



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

**PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y  
DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE  
NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S. A.**

**Edgar Vinicio Gómez Gómez**

Asesorado por el Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y  
DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE  
NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S. A.**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDGAR VINICIO GÓMEZ GÓMEZ**

ASESORADO POR EL ING. ÁLVARO ANTONIO ÁVILA PINZÓN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Raúl Guillermo Izaguirre Noriega
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
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:

### **PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S. A.**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 2 de abril de 2014.



**Edgar Vinicio Gómez Gómez**



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

Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.El.Mecánica 314.2014  
Guatemala 20 de noviembre de 2014

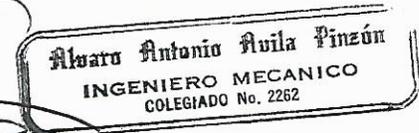
Ingeniero  
**Julio Cesar Campos Paiz**  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Pérez:

Es un gusto saludarlo y al mismo tiempo informarle que ha finalizado la etapa de asesoría del trabajo de graduación titulado PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S.A. Realizado por el estudiante **Edgar Vinicio Gómez Gómez**, considerando que cumple con el contenido y objetivos propuestos en el protocolo aprobado por la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Atentamente,

*Id y Enseñad a Todos*



**MA. Ing. Álvaro Antonio Avila Pinzón**  
**No. De Colegiado 2262**  
**Asesor de Trabajo de Graduación**



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.001.2015

El Coordinador del Área de Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S.A.** Del estudiante **Edgar Vinicio Gómez Gómez.**, recomienda su aprobación.

*"Id y Enseñad a Todos"*



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador del Área de Complementaria  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, enero de 2015.



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.Mecanica.60.2015

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 Asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Complementaria, del trabajo de graduación titulado **PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI, S.A.** del estudiante **Edgar Vinicio Gómez Gómez**, procede a la autorización del mismo.

*"Id y Enseñad a Todos"*

MA. Ing. Julio César Campos Paiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica

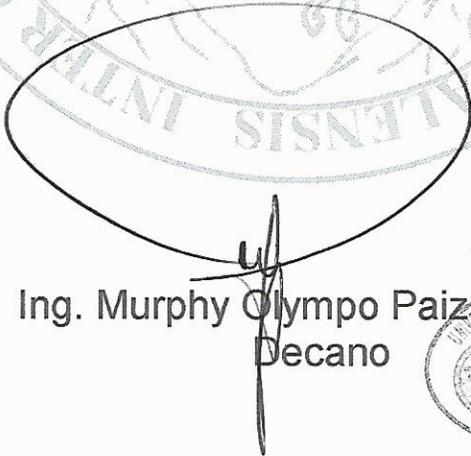


Guatemala, febrero de 2015



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: **PROPUESTA DE MEJORA DEL SISTEMA DE GENERACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO EN LAS INSTALACIONES DE NATURAL SOAP COSMETICS INTERNATIONAL, NSCI,S.A.**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Vinicio Gómez Gómez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, febrero de 2015

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por regalarme el don de la vida y de la sabiduría, por ser la fuente de mi inspiración y mi fortaleza en los momentos difíciles, por guiarme a lo largo de mi carrera y por ayudarme a llegar al fin de una meta más en mi vida.

### **Mis padres**

Adelaido Gómez Matzúl y María Leandra Gómez Xicay de Gómez, por su amor, sus sabios consejos, su esfuerzo para darme la oportunidad de tener una excelente educación y por su apoyo incondicional.

### **Mis hermanos**

Josefina, Rosa, Beatriz, Florinda, Lidia, Fredy, Doris Gómez Gómez, por su apoyo incondicional.

### **Mis sobrinos**

Por ser parte de mi inspiración para salir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por acogerme en sus instalaciones y permitirme ser parte de los estudiantes sancarlistas para formarme profesionalmente.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por darme la oportunidad de adquirir los conocimientos del ramo ingenieril para mi superación.
<b>Ing. Álvaro Ávila</b>	Por apoyarme en la asesoría para la realización de mi trabajo de graduación.
<b>Mis maestros</b>	Por formarme como profesional con sus enseñanzas y experiencias compartidas.
<b>Mis compañeros</b>	Por su tiempo y las experiencias compartidas
<b>Mis familiares y personas en general</b>	Por los consejos y apoyo que de alguna manera me brindaron.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. INFORMACIÓN DE LA EMPRESA .....	1
1.1. Misión .....	3
1.2. Visión.....	3
1.3. Descripción de los procesos de producción .....	4
1.3.1. Proceso de producción en la planta de jabón en barra .....	4
1.3.2. Proceso de producción en la planta de jabón transparente.....	5
1.3.3. Proceso de producción en la planta de jabón líquido .....	6
1.4. Información general del sistema de aire comprimido actual .....	7
2. ANTECEDENTES .....	9
2.1. Introducción .....	9
2.1.1. Ventajas del aire comprimido.....	10
2.1.2. Desventajas del aire comprimido .....	11
2.2. Generación de aire comprimido.....	11
2.3. Almacenamiento del aire comprimido.....	12

2.4.	Tratamiento del aire comprimido .....	14
2.4.1.	Norma ISO 8573-1: 2010 .....	14
2.4.2.	¿Por qué se debe tratar el aire comprimido? .....	15
2.4.3.	Tratamiento del aire comprimido a la salida del compresor .....	17
2.4.3.1.	Postenfriador de agua .....	17
2.4.3.2.	Postenfriador de aire .....	18
2.4.3.3.	Secadores .....	18
	2.4.3.3.1. Secado por absorción ...	20
	2.4.3.3.2. Secador frigorífico .....	21
	2.4.3.3.3. Secador por adsorción.....	23
2.4.4.	Tratamiento del aire comprimido en la red de distribución .....	25
2.4.4.1.	Secador .....	25
2.4.4.2.	Separadores.....	25
2.4.4.3.	Filtros.....	25
2.4.4.4.	Purgadores.....	26
2.4.5.	Tratamiento del aire comprimido en los puntos de consumo.....	27
2.4.5.1.	El filtro .....	27
2.4.5.2.	El regulador de presión .....	28
2.4.5.3.	El lubricador .....	29
2.5.	Red de distribución de aire comprimido .....	29
2.5.1.	Presión .....	30
2.5.2.	Caudal.....	30
2.5.3.	Pérdida de presión .....	30
2.5.4.	Velocidad de circulación.....	31
2.5.5.	Red abierta.....	31

2.5.6.	Red cerrada .....	32
2.5.7.	Red interconectada o mixta .....	33
2.6.	Requerimientos de una red de aire comprimido .....	35
2.6.1.	Línea principal de aire .....	35
2.6.2.	Línea de distribución.....	35
2.6.3.	Línea de alimentación de consumo .....	36
2.6.4.	Accesorios .....	36
2.6.5.	Manómetros de presión .....	36
2.6.6.	Separadores .....	36
2.6.7.	Purgadores .....	36
2.6.8.	Unidad de mantenimiento.....	37
2.7.	Distribución de aire comprimido .....	37
3.	CLASIFICACIÓN DE LOS COMPRESORES.....	39
3.1.	Compresores de flujo intermitente o de desplazamiento positivo .....	39
3.1.1.	Compresores alternativos .....	39
3.1.1.1.	Compresores alternativos de émbolo ..	39
3.1.1.2.	Compresores alternativos de membrana.....	41
3.1.2.	Compresores rotativos.....	42
3.1.2.1.	Compresor rotativo de paletas.....	42
3.1.2.2.	Compresor rotativo de lóbulos.....	43
3.1.2.3.	Compresor rotativo de tornillos .....	44
3.1.2.4.	Compresor rotativo de pistón líquido ...	45
3.2.	Compresores de flujo continuo o dinámicos .....	47
3.2.1.	Compresores de flujo radial (centrífugos).....	47
3.2.2.	Compresores de flujo axial .....	48
3.2.3.	Compresores de flujo mixto .....	49

4.	DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL .....	51
4.1.	Planteamiento del problema.....	51
4.2.	Circuito de aire comprimido actual .....	54
4.3.	Descripción del compresor actual .....	54
4.4.	Costos de generación del sistema actual.....	56
5.	SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	63
5.1.	Selección del compresor.....	63
5.1.1.	Calidad del aire .....	63
5.1.2.	Presión .....	65
5.1.2.1.	Presión relativa.....	66
5.1.2.2.	Presión absoluta.....	66
5.1.2.3.	Presión de trabajo en NSCI.....	67
5.1.3.	Caudal.....	67
5.1.4.	Determinando la demanda de aire .....	68
5.1.4.1.	Se determina el número de consumidores por departamento de producción.....	68
5.1.4.2.	Consumo de aire por equipo .....	69
5.1.4.3.	Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Sólido .....	76
5.1.4.4.	Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Transparente y Departamento de Productos Cosméticos.....	78
5.1.4.5.	Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Líquido ....	79
5.1.5.	Grado de utilización.....	81
5.1.6.	Factor de concurrencia.....	81

5.1.7.	Tolerancia para fugas .....	82
5.1.8.	Tolerancia para expansiones de la red .....	82
5.2.	Descripción del compresor seleccionado .....	84
5.3.	Instalación del compresor seleccionado .....	85
5.4.	Selección del postenfriador .....	85
5.5.	Selección del secador de aire.....	85
5.6.	Selección del depósito de aire comprimido .....	85
5.7.	Selección de filtros y trampas de agua y aceite.....	87
5.8.	Circuito de aire comprimido mejorado propuesto .....	87
6.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	89
6.1.	Análisis con el sistema actual (1 compresor).....	89
6.1.1.	Costos de generación con el sistema actual .....	89
6.1.2.	Costos de mantenimiento .....	91
6.1.3.	Costo por fugas en el sistema .....	91
6.1.4.	Costo de horas extras.....	93
6.1.5.	Resumen de costos .....	94
6.2.	Análisis con el sistema mejorado (3 compresores en paralelo).....	94
6.2.1.	Costo de adquisición del equipo .....	94
6.2.2.	Costo de generación con tres compresores en paralelo.....	96
6.2.3.	Costo de mantenimiento de los compresores.....	98
6.2.4.	Resumen de costos .....	99
6.3.	Comparación costo-beneficio con ambos sistemas.....	99
	CONCLUSIONES .....	103
	RECOMENDACIONES.....	105
	BIBLIOGRAFÍA.....	107



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Postenfriador de agua .....	17
2.	Postenfriador de aire .....	18
3.	Secador por absorción .....	21
4.	Principio de funcionamiento del secador frigorífico .....	22
5.	Secador por adsorción .....	23
6.	Filtro.....	26
7.	Purgador automático .....	27
8.	Regulador de presión .....	28
9.	Lubricador .....	29
10.	Red de aire comprimido tipo abierta.....	32
11.	Red de aire comprimido tipo cerrada .....	33
12.	Red de aire comprimido tipo mixta .....	34
13.	Aspiración y compresión del compresor alternativo de émbolo .....	40
14.	Compresor de membrana .....	41
15.	Compresor rotativo de paletas .....	43
16.	Diagrama de funcionamiento del compresor de lóbulos.....	44
17.	Compresor rotativo de tornillos .....	45
18.	Compresor de anillo o pistón líquido .....	46
19.	Corte isométrico del compresor de flujo radial .....	48
20.	Compresor de flujo axial.....	49
21.	Compresor de flujo mixto .....	50
22.	Diagrama del sistema de aire comprimido actual.....	54
23.	Medición de la presión .....	57

24.	Gráfica de calidad y tratamiento del aire comprimido .....	64
25.	Medición de la presión .....	70
26.	Demanda de aire del sistema actual.....	71
27.	Consumo de energía del sistema de aire actual.....	72
28.	Entrega de aire y presión del sistema día a día .....	73
29.	Demanda de aire y consumo de energía del sistema actual .....	74
30.	Límite de uso de compresores.....	84
31.	Sistema de aire comprimido mejorado.....	88
32.	Presión de aire en la generación .....	93

## TABLAS

I.	Métodos de secado del aire comprimido .....	19
II.	Comparación entre los tipos de sistemas de secado.....	24
III.	Características técnicas del compresor actual.....	55
IV.	Resumen de costos .....	58
V.	Costo de generación promedio anual .....	59
VI.	Costo de generación máximo anual.....	60
VII.	Costo de generación real anual .....	60
VIII.	Equivalencia entre las unidades de presión.....	66
IX.	Maquinaria del Departamento de Jabón en Barra .....	68
X.	Maquinaria del Departamento de Jabón Líquido .....	68
XI.	Consumo de aire de la maquinaria de la línea 1 .....	76
XII.	Consumo de aire de la maquinaria de la línea 2.....	77
XIII.	Consumo de aire de la maquinaria de la línea 4.....	78
XIV.	Consumo de aire del equipo .....	79
XV.	Consumo de aire por equipo.....	79
XVI.	Factor de simultaneidad.....	81
XVII.	Costos de generación con el compresor actual .....	90

XVIII.	Costos de mantenimiento del compresor actual .....	91
XIX.	Costo por fugas de aire comprimido en el sistema .....	92
XX.	Resumen de costos con el sistema actual .....	94
XXI.	Costo de adquisición de los compresores.....	95
XXII.	Costo del tanque de almacenamiento de aire .....	95
XXIII.	Costo del secador de aire .....	95
XXIV.	Costo de tubería y accesorios.....	95
XXV.	Costos de generación .....	96
XXVI.	Costo por mantenimiento de los 3 compresores .....	98
XXVII.	Resumen de costos con el sistema mejorado propuesto .....	99
XXVIII.	Ahorro de energía con el sistema mejorado propuesto.....	101
XXIX.	Comparación económica entre ambos sistemas.....	102



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CV</b>	Caballo de vapor
<b>cgc</b>	Capacidad de generación del compresor en pie <sup>3</sup> /min
<b>Q</b>	Caudal
<b>ca</b>	Corriente alterna
<b>cfm</b>	<i>Cubic feet minute</i> , pies cúbicos por minuto
<b>dB</b>	Decibel
<b>Y/Δ</b>	Estrella-delta
<b>GPa</b>	Giga pascal
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>Hz</b>	Hertzios
<b>hp</b>	<i>Horse power</i> , caballos de potencia
<b>kPa</b>	Kilo pascal
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kgf/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo fuerza por centímetro cuadrado
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>kW</b>	Kilowatt
<b>l</b>	Litros
<b>l/min</b>	Litros por minuto
<b>MPa</b>	Mega pascal
<b>m/s</b>	Metros por segundo
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mmHg</b>	Milímetro de mercurio

<b>N/m<sup>2</sup></b>	Newton por metro cuadrado
<b>NI/min</b>	Normal litro por minuto
<b>Nm<sup>3</sup>/h</b>	Normal metro cúbico por hora
<b>Nm<sup>3</sup>/min</b>	Normal metro cúbico por minuto
<b>pie<sup>3</sup>/año</b>	Pie cúbico por año
<b>pies<sup>3</sup>/min</b>	Pies cúbicos por minuto
<b>%</b>	Porcentaje
<b>PSI</b>	<i>Pounds per square inch</i> , libras por pulgada cuadrada
<b>Psig</b>	<i>Pounds per square inch</i> , libras por pulgada cuadrada manométrica
<b>Pulg</b>	Pulgada
<b>PRP</b>	Punto de rocío a presión
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b>TIR</b>	Tasa Interna de Retorno
<b>V</b>	Voltaje

## GLOSARIO

<b>Abrasión</b>	Acción y efecto de raer o desgastar por fricción.
<b>Absorción</b>	Ejercer atracción sobre un fluido con el que está en contacto, de modo que las moléculas de este penetren en aquella.
<b>Adsorción</b>	Atraer y retener en la superficie de un cuerpo moléculas o iones de otro cuerpo.
<b>Aire atmosférico</b>	Aire con cierta cantidad de vapor de agua.
<b>Aire comprimido</b>	Aire cuyo volumen ha sido reducido para aumentar su presión y aprovecharla como energía al expansionarse.
<b>Aire húmedo</b>	Mezcla de aire y vapor de agua.
<b>Aire saturado</b>	Aire con el máximo contenido de humedad.
<b>Álabes</b>	Cada una de las paletas curvas de la turbina que reciben el impulso del fluido.

<b>Alúmina</b>	Óxido de aluminio que se halla en la naturaleza algunas veces puro y cristalizado, y por lo común formando, en combinación con la sílice y otros cuerpos, los feldespatos y las arcillas.
<b>Avería</b>	Daño que impide el funcionamiento de un aparato, instalación, vehículo, entre otros.
<b>Baria</b>	Unidad de medida para la presión en el Sistema Cegesimal de Unidades, (CGS).
<b>Bocamina</b>	Boca o entrada del molde del troquel.
<b><i>Bypass</i></b>	Término en inglés que significa derivación o conexión de una vía alternativa a la línea principal de la red de aire comprimido para evitar bloqueos
<b>Caballo de vapor</b>	Unidad de potencia de una máquina, que representa el esfuerzo necesario para levantar, a 1 metro de altura, en 1 s, 75 kg, y equivale a 745,7 w.
<b>Caída de presión</b>	Disminución de la presión de un fluido a lo largo del conducto por el que circula.
<b>Cámara de compresión</b>	Espacio libre entre la cabeza del pistón y la culata, donde se produce la reducción del volumen y el aumento de presión del aire.
<b>Coalescente</b>	Que une o funde.

<b>Compresores en paralelo</b>	Dos o más compresores montados de tal manera que puedan trabajar al mismo tiempo para aumentar el caudal de aire entregado al sistema.
<b>Compresores en serie</b>	Dos o más compresores montados de tal manera que puedan trabajar al mismo tiempo para aumentar aún más la presión de aire entregado al sistema.
<b>Condensado</b>	Formación de gotas de agua contenida en el aire o gas, cuando este reduce su temperatura.
<b>Controlador PLC</b>	Programmable logic controller, controlador lógico programable.
<b>Corrosión</b>	Destrucción paulatina de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma.
<b>Cuello de ganso</b>	Dispositivo empleado en las conexiones de las tuberías de aire, para evitar que el condensado llegue a los equipos consumidores.
<b><i>Data loggers</i></b>	Registradores de datos.
<b>Drenado</b>	Eliminación de las aguas muertas o la excesiva humedad de los conductos de gases o aire comprimido.
<b>Energía cinética</b>	La que posee un cuerpo por razón de su movimiento.

<b>Entarimado</b>	Conjunto de tablas dispuestas y arregladas en una armadura.
<b>Estator</b>	Parte fija de una máquina dentro de la cual gira un rotor.
<b>Estibar</b>	Apretar, ajustar o distribuir convenientemente materiales o cosas sueltas para que ocupen el menor espacio posible.
<b>Fiable</b>	Que ofrece seguridad o buenos resultados.
<b>Fricción</b>	Roce de dos cuerpos en contacto.
<b>Impureza</b>	Materia que, en una sustancia, deteriora alguna o algunas de sus cualidades.
<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización.
<b><i>Leveraging</i></b>	Relación entre el capital del préstamo de una empresa (deuda) en el valor de sus acciones ordinarias (equidad).
<b>Óxido</b>	Capa de diversos colores, que se forma en la superficie de los metales por oxidación, como el orín.
<b>Presión del aire</b>	Necesaria en las instalaciones para que los elementos neumáticos trabajen correctamente durante su funcionamiento.

<b>Presostato</b>	Dispositivo que permite mantener constante la presión de un fluido en un circuito.
<b>Punto de rocío</b>	Temperatura mínima a la que se produce el condensado del vapor de agua contenido en el aire.
<b>Punto muerto inferior</b>	Límite de la carrera del émbolo dentro del cilindro.
<b>Purgar</b>	Sacar el agua u otro fluido en un circuito de un aparato o máquina para su buen funcionamiento.
<b>Transductores de presión</b>	Dispositivo que transforma el efecto de la presión en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.



## RESUMEN

NSCI, S. A. es una empresa dedicada a la elaboración de productos de cuidado e higiene personal, así como productos de uso doméstico, para lo cual emplea aire comprimido como fuente principal de energía debido a que el 80 por ciento de su maquinaria es de tipo neumática.

El sistema de generación y distribución de aire comprimido en las instalaciones de NSCI, S. A. está compuesto únicamente por un compresor de tornillo de 50 caballos de potencia con capacidad de generación de 220 pies cúbicos por minuto, un tanque de almacenamiento con capacidad de 2000 litros, sistema de purgas manuales, la red es de tipo abierta.

En NSCI, S. A., sin hacer un estudio previo, se adecuó un sistema de generación y distribución de aire comprimido que fue diseñado para una planta con necesidades diferentes a las existentes en la actualidad, esto hace notar las debilidades que presenta el sistema en uso y estos factores negativos en el sistema elevan el costo de generación de aire comprimido con exceso de consumo de energía eléctrica, como también, el costo de mantenimiento con el aumento de paros innecesarios y reducción de la vida útil de los equipos, provocan pérdidas de producción y todo esto se traduce en el elevado costo de producción de la planta.

En este trabajo se presenta una propuesta de mejora del sistema de generación, tratamiento y distribución de aire comprimido, luego de realizar el estudio y análisis correspondiente.



# OBJETIVOS

## General

Reducir los costos de generación de aire comprimido mediante la mejora del sistema, instalando dos compresores en paralelo al compresor actual para implementar un sistema de aire comprimido más eficiente teniendo dos compresores en funcionamiento para generar, únicamente la demanda de aire requerida, según la maquinaria en funcionamiento y un tercer compresor en disponibilidad.

## Específicos

1. Mejorar el sistema de generación y distribución de aire comprimido en NSCI, S. A. implementando un sistema de tres compresores en paralelo.
2. Instalar dos compresores en paralelo y cada uno de menor capacidad al compresor actual para reducir el consumo de energía eléctrica.
3. Reducir los costos de generación de aire comprimido.
4. Generar únicamente la demanda de aire requerida en el momento de acuerdo a la maquinaria y equipo en funcionamiento para reducir los costos de producción.
5. Disponer de un compresor para emergencias o mantenimiento de los compresores que trabajan constantemente.

6. Reducir los costos de mantenimiento minimizando los paros de producción por fallas en los compresores.
7. Habilitar el sistema de tratamiento de aire comprimido para generar aire comprimido sin humedad ni contaminación.

## INTRODUCCIÓN

NSCI, S.A. considera necesario la realización de un estudio para analizar la posibilidad de mejorar el sistema de generación, tratamiento y distribución de aire comprimido y así reducir los costos y garantizar aún más la calidad de los productos.

En este trabajo se recopila la información necesaria del sistema de aire comprimido en las instalaciones para analizar la situación actual, se hace énfasis en la mejora del sistema de generación, tratamiento y distribución de aire comprimido, tomando en cuenta la Norma ISO 8573-1 para determinar la calidad del aire requerido en las instalaciones, se propone instalar dos compresores en paralelo al compresor instalado actualmente, se selecciona y recomienda el equipo para el tratamiento de aire que se debe instalar, asimismo, se recomienda rediseñar parte de la red de aire, además se presenta un análisis económico que garantiza la factibilidad y rentabilidad del proyecto.



## 1. INFORMACIÓN DE LA EMPRESA

NSCI, S. A. (Natural Soap Cosmetics International Sociedad Anónima) es una empresa dedicada a la elaboración de productos de cuidado e higiene personal: jabón en barra y en gel, cosméticos, productos de uso doméstico: velas aromáticas, limpiavidrios, quitamanchas, desinfectantes, detergente líquido, jabón en polvo, cloro, entre otros.

La planta se encuentra ubicada en la 2da avenida 2-76 Granjas Gerona zona 8 de San Miguel Petapa, Guatemala. Cuenta con una superficie de 161 118 pies cuadrados y se divide de la siguiente manera:

- Oficinas administrativas
- Oficinas de investigación y desarrollo
- Departamento de Fabricación de Jabón en Barra
- Departamento de Fabricación de Jabón Líquido
- Departamento de Fabricación de Productos Cosméticos
- Departamento de Fabricación de Jabón en Polvo
- Departamento de Fabricación de Cloro
- Bodega de materia prima y producto terminado
- Bodega de etiquetas
- Bodega de repuestos
- Planta de tratamiento de agua
- Taller de mantenimiento
- Cafetería

La planta de ISC International Soap Cosmetics actualmente NSCI, S. A. (Natural Soap Cosmetics International Sociedad Anónima), inició operaciones en 1979, maquilando desinfectantes para pisos. En 1981 inició con la maquila de productos cosméticos y en 1982 se expandió a la producción de jabón de lavandería a nivel industrial, maquilando diversas marcas nacionales. Ya para 1990 se desarrolla una fórmula de jabón translúcido y se inician las exportaciones de este producto a EE.UU. Desde entonces se convirtió en una empresa exportadora de productos de higiene personal y fragancias para el hogar, expertos en la aplicación de los estándares internacionales.

Trabaja para compañías internacionales con el prestigio de Alberto Culver y Colgate, maquilando productos como champú, jabón de tocador y jabones de lavandería.

NSCI honra el compromiso de proveer productos de alta calidad. Esto lo consigue siguiendo los procedimientos más seguros y adecuados de manufactura, lo cual requiere mantener un estricto control del proceso y vigilar que se respeten los procedimientos de higiene y limpieza de las líneas de producción, lo que asegura la integridad de los productos. Para lograr esto se aplica la Norma ISO 9001 que regula los sistemas de gestión de calidad, y la Norma ISO 22 716–2010, la cual es una guía de buenas prácticas de fabricación para productos cosméticos.

La Norma ISO 22 716 proporciona una herramienta específica para la gestión de la calidad en:

- Fabricación
- Envasado
- Pruebas

- Almacenamiento
- Transporte

Al asegurarse que sus productos contengan la mejor materia prima y sus fórmulas sean examinadas y aprobadas antes de entrar a producción, logran mantener sus estándares de calidad.

NSCI, S. A. invierte en investigar a nivel mundial cuál es la tecnología más innovadora que ayude a satisfacer las necesidades de sus clientes.

Esto, entre otras cosas, les permite ser capaces de traducir las ideas innovadoras que provienen de su Departamento de Investigación y Desarrollo en productos de bajo precio y alta calidad.

### **1.1. Misión**

“Desarrollar, diseñar, producir y distribuir jabón de tocador, productos de limpieza, productos de cuidado personal y aromatizantes ambientales, creativos e innovadores, con los más altos estándares de calidad que satisfagan y excedan las exigencias y expectativas de los clientes y de las normas de producción internacionales en cuanto a desempeño y servicio. Esto a través de la continua capacitación del personal y optimización de procesos y recursos”<sup>1</sup>.

### **1.2. Visión**

“Somos la mejor organización global en ventas y mercadeo. Contamos con los mejores clientes clave somos más proactivos en diseño y nos anticipamos a las tendencias del mercado. Creamos continuamente nuevos

---

<sup>1</sup> NSCI, S. A.

productos y empaques con puntos de diferencia innovadores y diseños para varios segmentos en el mercado. Nos enfocamos en servicio al cliente y control de calidad. Creamos una fuente de manufactura de “Una Única Parada” para sistemas de entrega de fragancias y cuidado personal. Proporcionamos productos de la más alta calidad a precios competitivos por el poder adquisitivo *leveraging* compartiendo recursos y personal. Sociedad con proveedores estratégicos”<sup>2</sup>.

### **1.3. Descripción de los procesos de producción**

A continuación se describen los procesos de producción en las distintas plantas.

#### **1.3.1. Proceso de producción en la planta de jabón en barra**

La fabricación de jabón sólido, inicia con la prueba de color de los materiales al empezar la producción.

Luego se agrega la materia prima a la máquina mezcladora y se mezclan durante cinco minutos como máximo, al finalizar el mezclado de los materiales se deja caer a la máquina refinadora, abriendo la compuerta inferior del mezclador de forma neumática.

De la refinadora, el producto se envía por medio de la banda transportadora hacia el molino, en esta máquina el inspector de calidad toma muestras para la evaluación de color y olor, si el producto no está dentro del estándar de olor y color, se envía de nuevo a la refinadora para hacer los ajustes indicados por Control de Calidad y realizar el proceso nuevamente, si el

---

<sup>2</sup> NSCI, S. A.

producto está dentro de los estándares de calidad, se envía por medio de bandas transportadoras a la máquina trefiladora para obtener barras, las cuales pasan a la máquina cortadora de tacos donde las barras se cortan de acuerdo al largo y alto que requiere la bocamina a ser utilizada para troquelar el jabón.

De la máquina cortadora de tacos, las barras se trasladan por medio de bandas a la máquina troqueladora, en esta máquina se obtiene el jabón según el formato en proceso, de la máquina troqueladora el jabón pasa a las máquinas empacadoras, y de las máquinas empacadoras el jabón se envía a la máquina formadora de paquetes por último los paquetes se colocan en las cajas para el entarimado y posterior almacenaje en bodega de producto terminado.

### **1.3.2. Proceso de producción en la planta de jabón transparente**

La fabricación inicia con la profundición de ácidos grasos en los tanques correspondientes y a las temperaturas establecidas.

Luego se prepara la base de jabón transparente, la cual se efectúa en tanques de reacción enchaquetados de acero inoxidable. La adición de todas las materias primas exceptuando la soda cáustica se efectúa por medio de un programa de ciclos de adición en un controlador PLC conectado a celdas de carga en el tanque.

La base preparada se mezcla con los colorantes y las fragancias.

Luego se decoran los moldes según el estándar, formulación y tipo de pastilla que vaya a producirse, esto se lleva a cabo de forma manual. Los moldes decorados se envían al área de llenado donde la mezcla previamente

preparada se deja caer a los moldes, los moldes llenos pasan al área de solidificación en la cual el jabón pasa a través del túnel de enfriamiento para que se lleve a cabo la solidificación.

Los jabones solidificados pasan al área de desmoldado, en la cual se desmoldan en forma manual y se envían al área de empaque en la que las pastillas se empacan de forma automática. Las pastillas empacadas se colocan en cajas de producto terminado, se estiban e identifican para su almacenaje y posterior despacho.

### **1.3.3. Proceso de producción en la planta de jabón líquido**

La fabricación inicia con la mezcla de la materia prima en tanques elevados.

Cuando la mezcla está lista, se llevan a cabo pruebas de color, olor y densidad, si la mezcla no cumple con el estándar, se hacen los ajustes necesarios y nuevamente se lleva a cabo el mezclado de la materia prima.

Si la mezcla cumple con el estándar, se inicia el proceso de llenado y del área de llenado los envases pasan al área de etiquetado.

El producto etiquetado, se coloca en cajas, las cuales se estiban e identifican para su almacenaje y posterior despacho en la bodega de producto terminado.

#### **1.4. Información general del sistema de aire comprimido actual**

El sistema de generación de aire comprimido en las instalaciones de NSCI, S. A. está compuesto por un compresor de tornillo SRP 2050 electrónico marca Schulz de 50 caballos de potencia y con capacidad de generación de 220 pies cúbicos por minuto. Este es el único compresor que abastece de aire comprimido a toda la maquinaria y equipo neumático empleado en los procesos de producción y mantenimiento de la planta de producción.

El sistema de aire comprimido cuenta con un tanque de almacenamiento cuya capacidad es de 2000 litros.

La red de distribución es del tipo circuito abierto pero las tuberías están instaladas completamente horizontal, no cuentan con la pendiente recomendada para este tipo de circuito. La red está compuesta por tuberías galvanizadas. El circuito cuenta con:

- La tubería principal, que corresponde a un diámetro de 4”.
- Las tuberías secundarias, que son tanto de 2” como de 1” respectivamente.

Un segmento de la red de distribución es subterráneo, esto perjudica grandemente el sistema debido a que el condensado en ese punto no se puede eliminar el cual llega a los equipos provocando un funcionamiento defectuoso, además de provocar óxido en las tuberías de la red.

El tratamiento del aire es defectuoso, debido a que los filtros y trampas de agua de la red de distribución de aire comprimido se encuentran en mal estado, el sistema no es purgado con frecuencia, además, la red no cuenta con secador

de aire, por lo cual las máquinas reciben aire húmedo y contaminado con partículas de aceite, partículas de óxido, polvo, provocando ineficiencia en el funcionamiento de la maquinaria y equipo aumentando los paros por fallas y elevando los costos de generación de aire comprimido y costos de mantenimiento.

Las fugas en el sistema son muy grandes lo cual resulta en el desperdicio del aire comprimido elevando los costos de generación.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Introducción

El aire comprimido es un portador de energía.

Al aire comprimido, desde muchos años atrás, se le ha dado diversas aplicaciones en distintas áreas, entre ellas el uso para operar máquinas y herramientas, por lo que juega un papel importante en la industria actual.

Algunos procesos industriales en los que el aire comprimido es fundamental son:

- Aeronáutica
- Comercialización y reparación
- Construcción
- Fabricación de productos cosméticos
- Fabricación de productos de higiene para el hogar y personal
- Fabricación de productos químicos
- Fabricación y procesamiento de alimentos
- Fabricación y procesamiento del papel
- Gases industriales
- Industria de fabricación de automóviles
- Industria farmacéutica
- Industria textil
- Ingeniería ambiental

- Instalaciones médicas
- Metalurgia industrial
- Minería
- Moldeo de plástico
- Petroquímica
- Plantas de generación
- Procesos del vidrio
- Suministro de energía eléctrica
- Transporte

Según Marcial Carrobles y Félix Rodríguez, las ventajas y desventajas del aire comprimido son las siguientes:

### **2.1.1. Ventajas del aire comprimido**

- Abundante: es ilimitado y se encuentra disponible gratuitamente en cualquier lugar. No precisa conductos de retorno. El aire utilizado pasa de nuevo a la atmósfera.
- Almacenaje: almacenado y comprimido en acumuladores o depósitos, puede ser transportado y utilizado donde y cuando se precise.
- Antideflagrante: está a prueba de explosiones. No hay riesgo de chispas en atmósferas explosivas. Puede utilizarse en lugares sin riesgo de electricidad estática.
- Temperatura: es fiable, incluso a temperaturas extremas.
- Limpieza: cuando se producen escapes no es perjudicial y pueden colocarse en las líneas, depuradores o extractores para mantener el aire limpio.
- Elementos: el diseño y constitución de elementos es fácil y de simple confección.

- Velocidad: se obtienen velocidades muy elevadas en aplicaciones de herramientas de montaje (atornilladores, llaves, etc.).
- Regulación: las velocidades y las fuerzas pueden regularse de manera continua y estratificada, combinado con sistemas oleo neumáticos.
- Sobrecargas: se puede llegar en los elementos neumáticos de trabajo hasta su total parada, sin riesgo de sobrecargas o tendencia al calentamiento.

### **2.1.2. Desventajas del aire comprimido**

- Preparación: es preciso eliminar impurezas y humedades previas a su utilización.
- Velocidad: debido a su gran compresibilidad, no se obtienen velocidades uniformes en los elementos de trabajo.
- Ruidos: el aire que escapa a la atmósfera produce a veces ruidos bastante molestos. Se superan mediante dispositivos silenciadores.
- Esfuerzos: son limitados (2000 a 3000 kilogramos con presión de trabajo de 7 kilogramos por centímetro cuadrado).
- Costo: es una fuente de energía cara, pero compensada con el buen rendimiento y facilidad de implantación.

## **2.2. Generación de aire comprimido**

Para generar aire comprimido, se toma el aire atmosférico para luego elevarle la presión y de esta manera acondicionarlo a las necesidades requeridas según el proceso para el cual se necesite. Para llevar a cabo este proceso es necesario emplear compresores.

Los compresores son máquinas térmicas que hacen que el aire, gases o vapores ganen energía en forma de presión.

El compresor succiona aire a la presión atmosférica y lo expulsa con un aumento de presión, este aire se conduce hasta las máquinas, equipos o mecanismos, por medio de la red de distribución de aire comprimido, la cual debe estar bien diseñada, para reducir los costos de generación de aire comprimido.

El compresor debe ser bien dimensionado para cubrir la demanda de aire de las instalaciones y futuras ampliaciones de la planta.

Existen varios tipos de compresores, los cuales pueden ser instalados en serie o en paralelo, según las necesidades del proceso para el cual se diseñe el sistema de aire comprimido.

Se instalan compresores en serie para lograr un mayor aumento de presión del aire o se instalan compresores en paralelo si lo que se requiere es aumentar el caudal de aire. Los compresores instalados en paralelo son la mejor solución para la industria, debido a la variación de la demanda de aire en los procesos. Se pueden instalar dos o más compresores en paralelo y éstos pueden trabajar simultáneamente o no, según el caudal de aire requerido en el momento para cubrir la demanda de aire sin exagerar los costos de generación.

### **2.3. Almacenamiento del aire comprimido**

En todo sistema de aire comprimido se debe disponer de un tanque acumulador de aire a presión, y debe instalarse entre el compresor y la red de distribución de aire.

Según Carnicer Royo Enrique, el depósito de aire cumple las siguientes funciones:

- Amortiguar las pulsaciones del caudal de aire salido de los compresores alternativos.
- Actuar de separador de los períodos de regulación.
- Hacer frente a las demandas puntas de caudal sin que se provoquen caídas de presión.
- Adaptar el caudal de salida del compresor al consumo de aire en la red.

Además, gracias a la gran superficie del depósito, también funciona como refrigerador del aire almacenado y se logra eliminar a través de él gran parte del condensado, por lo tanto los depósitos de aire comprimido deben contar con un sistema de drenado del condensado, ya sea manual o automático y deben instalarse en áreas protegidas del sol y bien ventiladas para evitar el calentamiento.

La capacidad del depósito de aire comprimido está determinada por la capacidad de entrega de aire del compresor.

Según Carnicer Royo Enrique, como orientación, la capacidad del depósito está determinada según el tipo de regulación y puede calcularse por las siguientes ecuaciones aproximadas.

- Para válvula piloto  $V \geq 30 P$  litros
- Automática con presostato  $V \geq 35 P$  litros
- Automática con presostato y contactor  $V \geq 40 P$  litros
- Automática con arrancador Y/ $\Delta$   $V \geq 75 P$  litros

Siendo P la potencia del compresor o la potencia total instalada en CV, y V, el volumen en litros del depósito o de todos los depósitos existentes apropiadamente comunicados entre sí.

## **2.4. Tratamiento del aire comprimido**

El tratamiento del aire comprimido está regulado por la Norma ISO 8573-1: 2010.

### **2.4.1. Norma ISO 8573-1: 2010**

El aire comprimido - Parte 1: contaminantes y las clases de pureza

ISO 8573-1: 2010 especifica las clases de pureza de aire comprimido con respecto a las partículas, el agua y el aceite independiente de la ubicación en el sistema de aire comprimido en el que se especifica o de medición del aire.

ISO 8573-1: 2010 proporciona información general acerca de los contaminantes en los sistemas de aire comprimido, así como enlaces a las otras partes de la Norma ISO 8573, ya sea para la medición de la pureza del aire comprimido o la especificación de requisitos de pureza de aire comprimido.

Además de los contaminantes de partículas, agua y aceite, arriba mencionados ISO 8573-1 2010 también identifica los contaminantes gaseosos y microbiológicos.

### **2.4.2. ¿Por qué se debe tratar el aire comprimido?**

El aire comprimido antes de ser utilizado debe ser tratado para eliminar las impurezas que contiene y con esto evitar daños perjudiciales al sistema de aire.

Las impurezas que el aire comprimido puede tener son:

- Sólidas: polvo, partículas de óxido, suciedad, polen, microorganismos.
- Líquidas: agua, aceite, refrigerante.
- Gaseosas: vapor de agua, vapor de aceite, humo.

Los problemas que las impurezas en el aire comprimido pueden ocasionar tanto en la red, como en los consumidores y la producción son:

- Desgaste, abrasión, óxido, corrosión, en el tanque de almacenamiento.
- Corrosión en las líneas de aire comprimido.
- Contaminación del producto fabricado.
- Contaminación al ambiente.
- Congelamiento dentro de la red de aire.
- Caídas de presión.
- Disminución de potencia, mal funcionamiento, averías e ineficiencia en las herramientas neumáticas.
- Desgaste en herramientas, válvulas, cilindros e instrumentos neumáticos.
- Tiempos de parada.
- Menor vida útil del sistema.

Todo esto eleva los costos de generación y mantenimiento provocando pérdidas económicas.

Para eliminar las impurezas en el aire comprimido, se emplean varios métodos, tales como:

- Refrigeradores de aire
- Secadores de aire
- Separadores centrífugos o cerámicos
- Purgas intermedias
- Filtros en puntas de distribución

El aire atmosférico contiene humedad en forma de vapor de agua, al comprimirse el aire, tiende a aumentar de temperatura, este aumento de temperatura en el aire hace que las partículas de agua se mantengan en el sistema en forma de vapor de agua, siempre que no se trate el aire al salir del compresor y antes de entrar a la red de distribución. Si el aire comprimido que sale del compresor no se trata, se enfría en el tanque de almacenamiento y al recorrer las tuberías de la red, entonces el vapor de agua se condensa y forma agua en estado líquido en las tuberías de la red y llega hasta los consumidores, lo que provoca los daños mencionados en los párrafos anteriores, tales como desgaste, corrosión, contaminación, entre otros.

El aire comprimido, una vez que sale del compresor, (con temperaturas que oscilan entre 125 y 180 grados centígrados, para compresores de pistón y de unos 70-80 grados centígrados para compresores rotativos. Carnicer Royo Enrique, *Aire comprimido*. (p. 125-126)), va recorriendo un camino hasta su utilización, durante este recorrido se lleva a cabo un intercambio de calor entre el ambiente y el aire comprimido dentro del tanque de almacenamiento y dentro de las tuberías de la red lo cual provoca una disminución de la temperatura del aire comprimido, obteniendo como resultado condensado del vapor de agua, por lo tanto se hace necesario instalar a la salida del compresor, un refrigerador

de aire, un secador de aire, filtros, depósito de almacenamiento, sistema de purga manual o automático, para que se distribuya en la red, aire seco y limpio eliminando el condensado y los inconvenientes que esto provoca.

Idealmente el aire debe tratarse a la salida del compresor, en el trayecto de la red de distribución y en los puntos de utilización, para obtener aire comprimido limpio y libre de vapor de agua y aceite.

### **2.4.3. Tratamiento del aire comprimido a la salida del compresor**

En la salida del compresor el aire comprimido puede tratarse con:

#### **2.4.3.1. Postenfriador de agua**

Un postenfriador de agua es un refrigerador que utiliza el agua como intercambiador de calor agua-aire. Se instala inmediatamente después del compresor para reducir significativamente la temperatura (de 70 a 80 %) del aire que sale del compresor para condensar y eliminar el vapor de agua y aceite contenido en el aire, de esta manera llevar el aire comprimido con la menor cantidad de agua y aceite hacia el depósito.

Figura 1. **Postenfriador de agua**



Fuente: <http://adningeneria.com.ar/productos/api-schmidt-bretten/post-enfriadores/>. Consulta:

12 de septiembre de 2014.

### **2.4.3.2. Postenfriador de aire**

Es un refrigerador que utiliza el aire ambiente como intercambiador de calor aire-aire, que se instala a la salida del compresor para reducir significativamente la temperatura del aire comprimido, condensando el agua y el aceite contenido en el aire. El enfriamiento del aire se lleva a cabo mediante la circulación del aire comprimido dentro de las tuberías del enfriador, y entre las tuberías se hace circular aire atmosférico mediante motor-ventilador con lo cual se logra la transferencia de calor.

Figura 2. **Postenfriador de aire**



Fuente:<http://www.indupym.com/postenfriadores.html>. Consulta: 12 de septiembre de 2014.

### **2.4.3.3. Secadores**

Los métodos de secado del aire comprimido se resumen en la tabla I.

Tabla I. **Métodos de secado del aire comprimido**

<b>Método</b>				
Difusión	Secador de membrana			
Sorción	Absorción	Desecantes sólidos		
		Desecantes disolventes		
		Desecantes líquidos		
	Adsorción	Desecantes sólidos	Regeneración	Calentamiento del desecante
				Calentamiento del aire de regeneración
				Sin calentamiento
	Condensación	Secado por refrigeración		
	Sobre-compresión y expansión			

Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. Seminario de aire comprimido. *Tratamiento de aire comprimido*. p.12.

#### **2.4.3.3.1. Secado por absorción**

Es un procedimiento puramente químico con el cual se logra alcanzar un punto de rocío de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El aire comprimido pasa a través de un lecho de sustancias secantes. En cuanto el agua o vapor de agua entra en contacto con dicha sustancia, se combina químicamente con esta y se desprende como mezcla de agua y sustancia secante.

Esta mezcla tiene que ser eliminada regularmente del absorbedor y esto se puede realizar manual o automáticamente.

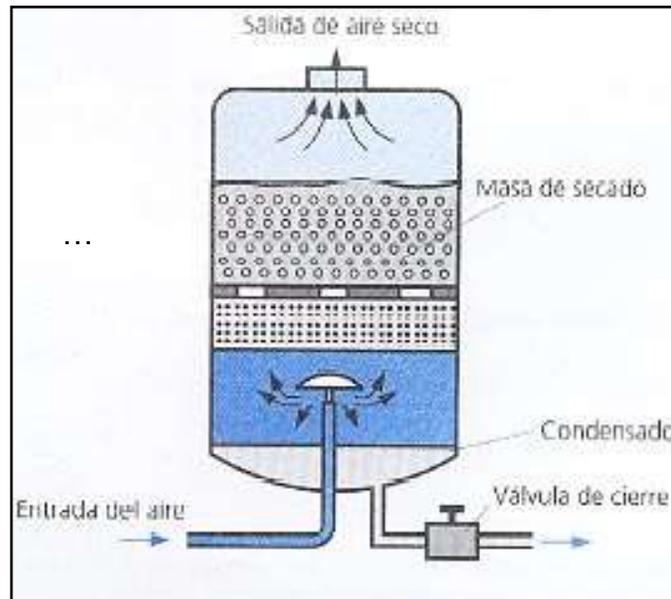
Con el tiempo se consume la sustancia secante, y debe suplirse en intervalos regulares (2 a 4 veces al año).

Al mismo tiempo, en el secador por absorción se separan vapores y partículas de aceite. No obstante, las cantidades de aceite, si son grandes, influyen en el funcionamiento del secador. Por esto conviene montar un filtro fino a la entrada del secador.

El procedimiento de absorción se distingue por:

- Instalación simple
- Reducido desgaste mecánico, porque el secador no tiene piezas móviles
- No necesita aportación de energía exterior.

Figura 3. **Secador por absorción**



Fuente: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3006>. Consulta: 29 de octubre de 2014.

#### 2.4.3.3.2. **Secador frigorífico**

Es un equipo que se emplea para reducir aún más la humedad del aire comprimido, reduciendo su temperatura, para que al ocurrir un posterior enfriamiento del aire en su recorrido por la red de distribución, no se presente la condensación, por eso los secadores frigoríficos deben seleccionarse de acuerdo al caudal nominal de la planta, a la presión de trabajo y al punto de rocío deseado. Además debe tomarse en cuenta que los secadores frigoríficos funcionan mejor cuando se emplean posenfriadores a la salida del compresor.

Figura 4. **Principio de funcionamiento del secador frigorífico**



Fuente: <http://www.relacind.com.ar/airproductssecadores.htm>. Consulta: 16 de septiembre de 2014.

Paso 1: el aire comprimido saturado de humedad entra en el secador y es dirigido hacia el intercambiador (1), siendo enfriado por el aire que vuelve a la línea, ya frío y seco. El intercambio de calor entre el aire de entrada y de salida reduce la carga en el compresor de refrigeración (4) ahorrando así costos de energía.

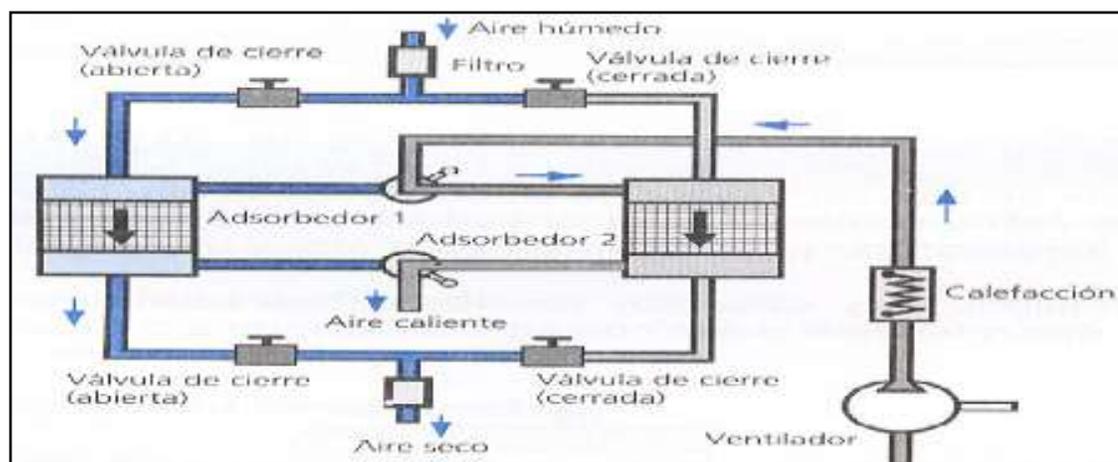
Paso 2: el aire entrante pasa ahora al intercambiador de calor, donde el fluido refrigerante lo enfría 2 °C, la humedad se condensa y forma gotas de agua que son separadas del aire en el separador de condensado (3) y se recoge en un colector que automáticamente purga el sistema.

Paso 3: luego, ya teniendo aire frío y seco, vuelve al intercambiador (1), enfría al aire nuevo que entra, y sale ya a la línea de conducción de aire comprimido, terminando el ciclo de secado frigorífico.

### 2.4.3.3.3. Secador por adsorción

Es un equipo de tratamiento de aire comprimido en el que se lleva a cabo un proceso físico que consiste en hacer pasar el aire comprimido a través del secador y al entrar en contacto con el desecante, este adsorbe el agua y el vapor de agua para fijar la humedad. El material de secado, que está compuesto de casi un 100 por ciento de dióxido de silicio, requiere regeneración continua, pues su capacidad de adsorción es limitada, por eso el secador por adsorción consta de dos depósitos para que al saturarse uno de ellos el otro quede activo mientras se lleva a cabo el proceso de regeneración del depósito saturado.

Figura 5. Secador por adsorción



Fuente: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3006>. Consulta: 16 de septiembre de 2014.

El punto de rocío que puede alcanzarse con este tipo de secador, varía entre -20 hasta -80 °C

Tabla II. **Comparación entre los tipos de sistemas de secado**

<b>Sistema o factor</b>	<b>Condensación frigorífica</b>	<b>Adsorción con regeneración del deshidratante</b>			<b>Absorción química</b>
<b>No. De torres</b>	1	2	2	No. Torres	1
<b>Deshidratante</b>	Evaporador frigorífico	Alúmina	Alúmina	Deshidratante	Evaporador frigorífico
<b>Regeneración</b>	No	Media temp.	Sin calor	Alta temp.	Por reposición
<b>Energía eléctrica</b>	Si	Si	No	Si	No
<b>Pérdida de fluido</b>	No	Según punto de rocío	Si	Si	No
<b>Utilización</b>	General punto de rocío medio	Todas las aplicaciones	Todas las aplicaciones	Procesos especiales	Protección
<b>Factor personal</b>	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Nulo
<b>Costo de compra</b>	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Bajo
<b>Costo de servicio</b>	Bajo	Medio	Medio	Alto	Nulo
<b>Costo de mantenimiento</b>	Bajo	Medio	Medio	Medio	Medio

Fuente: CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido*. p. 140.

#### **2.4.4. Tratamiento del aire comprimido en la red de distribución**

En la red de distribución el aire puede tratarse con:

##### **2.4.4.1. Secador**

Puede ser del tipo secador por deliquesencia, el cual utiliza pastillas desecantes y deliquescentes para retener el vapor de agua contenido en el flujo de aire a secar.

##### **2.4.4.2. Separadores**

Pueden ser separadores centrífugos los cuales se instalan cuando se persigue una separación de condensado a un costo económico.

En estos separadores, el condensado se separa del aire comprimido mediante cambios de dirección.

##### **2.4.4.3. Filtros**

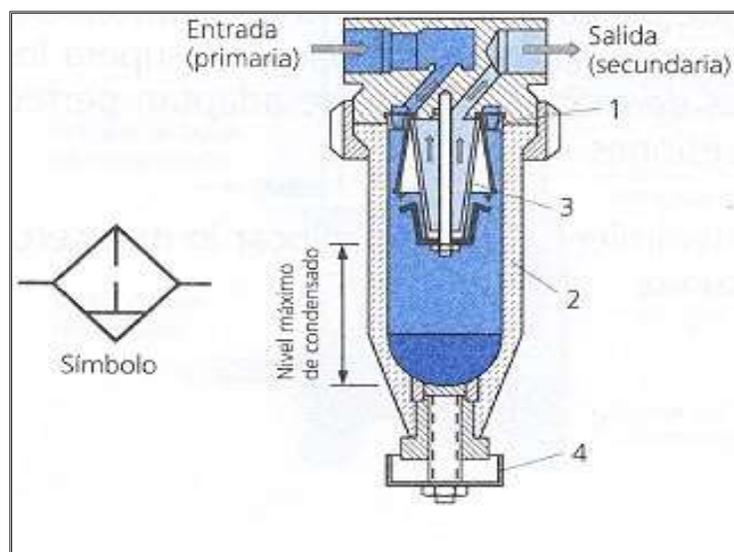
Los filtros se instalan en la red para eliminar las impurezas que no se lograron separar del aire con los equipos de tratamientos previos. Estos contaminantes pueden ser líquidos como gotas de agua y aceite, sólidos como polvo y residuos de metal y gaseosos como vapor de agua y vapor de aceite.

Los filtros se clasifican en:

- Filtros separadores cerámicos

- Filtros absorbentes
- Filtros coalescentes
- Filtros de superficie
- Filtros de profundidad
- Filtros de carbón activado

Figura 6. **Filtro**



Fuente: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3006>. Consulta: 16 de septiembre de 2014.

#### 2.4.4.4. **Purgadores**

Son necesarios para poder evacuar el condensado que se separa del aire comprimido tanto a la salida del compresor como en el depósito de aire y en todo el trayecto de la red de distribución de aire comprimido. Para garantizar su funcionamiento óptimo y efectivo, los purgadores deben instalarse en puntos estratégicos tales como tanques de compresores, separadores de condensado,

filtros, depósito de aire, puntos finales de la red, que es donde se acumula el condensado.

Figura 7. **Purgador automático**



Fuente: <http://www.kaeser.es/Images/P-741-SP-tcm11-6774.pdf>. Consulta: 29 de octubre de 2014.

#### **2.4.5. Tratamiento del aire comprimido en los puntos de consumo**

En los puntos de consumo el aire debe tratarse con la Unidad de Mantenimiento (filtro, regulador de presión y lubricador).

##### **2.4.5.1. El filtro**

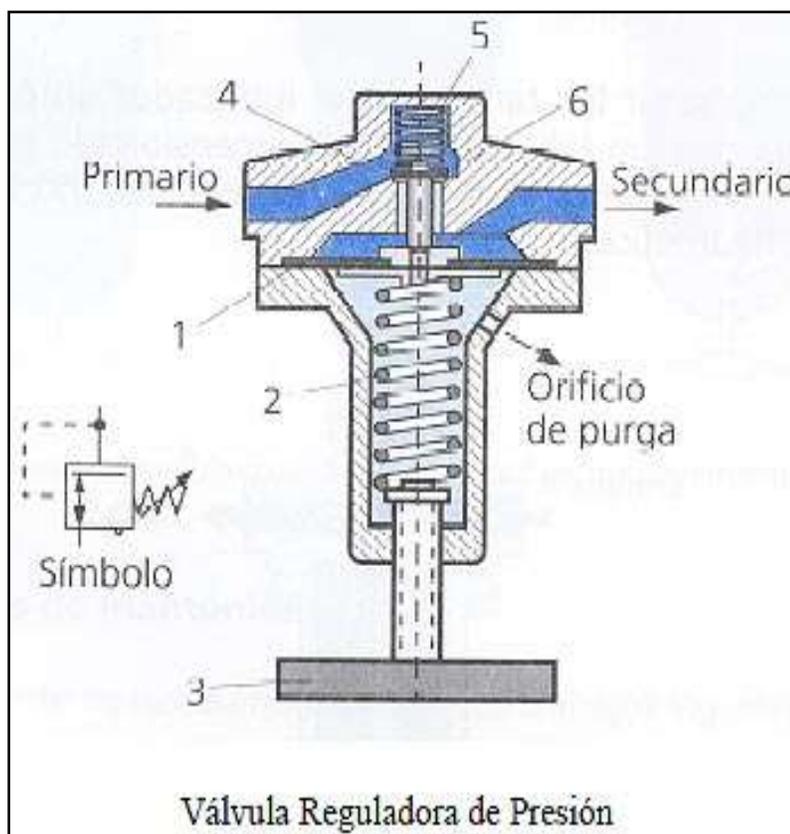
El filtro instalado en la entrada del consumidor juega un papel muy importante en la red de aire comprimido, pues debe eliminar las impurezas que

no se lograron eliminar desde la salida del compresor y en el trayecto de la red de distribución hasta el punto de consumo.

### 2.4.5.2. El regulador de presión

Este dispositivo se emplea para adecuar la presión requerida por la máquina herramienta, equipo o consumidor de aire comprimido.

Figura 8. Regulador de presión

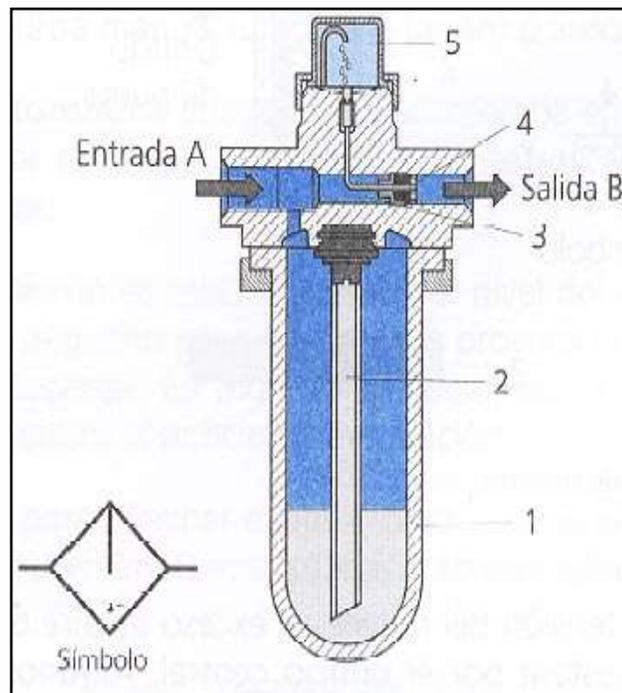


Fuente: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3006>. Consulta: 16 de septiembre de 2014.

### 2.4.5.3. El lubricador

Se emplea para suministrar aceite limpio al aire comprimido y con esto agregar propiedad lubricadora al aire lo cual facilita y mejora su uso en el equipo consumidor.

Figura 9. **Lubricador**



Fuente: <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3006>. Consulta: 16 de septiembre de 2014.

## 2.5. Red de distribución de aire comprimido

Para conducir el aire comprimido que sale del cuarto de máquinas, el cual puede estar equipado con uno o más compresores, hasta los puntos de consumo, se necesita de una serie de tuberías y accesorios, a la que se le

denomina, red de distribución de aire comprimido y debe diseñarse correctamente, tomando en consideración los parámetros de presión, caudal, pérdidas de presión y velocidad de circulación del aire, para que la distribución sea óptima.

### **2.5.1. Presión**

La presión a la cual se desea trabajar, tanto para el caudal de aire entregado por el compresor como para el caudal de utilización en la red.

Mientras no se indique lo contrario, al hablar de presiones serán siempre presiones efectivas, que se cuentan a partir de la presión atmosférica. Los manómetros industriales miden la presión efectiva. Carnicer Royo Enrique, *Aire comprimido* (1991, p. 210).

### **2.5.2. Caudal**

El caudal de aire comprimido a suministrar por el compresor, así como el que debe circular por cada zona de trabajo o ramal de distribución. El caudal de aire comprimido se expresa en Nm<sup>3</sup>/min o en NI/min, referidos al aire libre. Carnicer Royo Enrique, *Aire comprimido* (1991, p. 210).

### **2.5.3. Pérdida de presión**

La pérdida de presión, pérdida de carga, caída de presión o presión diferencial,  $\Delta p$ , distintas expresiones que vienen a significar lo mismo, se refieren a la pérdida de energía que se va originando en el aire comprimido ante los diferentes obstáculos que encuentra en su desplazamiento hacia los puntos de utilización, como son: secador, filtros, tuberías, etc. Es decir, la diferencia

entre la presión  $p_1$  de entrada y la presión  $p_2$  de salida. Carnicer Royo Enrique, *Aire comprimido* (1991, p. 210-211).

#### **2.5.4. Velocidad de circulación**

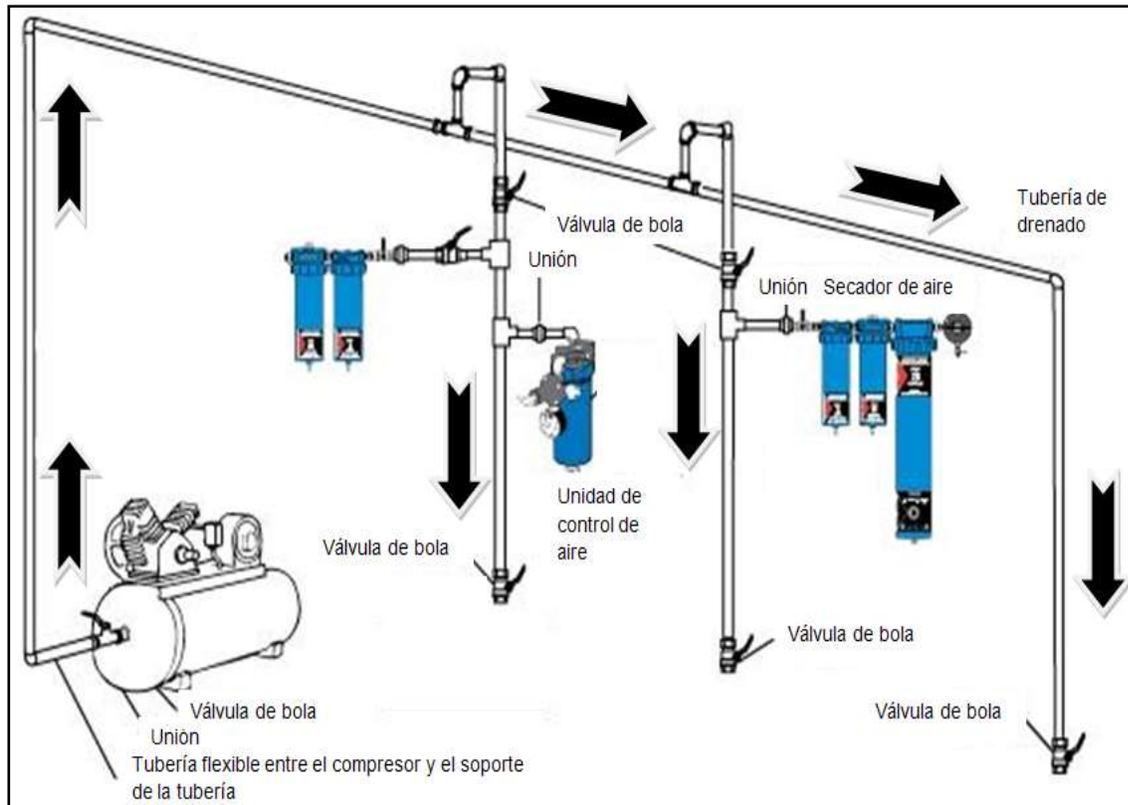
También existe límite para la velocidad de aire, ya que cuanto mayor es la velocidad de circulación, tanto mayor es la pérdida de presión en el recorrido hasta el punto de aplicación. En aire comprimido las velocidades oscilan entre 3 y 16 m/s para las tuberías. Carnicer Royo Enrique, *Aire comprimido* (1991, p. 211).

La configuración de la red de aire comprimido puede ser abierta, cerrada o interconectada o mixta, cada configuración presenta ventajas y desventajas.

#### **2.5.5. Red abierta**

Esta configuración está compuesta por una sola línea principal de la cual se desprenden la línea secundaria y las líneas de servicio o consumo. Entre las ventajas que esta configuración presenta está la inversión inicial que es menor comparada con la inversión de las otras configuraciones, además que se puede diseñar la red con cierta inclinación para eliminar los condensados. La principal desventaja de la red abierta radica en el mantenimiento debido a que al llevarse a cabo una reparación en la red es necesario detener el suministro de aire comprimido lo que provoca el paro de producción.

Figura 10. **Red de aire comprimido tipo abierta**



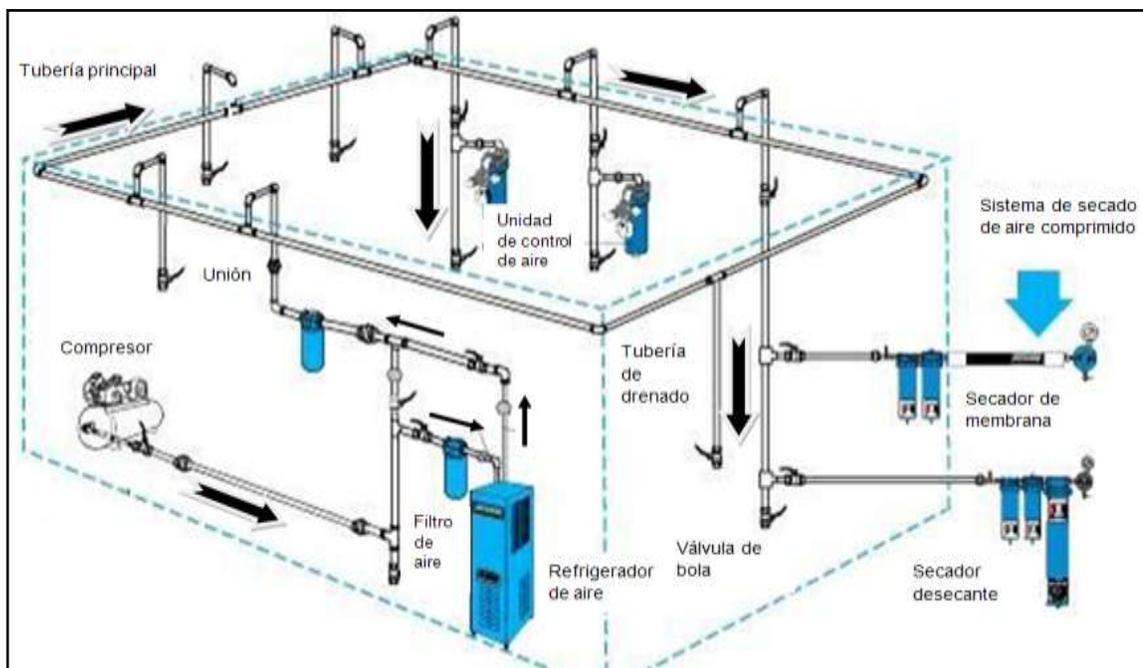
Fuente: <http://marcelocassani.files.wordpress.com/2011/02/red-abierta.jpg>. Consulta: 23 de agosto de 2014.

### 2.5.6. **Red cerrada**

En esta configuración la línea principal retorna a su punto de partida formando un anillo. Las ventajas de esta configuración son aquellas que minimizan las pérdidas de carga en el sistema y no se interrumpe el suministro de aire al prestar mantenimiento a la red, porque se puede aislar parte del anillo mediante válvulas. Algunas de las desventajas son el costo inicial elevado y que la red no se puede diseñar con inclinación, además que la dirección del flujo no es constante debido a que el aire se dirigirá hacia el punto de mayor consumo

dependiendo de la demanda y esto provoca cambios constantes en la dirección del caudal de aire entorpeciendo el funcionamiento de los accesorios de la red puesto que están diseñados para un solo sentido, una entrada y una salida de aire.

Figura 11. **Red de aire comprimido tipo cerrada**

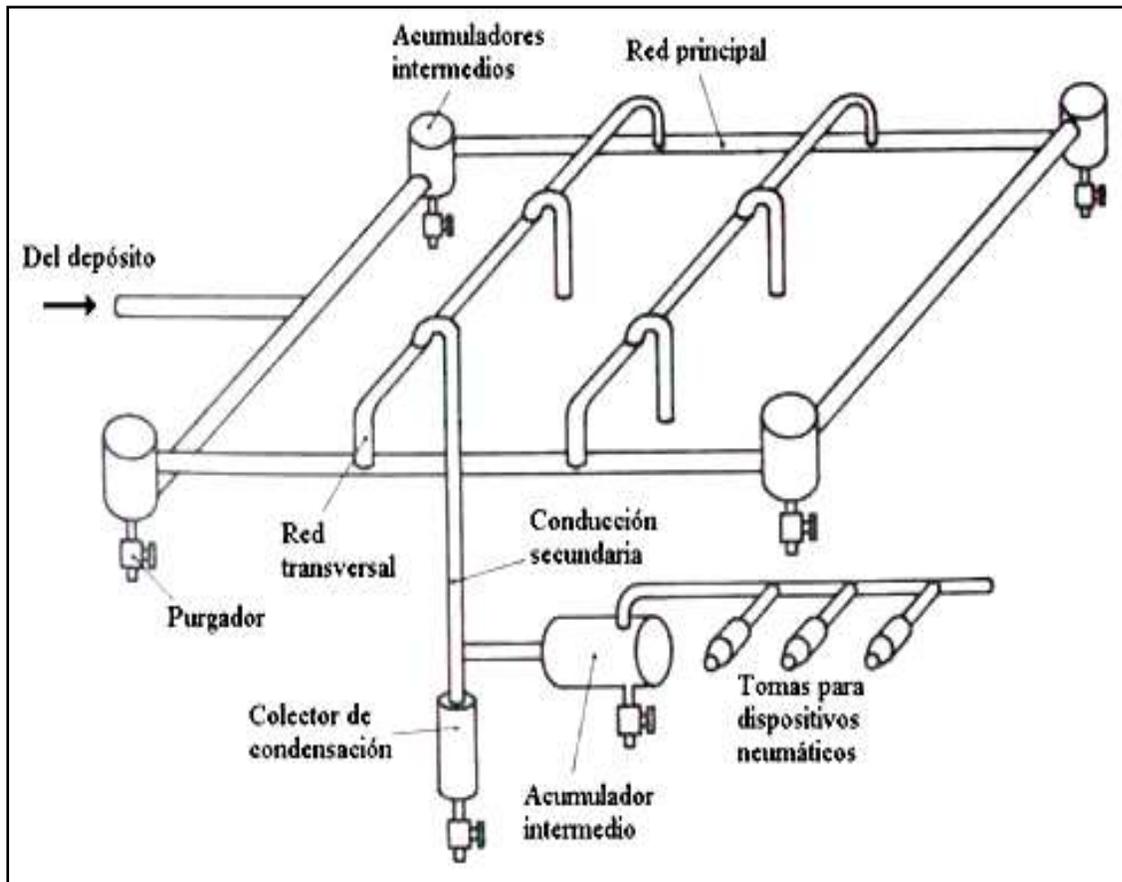


Fuente: <http://marcelocassani.files.wordpress.com/2011/02/red-cerrada.jpg>. Consulta: 23 de agosto de 2014.

### 2.5.7. **Red interconectada o mixta**

Esta configuración consta de un anillo como línea principal pero se diferencia de la red cerrada, en que la línea principal está interconectada por medio de *bypass*. Presenta las mismas desventajas que la red cerrada pero el mantenimiento se mejora.

Figura 12. Red de aire comprimido tipo mixta



Fuente: <http://e->

[educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1108/html/23\\_distribucion\\_de\\_aire\\_comprimido.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1108/html/23_distribucion_de_aire_comprimido.html). Consulta: 23 de agosto de 2014.

Se recomienda tomar en cuenta las características de la instalación de aire comprimido para determinar el tipo de red a utilizar y no decidir solamente por la economía inicial, además, que la red de tuberías de aire comprimido sea aérea y subterránea solamente en casos realmente necesarios, puesto que en tuberías subterráneas, se dificulta y hasta se imposibilita la eliminación del condensado y sus efectos de corrosión en tuberías y accesorios, así como el

mal funcionamiento de los equipos neumáticos y la ineficiencia del sistema de aire comprimido, reduciendo su vida útil, todo esto se evita con la red aérea.

## **2.6. Requerimientos de una red de aire comprimido**

Para dirigir el aire desde la salida del compresor hacia los consumidores, es necesario contar con una red de distribución bien diseñada con el diámetro correcto de las tuberías de acuerdo a los requerimientos del proceso, la red debe contar con los siguientes elementos:

- Línea principal de aire
- Línea de distribución
- Línea de alimentación de consumo
- Accesorios de la red; válvulas, codos, tes, reductores, uniones, cruces
- Manómetros de presión
- Separadores de condensado
- Purgadores manuales o automáticos
- Unidad de Mantenimiento (filtro, regulador de presión y lubricador)

### **2.6.1. Línea principal de aire**

Une el tanque de almacenamiento con la red de distribución de aire.

### **2.6.2. Línea de distribución**

Recibe el aire comprimido de la línea principal y lo distribuye dentro de una red de consumo.

### **2.6.3. Línea de alimentación de consumo**

Une la línea de distribución con los puntos de salida del aire, es decir, que conducen el aire comprimido desde la salida de la línea de distribución hasta las herramientas, máquina o equipo consumidor.

### **2.6.4. Accesorios**

- Codos
- Tes
- Válvulas
- Uniones
- Tomas de aire

### **2.6.5. Manómetros de presión**

Para controlar la presión tanto en la generación como en la red y puntos de consumo.

### **2.6.6. Separadores**

Para separar el agua del flujo de aire del sistema.

### **2.6.7. Purgadores**

Los purgadores son necesarios para poder evacuar el condensado que se separa del aire comprimido, tanto a la salida del compresor como en el depósito de aire y en todo el trayecto de la red de distribución de aire comprimido.

### **2.6.8. Unidad de mantenimiento**

Para tratar el aire comprimido a la entrada de los equipos consumidores.

### **2.7. Distribución de aire comprimido**

El aire comprimido se conduce desde la salida del compresor hacia el tanque de almacenamiento pasando por el refrigerador, prefiltros y secador de aire, (si se incluyen en la red), y del tanque de almacenamiento pasando por los filtros (si se incluyen en la red) llega hasta la línea de distribución por medio de la línea principal. La línea de distribución conduce el aire comprimido hacia la línea de alimentación de consumo y el aire sale de la línea de consumo pasando por la unidad de mantenimiento, directamente hacia la herramienta, máquina, o equipo consumidor.



### **3. CLASIFICACIÓN DE LOS COMPRESORES**

#### **3.1. Compresores de flujo intermitente o de desplazamiento positivo**

Son compresores en los que el incremento de la presión del aire, gas o vapor, se produce con la reducción de su volumen en la cámara de compresión o por contraflujo en un recinto cerrado. Los compresores de desplazamiento positivo se subdividen en dos grupos:

- Compresores alternativos
- Compresores rotativos

##### **3.1.1. Compresores alternativos**

Son compresores en los que la entrada y salida de aire a la cámara o recinto de compresión se realizan mediante válvulas, además, consta de uno o más pistones o diafragmas para realizar la compresión y su movimiento es alternativo. Los compresores alternativos se subdividen en compresores de émbolo y compresores de membrana.

##### **3.1.1.1. Compresores alternativos de émbolo**

Son los compresores más comunes y elevan la presión del aire reduciendo su volumen mediante el desplazamiento de un pistón dentro de un cilindro. Estos compresores pueden ser de uno o más cilindros, así como de una o más etapas, logrando mayor compresión en los compresores de varias etapas. Los compresores de émbolo pueden subdividirse en compresores de

émbolo lubricados y compresores de émbolo sin lubricación y se fabrican compresores de baja, media y alta presión.

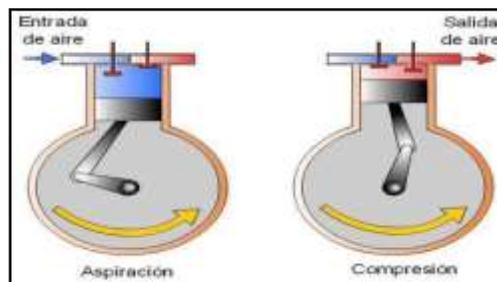
Según Marcial Carrobles y Félix Rodríguez, las presiones que se alcanzan con los compresores de émbolo son las siguientes:

- Hasta 12 bar = 1 etapa
- Hasta 20 bar = 2 etapas
- Hasta 200 bar = 3 o más etapas

El funcionamiento del compresor de émbolo de una etapa es el siguiente:

El aire entra al cilindro a través de la válvula de admisión durante la carrera de descenso del émbolo, hasta que el pistón llega al punto muerto inferior que es cuando la válvula de admisión se cierra. El pistón comprime el aire durante su carrera de ascenso y cuando la presión del aire vence la válvula de escape, esta se abre y deja circular el aire comprimido hasta el acumulador o hasta los consumidores.

Figura 13. **Aspiración y compresión del compresor alternativo de émbolo**



Fuente: <http://gasllave.wordpress.com/author/diferquisi/> Consulta: 24 de septiembre de 2014.

### 3.1.1.2. Compresores alternativos de membrana

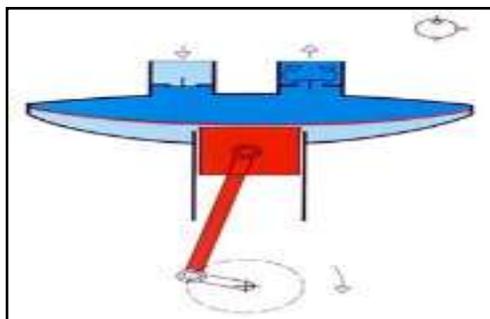
Los compresores de membrana son compresores alternativos libres de aceite y funcionan de manera similar a los compresores de pistón. La diferencia es el sistema de cierre hermético, que en los compresores de pistón lo realizan los segmentos y en los de membrana se realiza con la membrana elástica.

El compresor realiza los tiempos de admisión y compresión, y las válvulas son similares a las válvulas del compresor de pistón, normalmente láminas.

La membrana puede funcionar mecánicamente cuyo movimiento se logra a través de una varilla que conecta la membrana con el cigüeñal, o puede funcionar hidráulicamente, en este caso el acople de la membrana se hace por medio de un fluido tal como aceite, fluorocarbonos inertes o agua jabonosa.

La presión hidráulica alternativa que origina el movimiento de la membrana es producida por una bomba de pistón.

Figura 14. **Compresor de membrana**



Fuente: <https://sites.google.com/site/circuito11alejandroadrian/2-compresores-o-generadores-de-aire-comprimido/2-1-compresor-de-pistones/2-2-compresor-de-membrana>. Consulta. 17 de septiembre de 2014.

### **3.1.2. Compresores rotativos**

El nombre de compresores rotativos deriva de que estas máquinas utilizan un movimiento rotatorio y continuo para producir aire comprimido. Los compresores rotativos se subdividen en:

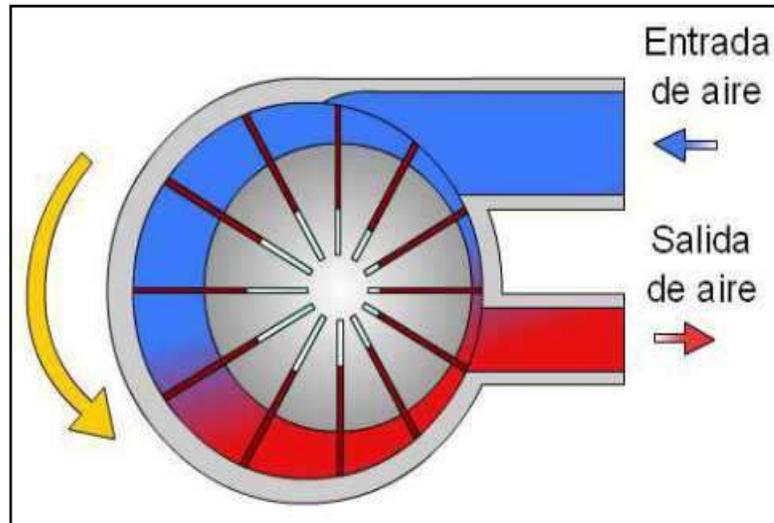
- Compresores rotativos de paletas
- Compresores rotativos de lóbulos o Roots
- Compresores rotativos de tornillo
- Compresores rotativos de anillo o pistón líquido

#### **3.1.2.1. Compresor rotativo de paletas**

Estos compresores constan de un rotor instalado excéntricamente con el estator y concéntricamente con las paletas dispuestas radialmente. Al girar el rotor con él giran las paletas, entre cada par de paletas, el rotor y el estator, se forma la cámara de trabajo por la cual entra el aire y a medida que el rotor y paletas giran alcanza su volumen máximo e inmediatamente se empieza a reducir el volumen con lo que se produce la compresión del aire.

El costo de servicio es muy elevado debido al desgaste de las paletas por el uso. El rango de presiones va desde 1 a 10 bar.

Figura 15. **Compresor rotativo de paletas**

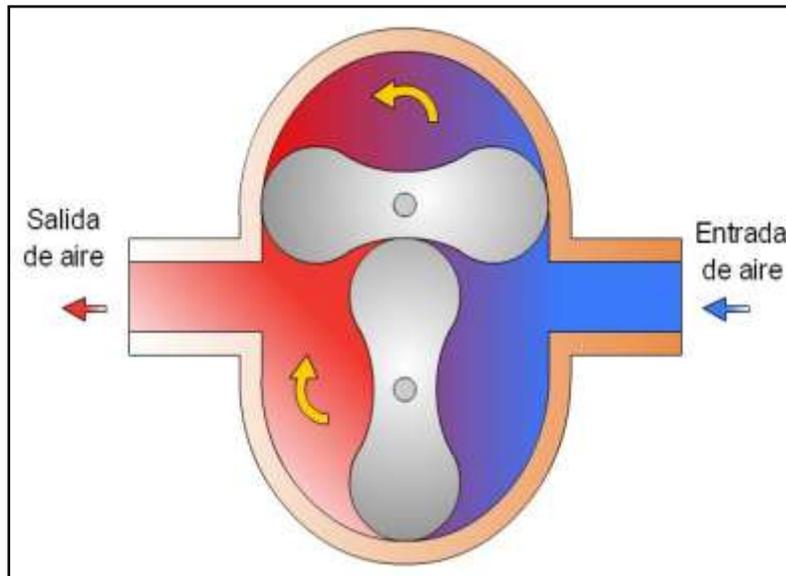


Fuente: <http://gasslave.wordpress.com/author/diferquisi/> Consulta: 24 de septiembre de 2014.

### 3.1.2.2. **Compresor rotativo de lóbulos**

También conocidos como compresores Roots o sopladores porque más que comprimir el aire lo que hacen es impulsarlo, por lo que tienen gran aplicación para bajas presiones. Constan de una carcasa en la cual se montan dos rotores o tres rotores con perfiles idénticos en forma de ocho que pueden ser helicoidales o rectos, los cuales giran a la misma velocidad, pero en sentido contrario uno del otro. Cuando los rotores giran impulsan el aire desde la entrada hasta la salida y la compresión de aire se produce en el sistema de descarga o tanque receptor donde se lleva a cabo el contraflujo de aire que es el aumento de moléculas de aire en un volumen fijo. La velocidad se mantiene sincronizada mediante engranajes exteriores. Presentan la ventaja de entregar aire totalmente libre de aceite debido a que los rotores no necesitan de lubricación, pues no existe ningún contacto o fricción entre ellos ni entre rotores y carcasa.

Figura 16. **Diagrama de funcionamiento del compresor de lóbulos**

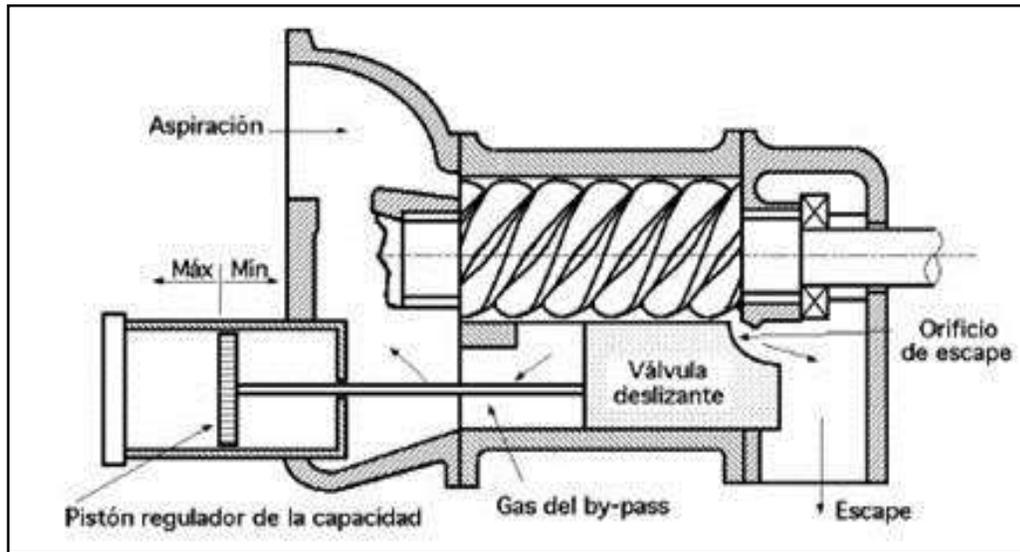


Fuente: <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2014/03/03/compresores-de-lobulos-o-tipo-roots/>. Consulta: 22 de septiembre de 2014.

### 3.1.2.3. **Compresor rotativo de tornillos**

Los compresores de tornillo constan de dos rotores en forma de tornillo sin fin, uno macho que es el que forma los lóbulos y otro hembra que forma las gargantas, al girar ambos tornillos los lóbulos se introducen en las gargantas con lo cual se genera la succión del aire, el cual queda atrapado entre los espacios de las roscas, este espacio se reduce a medida que los tornillos giran uno en sentido opuesto al otro, lo cual genera el aumento de presión en el aire que queda encerrado entre los alojamientos, y los perfiles de los tornillos crean la descarga axial del aire comprimido. Los compresores de tornillo pueden ser de una o de dos etapas y son los que predominan en la actualidad por su alta eficiencia. El rango de presiones en estos compresores va de 5 a 14 bar.

Figura 17. **Compresor rotativo de tornillos**



Fuente: <http://tecnicayateismo.files.wordpress.com/2013/06/3.jpg>. Consulta: 26 de agosto de 2014.

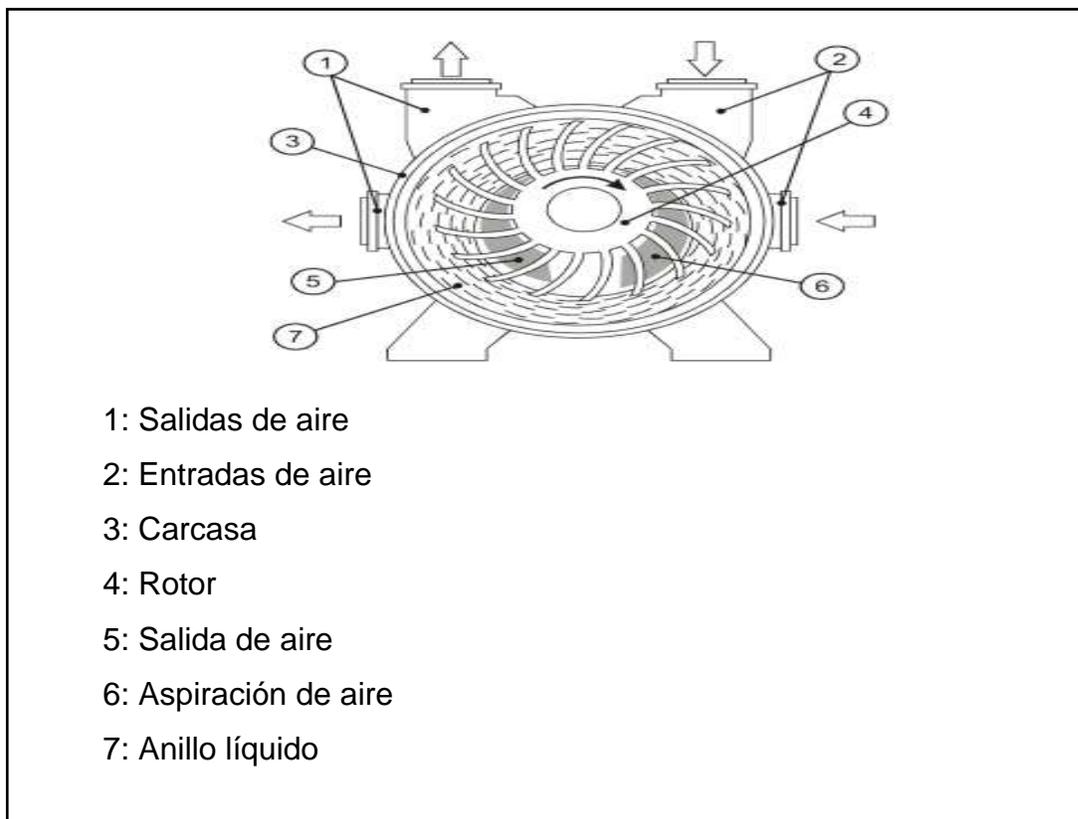
#### 3.1.2.4. **Compresor rotativo de pistón líquido**

Este compresor está constituido por un rotor con paletas fijas curvadas hacia adelante montados dentro de una carcasa circular alrededor de un cuerpo central que tiene aberturas de admisión y descarga, las paletas actúan sobre el líquido que generalmente es agua atrapado en el interior de la carcasa, y por la fuerza centrífuga el agua es proyectada contra las paredes de la carcasa, con lo que se forma el pistón o anillo líquido para actuar como sello entre cada par de paletas con lo que se logra la compresión del aire reduciendo su volumen. La refrigeración de estos compresores es directa debido al contacto directo entre el gas y el líquido, esto favorece a que la temperatura de salida del aire esté cerca de la temperatura de entrada del líquido pero también provoca que el aire comprimido esté saturado.

El consumo de energía de este tipo de compresor es elevado debido al hecho de mantener el anillo líquido en constante movimiento durante todo el tiempo de funcionamiento.

Este compresor es del tipo libre de aceite puesto que solamente necesita lubricación en los rodamientos de la parte externa de la carcasa. Además, el líquido actúa como medio de desplazamiento, lubricante, medio sellante y refrigerante de la unidad compresora.

Figura 18. **Compresor de anillo o pistón líquido**



Fuente: <http://areamecanica.wordpress.com/2011/10/24/ingenieria-mecanica-bombas-de-vacio-de-anillo-liquido/>. Consulta: 24 de octubre de 2014.

### **3.2. Compresores de flujo continuo o dinámicos**

También conocidos como compresores de desplazamiento no positivo. En estos compresores se le incrementa la velocidad al gas con paletas rotativas o con un chorro de gas o vapor con el fin de que ésta velocidad se convierta en presión cuando el gas pasa por los difusores. Son adecuados para aplicaciones que requieran grandes caudales de aire a baja presión, el flujo de aire es continuo y se subdividen en:

- Compresores de flujo radial
- Compresores de flujo axial
- Compresores de flujo mixto

#### **3.2.1. Compresores de flujo radial (centrífugos)**

En estas máquinas, la trayectoria del flujo es perpendicular al eje de rotación y la compresión se produce por la fuerza centrífuga que actúa sobre el aire al entrar a la cámara de compresión. El aire entra al compresor aspirado por las aspas, el rotor incrementa la energía cinética del aire y cuando el aire entra al difusor la fuerza centrífuga se convierte en presión. El aire sale libre de aceite debido a que este compresor funciona en seco y la lubricación corresponde únicamente a los cojinetes externos. Puede ser de una o varias etapas, alcanzándose presiones de 8 bar y caudales entre 10 000 y 200 000 Nm<sup>3</sup>/h. Son máquinas de alta velocidad.

Figura 19. **Corte isométrico del compresor de flujo radial**



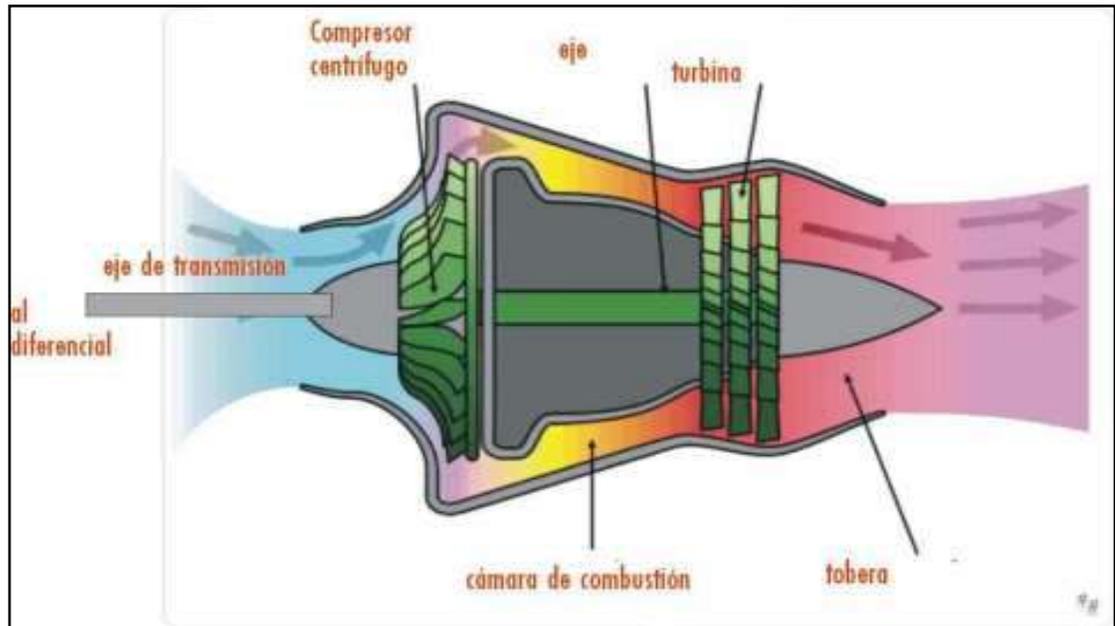
Fuente: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-164.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-164.htm). Consulta: 22 de septiembre de 2014.

### 3.2.2. **Compresores de flujo axial**

En estos compresores el flujo de aire es paralelo al eje del compresor y no cambia de sentido como en los compresores de flujo radial. Están formados por varios rotores y varios estatores, a los cuales se acoplan los álabes que son los que comprimen el aire, cada disco del rotor y estator o rodetes, forman una etapa de compresión. La presión se produce cuando el aire que es acelerado por el rotor choca y frena con el estator, convirtiéndose la energía cinética en presión, esto se lleva a cabo en cada etapa de compresión. Generalmente el 50 por ciento del aumento de la presión se produce en los álabes del rotor y el otro 50 por ciento se produce en los álabes del estator. Se construyen hasta de 20 etapas.

Con este compresor se alcanzan caudales desde 20 000 hasta 50 000 Nm<sup>3</sup>/h y presiones de 5 bares, por lo cual son poco utilizados en neumática industrial.

Figura 20. **Compresor de flujo axial**

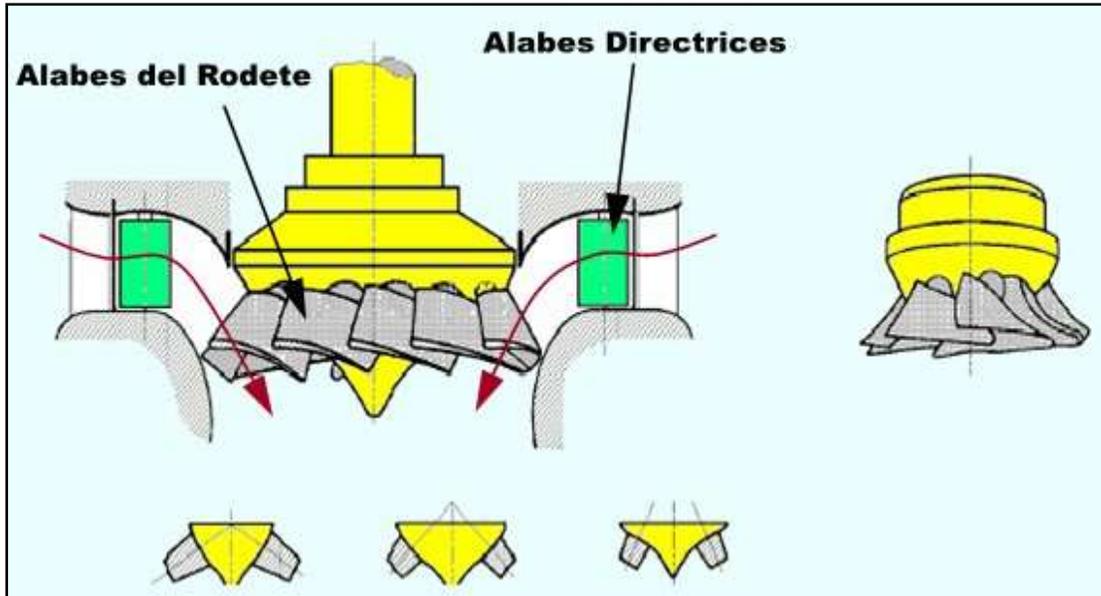


Fuente: <http://gasslave.wordpress.com/author/diferquisi/> Consulta: 24 de septiembre de 2014.

### 3.2.3. **Compresores de flujo mixto**

Entre los dos anteriores diseños se encuentra el compresor dinámico de flujo mixto, el cual combina características de diseño del centrífugo y el axial, sus características únicas de flujo hacen de este compresor el equipo ideal para aplicaciones de baja presión, el impulsor de flujo mixto puede manejar entre dos y tres veces el flujo que manejaría el impulsor de un compresor centrífugo con igual diámetro.

Figura 21. **Compresor de flujo mixto**



Fuente: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-164.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-164.htm). Consulta: 29 de octubre de 2014.

## 4. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

### 4.1. Planteamiento del problema

En NSCI, S. A. sin hacer un estudio previo, se adecuo un sistema de generación y distribución de aire comprimido que fue diseñado para una planta con necesidades diferentes a las existentes en la actualidad, el sistema de generación y distribución de aire comprimido está bien diseñado y dimensionado, pero para una planta con mayor capacidad de producción y por lo mismo, con mayor demanda de aire comprimido, esto hace notar las debilidades existentes en el sistema actual, debilidades como:

- Actualmente, en el cuarto de máquinas se tiene instalado únicamente un compresor, el cual opera sin interrupciones durante toda la jornada de trabajo y esto provoca los siguientes inconvenientes:
  - Al contar únicamente con un compresor, aumentan los paros de producción por falta de aire comprimido al momento de que el compresor falle o se le preste mantenimiento puesto que no se cuenta con un compresor en disponibilidad o para emergencias.
  - El compresor instalado actualmente está sobredimensionado de acuerdo con la demanda de aire actual en la planta, pues tiene una potencia de 50 caballos de potencia y una capacidad de generación de aire comprimido equivalente a 220 pies cúbicos por minuto y en temporadas de alta producción, cuando toda la maquinaria y equipo está en funcionamiento al mismo tiempo, la

máxima demanda de aire es de 165 pies cúbicos por minuto de acuerdo con el análisis realizado por Kaeser Compresores de Guatemala en las instalaciones. Además, el compresor opera sin interrupciones durante toda la jornada de trabajo, aún en temporada de baja producción donde la demanda de aire promedio es de 44,16 pies cúbicos por minuto y esto eleva los costos de generación de aire comprimido con el elevado consume de energía eléctrica por la capacidad en hp del motor principal del compresor puesto que la demanda de aire en las instalaciones se puede cubrir con un compresor de menor potencia.

- A esto se le suma que el aire que se genera no se aprovecha en su totalidad por los equipos consumidores, pues existen fugas en la red de distribución de aire.
- El depósito de almacenamiento de aire comprimido está mal dimensionado, puesto que debe ser de mayor volumen de acuerdo con el análisis presentado en la sección de almacenamiento del aire comprimido del capítulo 2, esto de la mano con el exceso de fugas de aire en la red, hacen que el depósito de aire se vacíe en intervalos cortos de tiempo, lo que requiere de arranques continuos del compresor provocando picos altos en el consumo de energía eléctrica.
- No se cuenta con sistema de tratamiento de aire pues no existe refrigerador de aire, los prefiltros están inservibles y el secador de aire está eliminado del sistema, además de que no existen filtros, ni separadores de condensado y a las unidades de mantenimiento no se les brinda el servicio adecuado y necesario para su correcto funcionamiento.

- El sistema de purga es manual, pero no se elimina el condensado constantemente por lo que el agua y el aceite, llegan hasta los equipos consumidores,
- Todo esto hace que se disponga de aire comprimido saturado de humedad y contaminado con impurezas y aceite. Los contaminantes y condensado circulan por toda la red provocando corrosión y desgaste en las tuberías y llegan hasta los equipos consumidores y esto genera desgaste y mal funcionamiento de la maquinaria, reduce la vida útil de los equipos resultando en paros y gastos innecesarios por mantenimiento, además de provocar pérdidas de producción pues el producto en fabricación se contamina con las impurezas del aire.
- Algunas líneas de alimentación de consumo son subterráneas lo que imposibilita la eliminación del condensado provocando corrosión en las tuberías, además, las conexiones entre las líneas de distribución y las líneas de alimentación no cuentan con cuello de ganso lo que provoca que el condensado llegue a los equipos consumidores.

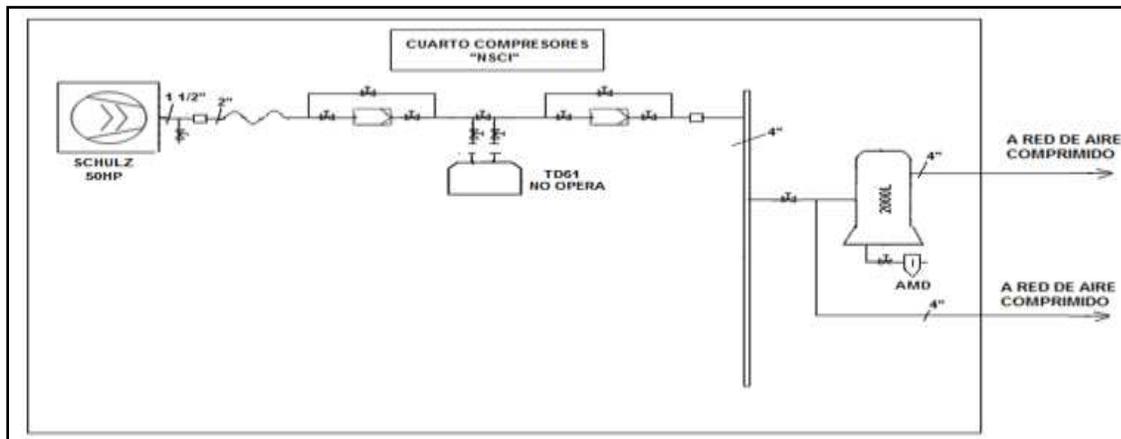
Estos factores negativos en el sistema de generación y distribución de aire comprimido actual en NSCI, S. A. elevan el costo de generación de aire comprimido con exceso de consumo de energía eléctrica, elevan el costo de mantenimiento con el aumento de paros innecesarios y reducción de la vida útil de los equipos, provoca pérdidas de producción y todo esto se traduce en el elevado costo de producción de la planta.

## 4.2. Circuito de aire comprimido actual

El circuito de aire comprimido está compuesto de los siguientes elementos:

- Un compresor de 50 caballos de potencia y 220 pies cúbicos por minuto de capacidad de generación de aire comprimido.
- Un tanque de almacenamiento de 2000 litros de capacidad.
- Red de distribución.
- Tomas de aire.
- Unidades de mantenimiento.

Figura 22. Diagrama del sistema de aire comprimido actual



Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. Análisis de demanda de aire, NSCI, S.A. Page 8.

## 4.3. Descripción del compresor actual

Las características técnicas del compresor rotativo de tornillo instalado actualmente, se detallan en la tabla III.

Tabla III. **Características técnicas del compresor actual**

220V – 380V – 440V / 50 Hz – 60 Hz

Versión	Bar		8	10	12	
Caudal Volumétrico	pies <sup>3</sup> /min		220	200	185	
	l/min		6 230	5 660	5 240	
Presión Trabajo	Barg/psig		8/116	10/145	12/174	
	mínimo		4,1/60	4,1/60	4,1/60	
RPM	Rotor macho		4 400	4 000	3 700	
Polea (Mot. Unidad)	50 Hz (dimensiones mm)		152/243	167/243	180/243	
	60 Hz (dimensiones mm)		152/190	167/190	180/190	
TRANSMISIÓN CORREA			POLY "V"	POLY "V"	POLY "V"	
MOTOR PRINCIPAL	Hp		50	50	50	
	kW		37	37	37	
	Tensión (V)			220/380 380/660 440/760	220/380 380/660 440/760	220/380 380/660 440/760
	RPM	50 Hz		2 840	2 840	2 840
		60 Hz		3 550	3 550	3 550
	Modo de partida			Y/Δ	Y/Δ	Y/Δ
MOTOR VENTILADOR	hp	50 Hz	3,00	3,00	3,00	
		60 Hz	1,50	1,50	1,50	
	kW	50 Hz	2,20	2,20	2,20	
		60 Hz	1,13	1,13	1,13	
	Tensión (V)			220/380 440	220/380 440	220/380 440
	RPM	50 Hz		1 400	1 400	1 400
60 Hz			1 700	1 700	1 700	
DATOS ELÉCTRICOS	Fusible máx. (A)	220 V	50 Hz	200	200	
			60 Hz	200	200	
	Fusible máx. (A)	380 V	50 Hz	125	125	
			60 Hz	100	100	
	Fusible máx. (A)	440 V	50 Hz	100	100	
			60 Hz	100	100	
Tensión del comando (V)			220ca	220ca	220ca	
TEMPERATURA	Temperatura ambiente recomendada (°C)		0-40	0-40	0-40	
COMPRESOR CON REFRIGERACIÓN POR AIRE	Dimensiones entrada del aire (mm)	50 Hz	850x600	850x600	850x600	
		60 Hz	960x810	960x810	960x810	
	Dimensiones salida del aire (mm)	50 Hz	865x795	865x795	865x795	

### Continuación de la tabla III.

NIVEL DE RUIDO	60 Hz		760x720	760x720	760x720
	Tolerancia +/- 3 dB(A)		80	80	80
ACEITE LUBRICANTE	Volumen (l)		21	21	21
	Denominación		ISO 32		Fabricante
TEMPERATURA AMBIENTE	De -10 C° hasta 20 C°		DTE 24		Mobil
			RANDO HD 32		Texaco
			TELLUS C 32		Shell
			COMPUTELLA 32		
	Denominación		ISO 46		Fabricante
	De 20 C° hasta 40 C°		DTE 25		Mobil
			RANDO HD 46		Texaco
			TELLUS C 46		Shell
		COMPUTELLA 46			
LLAVE SERVICIO HEMBRA	BSP		1,1/2"	1,1/2"	1,1/2"
PESO COMPRESOR	kg	50 Hz	860	860	860
	kg	60 Hz	850	850	850

Fuente: SCHULZ. *Manual del compresor de tornillo de 50 hp.* p. 8.

#### 4.4. Costos de generación del sistema actual

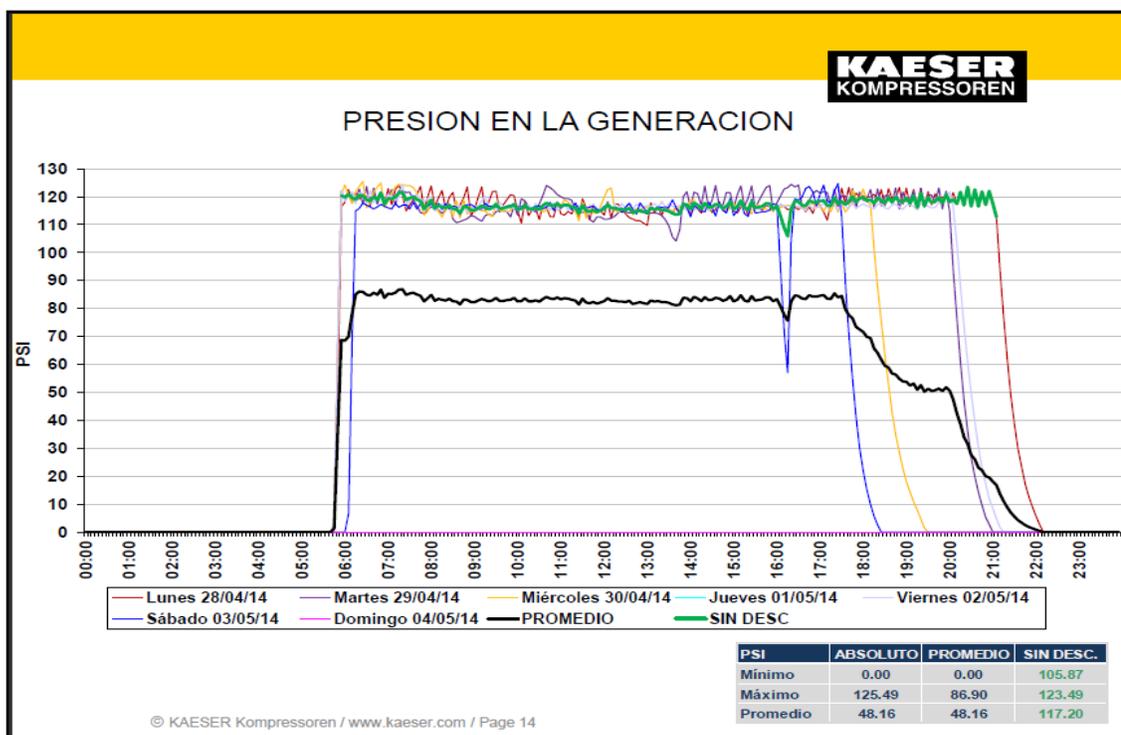
Con la finalidad de conocer el funcionamiento y el estado actual del sistema de generación y distribución de aire comprimido en NSCI, S. A., se realizó un análisis por Kaeser Compresores de Guatemala. Este se realizó del 26 de abril al 8 de mayo de 2014 y se tomó la semana del 28 de abril al 4 de mayo del 2014 para obtener los datos promedio.

Con el análisis realizado por Kaeser Compresores de Guatemala en el sistema de generación y distribución de aire comprimido de NSCI, S. A. se determina que la demanda de aire promedio es de 44,16 pies cúbicos por minuto, la máxima demanda de aire es de 165 pies cúbicos por minuto y la energía específica indica que por cada pie cúbico por minuto generado se consume en

promedio 0,2736 kilovatios. Además se determina que las fugas en el sistema son de aproximadamente 1,18 pies cúbicos por minuto, de acuerdo con la figura 23, la cual indica que inmediatamente luego de que el compresor se apaga, el depósito de aire comprimido queda vacío aproximadamente una hora después.

El depósito es de una capacidad de 2000 litros equivalentes a 72,63 pies<sup>3</sup> los cuales se dividen entre los 60 minutos correspondientes a 1 hora y esto da el promedio de las fugas en el sistema actual (1,18 pies cúbicos por minuto).

Figura 23. **Medición de la presión**



Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación del análisis NSCI*, S. A. p. 14.

En la planta se laboran generalmente 6 días por semana, aunque con frecuencia se laboran turnos nocturnos y días domingo.

Regularmente, el compresor opera de las 6 de la mañana hasta las 8 de la noche.

El costo por kilovatio por hora de acuerdo con el contrato actual de energía eléctrica es de \$ 0,14177. Este costo corresponde al mes de julio del 2014.

Estos datos se resumen en la siguiente tabla, de acuerdo con el tipo de cambio para la fecha 25 de octubre de 2014, US\$ 1,00 = Q. 7,70:

Tabla IV. **Resumen de costos**

<b>Concepto</b>	<b>Promedio</b>
Precio del kilovatio hora	Q. 1,09163
Cantidad de días laborados por año	320,00000
Horas de trabajo por día	14,00000
Demanda de aire anual promedio (pie <sup>3</sup> /año)	11 870 208,00000
Demanda máxima de aire anual (pie <sup>3</sup> /año)	44 352 000,00000
Generación de aire anual de acuerdo con la capacidad del compresor actual (pie <sup>3</sup> /año)	59 136 000,00000

Fuente: elaboración propia.

La demanda de aire anual promedio se calcula al multiplicar la demanda promedio (44,16 pies cúbicos por minuto) por 60 minutos correspondientes a 1 hora y por 4480 horas que es el promedio de horas laboradas por año.

$$\text{Demanda promedio} = 44,16 \times 60 \times 4480 = 11\,870\,200 \text{ (pie}^3\text{/año)}.$$

La demanda máxima de aire anual se calcula al multiplicar la demanda máxima (165 pies cúbicos por minuto) por 60 minutos correspondientes a 1 hora y por 4480 horas que es el promedio de horas laboradas por año.

$$\text{Demanda máxima} = 1654 \times 60 \times 4480 = 44\,352\,000 \text{ (pie}^3\text{/año)}.$$

La generación anual se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = \text{cgc} \times \frac{\text{min}}{h} \times \text{hfa}$$

Donde:

G = generación en pie<sup>3</sup>/año

cgc = capacidad de generación del compresor en pie<sup>3</sup>/min

min = minuto

h = hora

hfa = horas de funcionamiento del compresor por año

$$G = 220 \times 60 \times 4480 = 59\,136\,000 \text{ pie}^3\text{/año}.$$

Tabla V. **Costo de generación promedio anual**

Concepto	Promedio
Precio del kilovatio hora	Q. 1,09163
Demanda de aire anual promedio (pie <sup>3</sup> /año)	11 870 208,00000
Costo anual de electricidad	Q. 59 087,91073

Fuente: elaboración propia.

El costo promedio anual se obtiene multiplicando la demanda promedio (44,16 pies cúbicos por minuto) por la energía específica (kilovatios por pie cúbico por minuto) por las horas laboradas por año y por el costo del kilovatio por hora (quetzales por kilovatio por hora).

$$\text{Costo promedio} = 44,16 \times 0,2736 \times 4480 \times 1,09163 = \text{Q. } 59\,087,91073$$

Tabla VI. **Costo de generación máximo anual**

Concepto	Promedio
Precio del kilovatio hora	Q. 1,09163
Demanda de aire anual promedio (pie <sup>3</sup> /año)	44 352 000,00000
Costo anual de electricidad	Q. 220 776,84030

Fuente: elaboración propia.

El costo máximo anual se obtiene multiplicando la demanda máxima (165 pies cúbicos por minuto) por la energía específica (kilovatio por pie cúbico por minuto) por las horas laboradas por año y por el costo del kilovatio por hora (quetzales por kilovatio por hora).

$$\text{Costo máximo} = 165 \times 0,2736 \times 4480 \times 1,09163 = \text{Q. } 220\,776,8403$$

Tabla VII. **Costo de generación real anual**

Concepto	Promedio
Precio del kilovatio hora	Q. 1,09163
Generación de aire anual de acuerdo con la capacidad del compresor actual (pie <sup>3</sup> /año)	59 136 000,00000
Costo real de electricidad anual	Q. 294 369,12050

Fuente: elaboración propia.

El costo de generación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = cgc \times EE \times \frac{h}{\text{año}} \times \%U \times CkW/h$$

Donde:

C = costo anual de generación en quetzales

cgc = capacidad de generación del compresor

EE = energía específica en kW/pie<sup>3</sup>/min

H = horas

%U = porcentaje de utilización del compresor

CkW/h = costo en quetzales del kW/hora

$$C = 220 \times 0,2736 \times 4480 \times 1 \times 1,09163$$

$$C = Q. 294 369,1205$$



## **5. SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS**

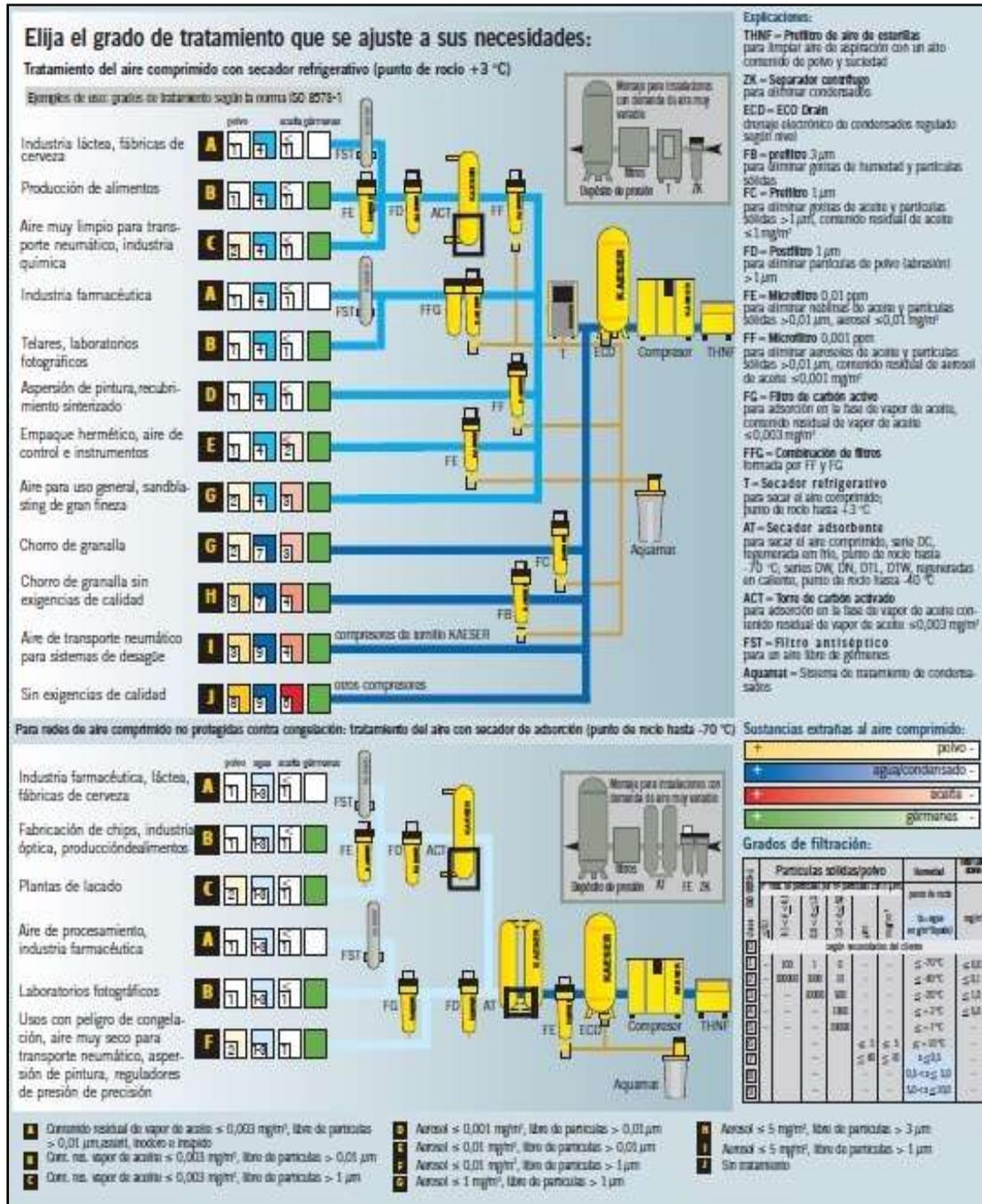
### **5.1. Selección del compresor**

Para seleccionar correctamente el compresor a instalar se deben tomar en consideración factores importantes que determinan el tipo y tamaño del equipo, factores tales como el proceso para el cual se requiere el aire comprimido, (calidad del aire), esto depende del tipo de industria para la cual se instalará el compresor, la presión de trabajo, el caudal de aire necesario, fugas, pérdidas por fricción en las tuberías y accesorios, posibles ampliaciones de la planta, entre otros.

#### **5.1.1. Calidad del aire**

En NSCI, S. A. se manipulan productos de cuidado e higiene personal así como productos para uso doméstico, lo cual se indicó en el capítulo 1. Estos productos entran en contacto con el consumidor final directa o indirectamente, por lo tanto de acuerdo con la Norma ISO 8573-1 (2010) Norma de Calidad de Aire Comprimido, descrita en el capítulo 2, se determina que en NSCI, S. A. se requiere un aire de calidad 1-4-1, puesto que se considera que esta clasificación de aire comprimido es la más recomendable para la industria cosmética y garantiza la calidad de los productos.

Figura 24. Gráfica de calidad y tratamiento del aire comprimido



Fuente: [http://airecomprimidoytratamiento.blogspot.com/2013\\_07\\_01\\_archive.html](http://airecomprimidoytratamiento.blogspot.com/2013_07_01_archive.html). Consulta: 15 de octubre de 2014.

### 5.1.2. Presión

Se define como la cantidad de fuerza que se aplica por unidad de área.

Siendo  $P = F/A$ , la ecuación que representa la presión.

Las unidades de presión varían de acuerdo con el sistema de unidades de medida que se trabaje.

En el Sistema Internacional, la unidad de medida para la presión es el  $N/m^2$  (Newton por metro cuadrado), que comúnmente recibe el nombre de Pascal, debido a que es una unidad muy pequeña, se usan prefijos tales como kilo pascal (kPa), Mega pascal (MPa) y Giga pascal (GPa).

En el Sistema Cegesimal de Unidades, (CGS) la unidad de medida para la presión es la baria que corresponde a la presión ejercida por una fuerza de una dina sobre una superficie de un centímetro cuadrado.

En el sistema Inglés la unidad de medida para la presión es el PSI, que es una libra de fuerza por pulgada cuadrada.

Estas son las unidades básicas para medir la presión, aunque existen otras unidades de presión tales como la atmósfera, el bar, los milímetros de mercurio, columnas de agua, etc.

En la industria las unidades de presión más empleadas son el PSI y el bar.

Las equivalencias entre estas unidades de presión se detallan en la tabla VIII.

Tabla VIII. **Equivalencia entre las unidades de presión**

Sistema Internacional	Sistema CGS	Sistema inglés.	Otras unidades de presión			
			Bar	Atmósfera	mmHg	kgf/cm <sup>2</sup>
N/m <sup>2</sup> Pascal	Baria	PSI				
1	10					
0,10	1 baria		10 <sup>-6</sup>			
0,0001450377		1				
100 000		14,5037738	1		750,062	1,01972
101 325	1 013 250		1,01325	1	750	
133,28947379					1	

Fuente: elaboración propia.

### 5.1.2.1. Presión relativa

También llamada presión manométrica y es la cantidad de presión que se mide desde la presión atmosférica.

### 5.1.2.2. Presión absoluta

Es la cantidad de presión que se mide tomando como referencia el cero absoluto, siempre es mayor que la presión relativa. No es más que la presión atmosférica sumada a la presión relativa o manométrica.

$$P_a = P_r + P_{at}$$

Donde:

$P_a$  = presión absoluta

Pr = presión relativa

Pat= presión atmosférica

### **5.1.2.3. Presión de trabajo en NSCI**

La presión de trabajo requerida por el equipo en la planta corresponde a 6 bares, y para determinarla, se consultó el manual del fabricante y se observó el manómetro en cada máquina durante su funcionamiento normal, dichas observaciones revelaron que la mayoría de las máquinas neumáticas trabajan con presión de 6 bar o menos.

### **5.1.3. Caudal**

Es la cantidad de fluido, en este caso es la cantidad de aire, que pasa por un punto específico del conducto por unidad de tiempo.

El caudal puede expresarse como caudal másico o caudal volumétrico.

El caudal másico es la cantidad de masa de fluido que pasa por un punto específico por unidad de tiempo.

El caudal volumétrico es el volumen de fluido que pasa por un punto específico por unidad de tiempo.

El caudal másico se expresa en kilogramos por segundo (kg/s) mientras que el caudal volumétrico se expresa en metros cúbicos por minuto (m<sup>3</sup>/min) aunque es más común expresar el caudal en litros por minuto (l/min) o metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/h).

#### 5.1.4. Determinando la demanda de aire

Para determinar el caudal necesario en las instalaciones de NSCI, se procede de la siguiente manera.

##### 5.1.4.1. Se determina el número de consumidores por departamento de producción

En las siguientes tablas se contabiliza el número de consumidores de aire comprimido en cada departamento de producción de la planta.

Tabla IX. **Maquinaria del Departamento de Jabón en Barra**

No.	Nombre del equipo	Cantidad
1	Troqueladoras de jabón	4
2	Envolvedoras	2
3	Encartonadora	1
4	Formadora de paquetes	1
	Total de máquinas	8

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Maquinaria del Departamento de Jabón Líquido**

No.	Nombre del equipo	Cantidad
1	Llenadoras	4
2	Llenadora y selladora	1
3	Empacadora	1
4	Etiquetadora de envases	1
5	Roscadora de envases	1
	Total máquinas	8

Fuente: elaboración propia.

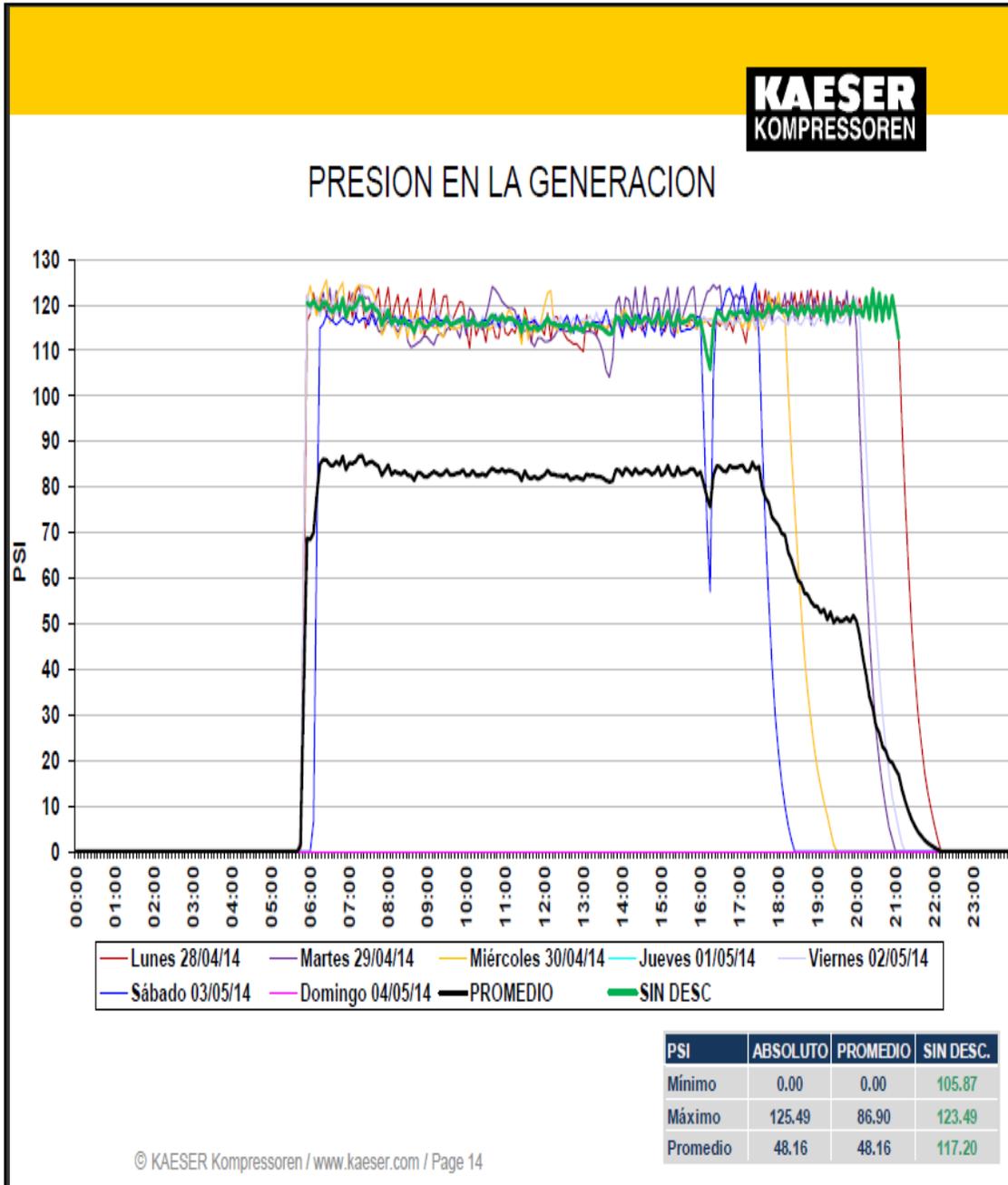
#### **5.1.4.2. Consumo de aire por equipo**

Para determinar la demanda de aire promedio y la demanda de aire máxima en la planta en general, tomando en consideración las fugas en el sistema, se realiza un análisis de demanda de aire por Kaeser Compresores de Guatemala. En dicho análisis se determina, la presión de trabajo, la entrega de aire por el compresor, la demanda de aire, el consumo de energía del compresor en kilovatios, la eficiencia energética total (EE Total), la entrega de aire y presión día a día, además de realizarse un análisis energético. Para realizar el análisis, se instaló en la red de distribución de aire el siguiente equipo:

- Data loggers
- Kilovatímetros trifásicos
- Transductores de presión
- Optoacopladores para carga/vacío

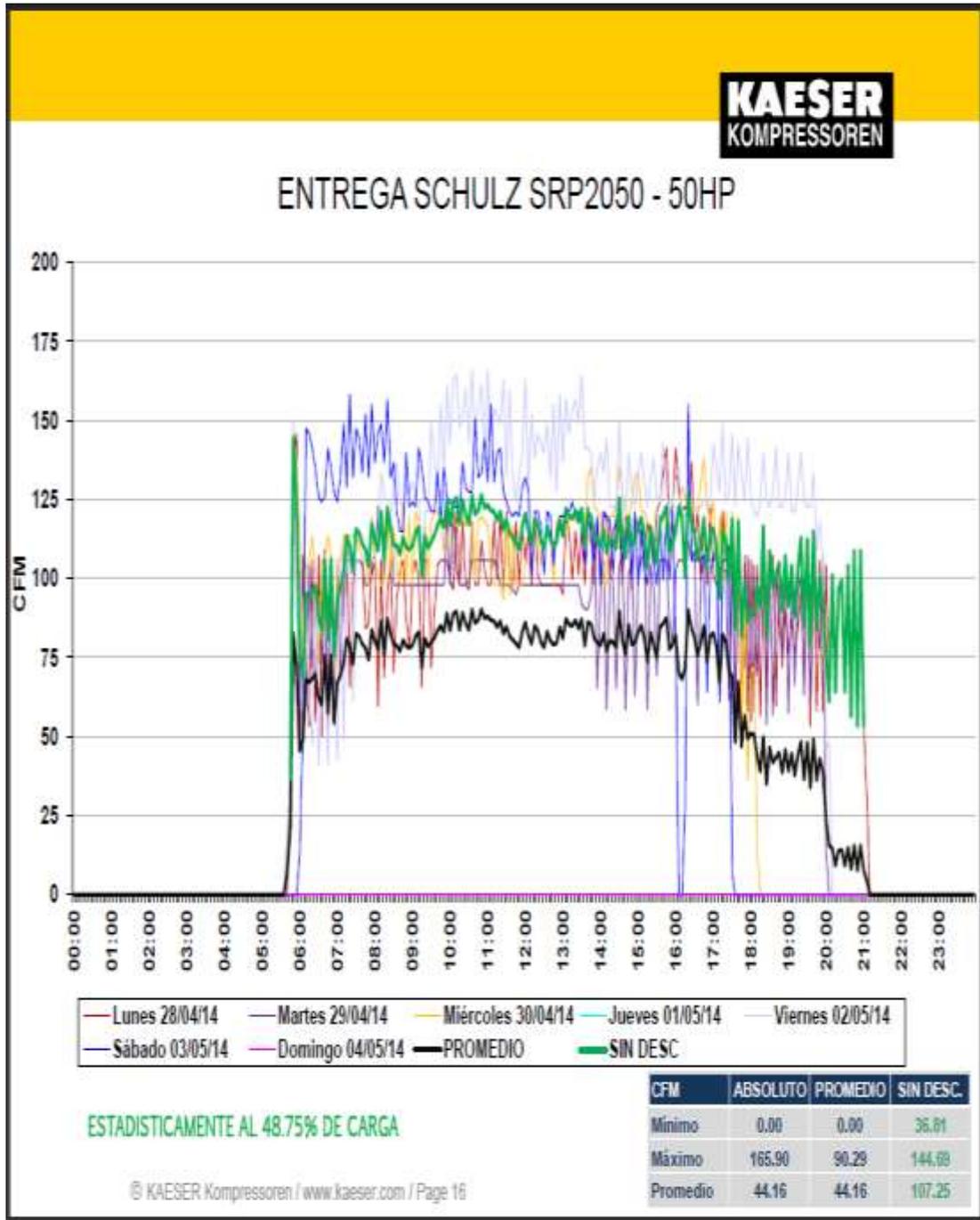
El período de medición corresponde del sábado 26 de abril al jueves 8 de mayo de 2014, y se toma la semana del lunes 28 de abril al domingo 4 de mayo de 2014, para obtener los datos promedio.

Figura 25. Medición de la presión



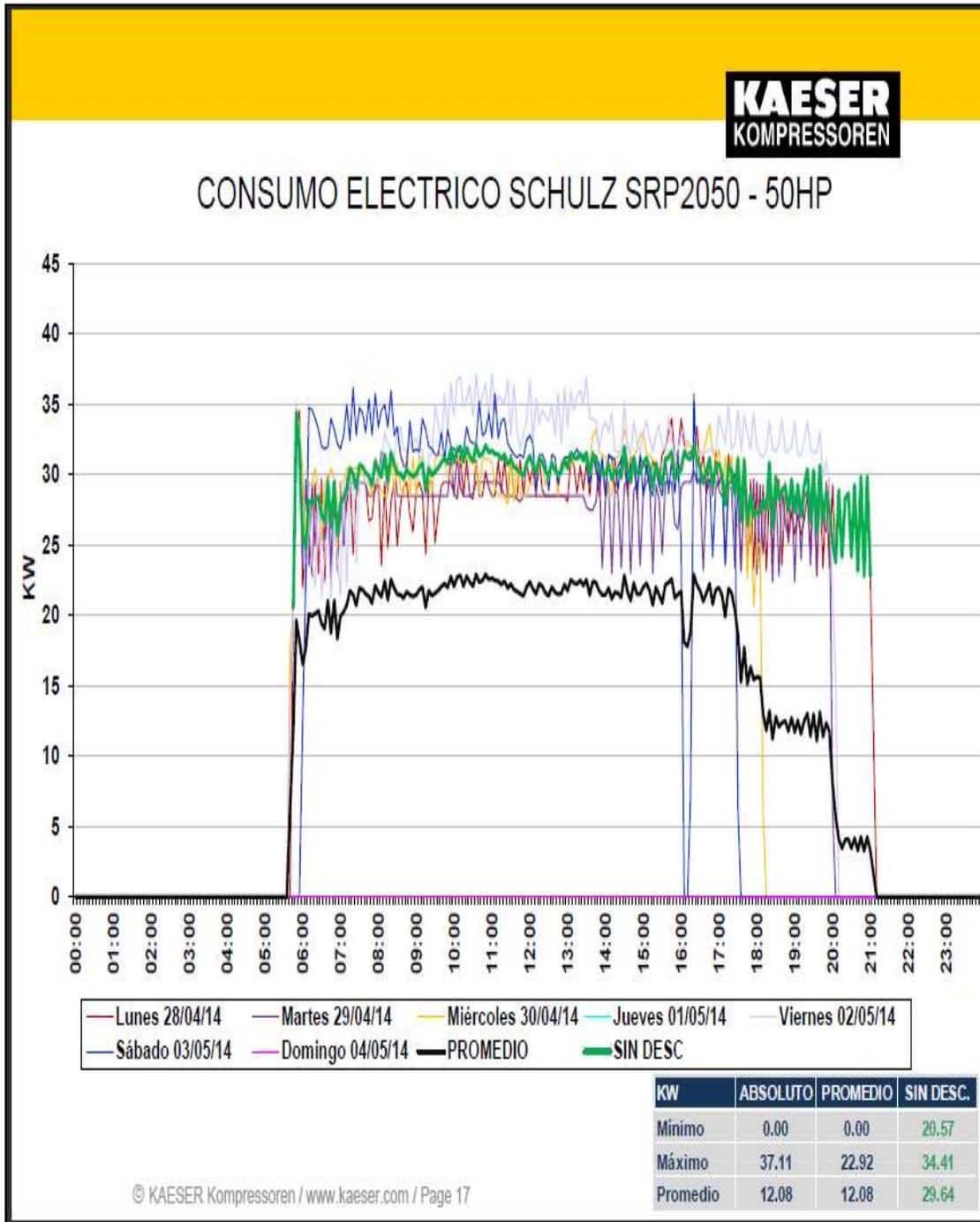
Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación análisis NSCI, S. A.* p. 14.

Figura 26. Demanda de aire del sistema actual



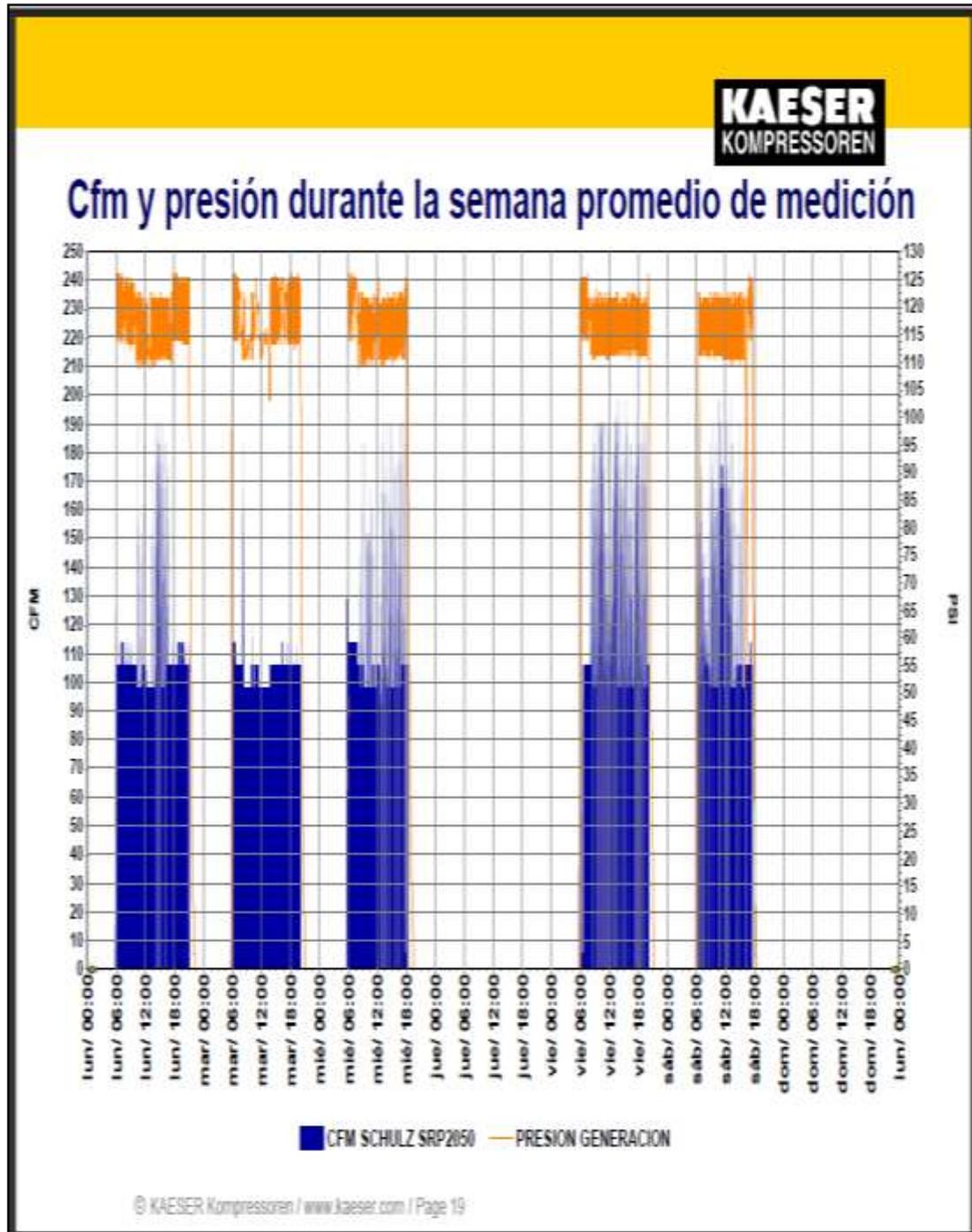
Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación análisis NSCI*, S. A. p. 16.

Figura 27. Consumo de energía del sistema de aire actual



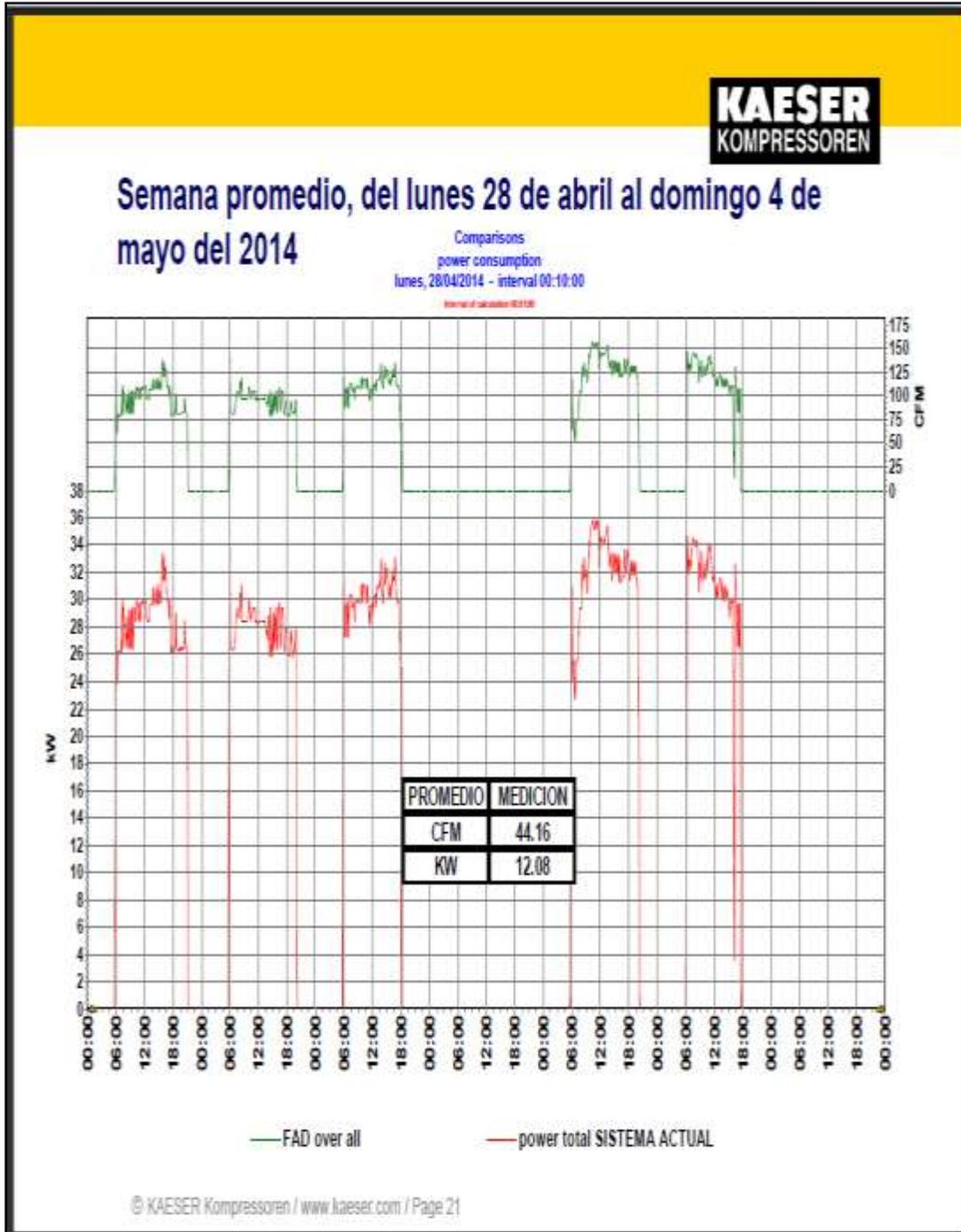
Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación análisis NSCI, S.A. p. 17.*

Figura 28. Entrega de aire y presión del sistema día a día



Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación análisis NSCI*, S. A. p. 19.

Figura 29. Demanda de aire y consumo de energía del sistema actual



Fuente: Kaeser Compresores de Guatemala. *Presentación análisis NSCI, S. A.* p. 21.

Con este estudio, se obtienen los siguientes datos:

- En la figura 25 se observa que la presión mínima en la generación es de 110 psi y la presión máxima es de 126 psi, por lo tanto se determina que la presión promedio en la generación durante la operación del compresor en la semana de medición es de 118 psi.
- De acuerdo con la figura 27, la energía específica o consumo de energía por cada pie<sup>3</sup> de aire generado, durante la semana de medición es de 0,2736 kilovatios por pie cúbico por minuto o 12,08 kilovatios por cada 44,16 pies cúbicos por minuto. Para determinar estos valores se tomó el mínimo y el máximo consumo de energía por día, durante el funcionamiento del compresor en la semana de medición.
- De la figura 29 se determina que durante la semana de medición, la demanda de aire día a día en promedio es de 44,16 pies cúbicos por minuto y la máxima demanda de aire es de 165 pies cúbicos por minuto.

Para determinar la demanda de aire por equipo y por departamento, se sigue uno de los siguientes procedimientos:

- Consultar el manual de la máquina para conocer el caudal de aire libre necesario que según el fabricante, la máquina necesita para su correcto funcionamiento.

Para las máquinas cuyo manual no está disponible o cuyo caudal de aire libre necesario para su funcionamiento no se indica en el manual del fabricante, el procedimiento para el cálculo de la demanda de aire es el siguiente:

- En aquellas máquinas que poseen cilindros neumáticos, se realiza a través del cálculo del volumen desplazado por los pistones de las

máquinas, lo que se lleva a cabo a partir de la siguiente ecuación que proporciona el caudal de aire libre. Soto Vásquez (2005, p. 39).

$$Q_{\text{libre}} = \frac{\pi}{4} * d^2 * c * n * p * N * 10^{-6}$$

Donde:

Q = consumo de aire (NI/min)

d = diámetro del cilindro (mm)

c = carrera del cilindro (mm)

n = número de ciclos completos por minuto

p = presión relativa de trabajo más 1 bar

N = número de efectos del cilindro

#### 5.1.4.3. Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Sólido

En las siguientes tablas se detalla el consumo de aire por equipo en el Departamento de Jabón en Barra.

Tabla XI. Consumo de aire de la maquinaria de la línea 1

Datos de operación	Troqueladora de jabón STUR-3	Empacadora CE-50 (Chongueadora)	Empacadora de jabón de tocador ACMA	Máquina celofanadora BFB 3711 AS (formadora de paquetes Tripack)
Consumo de aire (l/min)	400	450	450	450

**Continuación de la tabla XI.**

<b>Presión de trabajo bar</b>	7	6	6	6
<b>Cantidad</b>	1	1	1	1
<b>Utilización (%)</b>	100	100	67	58
<b>Factor de concurrencia (%)</b>	1	1	1	1
<b>Consumo de aire efectivo (l/min)</b>	1*400*1*1 400	1*450*1*1 450	1*450*0.67*1 302	1*450*0.58*1 261
<b>Requerimiento total</b> = 400 + 450 + 302 + 261 = 1413 l/min + tolerancias = 1413 + 141,3 + 211,95 + 282,6 = 2 048,85 l/min				
<b>Tolerancias permisibles:</b> Por fugas +10% = 141,3 Por mal cálculo +15% = 211,95 Por futuras ampliaciones +20% = 282,6				

Fuente: elaboración propia, con base a Kaeser Compresores de Guatemala. Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 5.

Tabla XII. **Consumo de aire de la maquinaria de la línea 2**

<b>Datos de operación</b>	Troqueladora de jabón Britannia	Empacadora de jabón de tocador Marchesini BA-300 (encartonadora)
<b>Consumo de aire (l/min)</b>	450	2
<b>Presión de trabajo bar</b>	6	6
<b>Cantidad</b>	1	1
<b>Utilización (%)</b>	100	100
<b>Factor de concurrencia (%)</b>	1	1
<b>Consumo de aire efectivo (l/min)</b>	1*450*1*1 450	1*2*1*1 2
<b>Requerimiento total</b> = 450 + 2 = 452 l/min + tolerancias = 452 + 45,2 + 67,8 + 90,4 = 655,4 l/min		
<b>Tolerancias permisibles:</b> Por fugas +10% = 45,2 Por mal cálculo +15% = 67,8 Por futuras ampliaciones +20% = 90,4		

Fuente: elaboración propia, con base a Kaeser Compresores de Guatemala. Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 5.

Tabla XIII. **Consumo de aire de la maquinaria de la línea 4**

<b>Datos de operación</b>	Troqueladora Neumática de pedal	Troqueladora de jabón de bola G. Mazonni S.P.A.
<b>Consumo de aire (l/min)</b>	95	450
<b>Presión de trabajo bar</b>	6	6
<b>Cantidad</b>	2	1
<b>Utilización (%)</b>	100	100
<b>Factor de concurrencia (%)</b>	1	1
<b>Consumo de aire efectivo (l/min)</b>	2*95*1*1 190	1*450*1*1 450
<b>Requerimiento total</b> = 190 + 450 = 640 l/min + tolerancias = 640 + 64 + 96 + 128 = 928 l/min		
<b>Tolerancias permisibles:</b> Por fugas +10% = 64 Por mal cálculo +15% = 96 Por futuras ampliaciones +20% = 128		

Fuente: elaboración propia, con base a Kaeser Compresores de Guatemala, Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 5.

La demanda total de aire en el Departamento de Sólidos se obtiene al sumar la demanda por línea; de la tabla XI 2 048,85 l/min, de la tabla XII 655,4 l/min y de la tabla XIII 928 l/min lo cual hacen 3 632,25 l/min.

#### **5.1.4.4. Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Transparente y Departamento de Productos Cosméticos**

En la tabla XIV se detalla el consumo de aire por equipo en el Departamento de Jabón transparente y en el Departamento de Productos Cosméticos.

Tabla XIV. **Consumo de aire del equipo**

Datos de operación	Roscadora Mecanoflex	Llenadora de envases Macroflex	Llenadora y selladora de populinos	Llenadora de tubos colapsibles
Consumo de aire (l/min)	13,96	4,14	22,42	175
Presión de trabajo bar	6	6	6	6
Cantidad	1	1	1	1
Utilización (%)	83	1	1	1
Factor de concurrencia (%)	1	1	1	1
Consumo de aire efectivo (l/min)	16,57	4,14	22,42	175
<b>Requerimiento total</b> = 16,57 + 4,14 + 22,42 + 175 = 218,13 = 218,13 + 21,81 + 32,80 + 43,63 = 316,37 l/min				
<b>Tolerancias permisibles:</b> Por fugas +10% = 21,81 Por mal cálculo +15% = 32,80 Por futuras ampliaciones +20% = 43,63				

Fuente: elaboración propia, con base a Kaeser Compresores de Guatemala, Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 5.

#### 5.1.4.5. **Demanda de aire de la maquinaria del Departamento de Jabón Líquido**

En la tabla XV se detalla el consumo de aire por equipo en el Departamento de Jabón en Líquido.

Tabla XV. **Consumo de aire por equipo**

Datos de operación	Llenadora doypack	Etiquetadora de envases	Llenadora de canecas	Empacadora CE-50 (Chongueadora)
Consumo de aire (l/min)	4,41	4,14	40,05	450

**Continuación de la tabla XV.**

<b>Presión de trabajo bar</b>	6	6	6	6
<b>Cantidad</b>	1	1	1	1
<b>Utilización (%)</b>	100	100	100	100
<b>Factor de concurrencia (%)</b>	1	1	1	1
<b>Consumo de aire efectivo (l/min)</b>	4,41	4,14	40,05	450
<b>Requerimiento total</b> = 4,41 + 4,14 + 40,05 + 450 = 498,60 = 498,60 + 49,86 + 74,79 + 99,72 = 722,97 l/min				
<b>Tolerancias permisibles:</b> Por fugas +10% = 49,86 Por mal cálculo +15% = 74,79 Por futuras ampliaciones +20% = 99,72				

Fuente: elaboración propia, con base a Kaeser Compresores de Guatemala. Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 5.

La demanda total de aire en el Departamento de Cosméticos y Jabón Líquido se obtiene al sumar la demanda de aire de la tabla XIV 316,37 litros por minuto y de la tabla XV 722,97 litros por minuto, con lo cual se obtiene 1 039,14 litros por minuto.

La demanda total de aire, en toda la planta se obtiene al sumar la demanda de cada departamento de fabricación.

De las tablas XI, XII y XIII se sabe que la demanda de aire en el Departamento de Sólidos es de 3 632,25 litros por minuto y de las tablas XIV y XV se sabe que la demanda de aire en el Departamento de Cosméticos y Jabón Líquido es de 1 039,14 litros por minuto, por lo tanto la demanda total de aire es de 4 671,39 litros por minuto, equivalentes a 164,9533 pies cúbicos por minuto, lo cual coincide con la demanda máxima calculada con el equipo electrónico la cual es de 165 pies cúbicos por minuto.

### 5.1.5. Grado de utilización

Es el tiempo en uso de un equipo en un período de trabajo. Kaeser Compresores de Guatemala, Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 4.

Para establecer el grado de utilización de cada equipo, se mide el tiempo de operación y el tiempo de parada del equipo por hora, luego se divide el tiempo en uso del equipo entre el tiempo de referencia, (1 hora).

### 5.1.6. Factor de concurrencia

Valor empírico cuando se usan idénticos consumidores al mismo tiempo en una red de aire comprimido. Kaeser Compresores de Guatemala, Seminario de aire comprimido, planeando un sistema de aire comprimido, p. 4.

El factor de concurrencia o factor de simultaneidad, se ha determinado estadísticamente con pruebas que se realizan en distintas industrias.

Tabla XVI. Factor de simultaneidad

No. de consumidores	Factor de concurrencia	No. de consumidores	Factor de concurrencia
1	1,00	9	0,73
2	0,94	10	0,71
3	0,89	11	0,69
4	0,86	12	0,68
5	0,83	13	0,67
6	0,80	14	0,66
7	0,77	15	0,65
8	0,75	100	0,20

Fuente: CREUS SOLÉ, Antonio. *Neumática e hidráulica*. p. 146.

### **5.1.7. Tolerancia para fugas**

El porcentaje de fugas en las instalaciones neumáticas, puede variar entre 10-25 %, según la antigüedad y estado de las instalaciones. En el presente estudio se tomó un porcentaje por fugas equivalente al 10 %.

### **5.1.8. Tolerancia para expansiones de la red**

Es de vital importancia tomar en consideración las ampliaciones de la planta en el futuro, pues con esto se diseña un sistema de aire comprimido capaz de cubrir futuras mayores demandas de aire sin la necesidad de rediseñar el sistema lo cual llevaría a realizar gastos innecesarios por ampliación.

En el presente estudio se tomó un porcentaje por futuras ampliaciones equivalente al 20 % dado que en la actualidad la planta se ha visto en la necesidad de habilitar nuevas áreas de producción, aumentando la demanda de aire comprimido por lo que hace pensar que en los próximos años se siga ampliando la producción.

Analizando los requerimientos de aire comprimido y basándose en el estudio y cálculos descritos anteriormente, se determina que el compresor actual está sobredimensionado, por lo que se recomienda instalar dos compresores en paralelo al compresor actual, la capacidad de cada uno de estos compresores debe ser como mínimo de 90 cfm.

Con un compresor con la capacidad indicada en el párrafo anterior, se logra satisfacer sin dificultad la demanda de aire promedio cuando la demanda de aire en la planta sea baja, y cuando la demanda de aire sea máxima,

funcionarían los dos compresores de menor capacidad para cubrir sin dificultad la demanda de aire.

El compresor actual se tendría disponible para emergencias o para cuando se le preste mantenimiento a los compresores de menor capacidad y así no dejar a la planta sin generación de aire comprimido.

Al disponer en la red únicamente de un compresor cuyo diseño es el actual, nos encontramos con las desventajas numeradas en el planteamiento del problema del capítulo 4.

Mientras que si se instalan dos compresores en paralelo al compresor actual, cuya capacidad de cada uno de ellos sea como mínimo la mitad de la demanda total de aire requerida en la planta, se eliminan esas desventajas porque se pueden utilizar dos compresores o se puede alternar el funcionamiento de las tres máquinas y así siempre contar con un compresor en disponibilidad.

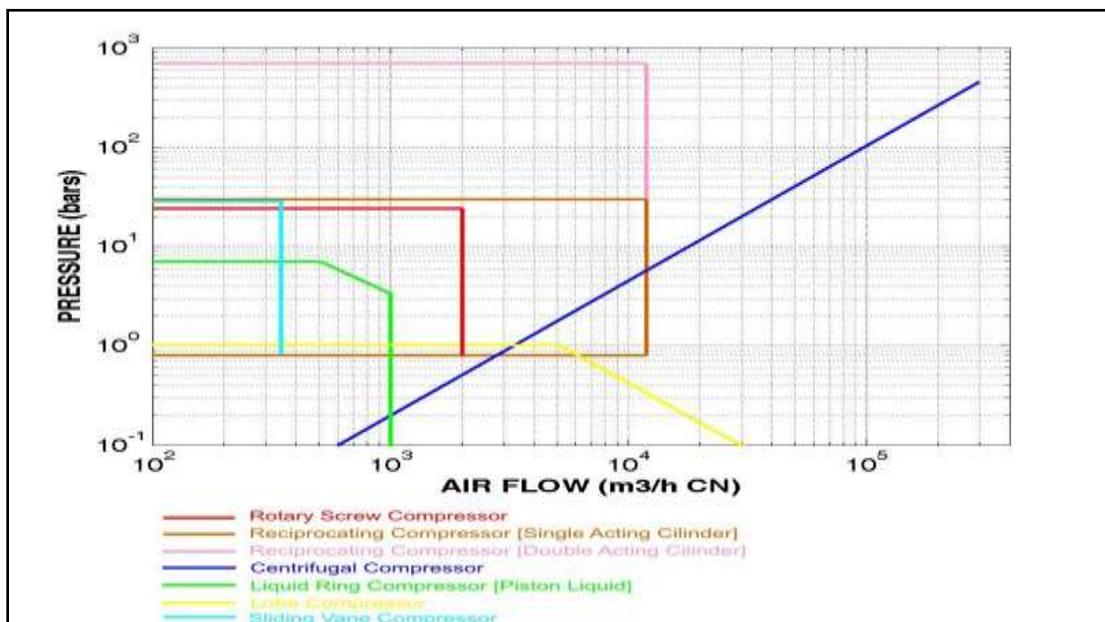
Cuando la demanda de aire es baja, basta con tener en funcionamiento uno de los dos compresores de menor capacidad y cuando la demanda lo requiera, funcionarían los dos compresores de menor capacidad o solamente el compresor de mayor capacidad.

Además, se puede alternar el mantenimiento de cada uno de los tres compresores para tener solamente uno de ellos fuera de servicio cuando sea necesario o cuando falle un compresor no se tenga el inconveniente de quedarse sin generación de aire comprimido.

## 5.2. Descripción del compresor seleccionado

Seleccionamos el compresor tomando en cuenta los parámetros descritos en los puntos anteriores y auxiliándonos de la figura 30.

Figura 30. Límite de uso de compresores



Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn201.html#seccion21>. Consulta: 13 de octubre de 2014.

Con esto se determina que se pueden instalar compresores recíprocos de una o dos etapas o compresores rotativos de tornillo, puesto que estos dos tipos de compresores son los más adecuados de acuerdo a la presión de trabajo requerida, la calidad de aire necesaria y a la demanda total requerida en las instalaciones. Los compresores instalados deben tener la capacidad de suministrar a la red 90 cfm, que es aproximadamente la mitad de la demanda máxima de aire requerida en las instalaciones de la planta.

### **5.3. Instalación del compresor seleccionado**

Se deben montar e instalar los compresores en paralelo al compresor actual. La conexión debe ser bien diseñada para que los tres compresores entreguen aire comprimido al depósito o depósitos de almacenamiento de aire y no exista ningún inconveniente cuando esté en funcionamiento uno o ambos compresores al mismo tiempo.

### **5.4. Selección del postenfriador**

Aunque la calidad de aire requerida en las instalaciones no lo hace cien por ciento necesario, se recomienda instalar un postenfriador del tipo aire-agua, debido a que es el más económico en cuanto al consumo de energía además de ser eficiente.

### **5.5. Selección del secador de aire**

Tomando en cuenta la calidad de aire requerida, la temperatura ambiente en la geografía del lugar, los métodos de secado detallados en la sección de secadores del capítulo 2 y el punto de rocío a presión PRP, necesario en la planta, se debe instalar un secador frigorífico con un PRP igual a +3, debido a que el consumo de energía para su funcionamiento es mínimo y con el PRP alcanzado por este tipo de secador es suficiente para lograr distribuir un aire con la calidad requerida.

### **5.6. Selección del depósito de aire comprimido**

Haciendo uso de las ecuaciones descritas en la sección de almacenamiento del aire comprimido del capítulo 2, y tomando en cuenta las

características del compresor actual, se verifica el tamaño del depósito actual y luego se realiza el cálculo para el tamaño ideal del depósito de aire comprimido, de acuerdo con las necesidades de la planta.

De acuerdo con la tabla III, sabemos que la potencia del compresor es de 50 caballos de potencia y de 37 kilovatios, equivalentes a 49,95 caballos de vapor y el modo de arranque es en estrella delta, por lo tanto la ecuación correspondiente para el dimensionamiento del depósito de aire es:  $V \geq 75 P$  litros.

$$V \geq 75 * 49,95 \text{ litros}$$

$$V \geq 3\,746,25 \text{ litros}$$

Actualmente, el tamaño del depósito es de 2000 litros lo cual evidencia que el depósito de aire comprimido está mal dimensionado, lo que provoca descargas rápidas del depósito y esto hace que el compresor trabaje a intervalos más frecuentes, lo que resulta en variaciones de carga demasiado frecuentes en la instalación eléctrica y todo esto eleva los costos de generación de aire comprimido.

Dado que los compresores que se recomienda instalar en paralelo al compresor instalado actualmente, deben ser de menor capacidad al compresor actual, se determina que el tamaño ideal del depósito de aire comprimido debe ser de un volumen de 3 746,25 litros como mínimo, tomando en cuenta la potencia y capacidad de entrega de aire comprimido del compresor actual.

Se debe tomar en cuenta que cuanto más grande es el tanque de almacenamiento de aire, mayor es la eficiencia y la uniformidad con la que operan los compresores.

Por lo tanto, para aprovechar el depósito instalado actualmente y reducir costos de adquisición e instalación, se recomienda instalar otro depósito de 2000 litros en serie al depósito actual y así disponer de un total de 4000 litros de almacenaje de aire comprimido ya que el volumen ideal calculado es de 3 746,25 litros como mínimo.

#### **5.7. Selección de filtros y trampas de agua y aceite**

Se deben instalar prefiltros entre el compresor y refrigerador o secador, de aire, filtros a la salida del depósito o depósitos de aire comprimido y trampas de agua en puntos estratégicos de la red para eliminar adecuadamente el condensado y partículas de aceite.

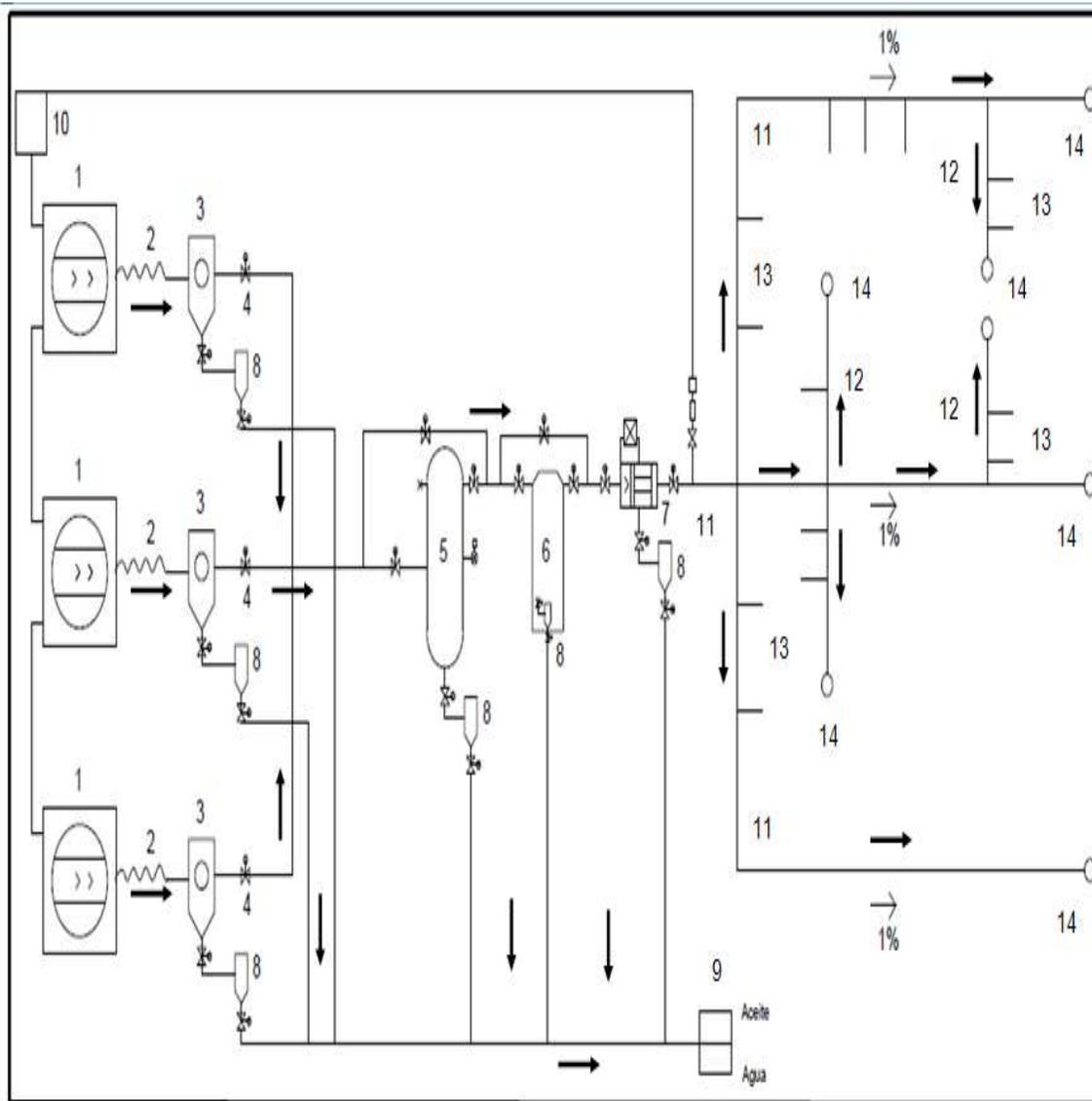
#### **5.8. Circuito de aire comprimido mejorado propuesto**

El circuito mejorado propuesto se compone de los elementos enumerados a continuación e identificados en la figura 31.

1. 3 compresores
2. Mangueras
3. Separador
4. Válvulas
5. Tanque
6. Secador frigorífico
7. Microfiltro
8. Purgadores automáticos
9. Sistema de tratamiento de aguas residuales
10. Transductor de presión
11. Tubería principal

- 12.Tubería secundaria
- 13.Tubería de servicio
- 14.Purgadores en puntas de distribución

Figura 31. Sistema de aire comprimido mejorado



Fuente: elaboración propia.

## 6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realiza un análisis económico con el sistema de generación de aire comprimido actual y luego se realiza el análisis económico con el sistema mejorado propuesto para compararlos y determinar si el proyecto es rentable.

El análisis económico se realiza de acuerdo con:

- El tipo de cambio del dólar para la fecha 25 de octubre de 2014, US\$ 1,00 = Q. 7,70.
- El costo del kilovatio por hora para la empresa en el mes de julio de 2014, el cual corresponde a Q. 1,09163.
- La energía específica durante la semana de medición indicada en el capítulo 5, la cual corresponde a 0,2736 kilovatios por hora por pie cúbico por minuto o 12,08 kilovatios por cada 44,16 pies cúbicos por minuto.

### 6.1. Análisis con el sistema actual (1 compresor)

A continuación se presenta el análisis económico con el sistema de aire comprimido actual.

#### 6.1.1. Costos de generación con el sistema actual

Los costos de generación se detallan en la tabla XVII.

Tabla XVII. **Costos de generación con el compresor actual**

<b>Concepto</b>	<b>Pie<sup>3</sup>/año</b>	<b>Costo Quetzales</b>
Precio del kilovatio hora		Q. 1,09163
Generación de aire anual de acuerdo con la capacidad del compresor actual (pie <sup>3</sup> /año)	59 136 000	
Costo real de electricidad anual		Q. 294 369,12050

Fuente: elaboración propia.

La generación se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = cgc \times \frac{\text{min}}{h} \times hfa$$

Donde:

G = generación en pie<sup>3</sup>/año

cgc = capacidad de generación del compresor en pie<sup>3</sup>/min

min = minuto

h = hora

hfa = horas de funcionamiento del compresor por año

$$G = 220 \times 60 \times 4480 = 59\,136\,000 \text{ pie}^3/\text{año}.$$

El costo de generación se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C = cgc \times EE \times \frac{h}{\text{año}} \times \%U \times CkW/h$$

Donde:

C = costo anual de generación en quetzales

cgc = capacidad de generación del compresor

EE = energía específica en kW/pie<sup>3</sup>/min

h = horas

%U = porcentaje de utilización del compresor

CkW/h = costo en quetzales del kW/hora

$$C = 220 \times 0,2736 \times 4480 \times 1 \times 1,09163$$

$$C = \text{Q. } 294\,369,1205.$$

### 6.1.2. Costos de mantenimiento

Los costos de mantenimiento del equipo de aire comprimido se detallan en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. **Costos de mantenimiento del compresor actual**

<b>Concepto</b>	<b>Costo Quetzales</b>
Servicio menor del compresor (2 al año)	Q. 7 000,00
Servicio mayor del compresor (2 al año)	Q. 17 000,00
Total mantenimiento del compresor (1 año)	Q. 24 000,00

Fuente: elaboración propia.

### 6.1.3. Costo por fugas en el sistema

Las fugas se calculan de acuerdo con la figura 32, que muestra la gráfica de medición de la presión, realizada por Kaeser Compresores de Guatemala. En la gráfica se visualiza que la presión baja a cero aproximadamente 1 hora

después de que se desconecta el compresor, esto significa que el tanque de almacenamiento se queda sin aire 1 hora después de que el compresor deja de suministrarle aire comprimido. La capacidad del tanque es de 2000 litros como se indicó en el capítulo 1.

Al dividir 2000 litros que son equivalentes a 70,6293 pies cúbicos, entre 60 minutos, se obtiene el flujo de fugas de aire que es equivalente a 1,18 pies cúbicos por minuto.

Tabla XIX. **Costo por fugas de aire comprimido en el sistema**

Flujo de fugas cfm	Costo diario Q	Costo anual Q
1,18	Q. 4,93403	Q. 1 578,8896

Fuente: elaboración propia.

El costo por fugas en el sistema se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_f = f \times EE \times \frac{h}{\text{año}} \times \%U \times C_{kW/h}$$

Donde:

$C_f$  = costo por fugas

$f$  = fugas en el sistema en (pie<sup>3</sup>/min)

$EE$  = energía específica en kW/pie<sup>3</sup>\*min

$h$  = horas

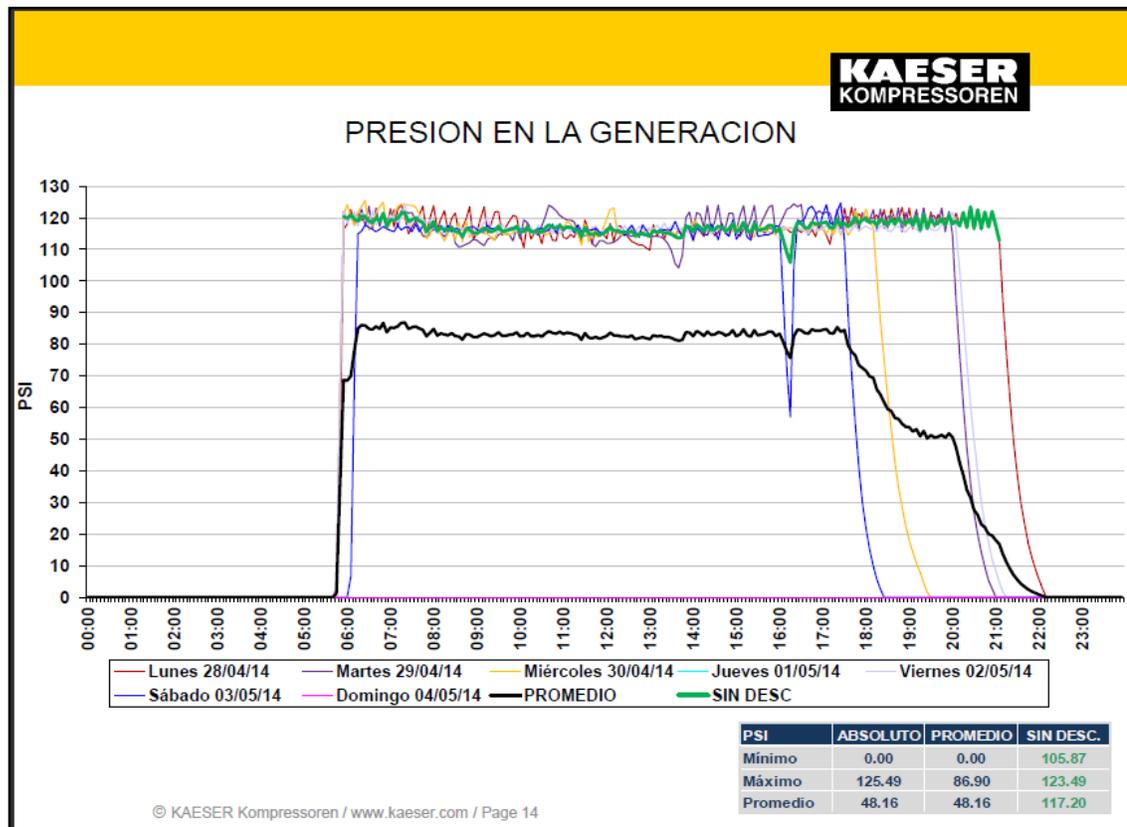
$\%U$  = porcentaje de utilización del compresor

$C_{kW/h}$  = costo en quetzales del kW/hora

$$C_f = 1,18 \times 0,2736 \times 4\,480 \times 1 \times 1,09163$$

$$C = Q. 1\,578,88892$$

Figura 32. Presión de aire en la generación



Fuente: Kaeser Compresores. *Presentación NSCI*, S. A. p. 14.

#### 6.1.4. Costo de horas extras

Quando el compresor instalado actualmente falla, en el 80 por ciento de la planta se para la producción y esto provoca que al solucionar el problema con el compresor, entre 8 y 12 empleados trabajen horas extras. Las horas extras mensuales ascienden a aproximadamente 10 por trabajador y hacen un total de

120 horas extras anuales por empleado. Esto tiene un costo anual aproximado de Q. 21 600,00

#### **6.1.5. Resumen de costos**

Los costos con el sistema actual se resumen en la tabla XX.

Tabla XX. **Resumen de costos con el sistema actual**

Costo anual de generación según tabla XVII	Q. 294 369,1205
Costo anual de mantenimiento según tabla XVIII	Q. 24 000,0000
Costo anual por fugas según tabla XIX	Q. 1 578,8896
Costo anual de horas extras	Q. 21 600,0000
Total costos	Q. 341 548,0101

Fuente: elaboración propia.

### **6.2. Análisis con el sistema mejorado (3 compresores en paralelo)**

A continuación se presenta el análisis económico con el sistema de aire comprimido mejorado propuesto.

#### **6.2.1. Costo de adquisición del equipo**

El costo de adquisición de los equipos generadores de aire comprimido, así como el costo de adquisición del equipo de tratamiento, almacenaje y distribución de aire comprimido se detalla en las siguientes tablas.

Tabla XXI. **Costo de adquisición de los compresores**

Tipo de compresor	Cantidad	Potencia		Presión		Caudal		Costo Q
		hp	kW	Bar	psi	cfm	m <sup>3</sup> /min	
Compresor de tornillo	2	25	18	9	125	90	2,55	Q. 462 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Costo del tanque de almacenamiento de aire**

Tamaño del tanque	Volumen de aire en litros	Costo en quetzales del equipo
Mediano	2 000,00	Q. 12 000,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Costo del secador de aire**

Tipo de secador	Potencia	Costo del equipo Q	Costo anual de funcionamiento	Mantenimiento anual Q/año
Frigorífico R-134a	4,1 kW	Q. 69,300	Q. 3 372,60	Q. 1 540,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Costo de tubería y accesorios**

Accesorio	Diámetro pulg.	Cantidad	Costo en quetzales
Tubería	1	3	Q. 1 515,00

**Continuación de la tabla XXIV.**

Codos	1	9	Q. 270,00
Unión	1	6	Q. 300,00
Te	1	6	Q. 120,00
Copla	1	6	Q. 150,00
Unidad de mantenimiento		15	Q. 5 775,00
Purgadores automáticos		3	Q. 2 000,00
Pre-filtro		1	Q. 1 000,00
Post-filtros		2	Q. 7 730,00
<b>Total costos de tuberías y accesorios</b>			<b>Q. 18 860,00</b>

Fuente: elaboración propia.

**6.2.2. Costo de generación con tres compresores en paralelo**

Se asume que los dos compresores de 25 hp trabajan al mismo tiempo solamente el 50% de las horas laboradas en un año y en el otro 50% de horas laboradas, trabaja solamente uno de los dos compresores de 25 caballos de potencia, el compresor de 50 caballos de potencia se deja en disponibilidad. Las horas laboradas en promedio al año son de 4480 horas.

Tabla XXV. **Costos de generación**

Concepto	Pie <sup>3</sup> /año	Costo Q
Precio del kilovatio hora		Q. 1,09163
Generación de aire anual de acuerdo con la capacidad de un compresor de 25 hp y 18 kW (pie <sup>3</sup> /año)	12 096,000	

**Continuación de la tabla XXV.**

Generación de aire anual de acuerdo con la capacidad de los dos compresores nuevos de 25 hp y 18 kW (pie <sup>3</sup> /año)	24 192,000	
Generación total anual (pie <sup>3</sup> /año)	36 288,000	
Costo de funcionamiento de un compresor de 25 hp y 18 kW		Q. 60 211,86555
Costo de funcionamiento de los dos compresores de 25 hp y 18 kW		Q. 120 423,73110
<b>Costo real total de electricidad anual</b>		<b>Q. 180 635,5966</b>

Fuente: elaboración propia.

Cálculo de la generación de los compresores.

Generación anual con 1 compresor de 25 hp.

$$G = cgc \times \frac{\text{min}}{h} \times hfa$$

$$\text{Generación} = 90 \times 60 \times 2240$$

$$\text{Generación} = 12\,096\,000 \text{ pie}^3/\text{año}$$

Generación anual con 2 compresores de 25 hp que trabajan al mismo tiempo.

$$\text{Generación} = 180 \times 60 \times 2240$$

$$\text{Generación} = 24\,192\,000 \text{ pie}^3/\text{año}.$$

Costos de generación.

$$C = cgc \times EE \times \frac{h}{\text{año}} \times \%U \times CkW/h$$

Costo de generación de 1 compresor de 25 hp.

$$C = 90 \times 0,2736 \times 4480 \times 0,5 \times 1,09163$$

$$C = \text{Q. } 60\,211,86555$$

Costo de generación de los 2 compresores de 25 hp.

$$C = 180 \times 0,2736 \times 4480 \times 0,5 \times 1,09163$$

$$C = \text{Q. } 120\,423,73110$$

### 6.2.3. Costo de mantenimiento de los compresores

Se realizará 1 servicio menor y 1 servicio mayor para cada compresor de 25 hp durante el año, y se realizará un servicio menor al compresor en disponibilidad al año, debido a que cada compresor trabajará solamente la mitad del tiempo que trabaja el compresor actual, al cual se le brinda cuatro servicios por año, dos servicios menores y dos servicios mayores.

Tabla XXVI. Costo por mantenimiento de los 3 compresores

Máquina	Cantidad	Costo de servicio menor (aproximado)	Costo de servicio mayor (aproximado)	Costo anual por servicio
Compresor de 25 hp	2	Q. 5 000,00	Q. 10 000,00	Q. 15 000,00
Compresor de 50 hp	1	Q. 4 000,00		Q. 4 000,00
<b>Total mantenimiento</b>				Q. 19 000,00

Fuente: elaboración propia.

#### 6.2.4. Resumen de costos

Los costos con el sistema mejorado propuesto se resumen en la siguiente tabla:

Tabla XXVII. **Resumen de costos con el sistema mejorado propuesto**

Costo de adquisición de los dos compresores según tabla XXI	Q. 462 000,0000
Costo de adquisición del tanque de almacenamiento según tabla XXII	Q. 12 000,0000
Costo de adquisición del secador de aire según tabla XXIII	Q. 69 300,0000
Costo de adquisición de tuberías y accesorios según tabla XXIV	Q. 18 860,0000
Costo anual de generación según tabla XXV	Q. 180 635,5966
Costo anual de mantenimiento según tabla XXVI	Q. 19 000,0000
Costo anual de funcionamiento del secador según tabla XXIII	Q. 3 372,6000
Costo anual de mantenimiento del secador de aire según tabla XXII	Q. 1 540,0000
<b>Total costos</b>	<b>Q. 766 708,1966</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 6.3. Comparación costo-beneficio con ambos sistemas

La comparación de los costos y beneficios se realiza para un tiempo de 10 años, debido a que la vida útil del compresor y secador de aire es de aproximadamente 10 años, luego de este período de tiempo se deben hacer reparaciones generales y a profundidad en cada equipo pero no son recomendables, debido a que los costos de reparación, funcionamiento y mantenimiento de los equipos se elevan, por lo cual lo más recomendable es el reemplazo de los equipos.

No se toma en cuenta el costo de instalación, debido a que se planifica que el personal a cargo del mantenimiento de las instalaciones, será el encargado de llevar a cabo el proyecto, dirigidos por el ingeniero jefe de mantenimiento.

Al final del período de 10 años ya no se realizan los dos mantenimientos mayores para los compresores de 25 hp ni el mantenimiento para el secador de aire, puesto que todo equipo debe reemplazarse de acuerdo con la vida útil que se asume de diez años. Con esto se ahorran Q. 10 000,00 por mantenimiento de los dos compresores de 25 hp y Q. 1 530,00 por mantenimiento del secador de aire, lo cual hace un total de Q. 11 530,00 como ahorro al final del año 10.

El costo de adquisición asciende a un total de Q. 562 160,00, e incluye el costo de adquisición de:

- Los 2 compresores de tornillo de 25 hp, tabla XXI.
- El tanque de almacenamiento, tabla XXII
- El secador frigorífico, tabla XXIII
- Pre-filtros, post-filtros, purgadores automáticos, unidades de mantenimiento, tubería y accesorios, tabla XXIV.

Según tabla XXV, el costo de generación asciende a un total de Q. 180 635,5966

Según tabla XXIII, tabla XXIV y tabla XXVI, el costo de mantenimiento a partir del año 1 asciende a un total de Q. 37 045,00 e incluye:

- Costo anual de mantenimiento de los tres compresores en paralelo
- Costo anual de mantenimiento del secador frigorífico

- Costo anual por reemplazo de unidades de mantenimiento, purgadores automáticos, prefiltro y postfiltros.

El costo de funcionamiento incluye únicamente el costo de funcionamiento del secador de aire el cual según tabla XVIII asciende a un total de Q. 3 372,60

El ahorro de energía representa la diferencia entre el costo total anual del sistema mejorado propuesto y el sistema actual, y se resume en la siguiente tabla:

Tabla XXVIII. **Ahorro de energía con el sistema mejorado propuesto**

Período	Costo total anual sistema actual Q	Costo total anual sistema mejorado Q	Ahorro de energía anual Q
Año 0	Q. 0,0000	Q. 562 160,0000	Q. 562 160,0000
Año 1	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 2	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 3	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 4	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 5	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 6	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 7	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 8	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 9	Q. 341 548,0101	Q. 221 053,1966	Q. 120 494,8135
Año 10	Q. 341 548,0101	Q. 209 523,1966	Q. 132 024,8135
<b>Ahorro de energía en 10 años</b>			<b>Q. 1 204 948,1350</b>
<b>Ahorro de energía real en 10 años</b>			<b>Q. 1 576,2463</b>

Fuente: elaboración propia.

El ahorro de energía real en 10 años que es Q. 1 576,2463, representa el monto de ahorro luego de restar al ahorro de energía en 10 años, la inversión inicial y una tasa de interés del 17%, dicha tasa de interés corresponde al valor del TIR.

Esto se resume en las siguientes tablas, de las cuales se calculó la TIR Tasa Interna de Retorno y el VPN Valor Presente Neto, para realizar el análisis costo beneficio del proyecto.

**Tabla XXIX. Comparación económica entre ambos sistemas**

ANÁLISIS ECONÓMICO CON EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO ACTUAL											
Costos	AÑO 0	Año 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Costo de adquisición											
Costo de instalación											
Costo de generación		Q. 294 369,12									
Costo de mantenimiento		Q. 24 000,00									
Costo por fugas		Q. 1 578,89									
Costo de horas extras		Q. 21 600,00									
Costo de funcionamiento											
Costo de reparación											
Costo total	Q. 0,00	Q. 341 548,01									
ANÁLISIS ECONÓMICO CON EL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO MEJORADO PROPUESTO											
Costos	AÑO 0	Año 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
Costo de adquisición	Q. 562 160,00										
Costo de instalación											
Costo de generación		Q. 180 635,60									
Costo de mantenimiento		Q. 37 045,00	Q. 25 515,00								
Costo por fugas											
Costo de horas extras											
Costo de funcionamiento		Q. 3 372,60									
Costo de reparación											
Costo total	Q. 562 160,00	Q. 221 053,20	Q. 209 523,20								
Ahorro de energía	Q. -562 160,00	Q. 120 494,81	Q. 132 024,81								
VPN	Q. 1 576,25										
TIR	17.00%										

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

1. Con el estudio realizado, se determina que efectivamente se puede mejorar el sistema de generación de aire comprimido si se instalan dos compresores con capacidad de generación mínima de 90 pies cúbicos por minuto cada uno, en paralelo al compresor instalado actualmente.
2. Se puede mejorar la calidad del aire generado al disponer en la red de un sistema de tratamiento de aire comprimido para disponer de aire limpio y libre de humedad, garantizando aún más la calidad de los productos fabricados.
3. Es necesario disponer de una red de aire comprimido bien diseñada, de acuerdo con las necesidades de las instalaciones, evitando las tuberías subterráneas e incluyendo en el diseño cuellos de ganso y un sistema de purga automática, para garantizar la calidad del aire generado y la calidad de los productos fabricados.
4. Al alternar el funcionamiento de los compresores de menor capacidad y dejar en disponibilidad al compresor instalado actualmente se reducen los costos por consumo de energía eléctrica.
5. Al generar únicamente el aire comprimido necesario para el funcionamiento de la maquinaria y equipo neumático sin que se desperdicie por fugas, se reducen los costos de producción.

6. Contar con un compresor en disponibilidad para que funcione si en algún momento falla uno o ambos compresores de 25 caballos de potencia, o cuando se preste mantenimiento a los compresores que trabajan constantemente evita dejar a la planta sin generación de aire comprimido y minimiza los paros de producción.
  
7. Los costos de mantenimiento se pueden reducir alternando el funcionamiento y mantenimiento de dos de los tres compresores instalados en paralelo y contando siempre con un compresor en disponibilidad para emergencias, pues con esto se evita descuidar las máquinas generadoras de aire comprimido garantizando el óptimo funcionamiento de las mismas durante su vida útil.

## RECOMENDACIONES

### A la Gerencia

1. Invertir en la mejora del sistema de generación, tratamiento y distribución de aire comprimido para generar aire comprimido a bajo costo y disponer de este recurso energético limpio, sin humedad ni interrupciones por fallas del compresor instalado actualmente y con esto reducir los paros y pérdidas de producción.
2. Tomar en cuenta que el mantenimiento de la maquinaria es necesario y no verlo como gasto sino como una inversión para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos de generación, tratamiento y distribución de aire comprimido y garantizar la calidad de los productos fabricados.

### Al Departamento de Mantenimiento

3. Planificar adecuada y estratégicamente, ejecutar según lo planificado y supervisar el mantenimiento de los compresores, del equipo de tratamiento de aire y de la red de distribución de aire comprimido para garantizar su correcto funcionamiento y alcanzar la vida útil de cada equipo o instalación.
4. Eliminar fugas de aire en el sistema para evitar desperdicio de energía y reducir los costos de generación de aire comprimido y costos de producción.

5. Rediseñar la red de aire comprimido para que esta cuente con la pendiente recomendada e instalar cuellos de ganso entre las conexiones de la línea secundaria y la línea de alimentación de consumo, para evitar que el condensado llegue hasta los equipos consumidores.
  
6. Cambiar las tuberías subterráneas de la red, por tuberías aéreas y así mejorar la eliminación del condensado y evitar daños por corrosión tanto en la red como en los equipos consumidores.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CARNICER ROYO, Enrique. *Aire comprimido. Dacuñha & Creativos (diseño de cubierta)*. Magallanes Madrid España: Paraninfo, 1991. 292 p. ISBN: 84-283 1813-1.
2. CREUS SOLÉ, Antonio. *Neumática e hidráulica*. México: Alfaomega Grupo Editor, 2007. 408 p. ISBN: 978-970-15-0903-6.
3. KAESER COMPRESSOREN, *Seminario de aire comprimido*. 2014. 150 p.
4. RIOJA CUESTA, Gonzalo Félix. *Manual de mecánica industrial. Neumática y oleo hidráulica*. Carrobles Marcial, Rodríguez Félix. España: Cultural, 2002. 227 p. ISBN: 84-8055-281-6 (obra completa). ISBN: 84-8055-283-2 (tomo II).