimido, se les recomiendan que se informen sobre los períodos de mantenimiento de cada uno de los elementos del sistema de tratamiento de aire comprimido, y además realicen los mantenimientos oportunamente para que estos no afecten negativamente al desempeño del sistema de aire comprimido.

5. A las empresas industriales que utilicen aire comprimido hospitalario, o para la producción de alimentos, bebidas o algún otro tipo de producto que requiera alta calidad de aire, para que apliquen los sistemas de tratamiento de aire más rigurosos para proteger a los consumidores de ingerir algún tipo de contaminación en el aire comprimido.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Compress air and gas institute. *The Compressed Air and Gas Handbook*. 6a ed. [en línea]. <<http://www.cagi.org/education/handbook.aspx>>. [Consulta: abril de 2013].
2. International Standart Organization ISO. *International Standard ISO-8573*. [en línea]. 2a ed. 2007. <[http://www.vfautomatika.hu/adatlap/parker/fil/iso\\_air\\_quality\\_standards.pdf](http://www.vfautomatika.hu/adatlap/parker/fil/iso_air_quality_standards.pdf)>. [Consulta: diciembre de 2013].
3. Kaeser Compresores. *Técnica de aire comprimido: fundamentos básicos, consejos y sugerencias*. [en línea] <<http://pdf.directindustry.es/pdf/kaeser-4742.html>>. [Consulta: mayo de 2013].
4. Kaeser Compressors. *Compressed Air Filters*, [en línea]. [Coburg, Alemania]. <<http://www.kaeser.fr/Images/P-725-FR-tcm13-6771.pdf>>. [Consulta: diciembre de 2013].
5. Kaeser Compressors. *Technical file: Compress Air Treatment*. Coburg: Alemania, 2008. 80 p.
6. , *Compressed air seminar handbook*, Coburg, 2013. 310 p.

7. NAVARRETE, Pablo. *Fortaleciendo el negocio de compresores libres de aceite.* [en línea]. <[www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=753&edi=42](http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=753&edi=42)>. [Consulta: octubre de 2013].
8. Norgren. *La guía Norgren para el Tratamiento del aire.* [en línea]. <[resources.norgren.com/document\\_resources.pdf](http://resources.norgren.com/document_resources.pdf)>. [Consulta: agosto de 2013].
9. Organización de las Naciones Unidas. *Clasificación industrial internacional uniforme de todas las actividades económicas (CIIU)*, 4a ed. New York. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales, División de Estadística, 2006. 328 p.
10. RYAN, Dan. *ISO 8573-1 Contaminants and Purity Classes.* Parker Hannifin. Compressed air best practices. [en línea]. <[www.airbestpractices.com/standards/iso-and-cagi/iso-85731-contaminants-and-purity-classes](http://www.airbestpractices.com/standards/iso-and-cagi/iso-85731-contaminants-and-purity-classes)>. [Consulta: octubre de 2013].
11. SCALES W, Mc CULLOCH D. *Best practices for compressed air systems.* Washington D.C.: The Compressed Air Challenge, Inc., 2003. 123 p.
12. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la República de Guatemala*, 2013. 58 p.

## ANEXOS

### 1. Sitios de interés

- ARCHER de la Vega, Henry. *Problemas más frecuentes en la industria manufacturera guatemalteca como consecuencia del inadecuado mantenimiento en compresores de aire de tornillo y propuesta para la disminución de los mismos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica. Guatemala, 2009. 161 p.
- HERNÁNDEZ Sampieri R. *Metodología de la Investigación*. Fernández Colado C., Baptista Lucio M. 5a ed. México: McGraw-Hill. 2010.
- Kaeser Compressors. *Compressed Air Treatment Guide: How to Select the Right Equipment for Your Application*. [en línea]. Disponible en web: <[http://us.kaeser.com/Advisor/Educational\\_Aids/default.asp](http://us.kaeser.com/Advisor/Educational_Aids/default.asp)>.
- Kaeser Compressor. *Designing Your Compressed Air System: How to Determine the System You Need*. [en línea]. Disponible en web: <[http://us.kaeser.com/Advisor/Educational\\_Aids/default.asp](http://us.kaeser.com/Advisor/Educational_Aids/default.asp)>.
- [www.gates.com.mx/pdf/DISTRIBUCION\\_DE\\_AIRE\\_No1.pdf](http://www.gates.com.mx/pdf/DISTRIBUCION_DE_AIRE_No1.pdf).
- [http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3992/5/Consejos\\_aire\\_comp.pdf](http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/3992/5/Consejos_aire_comp.pdf).

- <http://www.airbestpractices.com> – mejores prácticas en aire comprimido.
- <http://pdf.directindustry.es/pdf/kaeser-4742.html>.
- [http://us.kaeser.com/Advisor/additional\\_training/default.asp](http://us.kaeser.com/Advisor/additional_training/default.asp).