



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

**SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN
EMPACADORA TOLEDO**

Jorge Mario Rivera Gavarrete

Asesorado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda

Guatemala, abril de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE
COMPRIMIDO EN EMPACADORA TOLEDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE MARIO RIVERA GAVARRETE

ASESORADO POR EL ING. EDWIN ESTUARDO SARCEÑO ZEPEDA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés De La Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Colomba
EXAMINADOR	Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
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:

SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN EMPACADORA TOLEDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 25 de abril de 2019.

Jorge Mario Rivera Gavarrete



Guatemala, 31 de julio de 2020
REF.EPS. D.18.07.2020

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero Urquizú Rodas:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado **SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA AIRE COMPRIMIDO PARA EMPRESA TOLEDO.**, que fue desarrollado por el estudiante universitario **Jorge Mario Rivera Gavarrete** quien se identifica con **CUI 2517 71714 0101** y **Registro Académico 200010681**, quien fue debidamente asesorado y supervisado por el Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

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

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

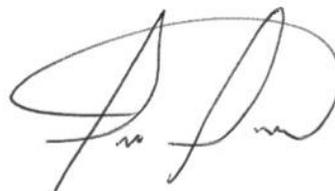
Ing. Oscar Argueta Hernández
Director Unidad de EPS



OAH

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-Supervisor y del Director de la Unidad de EPS, al trabajo de graduación titulado: **SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PARA AIRE COMPRIMIDO PARA EMPRESA TOLEDO**, del estudiante **Jorge Mario Rivera Gavarrete**, Reg. Académico 200010681 y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, febrero de 2021
/aej

DTG. 172.2021.

La Decana 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: **SELECCIÓN Y MONTAJE DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO EN EMPACADORA TOLEDO**, presentado por el estudiante universitario: **Jorge Mario Rivera Gavarrete**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, abril de 2021.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por su amor, sus incontables bendiciones y por permitirme finalizar mis estudios.
Mis padres	Jorge Rafael Rivera y Sonia Aida Gavarrete Mesa de Rivera, por su sacrificio, ayuda, paciencia y amor incondicional.
Mi esposa	Andrea Noemí Rosales Cordón de Rivera, por su apoyo y amor incondicional en esta etapa de mi vida.
Mis hijos	Por ser mi inspiración.
Mis hermanos	José Miguel y Claudia Paola Rivera Gavarrete, por la ayuda y el apoyo brindado.
Mi familia	Por su apoyo incondicional.
Mis amigos	Por la amistad que nos une y por la ayuda brindada.
Mis jefes	Enrique López y Axel Pimentel, quienes han formado mi liderazgo a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por su importante influencia en mi carrera y por ser el centro de enseñanza que me inculcó la responsabilidad, el trabajo y la dedicación.
Facultad de Ingeniería	Por ser mi segunda casa, donde viví momentos buenos y difíciles y conocí a los amigos que son mi segunda familia.
Mis catedráticos	Por darme los conocimientos necesarios.
Empacadora Toledo y al personal de conservación industrial	Por haberme dado la oportunidad y el apoyo para realizar el presente proyecto.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA.....	1
1.1. Descripción de la empresa	1
1.1.1. Ubicación de la planta	1
1.1.2. Historia	1
1.1.3. Misión	2
1.1.4. Visión.....	2
1.1.5. Valores	2
1.1.6. Organización de la empresa	3
1.2. Definiciones fundamentales.....	4
1.2.1. Compresor de desplazamiento positivo.....	4
1.2.2. Compresor de tornillo	4
1.2.3. Secado	5
1.2.4. Secadores refrigerativos.....	5
1.2.5. Filtración	7
1.2.6. Filtros de superficie.....	7
1.2.7. Filtros de lecho profundo	8
1.2.8. Almacenamiento de aire comprimido.....	8

2.	SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO	9
2.1.	Descripción del problema	9
2.1.1.	Descripción de un sistema de aire comprimido	9
2.1.1.1.	Tipos de compresores instalados	10
2.1.1.2.	Sistema de tratamiento de aire comprimido instalado.....	10
2.1.2.	Características del aire comprimido en Empacadora Toledo	11
2.1.2.1.	Ambientes donde se entrega aire comprimido	11
2.2.	Recaudación de Datos de Operación.....	12
2.2.1.	Ambiente de aspiración del aire.....	12
2.2.2.	Ambiente del cuarto de compresores	13
3.	SELECCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO	15
3.1.	Análisis de datos según el presupuesto	15
3.2.	Análisis de los componentes que integran el sistema de aire comprimido para Empacadora Toledo.....	16
3.3.	Análisis de Tipo de Secadores	17
3.4.	Toma de medidas.....	19
3.4.1.	Medición de presión.....	20
3.4.2.	Medición de caudal.....	22
3.4.3.	Medición de punto de rocío.....	27
3.4.4.	Medición de consumo energético en el sistema de aire comprimido	28
3.5.	Selección del sistema de tratamiento de aire comprimido para Empacadora Toledo	29
3.5.1.	Cálculo de secadores	32

3.5.2.	Cálculo de elementos del sistema de aire comprimido	33
3.5.2.1.	Cálculo de filtros	33
3.5.2.2.	Cálculo de tanques	34
3.5.3.	Diagrama del sistema de tratamiento de aire comprimido a montar	36
3.6.	Montaje del sistema de tratamiento de aire comprimido	37
3.7.	Comparación de eficiencias.....	39
3.7.1.	Eficiencia actual.....	39
3.7.2.	Eficiencia con mejores propuestas	40
4.	FASE DOCENCIA	45
4.1.	Capacitación del personal operativo.....	45
4.1.1.	Importancia de contar con un sistema de tratamiento de aire comprimido	45
4.1.2.	Importancia del sistema de tratamiento de aire comprimido instalado en Empacadora Toledo.....	46
4.1.3.	Importancia de cumplir con los parámetros técnicos del aire comprimido en la planta.....	46
4.1.4.	Presentación de mejoras y avances a la gerencia de conservación industrial	46
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51
	APÉNDICES	53
	ANEXOS	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Organigrama.....	3
2.	Diagrama del sistema.....	11
3.	Ejemplo de pérdidas por altura.....	13
4.	Configuración recomendada	16
5.	Métodos de secado	17
6.	Selección de punto de rocío a presión	19
7.	Tabla de días.....	20
8.	Presión antes del tratamiento	20
9.	Presión después del tratamiento	21
10.	Caudal compresor No.1.....	22
11.	Caudal compresor No.2.....	23
12.	Caudal compresor No.3.....	24
13.	Demanda total.....	25
14.	CFM y presión.....	26
15.	Punto de rocío.....	27
16.	Consumo eléctrico de los compresores.....	28
17.	Selección del filtro de partículas.....	29
18.	Selección del secador refrigerativo.....	30
19.	Selección del filtro de aceite	31
20.	Calculo de factor por condiciones.....	32
21.	Selección del sistema de secado	33
22.	Selección de filtros	34
23.	Tanque de Almacenamiento.....	35
24.	Diagrama final a montar	36

25.	Diagrama de flujo del sistema	38
26.	Diagrama de flujo del sistema	39
27.	Gráfica energía específica.....	40
28.	Sistemas propuestos	41
29.	Grafica proyectada del sistema actual vs. propuestas	42
30.	Costos Energéticos por Sistema	42
31.	Comparación de sistemas	43

TABLAS

I.	Equipos instalados.....	10
II.	Precios promedio	15
III.	Componentes del sistema montado	38

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
hp	Caballos de fuerza
gal	Galón
°C	Grados centígrados
°F	Grados Fahrenheit
gr	Gramos
h	Hora
kW	Kilovatios
lbf	Libra fuerza
psi	Libras por pulgada al cuadrado
psig	Libras por pulgada al cuadrado relativa
l	Litros
m	Metros
msndm	Metros sobre el nivel del mar
µm	Micra, milésima parte de un milímetro
mg	Miligramos
mm	Milímetros
cfm	Pies cúbicos por minuto
pulg	Pulgada
rpm	Revoluciones por minuto
Bar	Unidad de presión

GLOSARIO

Adsorción	Es el proceso de remoción del vapor de agua del aire comprimido, es decir la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido.
Aire	Es una mezcla de gases que existen en el ambiente compuesta de nitrógeno, oxígeno y otras sustancias, como ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles.
Aire húmedo	El aire húmedo se da cuando su composición presenta un porcentaje apreciable de vapor de agua.
Alúmina activada	Es una forma porosa y adsorbente, tiene la propiedad de secar el aire hasta dejarle muy poca humedad.
Caudal	Es el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
CFM	Pies cúbicos por minuto, consumo de aire.
Punto de rocío	El punto de rocío se describe como el estado saturado bajo el cual el aire es cargado con la máxima humedad a cierta temperatura. Si se enfría más allá: la condensación se precipita en forma de niebla.

Condensado	Es el líquido formado cuando el vapor pasa de fase gas a fase líquida.
EPP	Equipo de protección personal.
Mantenimiento	La acción que tiene como objetivo preservar o mantener un estado óptimo.
Micrón	Denominación del micrómetro.
ppm	Partículas por millón.
Presión	Se define como la razón de la fuerza por área.
psi	Libra por pulgada cuadrada.
Purga	Toda el agua que se condensa en el depósito de aire comprimido.
Temperatura	Grado o nivel térmico de un cuerpo.

RESUMEN

Para la realización del proyecto fue necesario tener información acerca de los compresores instalados para la generación de aire comprimido para comprobar cuánto aire producen, la calidad del aire, los sistemas de tratamiento y de distribución hacia las áreas de producción. Cuáles serán los puntos donde se alimentarán las termoformadoras, y el consumo de energía eléctrica que generarán. Para el efecto, se recopilará los datos de abastecimiento, según lo establezca la empresa. Estos datos incluyen horarios de producción y presión de trabajo de los equipos. Se utilizará como apoyo el manual del fabricante de las termoformadoras, donde se refiere todas las características de diseño de cada.

Se realizarán medidas de presión de trabajo en los equipos que abastecen a los anillos de suministro de aire comprimido de la planta, el consumo energético, la producción de aire y el punto de rocío en el punto más lejano, respecto del cuarto de compresores, para corroborar que este sea el indicado para la óptima operación de los equipos neumáticos. De igual manera se tendrá la información de paros del equipo por falta de aire comprimido de las termoformadoras, alimentadas por este sistema, para poder mapear cuánto tiempo se pierde por paros causados por problemas en los componentes neumáticos, debidos a la humedad en el aire suministrado, con el objeto de elegir el sistema de tratamiento adecuado para los compresores instalados en Empacadora Toledo S. A.

OBJETIVOS

General

Determinar el tipo de tratamiento de aire comprimido que sea técnica y económicamente la mejor opción para solucionar el problema de humedad y contaminación en el aire comprimido generado en Empacadora Toledo.

Específicos

1. Seleccionar y montar un sistema de tratamiento de aire comprimido para secar 670cfm, que es la entrega nominal de los 3 compresores de tornillo montados en el sistema actual con las características ambientales de Empacadora Toledo.
2. Dar a conocer el sistema de tratamiento de aire comprimido técnica y económicamente, la mejor opción para tratar el aire comprimido de Empacadora Toledo.

INTRODUCCIÓN

El aire comprimido es uno de los recursos más importantes para la industria, ya que resulta vital para la operación de los equipos. Normalmente, no se le pone atención al tratamiento de este aire generado; sin embargo, es muy importante calcular y seleccionar los equipos de generación de aire comprimido más idóneos. En la industria de alimentos se debe tomar en cuenta también si este aire tendrá contacto directo e indirecto con el producto, para que la calidad de aire por entregar garantice la inocuidad del producto, según normas internacionales de Inocuidad.

La efectividad será evaluada, según los siguientes parámetros: disponibilidad de 85 % y un MTBF (tiempo medio entre fallas) de 28 hrs en el área de embutidos; una disponibilidad de 90 % y un MTBF de 36 hrs de las termoformadoras Multivac; eficiencia energética de todos los equipos del sistema, calidad del aire en los puntos de entrega, garantía los principios de operación de los equipos, según diseño, caudal entregado para la presión requerida en cada punto y punto de rocío debajo de 10 °C, para garantizar que no haya humedad en los puntos de entrega de aire a los equipos.

1. GENERALIDADES DE LA EMPRESA

1.1. Descripción de la empresa

Empacadora Toledo es parte de CMI alimentos, uno de los grupos de alimentos más grandes e importantes de la región en negocios de: molinos de harina de trigo y maíz, producción de pasta y galletas; industria avícola, porcícola, procesados y fabricación de embutidos; alimentos balanceados para animales y mascotas; industria de restaurantes con Pollo Campero y Pollo Granjero, entre otras.

1.1.1. Ubicación de la planta

Empacadora Toledo está ubicada en el barrio Ingenio, municipio de Amatitlán. Cuenta con hectáreas para uso de la fábrica, urbanización y futuras ampliaciones.

1.1.2. Historia

Su funcionamiento inició en la década de los sesenta. Sus servicios son la producción y comercialización de productos de carne de pollo y cerdo, y de alimentos balanceados para animales.

Tiene presencia en Guatemala, El Salvador, Honduras y Costa Rica. Empacadora Toledo, con 45 años en el mercado, es líder en proveer e innovar soluciones alimentarias, además cuenta con certificaciones como HACCP

(Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control) en todos sus procesos y SQF (Safe Quality Food) en la línea de salchichas y formados (*fully cooked*).

1.1.3. Misión

Proveer e innovar soluciones alimentarias para ti y tu familia, con una trayectoria de más de 40 años en el mercado y operaciones en Guatemala, El Salvador y Honduras. Certificaciones como HACCP en sus procesos que garantizan la calidad de sus productos.

1.1.4. Visión

Alimentar y estar presente en todos los hogares, en los momentos para disfrutar, con una amplia variedad de productos para toda ocasión.

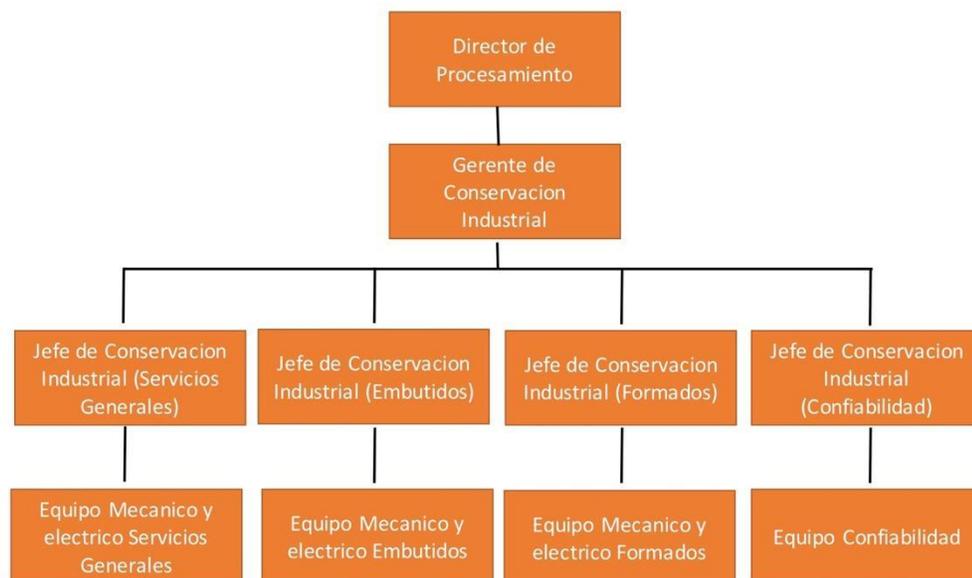
1.1.5. Valores

“Los valores REIR: responsabilidad, es asumir y cumplir el compromiso individual, así como responder por nuestros actos y consecuencias. Excelencia: es buscar la superioridad y acercarnos a la perfección en lo que hacemos. Para ello, buscamos hacer mejora continua, dar resultados excepcionalmente buenos y ser eficientes. Integridad: es la congruencia de nuestros actos y palabras con nuestros valores. Respeto: es la consideración que prestamos a los derechos de los demás y al sistema legal que apoya dichos derechos”.

1.1.6. Organización de la empresa

El área de conservación industrial de Empacadora Toledo está organizada de la siguiente manera:

Figura 1. Organigrama



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

1.2. Definiciones fundamentales

Definiciones que integran un sistema de aire comprimido.

1.2.1. Compresor de desplazamiento positivo

El principio de funcionamiento de estos compresores se basa en la disminución del volumen del aire en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto, momento en el cual el aire es liberado al sistema.

1.2.2. Compresor de tornillo

La tecnología de los compresores de tornillo se basa en el desplazamiento del aire a través de las cámaras que se crean con el giro simultáneo y, en sentido contrario, de dos tornillos: uno macho y otro hembra. El aire llena los espacios creados entre ambos tornillos, aumentando la presión, según se va reduciendo el volumen en las citadas cámaras.

El sentido del desplazamiento del aire es lineal, desde el lado de aspiración hasta el lado de presión, donde se encuentra la tobera de salida.

Este tipo de tecnología se fabrica en dos ejecuciones diferentes: compresores de tornillo lubricado y compresores de tornillo exento. La diferencia entre ambos es el sistema de lubricación.

1.2.3. Secado

El aire atmosférico que ingresa al compresor se compone de una mezcla de gases y vapor de agua. No obstante, el volumen de vapor de agua presente en el aire varía y, por lo general, depende de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, lo cual sucede durante la compresión, la capacidad de retención de humedad del aire aumenta también. Cuando el aire se enfría, su capacidad para retener humedad se reduce, y esto hace que el vapor de agua se condense. El condensado se elimina luego, en el separador centrífugo o en el tanque de almacenamiento, instalados después del compresor. Aun después, el aire puede estar completamente saturado de vapor de agua. Es por eso que, a medida que el aire se enfría más, se pueden acumular grandes cantidades de condensado en la tubería de distribución y en los puntos de conexión. En consecuencia, las averías del sistema, los recesos operativos y las costosas labores de servicio y mantenimiento son inevitables cuando no se emplea un sistema de secado adicional.

Para tratar aire comprimido con eficiencia y calidad, se debe empezar por el secado. Para ello hay una amplia y eficiente gama de secadores de aire comprimido, basada en diversos principios operativos que permiten entregar caudales de acuerdo con aplicaciones específicas, satisfaciendo todos los requerimientos en materia de calidad, punto de rocío y volumen de entrega.

1.2.4. Secadores refrigerativos

Se emplean por lo general para secar el aire de la planta y el aire de control, y proporcionan una mínima presión de punto de rocío de +3 °C.

En la práctica, los secadores refrigerativos son el método más común de secado utilizado. Durante este proceso, el aire se enfría a una temperatura cercana al punto de congelación. Esto conduce a la condensación de una gran proporción de la humedad en el aire, que es eliminada por medio de un separador de condensado y un drenaje. El proceso de enfriamiento consta de dos pasos: en primer lugar, el aire comprimido que fluye dentro del secador [1] se enfría en un intercambiador de calor aire / aire [2] por el aire comprimido frío y seco [6], que sale del secador después de pasar por el segundo proceso de enfriamiento. Esto también calienta el aire comprimido seco que sale del secador. El enfriamiento del aire en la segunda etapa – intercambiador de calor refrigerante / aire [4] - es comparable con el principio de un refrigerador de casa. El condensado formado por la acción de enfriamiento se separa del aire comprimido por el sistema de separación y se retira por un drenaje automático de condensado [5]. El aire seco se calienta de nuevo en la sección superior del intercambiador de calor aire / aire [2]. Cuando el aire alcanza la salida [6], su humedad relativa se ha reducido a valores entre 10 a 25 %.

Secadores de refrigeración más simples pueden ser diseñados sin un intercambiador de calor integrado aire / aire, en cuyo caso, el aire comprimido viaja directamente desde la entrada hasta el intercambiador de calor refrigerante / aire y de allí a la salida sin una etapa de recalentamiento. El aire de salida está saturado a casi el 100 %, pero - debido a que la temperatura ambiental suele ser más alta - el aire se calentará y se desaturará en el camino subsiguiente a través del sistema de aire comprimido.

La ventaja de este proceso reside en el hecho de que estos secadores son muy fiables, tienen una muy buena relación precio / rendimiento y pueden ser operados a un costo razonable. Por esta razón, los secadores refrigerativos son mayormente usados, sobre todo cuando se un punto de rocío a presión por encima

del punto de congelación es suficiente. El enfriamiento por debajo del punto de congelación podría destruir el dispositivo, puesto que el condensado se congelará. Por esta razón se instala, en los secadores refrigerativos modernos, un regulador, para la prevención de formación de hielo y evitar fallas.

El compresor de refrigeración, integrado dentro del secador, suele ser un compresor de pistón o un *scroll*.

En casos especiales, los secadores refrigerativos se diseñan en función de la aplicación, por ejemplo, para alta temperatura, o secadores refrigerativos para alta presión.

1.2.5. Filtración

El propósito de la filtración es asegurar que el suministro de aire comprimido esté libre de contaminantes. Polvo y componentes en aerosol son filtrados en la succión del compresor. En el lado de presurizado, se usan filtros para remover polvo, partículas y gotas de líquidos.

Aparte de la separación mecánica, los filtros se clasifican como filtros de superficie y de lecho profundo.

1.2.6. Filtros de superficie

Estos filtros aplican principalmente mecanismos de separación mecánica. Las partículas, cuyo tamaño es mayor que los poros definidos del filtro permanecen en su la superficie, formando una capa de acumulación, que es relativamente fácil de remover.

1.2.7. Filtros de lecho profundo

Estos filtros usan canastas hechas de muy finas fibras heterogéneas enredadas, que combinan un número de mecanismos de separación para retener partículas más pequeñas que el tamaño de los poros definidos. Los mecanismos de separación son:

- Impacto directo
- Carga electrostática
- Adsorción
- Difusión
- Efecto tamiz

1.2.8. Almacenamiento de aire comprimido

En los tanques de aire comprimido, el enfriamiento adicional del aire comprimido se produce debido a la gran superficie del tanque, con la consiguiente separación de condensado. Los sistemas de tratamiento de aire subsiguientes están sujetos a menor carga si se utiliza previo un tanque de aire. El aire comprimido se alimenta por el puerto inferior y se descarga desde el puerto superior. El aire comprimido es forzado a subir. Debido a la baja velocidad del flujo del aire en el depósito, líquidos y partículas se acumulan en el fondo del tanque gracias a la fuerza de la gravedad, estos salen a través de un drenaje automático en forma de condensado.

2. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO

2.1. Descripción del problema

Empacadora Toledo, S. A., con 45 años en el mercado, es líder en proveer e innovar soluciones alimentarias, además cuenta con certificaciones como HACCP y SQF en todos sus procesos. Se cuenta con un CAPEX (gasto en capital) para la compra de un sistema de tratamiento para el aire comprimido, para evitar baja eficiencia en los equipos a los que se alimenta, este es un proyecto de bastante interés para la empresa, ya que se pretende un menor costo de operación y aumentar la disponibilidad de los equipos de producción.

2.1.1. Descripción de un sistema de aire comprimido

El sistema de aire comprimido se encuentra en la mayoría de las instalaciones industriales. El aire comprimido tiene como materia prima el aire atmosférico, el cual se puede tomar gratis en la cantidad necesaria y se comprime utilizando equipos denominados compresores. El aire atmosférico es aspirado y comprimido hasta llegar al valor de presión requerido y superior al de la presión atmosférica. Una vez comprimido se hace pasar por el separador, el refrigerador final, el separador de condensados, enviado al secador y, por último, ingresado al tanque de almacenamiento listo para su uso.

Dentro de la planta en general el aire comprimido será utilizado para a operación de equipos de producción, termoformadoras para empacar embutidos, torcionadoras, embutidoras, servicios generales, equipos de limpieza y cualquier equipo que lo requiera. El aire comprimido utilizado debe llegar a los equipos con

la menor cantidad de humedad y con una presión constante de 7 bar (101 psi). Para evitar la presencia de condensados el contenido de humedad tiene que ser lo más bajo posible, para que el punto de rocío sea siempre superior a la menor temperatura en cualquier lugar de la red.

2.1.1.1. Tipos de compresores instalados

Empacadora Toledo cuenta con tres compresores marca Sullair, cuyas características se detallan en la tabla 1.

Tabla I. **Equipos instalados**

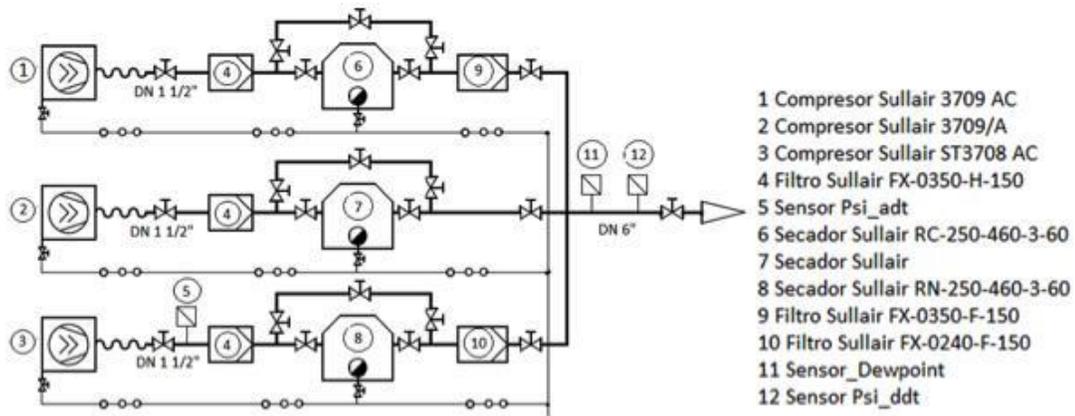
Equipo	Marca/modelo	Potencia	Capacidad	Presión	Estado	Año de fabricación
Compresor de aire	Sullair 3709 AC	50HP	222 CFM	135 psi	Operación	2013
Compresor de aire	Sullair 3709/A	50HP	222 CFM	135 psi	Operación	2010
Compresor de aire	Sullair ST3708 AC	50HP	222 CFM	105 psi	Operación	2016

Fuente: elaboración propia Excel.

2.1.1.2. Sistema de tratamiento de aire comprimido instalado

El sistema de tratamiento instalado consiste en que a la salida de cada compresor se instaló un secador, filtros de partículas y aceite. No se calcularon pérdidas por la altura, humedad relativa y temperatura ambiente de Amatitlán.

Figura 2. Diagrama del sistema



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

2.1.2. Características del aire comprimido en Empacadora Toledo

El aire comprimido requerido en la planta debe ser lo más seco posible, según los requerimientos de los equipos. Las termoformadoras que son los equipos más sensibles a la contaminación, trabajan en un ambiente de temperatura controlada entre 10 y 12 grados Celsius; esto requiere que el punto de rocío este por debajo de esa temperatura para que el aire lleve la menor cantidad de humedad.

2.1.2.1. Ambientes donde se entrega aire comprimido

En la planta hay diferentes ambientes donde se entrega aire comprimido, áreas de cocción entre 20 a 30 grados Celsius, áreas de producción entre 12 a 15 grados Celsius, áreas de empaque entre 10 a 12 grados Celsius y áreas a

temperatura ambiente, haciendo las áreas de empaque las más críticas por la temperatura requerida.

2.2. Recaudación de Datos de Operación

En esta actividad se recaudaron los datos que afectan a la operación tanto de los compresores como del sistema de tratamiento, ya que es fundamental para entender tanto el sistema actual como para elegir el nuevo sistema de tratamiento de aire comprimido.

2.2.1. Ambiente de aspiración del aire

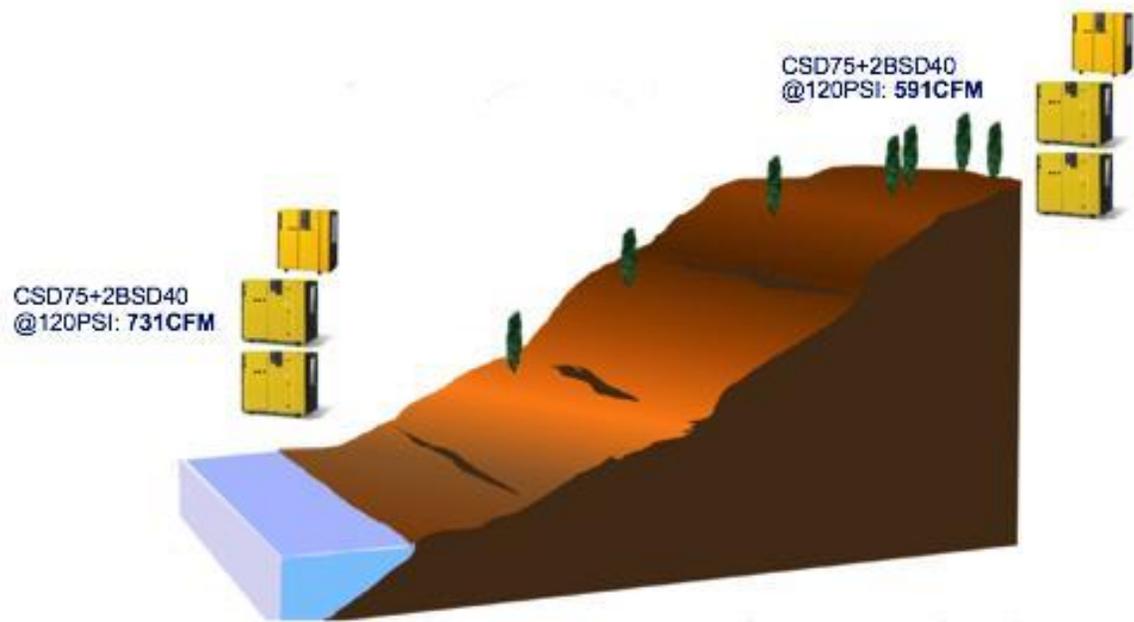
En Amatitlán, según el INSIVUMEH, se presentan condiciones climáticas que afectan la aspiración de aire de los compresores:

- Temperatura máxima: 32 °C
- Humedad relativa máxima: 76 %
- Altura: 1 189 msnm

Ejemplo de pérdidas por altura:

El flujo a secar debe calcularse con base en la entrega máxima de los compresores en la altura del lugar de instalación. Se tomó como referencia un sistema CSD75 + 2XBSD40, porque entrega una mayor cantidad de aire.

Figura 3. **Ejemplo de pérdidas por altura**



Fuente: Kaeser compresores.

2.2.2. **Ambiente del cuarto de compresores**

El ambiente del cuarto de compresores cuenta con ventilación adecuada para el funcionamiento de los equipos del sistema de aire comprimido mantiene una temperatura entre 20 a 30 grados Celsius y la aspiración de los compresores tiene ductos que hace que el aire sea aspirado del exterior y no del interior del cuarto, el espacio entre compresores es el adecuado.

3. SELECCIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO

Después de tener el concepto de todos los puntos que afectan la calidad del aire comprimido ya podemos seleccionar un sistema de tratamiento acorde a las necesidades de Empacadora Toledo Amatlán.

3.1. Análisis de datos según el presupuesto

Se cuenta con un CAPEX de \$ 60 000,00 sin IVA para adquirir un sistema de aire comprimido el cual se tiene pensado distribuir de la siguiente forma, según los precios aproximados del mercado.

Tabla II. Precios promedio

Equipo	Precio promedio
Secadores	\$23 808,00
Filtros	\$3 416,00
Almacenamiento	\$12 814,00
Drenajes	\$1 108,00
Tubería y accesorios	\$12 000,00
Total	\$53 146,00

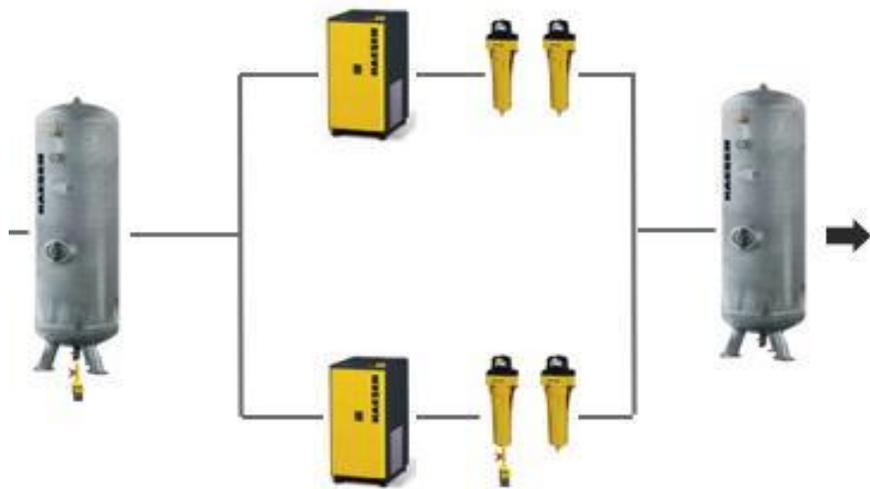
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.2. Análisis de los componentes que integran el sistema de aire comprimido para Empacadora Toledo

Componentes que integran el sistema de tratamiento de aire comprimido propuesto:

- Tanque húmedo
- Secadores
- Filtros
- Tanque seco

Figura 4. Configuración recomendada

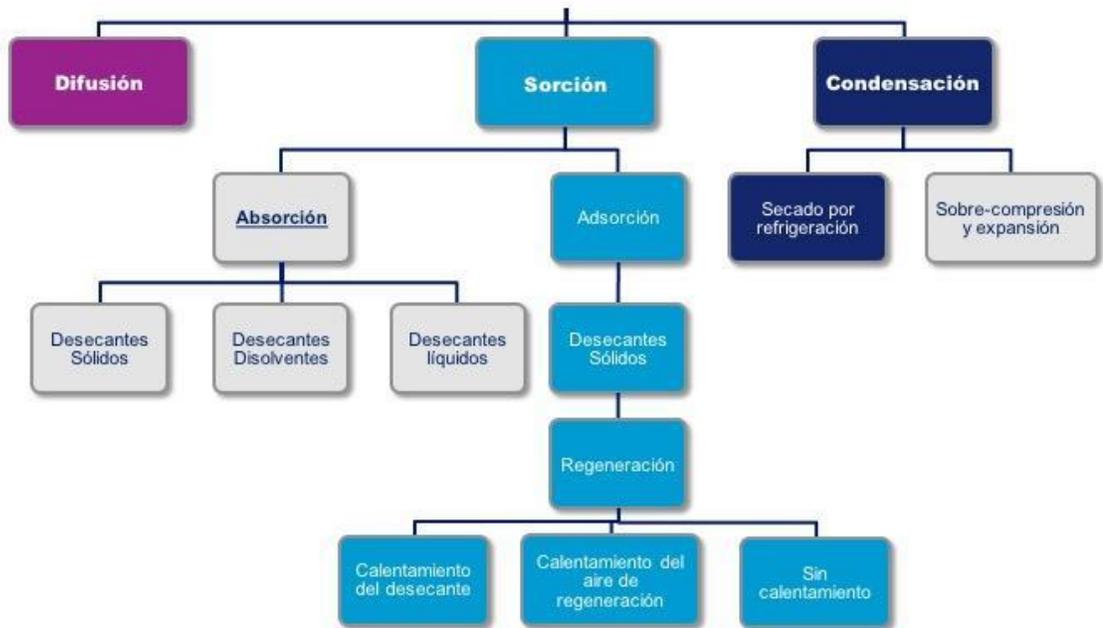


Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

3.3. Análisis de Tipo de Secadores

Se analizaron todos los tipos de secadores en el mercado para seleccionar la mejor opción en cuanto a costo y desempeño según los requerimientos de Empacadora Toledo, las opciones evaluadas fueron las que se expresan en la figura 5.

Figura 5. Métodos de secado



Fuente: Kaeser Compresores.

- Condensación: separación del agua mediante la reducción de la temperatura del aire a un valor más bajo que el punto de rocío. La sobre compresión y posterior expansión. El enfriamiento por circulación de refrigerante en un secador refrigerativo.

- Sorción: eliminación de la humedad
- Adsorción: proceso físico; uso de las fuerzas moleculares. La humedad está unida al medio de secado.
- Absorción: proceso químico; humedad se separa por reacción química con el medio de secado.
- Difusión: el vapor de agua se difunde (permea) a través de una membrana como una consecuencia del cambio parcial de la presión.

Enfocados en el método de condensación, elegimos los secadores por refrigeración ya que según los ambientes de las áreas de producción necesitamos un punto de rocío debajo de 8 grados Celsius, esto hace que la mejor opción en secadores sea refrigerativos, las ventajas de estos son:

- Enfriar el aire a una temperatura cerca al punto de congelamiento.
- Condensación de la mayor parte de la humedad contenida en el aire.
- Separación por medio de un sistema de drenaje de condensado.

La figura 6 muestra como seleccionando el secador adecuado llegamos a un mejor ahorro energético, seleccionando el punto de rocío a presión solo tan bajo como sea necesario.

Figura 6. Selección de punto de rocío a presión

Método de secado	Punto de rocío a presión °C	Potencia específica Típica KW/m³/min
Secador refrigerativo	+ 3	0,1
Hybritec	+ 3 / - 40 *)	0,2
	- 40	0,3
Secador desecante regenerado por calor	- 40	0,5 - 0,6
Secador desecante regenerado sin calor	+ 3	1,4 - 1,6
	- 40	

Fuente: Kaeser Compresores.

3.4. Toma de medidas

En este punto se hicieron todas las mediciones necesarias del sistema actual para poder tomar la mejor decisión al seleccionar el sistema de tratamiento de aire comprimido.

Las mediciones se tomaron en una semana de lunes a domingo. En la figura 7, cada color representa un día diferente:

Figura 7. **Tabla de días**

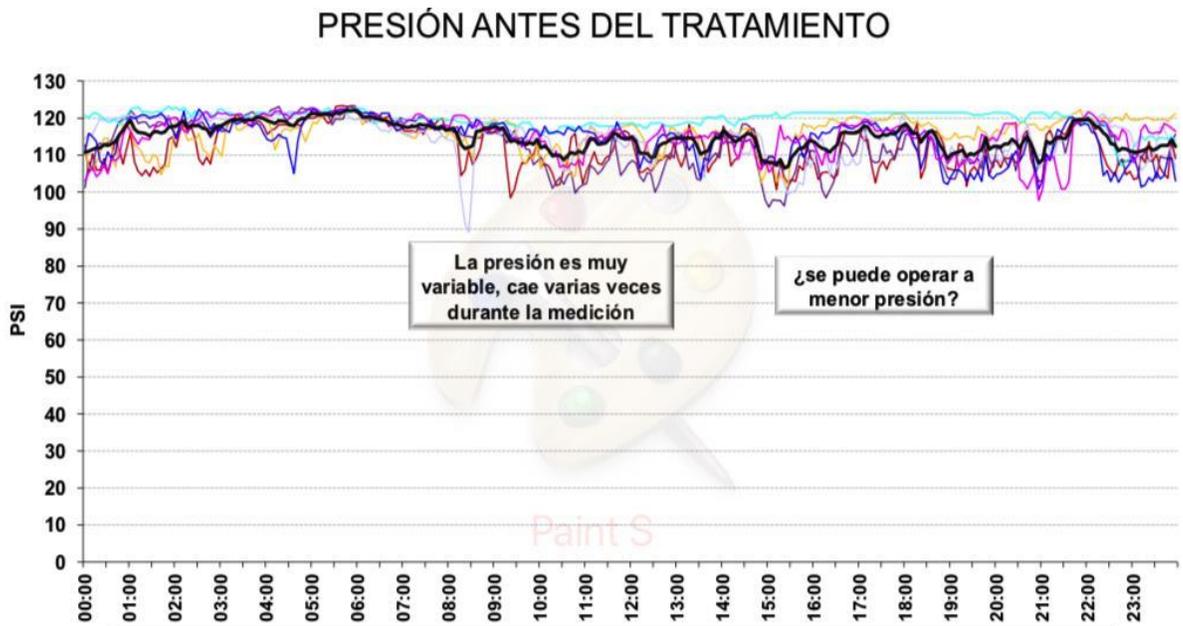


Fuente: elaboración propia.

3.4.1. **Medición de presión**

Presión tomada antes y después del tratamiento instalado.

Figura 8. **Presión antes del tratamiento**

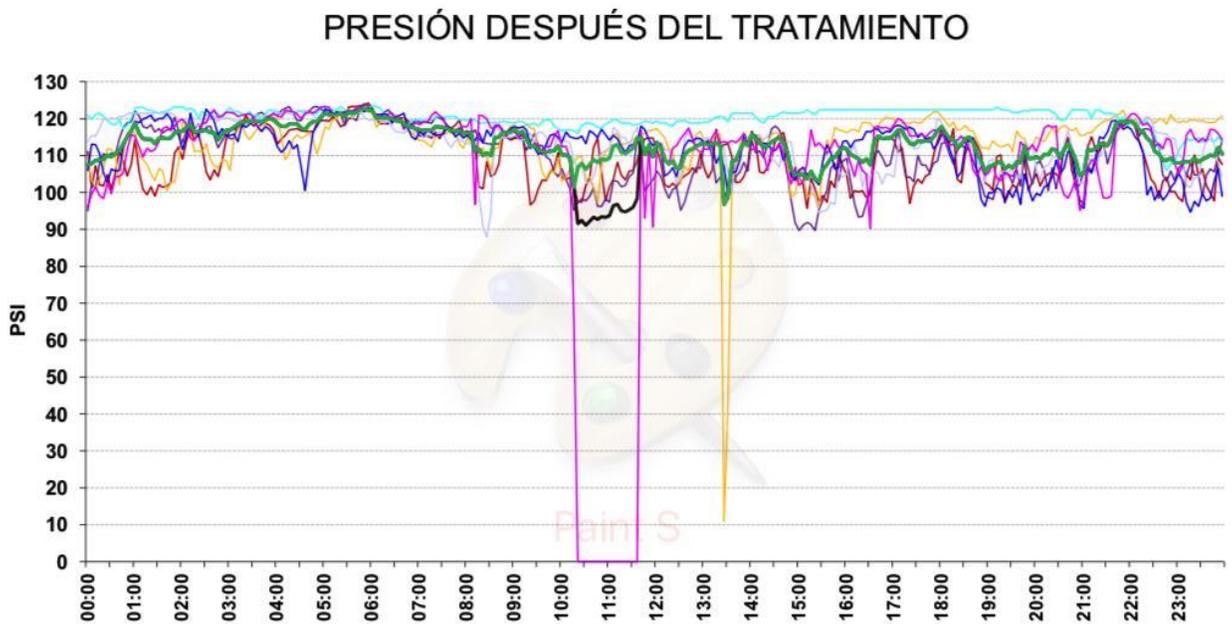


continuación figura 8.

PSI	ABSOLUTO	PROMEDIO
Mínimo	89.15	106.63
Máximo	123.31	122.05
Promedio	114.96	114.96

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 9. **Presión después del tratamiento**



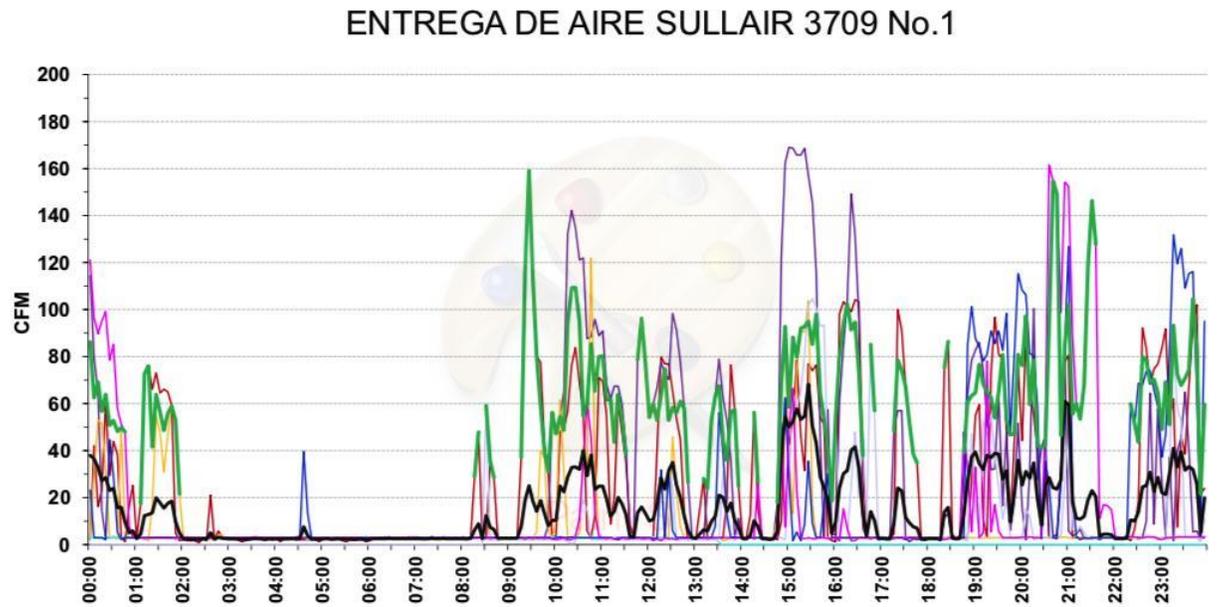
PSI	ABSOLUTO	PROMEDIO	SIN DESC.
Mínimo	0.00	91.10	96.77
Máximo	124.22	122.58	122.58
Promedio	112.35	112.35	113.23

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.4.2. Medición de caudal

Caudal tomado en cada compresor instalado, y el caudal total.

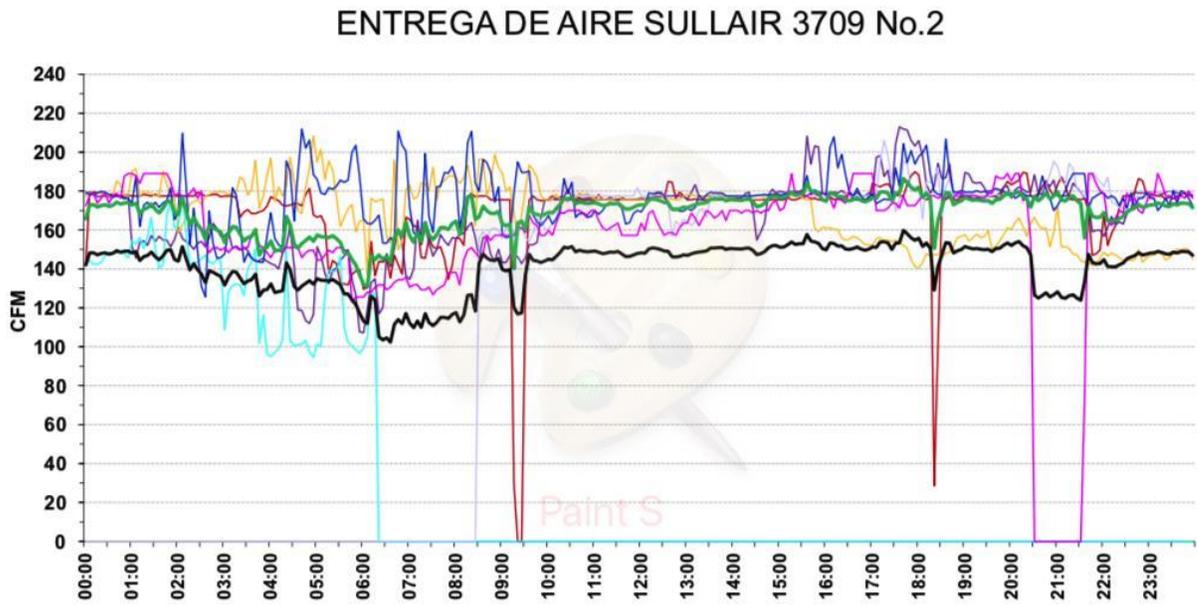
Figura 10. Caudal compresor No.1



CFM	ABSOLUTO	PROMEDIO	SIN DESC.
Mínimo	0.00	2.19	16.95
Máximo	169.07	68.27	159.15
Promedio	14.62	14.62	64.71

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

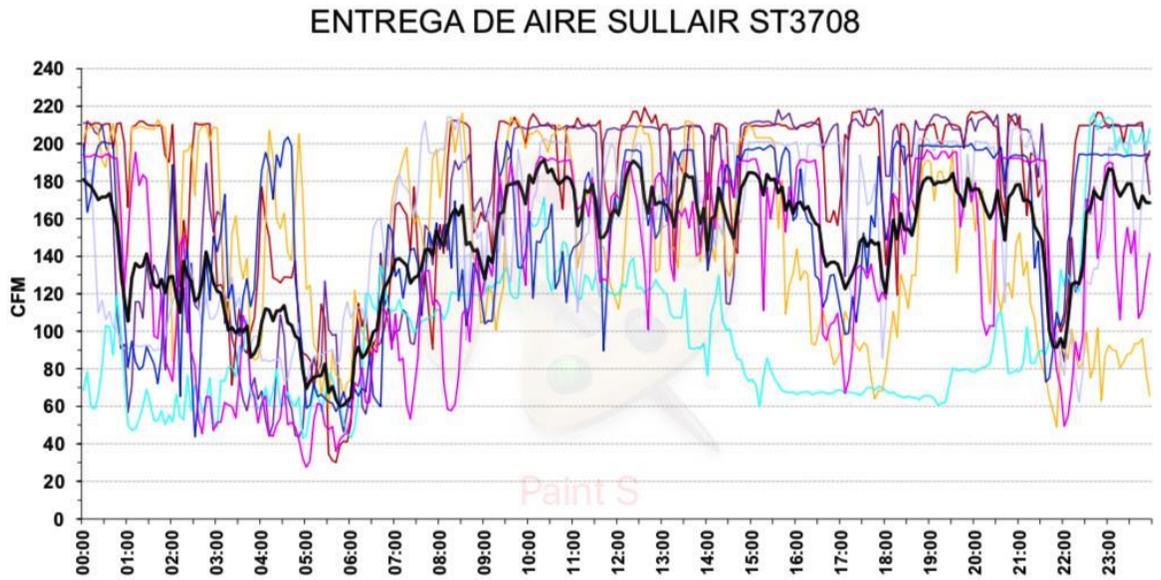
Figura 11. Caudal compresor No.2



CFM	ABSOLUTO	PROMEDIO	SIN DESC.
Mínimo	0.00	102.37	130.64
Máximo	213.00	159.85	186.50
Promedio	141.34	141.34	168.80

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

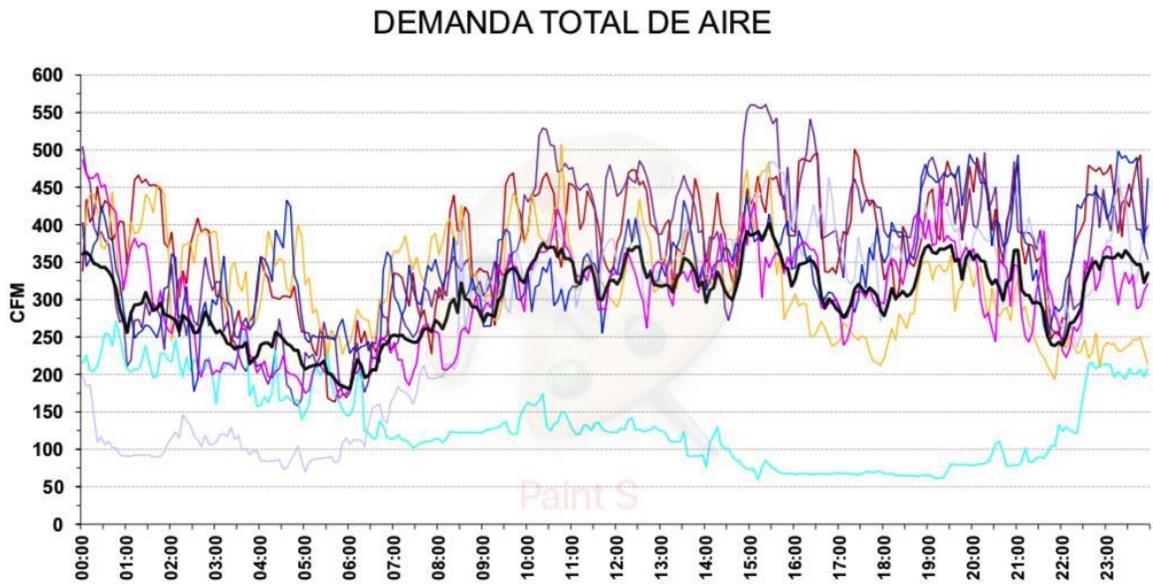
Figura 12. Caudal compresor No.3



CFM	ABSOLUTO	PROMEDIO
Mínimo	27.53	59.99
Máximo	219.38	191.47
Promedio	147.17	147.17

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

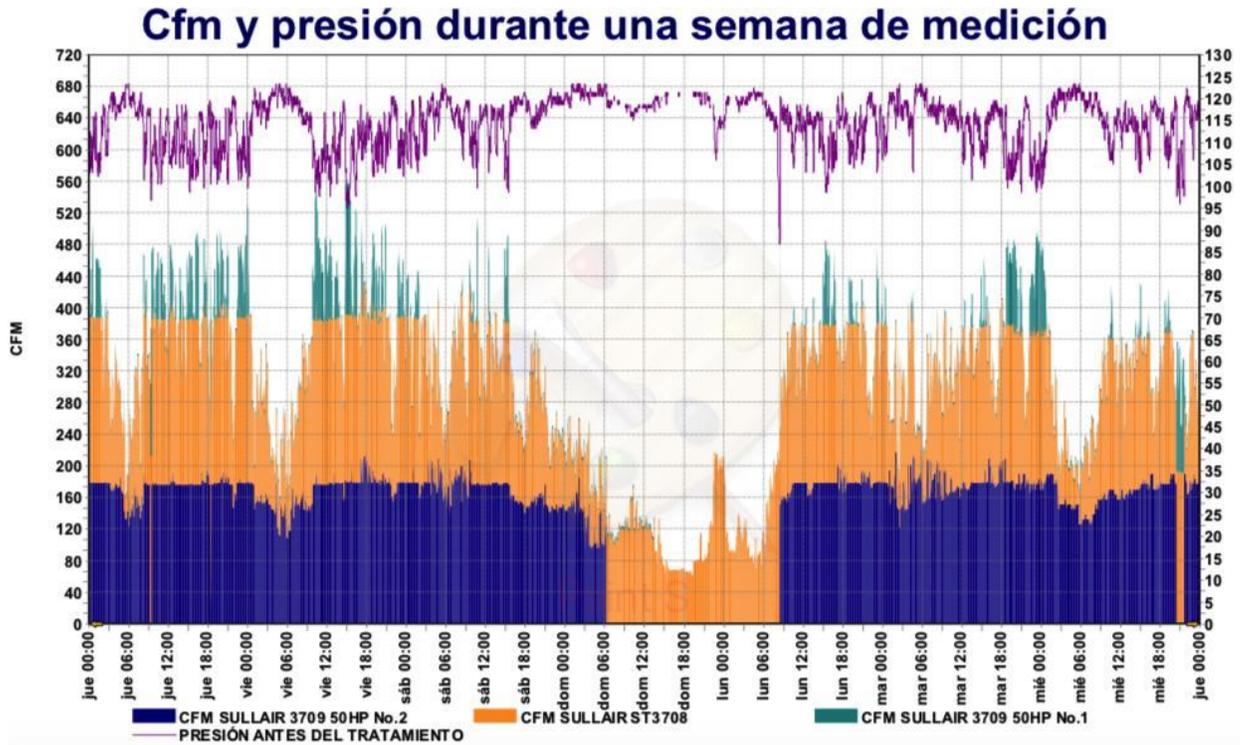
Figura 13. **Demanda total**



CFM	ABSOLUTO	PROMEDIO
Mínimo	59.87	180.59
Máximo	560.45	401.85
Promedio	303.13	303.13

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 14. CFM y presión

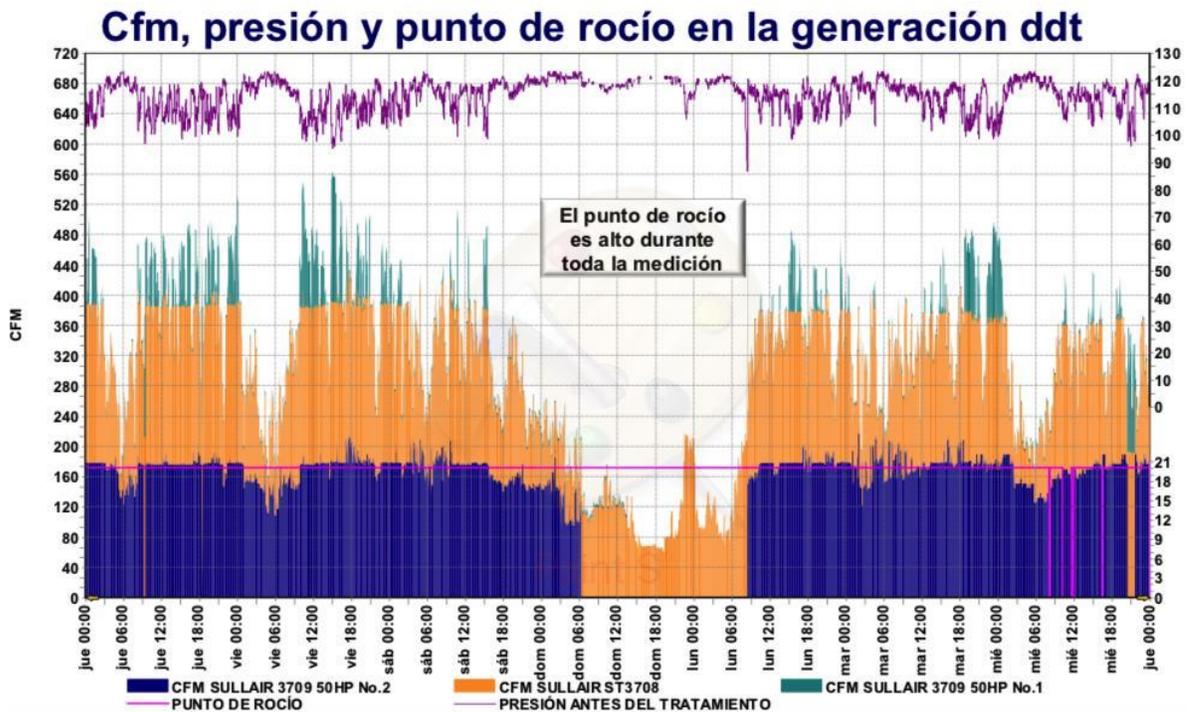


Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.4.3. Medición de punto de rocío

Punto de rocío tomado en el punto más lejano de la red de aire comprimido.

Figura 15. Punto de rocío



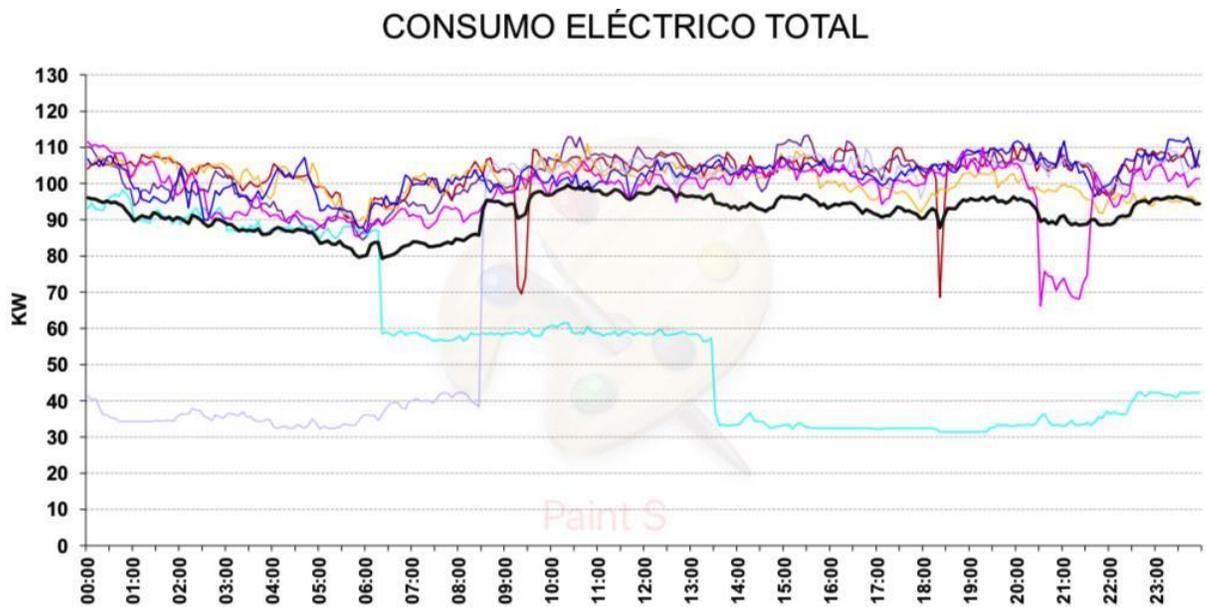
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Con base en esta gráfica, se concluye que el sistema de tratamiento anterior no estaba cumpliendo su función, pues permitía pasar mucha humedad a la red de distribución, lo cual afectaba el funcionamiento de los equipos, ya que la temperatura del punto de rocío es menor de 8 grados Celsius.

3.4.4. Medición de consumo energético en el sistema de aire comprimido

Se midieron los tres compresores durante una semana, para determinar el consumo de cada uno y a la eficiencia con que operan.

Figura 16. Consumo eléctrico de los compresores



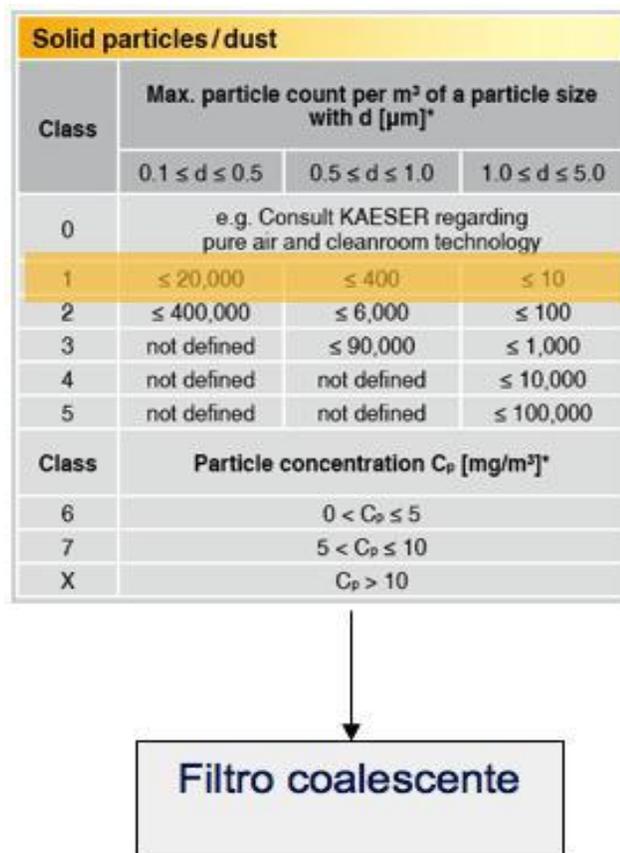
KW	ABSOLUTO	PROMEDIO
Mínimo	31.42	79.34
Máximo	113.31	99.59
Promedio	91.75	91.75

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.5. Selección del sistema de tratamiento de aire comprimido para Empacadora Toledo

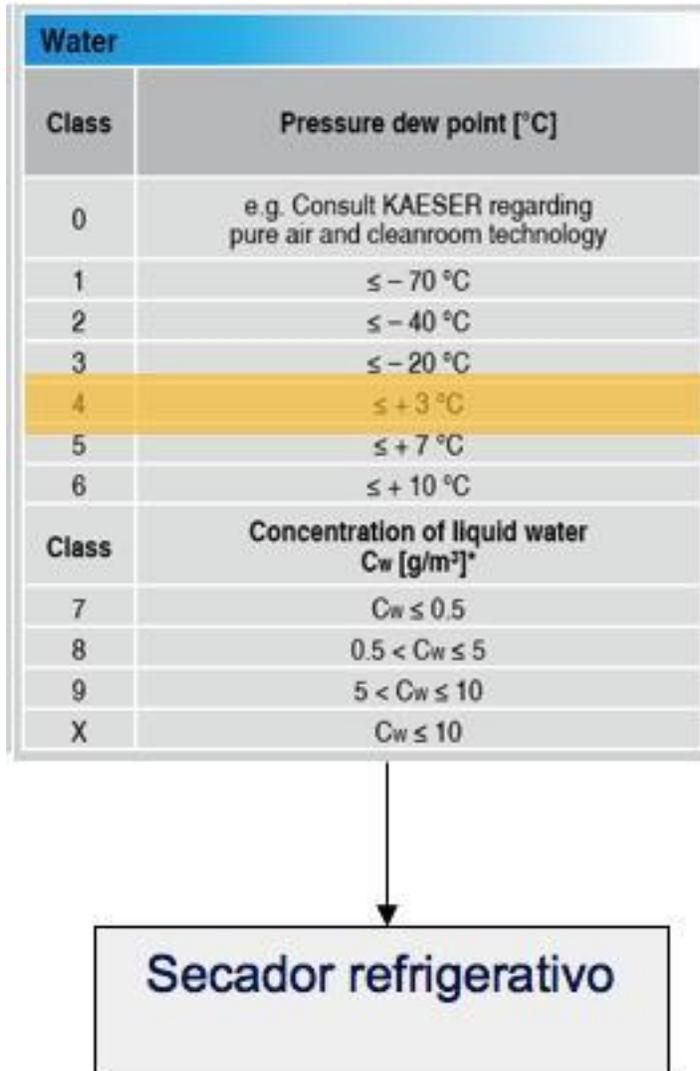
Luego de haber analizado todas las mediciones del sistema actual de aire comprimido, se procedió a calcular y seleccionar el sistema de tratamiento idóneo para el sistema de aire comprimido montado en la planta, que cumpla con el presupuesto y que garantice que la temperatura del punto de rocío esté por debajo de los 8 grados Celsius, y, en consecuencia, que la calidad del aire 1.4.1, cumpla los criterios de la norma ISO8573-1.

Figura 17. Selección del filtro de partículas



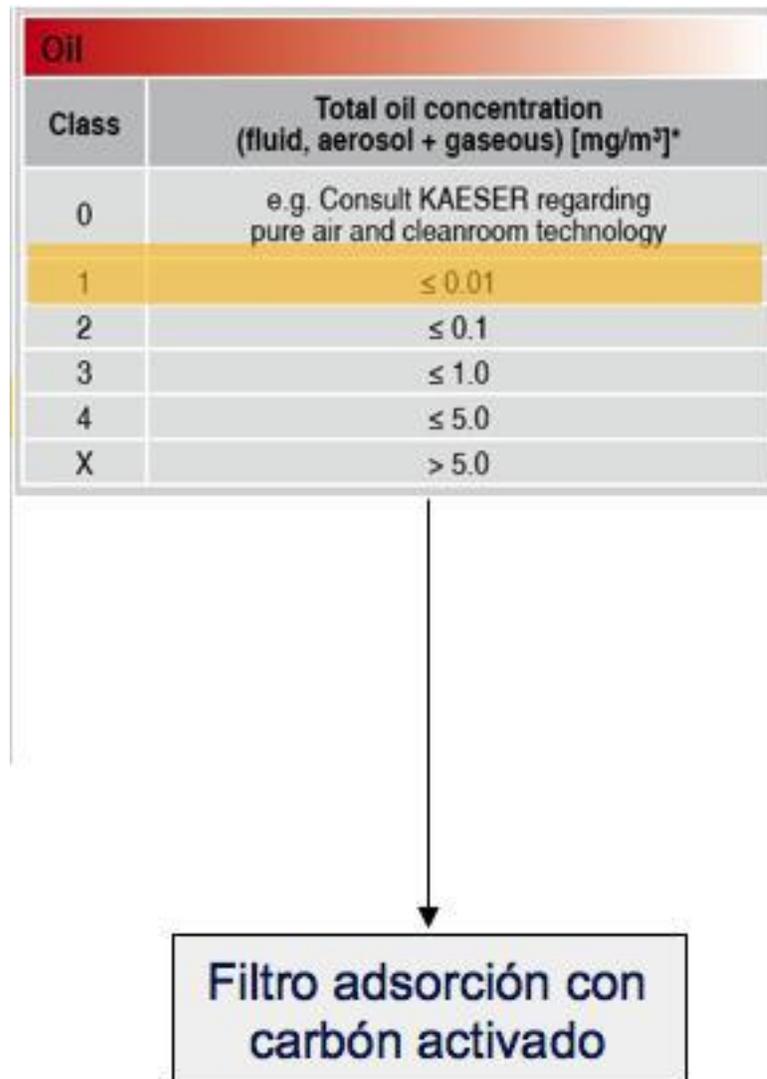
Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 18. Selección del secador refrigerativo



Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 19. Selección del filtro de aceite



Fuente: Kaeser Compresores.

En las visitas técnicas a la planta se analizó marcas como Atlas Copco, Gardner Denver, Sullair y Kaeser, pero en la licitación solo cotizó Kaeser, los cálculos siguientes son realizados para equipos Kaeser.

3.5.1. Cálculo de secadores

Tomando en cuenta las condiciones climáticas de Amatitlán: temperatura ambiental máxima: 32 °C – Kte y temperatura del aire máxima: 44 °C – Ktu; las condiciones de operación a 120 psi ≈ 8,3 bar - Kp, y un requerimiento de flujo: 591/2 = 296 cfm, se obtiene el siguiente análisis.

Figura 20. Cálculo de factor por condiciones

TA-TF (60 Hz)

p bar(ü)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
k _p	0,75	0,84	0,92	1	1,05	1,09	1,12	1,16	1,19	1,22	1,24	1,26	1,27

TA-TF (60 Hz)

T _i (°C)	32	35	38	41	43	46	49	54	60
k _{Te}	1,25	1,12	1	0,88	0,78	0,69	0,61	0,48	0,39

T _a (°C)	32	35	38	41	43	46	50
k _{Tu}	1,09	1,05	1,01	0,96	0,92	0,87	0,81

Fuente: Kaeser Compresores.

FACTOR FINAL: 1,06 X 0,75 X 1,09 = 0,87

Figura 21. Selección del sistema de secado

Model	TE 102	TE 122	TE 142
1. Volume flow related to ambient temp. 20°C, air pressure 1000 mbar and compressor operating pressure 7 bar(g)	9,2	11,6	13,3

↓

11.6 m³/min = 410 cfm

Fuente: Kaeser Compresores.

CAPACIDAD FINAL: 410 X 0,87 = 355 cfm

Dos secadores Kaeser TE122 pueden secar hasta **710 cfm** en las condiciones climáticas de Amatitlán.

3.5.2. Cálculo de elementos del sistema de aire comprimido

En este punto, se calcula el resto de componentes (filtros y tanques) que integran el sistema de tratamiento de aire comprimido para Empacadora Toledo.

3.5.2.1. Cálculo de filtros

Los filtros son la última etapa del tratamiento y sirven para quitar las impurezas que pueda llevar el aire, como aceite y partículas sólidas, después del secado y previo al tanque seco, con un requerimiento de flujo: $591/2 = 296$ cfm.

Figura 22. Selección de filtros

Flow-rate* [m³/min]	Coalescence filter 0,1 mg/m³ grade KB	Dust filter grade KD	Coalescence filter 0,01 mg/m³ grade KE	Activated carbon filter grade KA	Filter element Type**	Compressed Air Connection G" (Option)
4,61	F 46 KB	F 46 KD	F 46 KE	F 46 KA	E46KX	2,(1 ½),(1 ¼)
8,25	F 83 KB	F 83 KD	F 83 KE	F 83 KA	E83KX	2,(1 ½),(1 ¼)
11,0	F 110 KB	F 110 KD	F 110 KE	F 110 KA	E110KX	2,(1 ½),(1 ¼)

bar	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Factor f	0,38	0,50	0,63	0,75	0,88	1,00	1,06	1,12	1,17	1,22	1,27	1,32	1,37	1,41	1,46

Fuente: Kaeser Compresores.

CAPACIDAD TOTAL: $8,25 * 1,08 = 8,91 \text{ m}^3/\text{min} = 314 \text{ cfm}$

Dos filtros KAESER F83 KE y KA pueden tratar hasta 628 cfm para una calidad de aire 1 en aceite y 1 en polvo según norma ISO8573-1

3.5.2.2. Cálculo de tanques

En los tanques de aire comprimido, el enfriamiento adicional del aire se produce debido a la gran superficie del tanque, con la consiguiente separación de condensado. Los sistemas de tratamiento de aire subsiguientes están sujetos a menor carga si se utiliza previo un tanque de aire. El aire comprimido se alimenta por el puerto inferior y se descarga desde el puerto superior. El aire comprimido es forzado a subir. Debido a la baja velocidad del flujo del aire en el depósito, líquidos y partículas se acumulan en el fondo del tanque gracias a la fuerza de la gravedad, estos salen a través de un drenaje automático en forma de condensado.

Figura 23. Tanque de Almacenamiento



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

$$V_B = \frac{\dot{V} \times t}{p_A - p_E}$$

V_B = Volumen del tanque en m³

V = Flujo requerido en m³/min

t = Tiempo del flujo requerido en min

p_A = Presión inicial en bar

p_E = Presión final en bar

V_B = ?

V = 16,75 m³/min (591cfm)

t = 0,33 min. (20s)

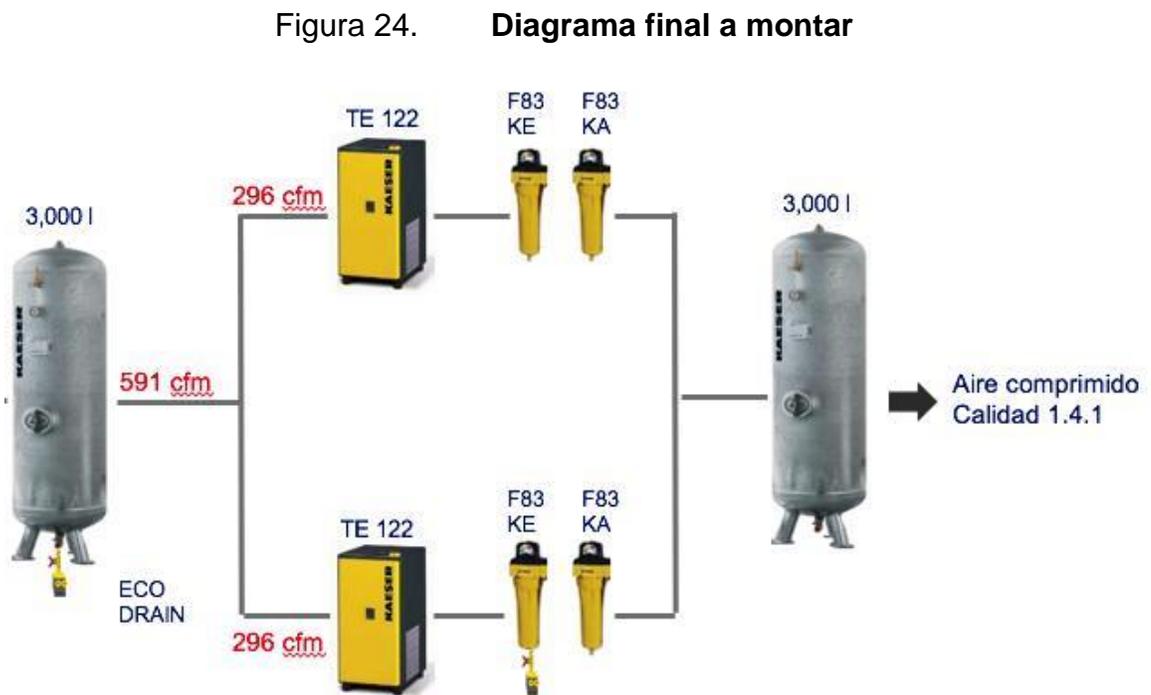
p_A = 8,3 bar (120psi)

p_E = 7,2 bar (105psi)

$V_B = 5\,200$ litros $\approx 2 \times 3\,000$ litros, se calculan dos tanques para tener un tanque húmedo y un tanque seco.

3.5.3. Diagrama del sistema de tratamiento de aire comprimido a montar

Luego de seleccionar los componentes que integran el sistema de tratamiento de aire comprimido y con los datos reales de cada etapa, el diagrama queda como se muestra en la figura 24.



Fuente: elaboración propia, empleando Paint.

En resumen:

- El tratamiento debe considerar una demanda máxima de 591 cfm

- La calidad de aire requerida según norma ISO8573-1 es 1.4.1

Los siguientes equipos tienen capacidad para tratar **591 cfm**:

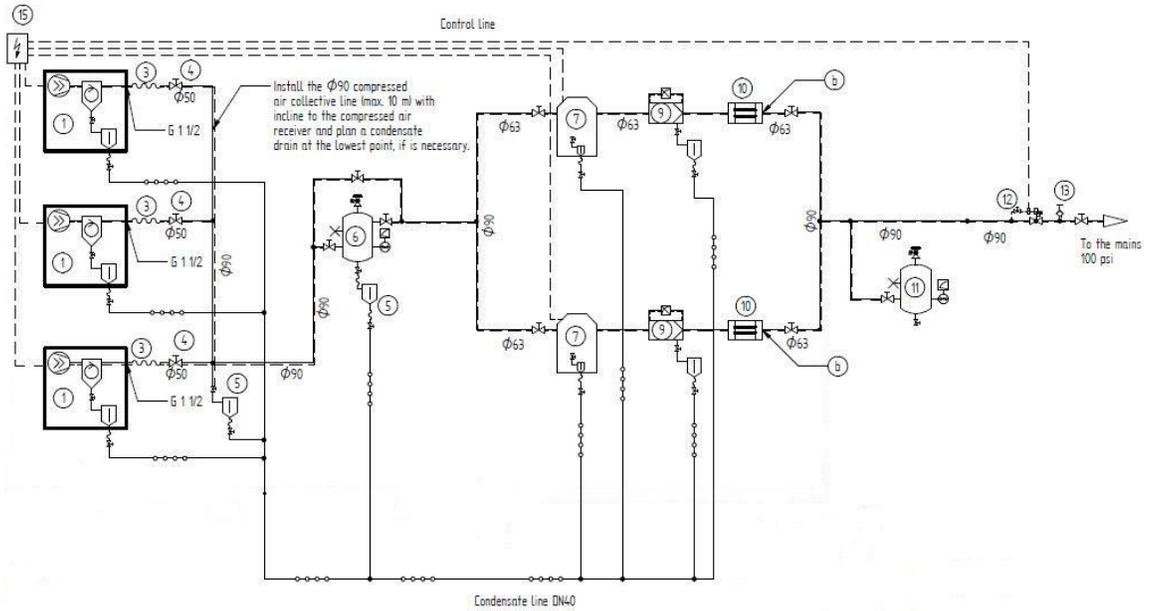
- 2X KAESER TE 122
- 2X KAESER F83 KE
- 2X KAESER F83 KA

Los equipos pueden seguir tratando la demanda máxima, aunque la presión disminuya a 107 psi.

3.6. Montaje del sistema de tratamiento de aire comprimido

Después de seleccionar el sistema de tratamiento de aire comprimido, se procede con el montaje de los equipos, los cuales serán instalados de acuerdo con el diagrama de flujo de la figura 25.

Figura 25. Diagrama de flujo del sistema



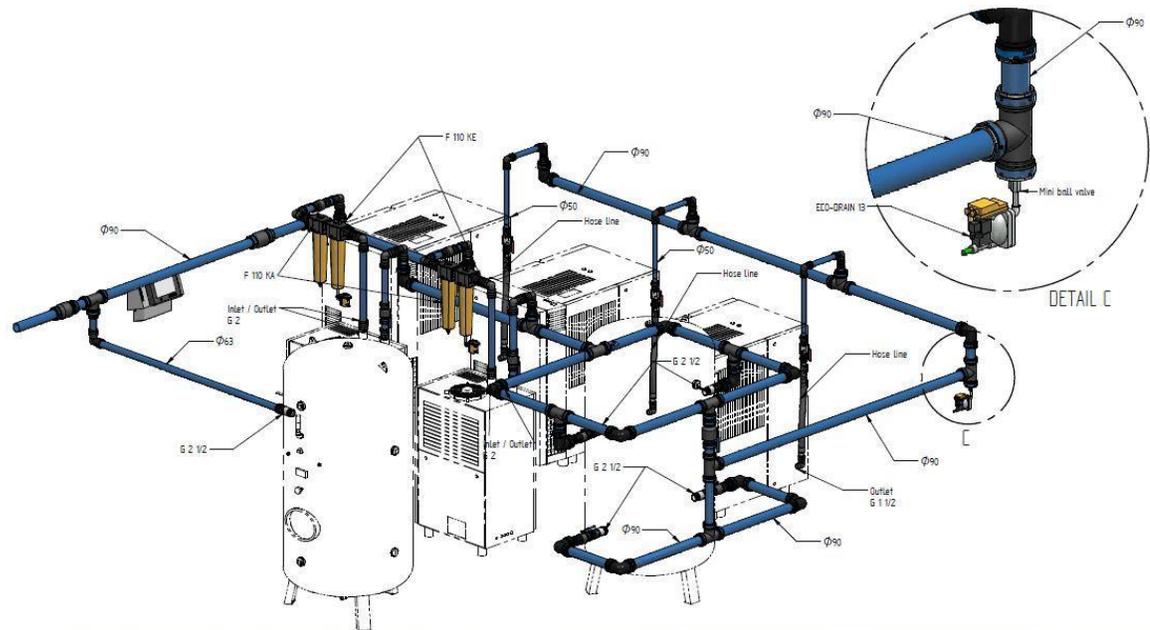
Fuente: Kaeser Compresores.

Tabla III. Componentes del sistema montado

1	Compresor de tornillo
3	Línea de manguera
4	Válvula de bola
5	Drenaje electrónico de condensado ECO-DRAIN 13
6	Tanque Vertical Húmedo 3 000 l / 11 bar
7	Secador refrigerativo TE 122
9	Filtro extra F 110 KE con drenaje electrónico de condensado ECO-DRAIN 30
10	Filtro de adsorción F 110 KA
11	Tanque vertical seco 3 000 l / 11 bar
12	Sistema de carga principal de aire DHS
13	Servicio de acoplamiento de Manguera DHS
15	Sigma Air Manager SAM 4.0 - 4

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 26. Diagrama de flujo del sistema



Fuente: Kaeser Compresores.

3.7. Comparación de eficiencias

La eficiencia de un Sistema de aire comprimido se mide a través de la energía específica (KW/CFM).

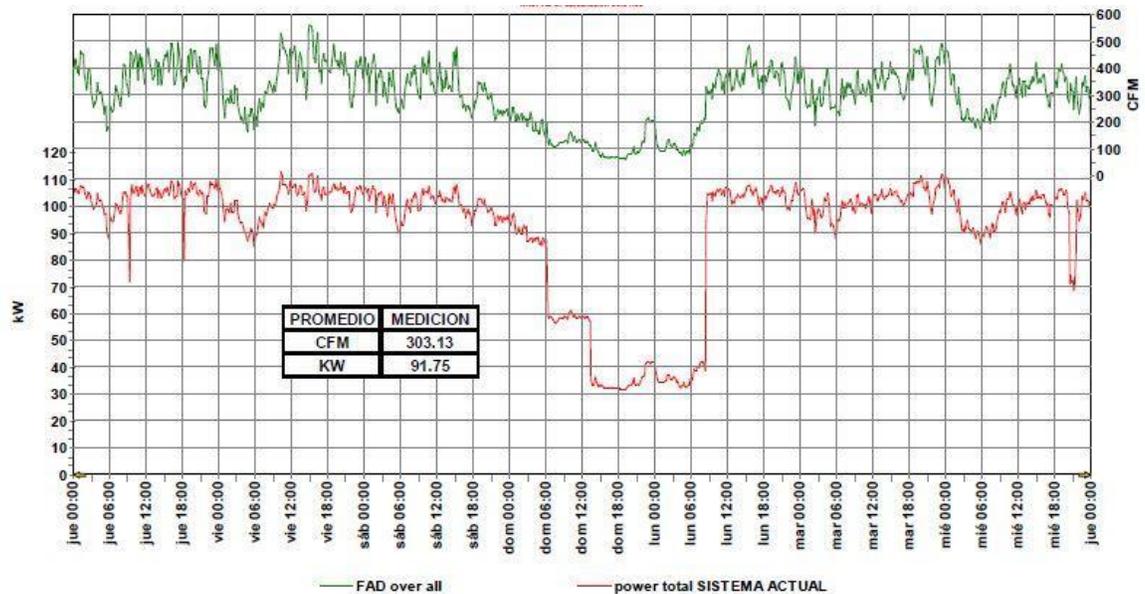
Un rango de energía específica aceptable está entre 0,18 a 0,20 KW/CFM, después del tratamiento.

3.7.1. Eficiencia actual

El sistema de compresores montado tiene una energía específica de 0,3027 KW/CFM, según la medición de los compresores por 7 días.

Se obtuvo una medición promedio de 91,75 KW y 303,13 CFM.

Figura 27. Gráfica energía específica



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

3.7.2. Eficiencia con mejores propuestas

Para mejorar la eficiencia del sistema se requiere mejorar la energía específica, eso solo se logra diseñando un sistema a la medida de la demanda requerida en Empacadora Toledo.

Según las mediciones obtenidas por la demanda, se puede proyectar un escenario con otra configuración de compresores y lograr una energía específica mucho más baja que la medida con el sistema actual.

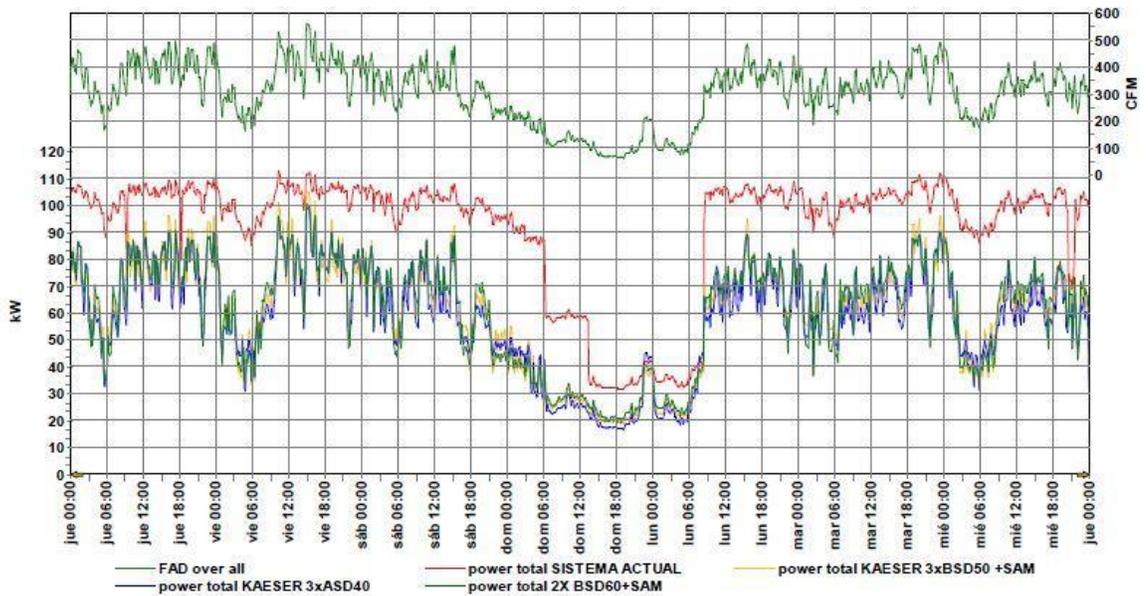
Se realizó una proyección de costos utilizando los datos medidos, la demanda de aire medida durante 50 semanas de trabajo anuales utilizando los siguientes sistemas:

Figura 28. **Sistemas propuestos**



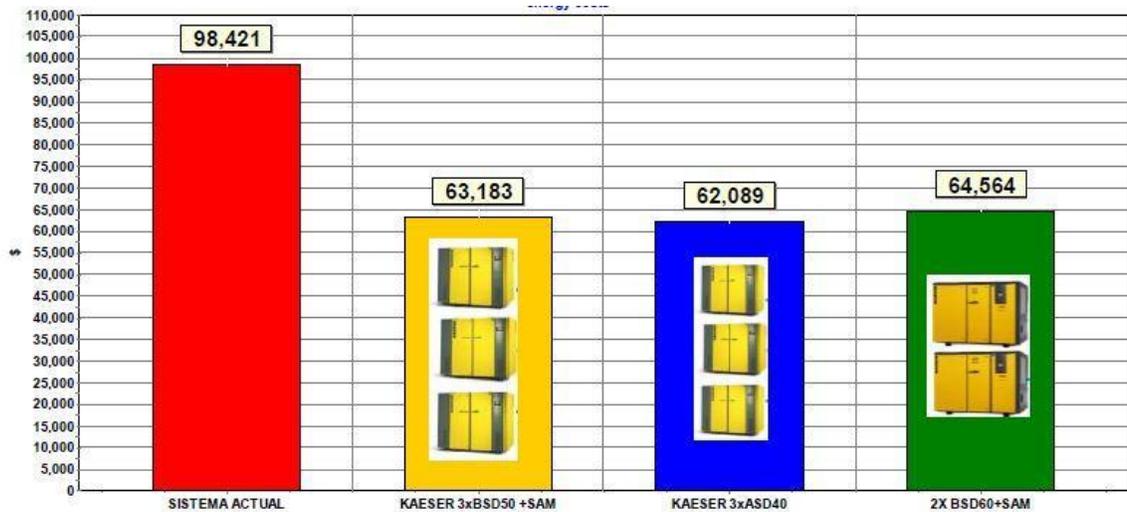
Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 29. Grafica proyectada del sistema actual vs. propuestas



Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 30. Costos Energéticos por Sistema



Fuente: Kaeser Compresores.

Figura 31. Comparación de sistemas

CON: 24 HR/DIA, 350 DIAS/AÑO, \$0.127/KWH

EQUIPOS: CONCEPTOS:	SISTEMA ACTUAL	KAESER SAM+ 3x BSD50	KAESER SAM+ 3x ASD40	KAESER SAM+ 2x BSD60
ELECTRICIDAD	\$98,421	\$63,183	\$62,089	\$64,564
AHORRO	-	<u>\$35,238</u>	<u>\$36,332</u>	<u>\$33,857</u>
AHORRO DE KW	-	32.85	33.87	31.56
% DE AHORRO	-	<u>35.80%</u>	<u>36.91%</u>	<u>34.40%</u>
COSTO 1,000 CF	\$0.6442	\$0.4136	\$0.4064	\$0.4226
KW/CFM	0.3027	0.1957	0.1921	0.2003

SEMANA PROMEDIO

Fuente: Kaeser Compresores.

Entre \$ 36 322 y \$ 33 857 de ahorro anual en energía eléctrica en compresores, esto equivale a 36,91 % y un 34,40 %.

4. FASE DOCENCIA

4.1. Capacitación del personal operativo

En esta fase, el objetivo fue que el personal de conservación industrial del área de servicios de Empacadora Toledo advirtiera la necesidad de instalar un sistema de tratamiento de aire comprimido, su funcionamiento y la importancia de la calidad de aire requerida dentro de la planta.

4.1.1. Importancia de contar con un sistema de tratamiento de aire comprimido

Se reunió a todo el personal del área de servicios generales que operan y dan mantenimiento al sistema de aire comprimido para recibir el curso de Tratamiento de Aire Comprimido, en el cual se impartieron los siguientes temas:

- Impurezas en el aire ambiente
- Calidad del aire comprimido
- Humedad y condensados
- Post-enfriadores
- Separación mecánica inicial
- Métodos de secado
- Filtración
- Recomendaciones de VDMA

4.1.2. Importancia del sistema de tratamiento de aire comprimido instalado en Empacadora Toledo

En este punto se reunió al personal de conservación industrial del área de servicios generales, mantenimiento de embutidos (ven el mantenimiento de los equipos de producción tanto mecánico como eléctrico) y a supervisores, coordinadores y gerente de producción de embutidos. Con el apoyo de las gráficas de medición del sistema de aire comprimido, se les mostró la situación actual y cómo funcionaba el sistema anterior, el indicador de paros de las termoformadoras antes del montaje del sistema de tratamiento de aire comprimido, luego se les presentó el proyecto, que equipos se montaron, funcionamiento y los resultados obtenidos después del montaje del sistema.

4.1.3. Importancia de cumplir con los parámetros técnicos del aire comprimido en la planta

En este punto se le dio énfasis a las impurezas del ambiente, calidad, humedad y condensado que lleva el aire comprimido que se produce Empacadora Toledo, dándole importancia a cuantificar los paros.

4.1.4. Presentación de mejoras y avances a la gerencia de conservación industrial

Se realizó una reunión con los encargados de las gerencias de conservación industrial y de producción de embutidos, para presentar el proyecto y los resultados esperados y obtenidos en el primer mes de operación.

CONCLUSIONES

1. Se determinó el tipo de tratamiento técnico del aire comprimido, con el presupuesto de \$ 60 000. Se tomó en cuenta el respaldo, mantenimiento y diseño del sistema para solucionar el problema de la humedad y la contaminación en el aire comprimido generado en Empacadora Toledo. El tipo escogido es el refrigerativo con filtros de aceite y partículas, con el uso de un tanque húmedo y un tanque seco, para tener una mejor estabilidad de la presión y se logró disminuir a cantidad de paros semanales por humedad en un 80 %, aumentando la productividad de los equipos.
2. Se seleccionó, montó y puso en marcha un sistema de tratamiento de aire comprimido con capacidad para una demanda máxima de aire de 591 cfm, con calidad de aire requerida, según norma la norma ISO8573-1. La calidad obtenida fue 1.4.1, con una presión mínima de 107 psi.
3. Se dio a conocer el proyecto al personal de conservación industrial encargado de operar los equipos, al personal de producción (clientes finales del aire comprimido) y a los gerentes de conservación industrial y de procesamiento de embutidos. Con el objeto de que todo el personal esté comprometido, compruebe la importancia del funcionamiento y los beneficios del nuevo sistema.

RECOMENDACIONES

Gerencia de conservación industrial

1. Evaluar las propuestas de ahorro energético al cambiar a equipos nuevos diseñados para la demanda específica de Empacadora Toledo, para bajar los costos de mantenimiento y obtener un ahorro de 15 % en energía eléctrica destinada a la generación de aire comprimido.
2. Evaluar la posibilidad de comprar aire comprimido (pies cúbicos), y hacer el análisis versus al gasto de mantenimiento del sistema de aire comprimido montado actualmente, para garantizar eficiencia energética constante, lo cual se reflejará en la disminución de personal de mantenimiento a dos personas, la limitación de los gastos de depreciación y la eliminación de gastos administrativos por el mantenimiento de los equipos actuales, que ya son muy antiguos.

Jefe de conservación industrial

1. Contar con personal capacitado para realizar las rutinas de mantenimiento preventivo de los equipos de aire comprimido para garantizar la efectividad de las reparaciones de los equipos.
2. Capacitar constantemente al personal técnico y operativo para garantizar la confiabilidad de los equipos.

3. Dotar a cada uno de los técnicos del equipo de protección personal, de bloqueo y etiquetado, para realizar las rutinas de mantenimiento, y con ello minimizar el riesgo de accidentes dentro de la planta.

Técnicos operarios

1. Asegurarse de que en el área donde se realiza el mantenimiento se encuentre el botiquín de primeros auxilios para que brinde los primeros auxilios, antes de trasladar al herido a la clínica médica.
2. Seguir cada una de las rutinas de mantenimiento preventivo establecidas y llenar las órdenes de trabajo para garantizar la disponibilidad de los equipos más de un 90 %.

BIBLIOGRAFÍA

1. CMI Corporación Multi Inversiones. *Historia, misión, visión, valores* [en línea]: <<https://www.cmi.co/es/quienes-somos/somos-cmi.>>. [Consulta: 15 de mayo de 2019].
6. GODOY, Miguel. *Henkel estudio del sistema de generación de aire comprimido Tratamiento*. Guatemala: Kaeser Compresores de Guatemala, 2007, 52 p.
2. Kaeser Compresores. *Aire comprimido*. [en línea]: <https://gt.kaeser.com/>. [Consulta: 15 de abril 2019].
3. LUSZCZEWSKI, Antoni. *Redes industriales de tubería. Bombas para agua, ventiladores y compresores*. España: Reverté Ediciones, 2004. 312 p.
4. Maquinas Hidraulica. *Mecánica de fluidos y recursos hidráulicos* [en línea]. [en línea]. <<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/maquinashidraulicas/comprimido/comprimido.htm>>. [Consulta: 12 de abril 2019]
5. MULTIVAC. *Operación de termoformadoras, descarga de manuales*. [en línea]: <https://gt.multivac.com/es/>. [Consulta: 25 de abril 2019].

APÉNDICE

Apéndice 1. **Protocolo de arranque de los compresores de aire comprimido tipo tornillo**

El procedimiento de arranque es la etapa culminante, se verifica que todo haya sido instalado de acuerdo con las especificaciones de diseño; se busca el correcto funcionamiento de todas y cada una de las partes que integran el proceso y, por último, se arranca el equipo para obtener el resultado deseado con la calidad establecida. El sistema de alimentación de aire incluye:

- Compresor de tornillo rotativo
- Almacenamiento en húmedo
- Secador regenerativo
- Filtros para satisfacer las necesidades del cliente
- Almacenamiento en seco
- Controlador de flujo
- Purgadores
- Separador de aceite lubricante

Continuación de apéndice 1.

Sistema de alimentación



Fuente: Sullair. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor Sullair*. p. 0.

Un compresor es una máquina de fluido que está construida para aumentar la presión y desplazar fluidos llamados compresibles, tales como gases y vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido, en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por este, convirtiéndose en energía de flujo y aumentando su presión y energía cinética, impulsándola a fluir.

- Compresor de tornillo:

Es impulsado por un motor (puede ser eléctrico, diésel, neumático, entre otros). Utiliza dos tornillos largos para comprimir el aire dentro de una cámara larga. Para evitar el daño de los mismos tornillos, es insertado aceite para

Continuación de apéndice 1.

mantener todo el sistema lubricado. El aceite es mezclado con el aire en la entrada de la cámara y transportado al espacio entre los dos tornillos rotativos. Al salir de la cámara, el aire y el aceite pasan a través de un largo separador de aceite donde el aire ya pasa listo por medio de un pequeño orificio filtrador. El aceite es enfriado y reutilizado mientras que el aire va al tanque de reserva para ser utilizado en su trabajo.

En los rotores de perfil asimétrico, el contacto solo se produce en una línea de paso lubricada, de modo que prácticamente no existe desgaste. Con esto no se pierde capacidad ni eficiencia. La lubricación a presión controlada y los depósitos de lubricante para rodamientos aseguran un suministro fiable de fluido a los elementos rotativos.

- Partes importantes

Separador del aire y lubricante:

- Los elementos del separador reducen el arrastre de lubricante a un máximo de 1 ppm.
- El arrastre reducido disminuye los costos de reposición de lubricante.
- Los elementos plegados reducen la caída de presión para lograr una mayor eficiencia y prolongar la vida útil de los elementos.
- Fáciles de cambiar.

Filtro de admisión:

- Incluye una conexión de admisión de aire remota.

Continuación de apéndice 1.

- Mantiene limpio el lubricante y prolonga la vida útil de otros componentes internos.
- Reduce la caída de presión a lo largo de la vida útil, lo que resulta en un ahorro de energía.

Mantenimiento mejorado para el enfriador de lubricante por aire:

- Paneles fáciles de desmontar que brindan acceso para limpiar los enfriadores.

Motor conectado con la unidad de aire a través de un acoplamiento flexible no lubricado:

- Permite usar motores de armazón NEMA estándar.
- Simplifica la instalación y la puesta en marcha.

Sistema de control de capacidad variable con tecnología de válvulas espiral:

- Disminuye los costos de operación a carga parcial.
- Reduce la carga cíclica en el paquete.
- Mantiene la presión de la planta constante.
- Control sencillo.
- Reduce la carga de los rodamientos.

Unidad de aire del compresor de dos etapas:

- Proporciona más aire.

Continuación de apéndice 1.

- Reduce el consumo de energía.
- Prolonga la vida útil de los rodamientos en la unidad compresora.

Filtro de lubricante de fibra de vidrio:

- El soporte de calidad aeronáutica ofrece una mejor filtración.
- Es hasta un 20 % más eficaz que los elementos convencionales de papel.
- Prolonga la vida útil del compresor.

- Supervisor Controller

- El controlador de microprocesadores compatible con ordenadores, muestra ilustraciones sencillas de gráficos de las funciones supervisadas y un teclado fácil de leer.
- Lectura constante de la presión y temperatura.
- Lectura bajo demanda de todas las condiciones de funcionamiento y mantenimiento.
- Supervisa las funciones clave y las paradas de seguridad.
- Reencendido automático después de un corte en el suministro eléctrico.
- Control doble que ofrece una operación automática de arranque/parada.
- Adelanto/retraso y control secuencial con varios compresores.
- Programa de servicio y mantenimiento preventivo.
- Se registran las horas de marcha ("RUN"), de carga ("*loaded*") y de insumos consumibles ("*consumable parts*").
- Historial de fallos con lecturas de los sensores.

Continuación de apéndice 1.

- La tecla "*help*" (ayuda) ofrece una guía de resolución de problemas.

- Procedimiento de arranque

Modo de arranque

Modo de arranque - 0 a 50 psi	
	Presionar el botón de encendido del compresor.
	Presión del separador sube de 0 a 50 psi.
	Reguladores de presión cerrados
	Electroválvula cerrada.
	Válvula neumática de admisión sin operar.
	Luego de 8 segundos, la electroválvula se abrirá, con la válvula de admisión.
	El compresor comenzará a funcionar a su capacidad nominal total.
	La presión está aislada de la línea de servicio.

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de apéndice 1.

Preparación eléctrica	
	Comprobar que el compresor está bien cableado para la tensión de red.
	Comprobar la tensión en llegada
	Comprobar las características del relé de arranque.
	Comprobar las características de los relés de sobrecarga térmica.
	Comprobar los collarines calefactores.
	Comprobar el apriete de todas las conexiones eléctricas.
	Poner en funcionamiento (desconectando los tres cables de alimentación del motor).
	Volver a conectar los tres cables del motor.
	Hacer funcionar el motor por impulsos para comprobar el sentido de rotación.
	Verificar todas las direcciones de rotación en los motores auxiliares.

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de apéndice 1.

Procedimiento para la primera puesta en marcha	
	Leer detenidamente las secciones anteriores.
	Empujar levemente el motor para verificar la rotación correcta del ventilador.
	Asegurarse de que se ha realizado una instalación correcta del compresor.
	Abrir la válvula de aislamiento hacia el círculo de servicio.
	Comprobar que no existan fugas en los tubos.
	Cerrar lentamente la válvula de aislamiento para asegurarse que el valor nominal de ajuste de descarga de presión es el correcto.
	El compresor se descargó a presión nominal.
	Observar la temperatura de servicio no debe ser mayor a 93 °C.
	Abrir la válvula de aislamiento hacia el circuito de servicio.
Al siguiente día:	
	Comprobar temperatura.
	Comprobar que no existan fugas.

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Continuación de apéndice 1.

Arranques posteriores

Procedimiento para los arranques posteriores	
	Comprobar el nivel del fluido en el cristal de inspección.
	Presionar el botón ARRANQUE (START) o modo AUTOMÁTICO.
	Observar el panel de mandos y los indicadores de mantenimiento.

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

ANEXO

Anexo 1. Pictogramas de seguridad

Seguridad de ventilador



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

Superficies calientes



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

Continuación anexo 1.

Atrapamiento



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

Riesgo eléctrico



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

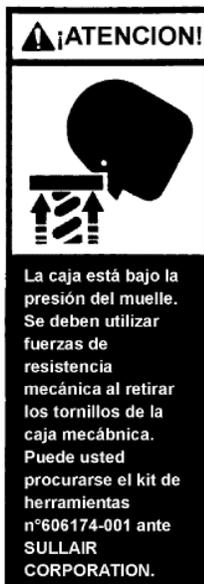
Continuación anexo 1.

Aire peligroso



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

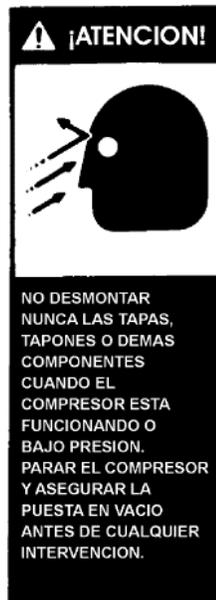
Riesgo mecánico



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

Continuación anexo 1.

Línea de fuego



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.

Aire tóxico



Fuente: SULLAIR. *Manual de instalación, operación y mantenimiento, compresor marca Sullair mod. LS25S-300H.* Consulta: 05 julio, 2019.