



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Estudios de Postgrado  
Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS  
COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS  
CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

**Ing. José Efraín Estrada Estrada**

Asesorado por la Mtra. Inga. Sandra Ninett Ramírez Flores

Guatemala, octubre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS  
COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS  
CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ING. JOSÉ EFRAÍN ESTRADA ESTRADA**  
ASESORADO POR LA MTRA. INGA. SANDRA NINETT RAMÍREZ FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2020



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 Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Javier Fidelino García Tetzaguic
SECRETARIO	Mtro. 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:

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS  
COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS  
CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 9 de octubre de 2019.

**Ing. José Efraín Estrada Estrada**





DTG. 325.2020.

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 Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359**, presentado por el Ingeniero **José Efraín Estrada Estrada** estudiante de la **Maestría en Ingeniería de Mantenimiento** 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, octubre de 2020.

AACE/asga





**Guatemala, Octubre de 2020**

EEPFI-1267-2020

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359”** presentado por el **Ingeniero José Efraín Estrada Estrada** quien se identifica con Carné **200112487** correspondiente al programa de **Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



**Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti**  
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**





Guatemala, Octubre de 2020

EEPFI-1266-2020

Como Coordinador de la **Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359"** presentado por el **Ingeniero José Efraín Estrada Estrada** quien se identifica con Carné **200112487**.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

**Mtro. Ing. Mario Renato Escobedo Martínez**  
**Coordinador de Maestría**  
**Escuela de Estudios de Postgrado**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**



Guatemala, Octubre de 2020

EEPFI-1268-2020

En mi calidad como Asesora del Ingeniero **José Efraín Estrada Estrada** quien se identifica con Carné **200112487** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **"DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO APLICADO A LOS COMPRESORES DE AIRE PARA LA FÁBRICA DE PISOS, AZULEJOS Y FACHALETAS CERÁMICAS DE SAMBORO, S.A. BASADO EN LA NORMA ISO 17359"** quien se encuentra en el programa de **Maestría en Artes en Ingeniería de Mantenimiento** en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

*"Id y Enseñad a Todos"*

  
Mtra. Inga. Sandra Nineth Ramirez Flores  
Asesora

*Sandra Nineth Ramirez Flores*  
INGENIERA QUÍMICA, COL. No. 437  
Msc. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por todas las bendiciones que me da, sobre todo la existencia y bienestar de mis lindas hijas.
<b>Virgen María</b>	Porque siempre nos cuida e intercede por nosotros, especialmente por las bendiciones para mis hijas.
<b>Mi papá</b>	Por todo el amor y apoyo que he tenido de su parte durante toda mi vida. Por su ejemplo como hombre de bien y padre de familia excepcional.
<b>Mi mamá</b>	Por ese amor incondicional y por todos esos sacrificios que hace sin siquiera darse cuenta. Por todo lo que sigue dándonos a sus hijos y nietos sin esperar nada a cambio.
<b>Mis hermanos</b>	Homero, Estefani, Hernán y Mayté Estrada, de quienes siempre he tenido el apoyo y a quienes admiro por diferentes motivos.
<b>Mi esposa</b>	Por su esfuerzo y dedicación para nuestra familia y para el bienestar de nuestras hijas. Y

por su apoyo todos estos sábados que no pude estar con ellas.

**Mis hijas**

Nicolle e Inés Estrada, quienes llenan mis días de puro amor y de alegría con esas bellas sonrisas, y por quienes doy todo. Que Dios y la Virgencita siempre las guarden con bien.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Universidad de San Carlos de Guatemala**

Por la oportunidad que nos brinda para el desarrollo individual y de nuestro país.

**Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería**

Por la facilidad de seguir los estudios de esta maestría.

**Mis amigos de la Maestría**

Por su ayuda y por su compañía durante estos estudios.

**Inga. Sandra Ramírez**

Por su dedicación y compromiso con el aprendizaje de sus estudiantes y por su apoyo en este trabajo.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS.....	XIII
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Industria cerámica.....	1
1.1.1. Procesos y técnicas aplicadas.....	2
1.1.2. Maquinaria utilizada.....	4
1.1.2.1 Molienda de arcilla continua en húmedo.....	4
1.1.2.2 Atomizado de arcilla.....	6
1.1.2.3 Prensado.....	8
1.1.2.4 Secado.....	9
1.1.2.5 Molienda de esmaltes.....	10
1.1.2.6 Líneas de esmalte.....	11
1.1.2.7 Cocción.....	12
1.1.2.8 Clasificación y empaque.....	14
1.1.2.9 Rectificado.....	15
1.1.3. Samboro, S.A.....	16
1.1.3.1 Historia.....	17

	1.1.3.2	Ubicación.....	17
	1.1.3.3	Mercado.....	18
1.2.		Mantenimiento.....	18
	1.2.1.	Fallas de mantenimiento.....	20
		1.2.1.1 Tipos de fallas.....	22
	1.2.2.	Filosofías de mantenimiento.....	23
		1.2.2.1 Mantenimiento correctivo.....	23
		1.2.2.2 Mantenimiento preventivo.....	23
		1.2.2.3 Mantenimiento de oportunidad.....	24
		1.2.2.4 Detección de fallas .....	24
		1.2.2.5 Modificación del diseño.....	24
		1.2.2.6 Reparación general .....	25
		1.2.2.7 Reemplazo.....	25
	1.2.3.	Plan de mantenimiento .....	25
		1.2.3.1 Tareas del plan de mantenimiento.....	26
	1.2.4.	Mantenimiento predictivo.....	26
		1.2.4.1 Ensayos no destructivos.....	28
1.3.		Compresores de aire .....	29
	1.3.1.	Aplicaciones del aire comprimido.....	30
	1.3.2.	Funcionamiento de compresores de aire .....	31
	1.3.3.	Mantenimiento del compresor .....	32
	1.3.4.	Operación recomendada de los compresores de aire	35
	1.3.5.	Tipos de compresores de aire .....	37
	1.3.6.	Compresor de tornillo.....	39
	1.3.7.	Partes de los compresores de tornillo.....	41
1.4.		Calidad en mantenimiento.....	41
	1.4.1.	ISO .....	42
	1.4.2.	Norma ISO 55000 .....	42
	1.4.3.	Norma ISO 17359 .....	42

1.4.4.	Norma ISO 5011:2014.....	43
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	45
2.1.	Recolección de datos .....	45
2.2.	Factores que afectan el funcionamiento de los compresores....	48
2.3.	Plan de mantenimiento preventivo .....	49
2.4.	Análisis de variables que afectan el funcionamiento de los compresores .....	51
2.4.1.	Análisis cualitativo y cuantitativo de variables .....	51
2.5.	Análisis de causa y efecto.....	54
2.5.1.	Análisis de 5 porqué's.....	56
2.6.	Análisis FODA.....	58
3.	PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....	61
3.1.	Análisis de los efectos del aire residual en la eficiencia de los compresores .....	61
3.2.	Acciones necesarias para implementar el plan de mantenimiento predictivo .....	65
3.3.	Plan de mantenimiento predictivo.....	73
3.3.1.	Partes del compresor a incluir en el plan de mantenimiento predictivo .....	74
3.3.2.	Tareas del plan de mantenimiento predictivo.....	76
3.3.3.	Frecuencia de las mediciones para el plan de mantenimiento predictivo .....	77
3.3.4.	Valores de alarma para cada parte monitoreada.....	78
4.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	81
4.1.	Resultados del análisis de los factores que afectan la operación de los compresores .....	81

4.2.	Comparación de los planes de mantenimiento preventivo con los planes incluyendo mantenimiento predictivo.....	82
4.3.	Comparación de costos.....	84
4.4.	Beneficios que se obtienen al implementar el plan de mantenimiento predictivo.....	86
4.5.	Discusión de resultados .....	88
4.5.1.	Análisis interno .....	88
4.5.2.	Análisis externo.....	89
4.5.3.	Integración.....	90
CONCLUSIONES.....		93
RECOMENDACIONES.....		95
REFERENCIAS.....		97
APÉNDICES .....		103
ANEXOS .....		107

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Esquema de flujo de la sección de molienda.....	5
2. Diseño esquemático de un molino continuo con tambor cilíndrico y revestimiento de clasificación helicoidal.....	6
3. Esquema general de la planta de atomización.....	7
4. Prensa hidráulica de serie 2000.....	8
5. Secadero horizontal de múltiples planos.....	10
6. Diseño de molino Alsing y detalle del revestimiento interior.....	11
7. Aplicación de esmalte con campana.....	12
8. Horno monoestrato.....	13
9. Dispositivo de control de calibre y de la planaridad.....	15
10. Máquina rectificadora.....	16
11. Relaciones en una organización con sus objetivos y los procesos de producción y mantenimiento.....	20
12. Fases de compresión de aire.....	31
13. Diagrama de árbol lógico simplificado para el MCC.....	34
14. Ilustración de unidad de tornillo.....	38
15. Compresor de aire.....	39
16. Partes de un compresor de tornillo.....	40
17. Tipos de compresores de aire.....	41
18. Gráfica de tendencia.....	47
19. Gráfica de temperatura ambiente, presión de salida y temperatura de salida.....	53
20. Diagrama de Ishikawa.....	55

21. Análisis FODA del área de compresores.....	59
22. Gráfica de temperatura ambiente y temperatura de salida.....	62
23. Temperatura ambiente <20 °C y potencia.....	63
24. Temperatura ambiente >32 °C y potencia.....	64
25. Temperatura ambiente promedio 23.2 °C y potencia, 26. caudal >482 CFM.....	65
27. Área de compresores delimitada.....	66
28. Orden de trabajo de lubricación con tarea para limpieza de compresores incluida.....	68
29. Registro de recorridos diarios, técnica V.O.S.O.....	69
30. Cotización por fabricación de prefiltro.....	70
31. Sensor de presión diferencial instalado en compresor 4.....	71
32. Ubicación de repuestos en compresor 4.....	75

## TABLAS

I. Técnicas predictivas.....	28
II. Propuesta plan de mantenimiento.....	50
III. Tabla de datos recolectados: temperatura ambiente, presión de salida y temperatura de salida.....	52
IV. Valores de vibración registrados en el control del compresor 4.....	72
V. Frecuencia de mediciones de variables.....	78
VI. Valores de alarma.....	79
VII. Plan de mantenimiento predictivo.....	80
VIII. Detalle de mantenimiento preventivo.....	84
IX. Detalle de mantenimiento predictivo.....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grados Celsius.
°F	Grados Fahrenheit.
psi	Libras fuerza por pulgada cuadrada. Es una unidad de presión del sistema imperial.
<b>MCC</b>	Mantenimiento centrado en la confiabilidad.
<b>PdM</b>	Mantenimiento predictivo.
<b>CFM</b>	Pies cúbicos por minuto (en inglés <i>cubic feet per minute</i> , siglas CFPM o CFM). Mide el caudal o flujo de un gas o líquido, indicando el volumen, en pies cúbicos, que pasa por una sección determinada, en la unidad de tiempo.



## GLOSARIO

<b>Caudal</b>	Cantidad de un fluido que discurre en un determinado lugar por unidad de tiempo.
<b>Compresor de aire</b>	Máquinas especialmente diseñadas y construidas para aumentar la presión en los gases. Lo más común es que se comprima aire, pero en la industria es frecuente la necesidad de comprimir otros gases.
<b>Falla</b>	Es la incapacidad del activo de cumplir con cualquier función. Son todos los estados indeseables del sistema o equipo.
<b>Falla funcional</b>	Deja de cumplir con la función, no necesariamente significa que el activo deja de producir.
<b>Falla potencial</b>	Se detecta una pequeña degradación, pero cumple con la función, es decir aún no afecta el requerimiento de producción
<b>Horómetro</b>	Es un contador de horas acumuladas de trabajo del compresor de aire.

<b>Mantenimiento predictivo</b>	Se realiza según la condición de las partes o equipos a mantener realizando el mantenimiento al presentar desgaste o pérdida de sus propiedades que puedan generar alguna falla.
<b>Mantenimiento preventivo</b>	Realizado periódicamente sin tomar en cuenta la condición de los equipos o las partes para evitar fallas.
<b>Modo de falla</b>	Es el efecto por el cual una falla es observada, la manera como se manifiesta un equipo cuando está en falla.
<b>Nivel de aceite</b>	Es el indicador para conocer la cantidad de aceite que tiene el compresor, puede ser una varilla, un visor o de otros tipos como flote.
<b>Presión</b>	Magnitud física que expresa la fuerza ejercida por un cuerpo sobre la unidad de superficie y cuya unidad en el sistema internacional es el Pascal.
<b>Presión de salida</b>	Es la presión del aire comprimido, a la que se entrega a la salida del compresor.
<b>Temperatura de salida</b>	Es la temperatura a la salida del compresor, la temperatura del aire comprimido que sale del mismo.

## RESUMEN

Los compresores han presentado alarmas por alta temperatura, provocada por diferentes causas, podía ser por obstaculización en el área que impide el paso de aire fresco, además que estaban expuestos a la contaminación en el aire y en ciertas ocasiones algún residuo de empaque ha llegado a obstruir parcialmente la entrada de aire de algún compresor, lo que llevó a ajustar el plan de mantenimiento preventivo.

Se diseñó el plan de mantenimiento predictivo para los compresores de aire, para monitorear la condición de los compresores de aire que suministran el aire comprimido a la fábrica para programar oportunamente las tareas, cambiando los repuestos cuando se necesitan cambiar por el uso y no solo por el tiempo que se han usado, ya que usualmente se mantienen con planes de mantenimiento exclusivamente preventivo, por lo que podía desaprovecharse la vida útil de los repuestos que se usan, según la duración establecida por los fabricantes, lo que incrementa los costos del mantenimiento.

Se analizaron las variables que afectan el funcionamiento de los compresores de aire como temperatura ambiente, presión de trabajo, saturación del filtro de aire, conociendo la condición y con la posibilidad de analizar la tendencia de estas variables. Por medio de la aplicación de estadística descriptiva, se analizaron los datos por medio de comparaciones que dieron a conocer los beneficios de saber la condición de los equipos aplicando mantenimiento preventivo según la norma ISO 17359.

Uno de los resultados más relevantes que se obtuvieron es la diferencia en el consumo de energía del compresor por trabajar a temperatura más alta, lo que afecta la eficiencia en la operación, mostrando una diferencia de USD 2,720 al año. Se recomienda aplicar el mantenimiento predictivo en todas las máquinas, se puede priorizar en las que se tienen mayores gastos para tener ahorros en menos tiempo.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS**

El problema que se buscaba resolver era el mejoramiento de las condiciones de operación de los compresores de aire, que afectaban la eficiencia en la generación de aire comprimido al provocar que la temperatura del aire de admisión subiera, debido a diferentes causas.

- Descripción del problema

El área de compresores se encuentra ubicada entre el espacio que se usa para almacenar el producto terminado, el área en que se encuentran instalados es prácticamente al aire libre, bajo techo con pared únicamente de un lado. Cuando a los compresores se les colocaba un elemento que impide el paso del flujo de aire se daba el problema de la alta temperatura, por el mismo calor generado por la operación de los compresores que afectaba la operación de estos.

También se tenía problema con el polvo que se mantenía en el ambiente por la operación de los montacargas en la calle interna de la planta, frente al área donde se ubican los compresores, y también el polvo que ingresa desde la calle por el tránsito que circula fuera de la planta y cerca de esta ubicación.

El área de compresores es abierta, por lo que le afecta la contaminación que pueda haber en el ambiente, y es aspirada por los compresores, contaminación como polvo y otros elementos como basura que ha llegado a encontrarse en la admisión del aire de los compresores, como restos de

empaques de comestibles o de material de empaque utilizado en el producto terminado.

Por lo anterior el mantenimiento menor se ha tenido que hacer cada 2,000 horas y no cada 4,000 horas como lo recomiendan los fabricantes. Lo que ha significado costos más altos a los presentados en la compra de los compresores, ya que al año se tienen que hacer 2 mantenimientos menores más de lo que inicialmente se estimaba.

- Delimitación del problema

El estudio quedó limitado a la operación de los compresores de aire en servicio en la planta de Samboro, S.A., empresa dedicada a la producción de productos cerámicos. Las mediciones y toma de datos para la investigación se hicieron durante la operación de los equipos según la demanda por la operación de la planta, en el transcurso de la investigación se analizaron los datos tomados desde septiembre de 2018 hasta octubre de 2019.

A consecuencia de los problemas suscitados se hicieron las siguientes preguntas:

- Pregunta central

¿Cómo se puede mejorar el funcionamiento de los compresores de aire de la fábrica de pisos, azulejos y fachaletas cerámicas de Samboro?

- Preguntas auxiliares de investigación

- ¿Qué factores afectan el funcionamiento de los compresores?

- ¿Cómo se puede determinar si el incremento de la temperatura del aire residual de salida de los compresores afecta la eficiencia de estos?
- ¿Cómo se pueden mejorar las condiciones de trabajo de los compresores en un ambiente más adecuado para su operación óptima?



# **OBJETIVOS**

## **Objetivo general**

Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para los compresores de aire de la fábrica de pisos, azulejos y fachaletas cerámicas de Samboro basado en la norma ISO 17359.

## **Objetivos específicos**

1. Identificar los factores que afectan el funcionamiento de los compresores.
2. Analizar el efecto del aire residual de los compresores al incrementar la temperatura en la admisión y cómo afecta la eficiencia de estos.
3. Determinar los beneficios que se logran con el mantenimiento predictivo de los compresores de aire con base en la norma ISO 17359.



## RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

Por medio del uso de las técnicas de estadística descriptiva los datos recolectados se presentaron haciendo uso de tablas y gráficas para comparar los tipos de mantenimiento y correlacionar las variables en estudio.

El enfoque de la investigación es de tipo mixto, incluye el estudio de variables de tipo cualitativo y cuantitativo. El diseño de la investigación es de tipo no experimental, se basó en el análisis de los datos recolectados de las variables en estudio, por medio de una muestra de datos recolectada durante un año para hacer estudios comparativos. También es descriptivo-correlacional en registros estructurados, para analizarlos y conocer cómo se relacionan las variables.

El estudio es de tipo descriptivo, basado en el análisis cuantitativo de las tendencias de las variables de operación de los compresores de aire, que permiten mostrar gráficamente que se encuentran bajo control porque se busca estudiar cómo se afecta la operación de los compresores con base en los cambios en las variables del estudio.

Las variables que se midieron son la temperatura del aire en la admisión del compresor, la temperatura en la salida de aire comprimido del compresor, la temperatura del aire residual en la salida del compresor, la saturación de los filtros de aire, presión de salida del compresor, caudal de salida del compresor, potencia, consumo de energía y análisis de aceite para verificar la condición del aceite.

La población total de compresores en la planta está compuesta de 6 compresores, de los cuales 2 se mantienen como respaldo. Los compresores en operación a plena demanda son 4 compresores. La muestra es no probabilística, como muestra se toman los datos de un año de operación de un solo compresor, se tomó el número 4 porque es el que debe mantenerse trabajando siempre a menos que se tenga que hacer mantenimiento o presente alguna falla.

En la primera fase de la investigación se identificaron los factores que afectan el funcionamiento de los compresores, mediante el análisis de los datos recolectados que se realizó en la segunda fase.

En la tercera fase se presentaron los resultados por la aplicación del mantenimiento predictivo basado en la norma ISO 17359. Al final se hizo la discusión de estos, por medio de las mejoras que se alcanzaron al realizar el monitoreo de condición para conformar el plan de mantenimiento predictivo en los compresores de aire, y se cuantificaron los beneficios logrados.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo presentó la sistematización para aplicar mantenimiento predictivo a los compresores de aire, ya que usualmente se mantienen con planes de mantenimiento exclusivamente preventivo, por lo que podía desaprovecharse la vida útil de los repuestos que se usan, según la duración establecida por los fabricantes.

El problema que se ha presentado en los compresores es alta temperatura, provocada por diferentes causas, podía ser por obstaculización en el área que impide el paso de aire fresco, además que estaban expuestos a la contaminación en el aire y en ciertas ocasiones algún residuo de material de empaque ha llegado a obstruir parcialmente la entrada de aire de algún compresor.

Por medio de la aplicación de estadística descriptiva, después de recolectar los datos, se ordenaron para presentarlos en tablas y gráficas, y se analizaron por medio de comparaciones que dieron a conocer los beneficios de monitorear la condición de los equipos aplicando mantenimiento predictivo como lo manda la norma ISO 17359.

Como resultados tras la implementación se tiene la reducción del uso de repuestos y realizar los cambios con intervalos de tiempo más amplios. Como aportes de este trabajo se tienen las bases para incluir tareas de mantenimiento predictivo en los compresores que se utilizan en Samboro, S.A., que sirve para programar el mantenimiento y conocer la condición de los equipos.

Como beneficio para la empresa se tiene la reducción de gastos innecesarios, por medio del uso de menos repuestos y la programación de las actividades oportunamente, lo que también reduce el impacto ambiental por el mantenimiento de los compresores de aire y beneficia a la comunidad donde se ubica la fábrica, así como al departamento de mantenimiento por la reducción de mano de obra dedicada al mantenimiento preventivo.

En el capítulo I se presentó el marco teórico, que contiene la información respecto a la industria cerámica, sus procesos y maquinaria utilizada en cada proceso, también los detalles de la empresa Samboro, S.A. y se presentaron principios básicos y los términos relacionados a la generación del aire comprimido, también el tipo de compresores utilizados y sus partes y, por último, lo referente al mantenimiento predictivo y elaboración de planes de mantenimiento.

En el capítulo II se hizo el desarrollo de la investigación, se mostraron los datos recolectados, los factores que afectan el funcionamiento de los compresores y el análisis de las variables y de la situación de esta área.

En el capítulo III se presentaron los resultados obtenidos de la recolección durante la operación usando el mantenimiento preventivo y los resultados esperados con base en el mantenimiento predictivo, estos resultados del monitoreo de condición basados en la norma ISO 17359, como base de comparación para el siguiente capítulo.

En el capítulo IV se hizo la discusión de los resultados proyectados por medio de las mejoras que se pueden alcanzar al realizar el monitoreo de condición para realizar el plan de mantenimiento predictivo en los compresores de aire, y se cuantifican los beneficios que se pueden alcanzar.

# 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se detalla la base teórica para la presente investigación, fragmentada en cuatro secciones:

## 1.1. Industria cerámica

El término cerámica es usado para denominar materiales inorgánicos a base de compuestos no metálicos, a veces con algo de contenido orgánico, que se terminan de producir por un proceso de cocción (EOI, 2012).

Se ha dado una revolución en la producción y el mercado por el incremento del mercado de la construcción y por el esfuerzo de aumentar la productividad junto con la calidad de vida de los trabajadores del sector (SACMI, 2004).

Se ha llegado al desarrollo de la mecanización para evitar el esfuerzo físico del trabajador y por medio de sistemas de automatización de las líneas de producción se han sustituido actividades de control y organización. Lo que hace más uniforme la producción, y el trabajador resulta esencialmente supervisando y controlando los procesos automatizados (SACMI, 2004).

Los principales sectores que se apoyan en los productos cerámicos manufacturados (cerámica), son los siguientes:

- Pavimentos y revestimientos
- Ladrillos y tejas
- Cerámica de mesa y de decoración (cerámica doméstica)

- Productos refractarios
- Cerámica sanitaria
- Cerámica técnica
- Tuberías de gres vitrificado
- Agregados de arcilla expandida
- Abrasivos aglomerados inorgánicos (EOI, 2012).

En la cocción de la cerámica se transforman los minerales constituyentes, con variables como el tiempo y la temperatura, que produce una nueva mezcla de minerales y fases vítreas en general (EOI, 2012).

Entre las propiedades características de la cerámica se tiene elevada resistencia mecánica, gran resistencia al desgaste, vida útil larga, inertes e inocuos químicamente, resistencia al calor y al fuego, una resistencia eléctrica, y a veces también una porosidad específica (EOI, 2012).

Se mencionan los tres factores críticos que, para poder alcanzar las metas tecnológicas y estéticas, se consideran: la maquinaria, adaptada a las exigencias actuales de los objetivos de producción; las materias primas, que cada vez tienen que cumplir funciones más sofisticadas por las características de los productos terminados, y los hombres, que se han tenido que desarrollar en la electrónica de proceso a causa de la difusión de la automatización (SACMI, 2004).

### **1.1.1. Procesos y técnicas aplicadas**

En general la fabricación de la cerámica puede hacerse por medio de diferentes tipos de hornos, diversidad de materias primas y formas, tamaños y colores. A pesar de todo lo anterior, en general el proceso de fabricación es bastante uniforme, y en algunos casos especiales de algunos pavimentos y

revestimientos, cerámica doméstica, sanitaria y técnica, la cocción se lleva a cabo en varias etapas (EOI, 2012).

La producción de cerámica se ha difundido además de la disponibilidad de materias primas por el proceso de fabricación considerado relativamente sencillo, se debe a la consolidación de la tecnología de máquinas fiables para hacer productos de alta calidad (SACMI, 2004).

En los años 70 u 80 la producción se llevó de bicocción tradicional a la bicocción y monococción rápida, en conjunto con la molienda en húmedo y la producción de formatos más grandes, que han requerido ajustes de importancia en los molinos, prensas y líneas de esmalte (SACMI, 2004).

Las materias primas se mezclan, moldean, prensan o extrusionan para que sea posible formarlas. El agua se usa en las mezclas para lograr un moldeado adecuado. Después el agua debe evaporarse en los secadores, las piezas cerámicas pueden ser colocadas a mano en el horno o en vagones que funcionan de forma continua. Durante la cocción se cambia la temperatura del horno, para manipular el tiempo y la temperatura a la que se exponen las piezas, con lo que se logra tratar adecuadamente los productos. Al final se deben enfriar bajo control, extrayendo el calor de las piezas y lograr la cerámica terminada. Después se empacan y almacenan, listos para distribuirlos (EOI, 2012).

## **1.1.2. Maquinaria utilizada**

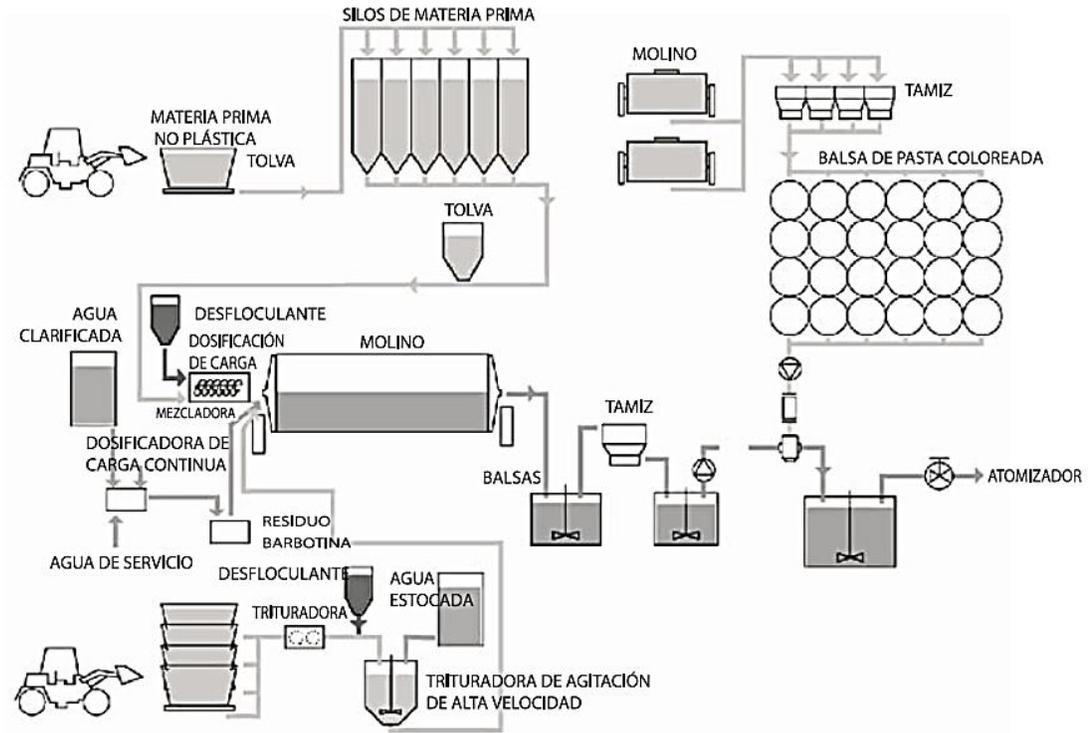
A continuación, se detalla cada área y la maquinaria que se utiliza en el proceso:

### **1.1.2.1. Molienda de arcilla continua en húmedo**

El molino continuo está hecho de un cilindro de chapa de acero, en el interior puede estar dividido en dos o tres cámaras de molienda, separadas por diafragmas intermedios, cuenta con escotillas para su inspección y tareas de mantenimiento. El interior es un revestimiento hecho de caucho especial resistente al desgaste, diseñado para maximizar el rendimiento de la molienda, para lo que usa bolas de alubit como medio de molienda (SACMI, 2004).

En estos molinos las materias primas se ingresan continuamente por un lado del molino, moliéndolo progresivamente en las cámaras y por la parte opuesta se saca la barbotina (SACMI, 2004).

Figura 1. Esquema de flujo de la sección de molienda



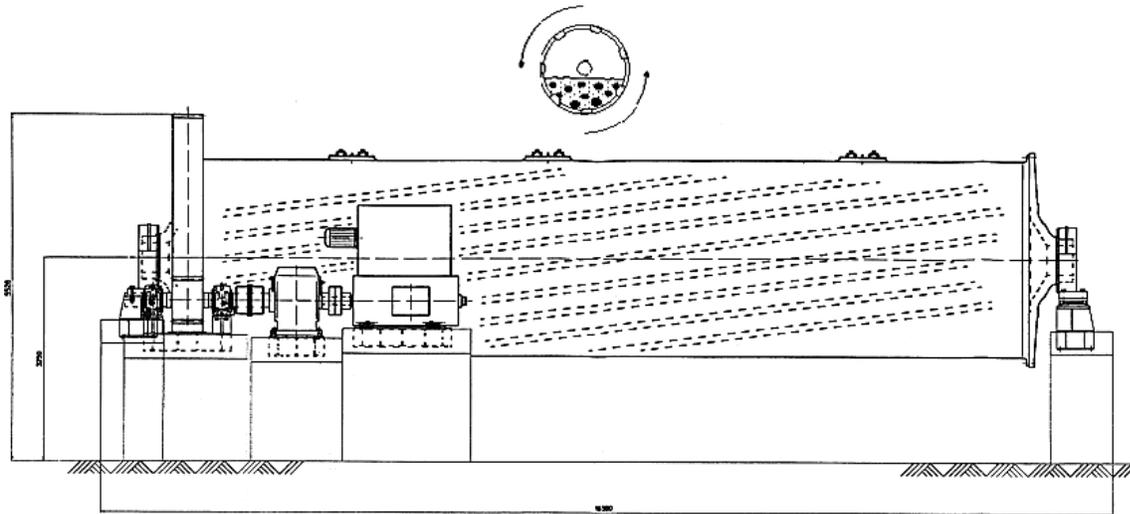
Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

Las instalaciones de la molienda empiezan con sistema de pesaje y alimentación continuo, la materia prima está contenida en un silo que regula la descarga según la demanda, la barbotina pasa por una batería de tamices, para almacenar la barbotina en cisternas con agitación para ser bombeada al atomizador (SACMI, 2004).

El principio de funcionamiento del molino continuo que se forma como un tambor cilíndrico con revestimiento helicoidal de clasificación hace uso del hecho por los medios de molienda (bolas de alubit) de mayor tamaño, por el efecto

causado por la fuerza de gravedad y de la acción centrífuga, y se mantiene en la periferia de la masa que rueda al interior del molino (SACMI, 2004).

**Figura 2. Diseño esquemático de un molino continuo con tambor cilíndrico y revestimiento de clasificación helicoidal**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

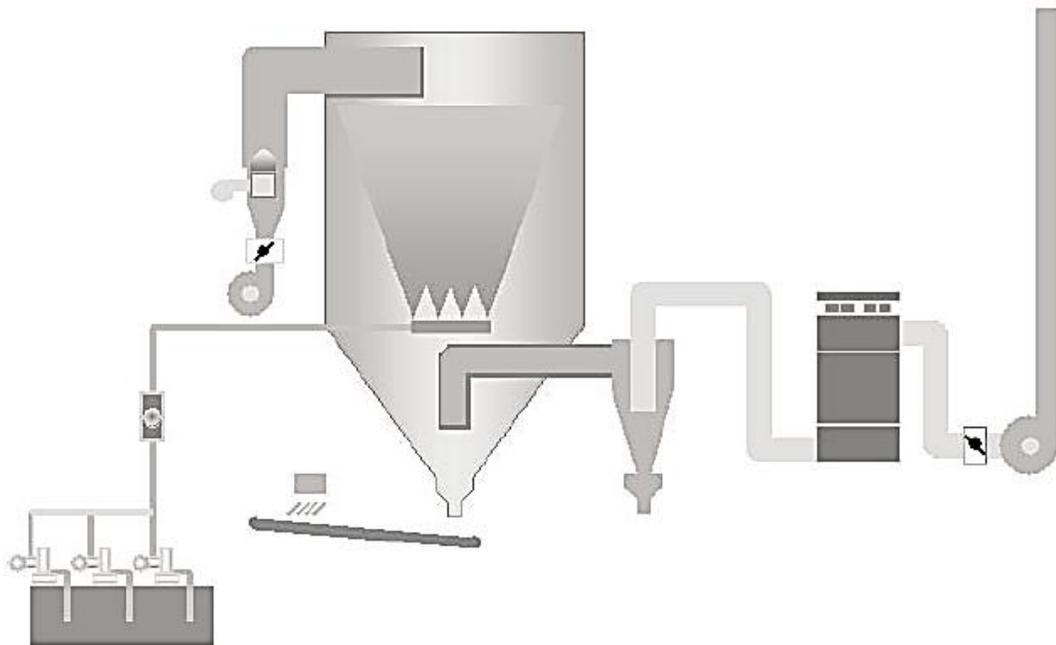
### **1.1.2.2. Atomizado de arcilla**

El proceso de secado de la barbotina en el atomizador se hace inyectando la barbotina desde abajo, por medio de bombas de alta presión (25-30 bar), con la barbotina atomizada dentro del atomizador se hace que entren en contacto con el aire caliente introducido tangencialmente desde arriba, los humos calientes se introducen en cambio desde lo alto y se distribuyen tangencialmente (SACMI, 2004).

La barbotina se seca de manera continua, por lo que se obtiene un producto controlado en humedad, forma y granulometría, que será usado en el

prensado. En los atomizadores de calor indirecto, como es este caso, el calor se transmite por conducción a la barbotina a secar (SACMI, 2004).

Figura 3. **Esquema general de la planta de atomización**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

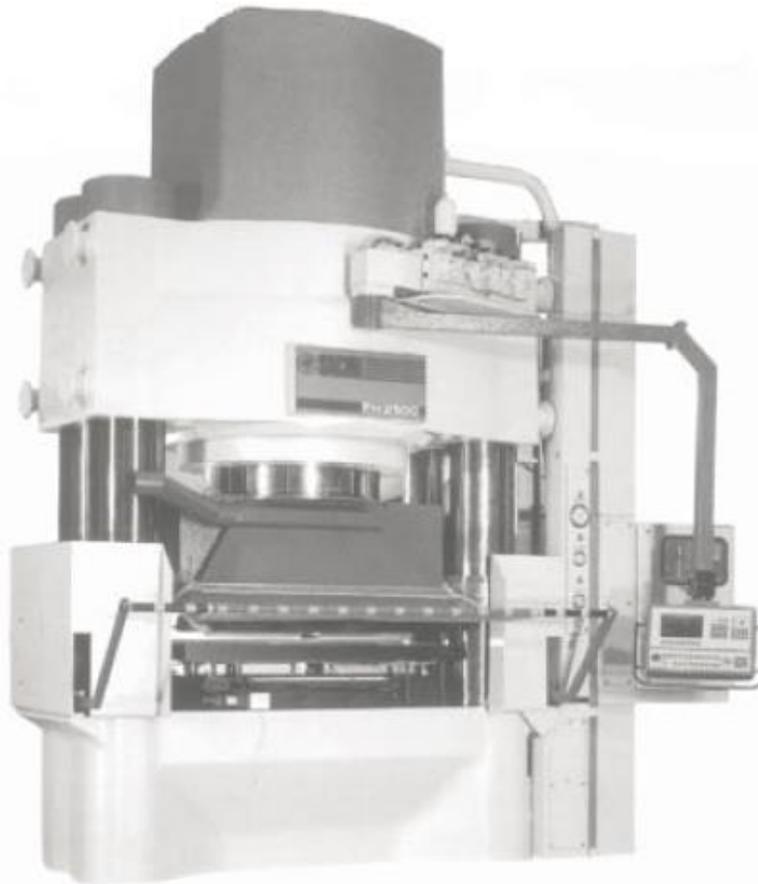
En las instalaciones para la preparación de la arcilla atomizada que se produce por medio de la atomización y el secado de la barbotina con aire caliente, en un proceso continuo, se obtiene la arcilla con parámetros controlados para la fabricación de piezas cerámicas (SACMI, 2004).

En la industria cerámica se ha afirmado que, entre los diferentes tipos de atomizadores, el de corrientes mixtas, como es este caso, hace que el tiempo de permanencia de las partículas dentro de la cámara de secado sea más largo (SACMI, 2004).

### 1.1.2.3. Prensado

El proceso de prensado es donde se forman las piezas por medio de la compactación de la arcilla atomizada semiseca. En este proceso se realizan tres operaciones: conformación de la pieza, compactación de la arcilla y densificación de la arcilla (SACMI, 2004).

Figura 4. Prensa hidráulica de serie 2000



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

La prensa hidráulica se basa en un principio oleodinámico por un fluido bajo presión aplicada dentro de un cilindro, por el incremento de presión en una columna comunicada con un pistón de sección mucho más grande. En este último pistón se obtiene una fuerza que aumenta con respecto a la fuerza aplicada en el primer cilindro a medida que aumenta la sección del cilindro grande con respecto a la del cilindro pequeño (SACMI, 2004).

La prensa cuenta con un sistema central hidráulico que provee el aceite bajo presión, al introducirlo en el cilindro se encarga de ejercer la fuerza de compresión del acumulador y del multiplicador sobre las piezas a prensar (SACMI, 2004).

#### **1.1.2.4. Secado**

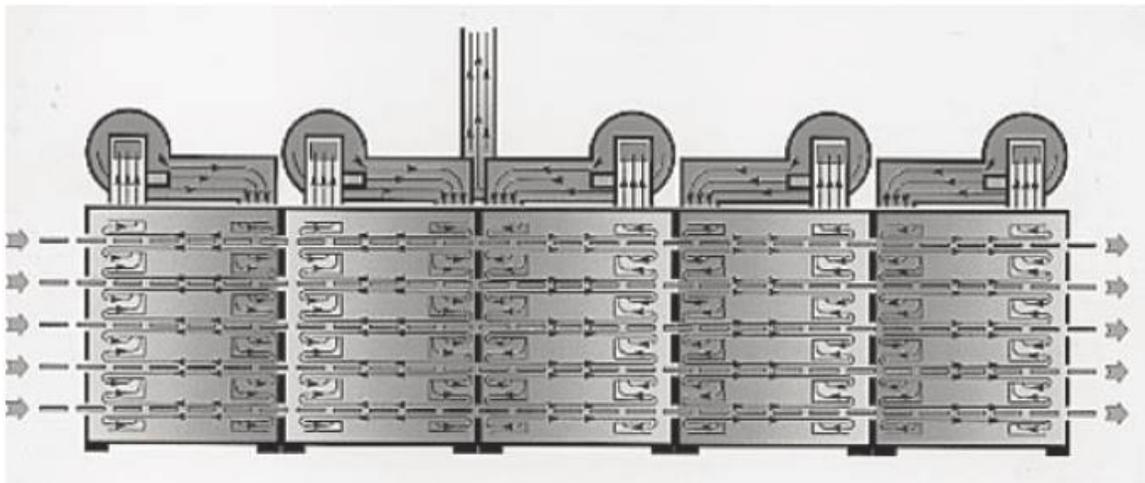
Los secaderos horizontales se componen de módulos hechos de estructuras metálicas y tuberías externas aisladas térmicamente, estas tuberías se usan para recircular aire caliente, las piezas recorren el secadero sobre rodillos a los que se les puede regular la velocidad, cada zona cuenta con sus quemadores para calentar el aire (SACMI, 2004).

El término secar significa eliminar el agua contenida en las piezas por evaporación, o sea se convierte el agua de estado líquido a vapor y es lo que se hace en los secadores usados en la industria cerámica, pueden ser verticales u horizontales, usando los mismos principios tecnológicos (SACMI, 2004).

Las piezas, al ingresar al secadero, se encuentran con una corriente de aire caliente, cada plano está delimitado por láminas para definir la cámara de secado, con lo que se regula la temperatura de cada zona del secadero, con esta estructura se logra hacer la curva de secado, después de evaporar el agua en

las piezas se regula la temperatura de salida de las piezas en la última zona. El movimiento de los rodillos que transportan las piezas es el tradicional usado en los hornos, con engranajes helicoidales en baño de aceite (SACMI, 2004).

Figura 5. **Secadero horizontal de múltiples planos**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

#### **1.1.2.5. Molienda de esmaltes**

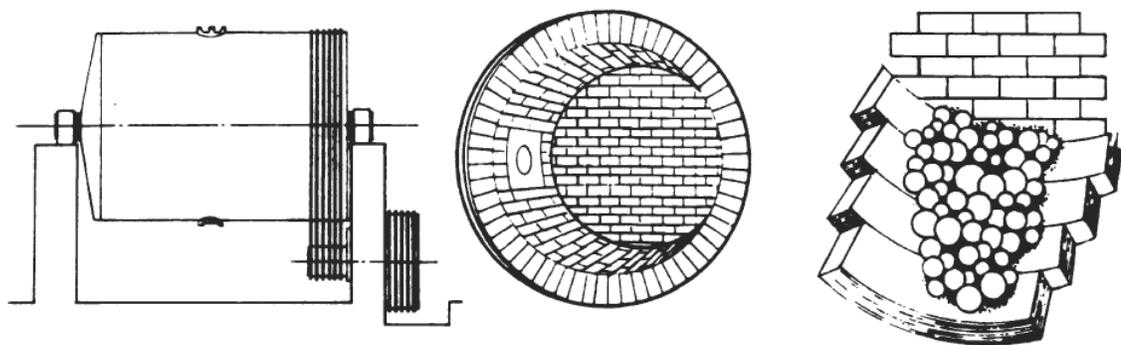
Debe posicionarse entre la bodega de materias primas y las líneas de esmalte para reducir el transporte, diseñadas para facilitar el trabajo del personal, con seguridad y precisión, para obtener productos fiables y constantes (SACMI, 2004).

Para preparar los esmaltes se utilizan molinos Alsing de diferente capacidad, los más comunes son de 5,000 l, hay desde 300 l, usados para pruebas de flameado, hasta los de 12,000 l, que son los más grandes. Contienen bolas de alúmina sinterizada como medio de molienda y el revestimiento es

generalmente de alúmina sinterizada con una vida útil de unas 20,000 horas. Para evitar contaminación la tapadera del molino es de acero inoxidable (SACMI, 2004).

Al terminar la molienda, se debe abrir el molino con precaución por la temperatura a causa de la fricción entre los medios de molienda y el esmalte, por lo que antes de liberar la tapadera se debe purgar la presión, al terminar de descargar se procede al lavado del molino (SACMI, 2004).

Figura 6. **Diseño de un molino Alsing y detalle del revestimiento interior**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

#### **1.1.2.6. Líneas de esmalte**

Las líneas de esmalte se instalan entre la salida del secadero usado en el área de prensas y las máquinas de carga de los hornos o el almacenamiento entre estos. A lo largo de la línea de esmalte se instalan las aplicaciones de los esmaltes y la decoración de las piezas separadas con cierta distancia entre ellas (SACMI, 2004).

En esta área se requiere cuidados en el piso que debe estar inclinado y ser antideslizante, con suficiente iluminación, instalaciones eléctricas, aire comprimido, red de agua y aspiración de humos (SACMI, 2004).

Figura 7. **Aplicación de esmalte con campana**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

#### **1.1.2.7. Cocción**

Actualmente los hornos cuentan con mayores secciones y se han mejorado los sistemas de combustión, que ayudan a mantener la temperatura constante y uniforme, se usan quemadores con capacidad de distribuir el calor de manera fluctuante para regular la potencia, para lograr una mejor distribución

del calor en las piezas, especialmente en las zonas críticas de la curva de cocción (SACMI, 2004).

En la cocción se transforman las materias primas en producto terminado con sus propiedades concretas, insolubilidad, solidez, resistencia mecánica, porosidad, resistencia química y otras. Se fusiona el revestimiento vítreo, por lo que en este proceso por medio del calentamiento se desarrollan las transformaciones químicas y físicas que llevan las piezas a las propiedades del producto cerámico terminado (SACMI, 2004).

El ciclo térmico de cocción se conforma de los valores de temperatura y los tiempos que se regulan. Al menos tiene tres fases: aumento de la temperatura desde el ambiente, tiempo de permanencia de las piezas a la máxima temperatura y reducción de la temperatura en intervalos hasta la temperatura ambiente (SACMI, 2004).

**Figura 8. Horno monoestrato**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

La composición de los módulos horizontalmente y de los hornos puede ser variada según los requisitos de la producción, cuentan con secciones como prehorno, precalentamiento, cocción, enfriamiento rápido, enfriamiento lento y enfriamiento final. Verticalmente la cámara de reduce al máximo para acelerar el intercambio térmico hacia las piezas, se usan ventiladores para diferentes funciones, como aspiración de humos, soplado de aire de combustión, soplado de aire de enfriamiento rápido, aspiración de los intercambiadores de calor en el enfriamiento lento, aspiración de aire caliente del enfriamiento final y soplado de aire frío en el enfriamiento final (SACMI, 2004).

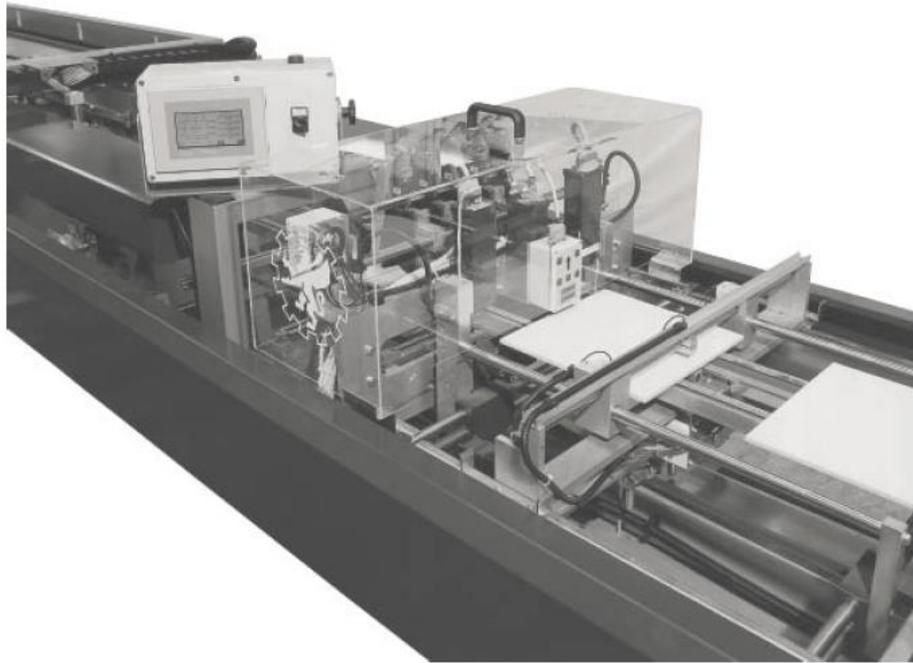
#### **1.1.2.8. Clasificación y empaque**

En esta área ya no se puede influenciar de modo alguno las características de las piezas, solo se comprueba y clasifican según los parámetros establecidos, se hace la subdivisión del producto para que sea empacado (SACMI, 2004).

Por medio de un análisis visual y de control dimensional y geométrico, se determinan los defectos, tonalidad, clases dimensionales, para agrupar las piezas con las mismas clasificaciones homogéneas en paquetes y tarimas del mismo tono, clase y calibre (SACMI, 2004).

En el caso de las piezas cerámicas se necesitan cámaras de alta resolución para obtener las imágenes de calidad para permitir la detección de defectos, por lo que se decide qué clase de calidad asignarle a cada pieza, después se comunica al empaquetado qué marca lleva cada pieza o paquete, para formar tarimas de las mismas características (SACMI, 2004).

Figura 9. **Dispositivo de control del calibre y de la planaridad**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

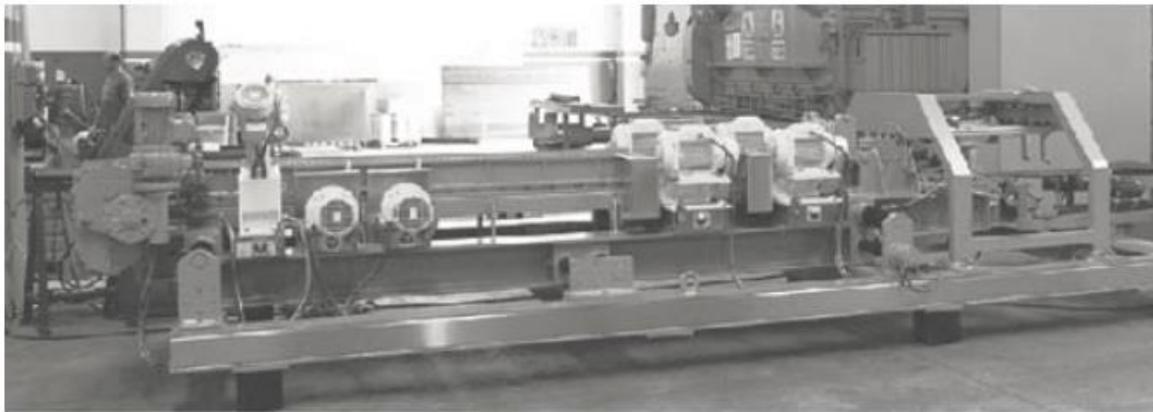
### **1.1.2.9. Rectificado**

Las piezas cerámicas se tratan cada vez más al final del proceso de producción tradicional con tareas de corte y rectificado, con lo que se aumenta su valor (SACMI, 2004).

El proceso de rectificado se hace por medio de máquinas rectificadoras dotadas de mandriles que reducen el tamaño de las piezas a un único calibre, esto se hace en piezas ya inspeccionadas y clasificadas en función de la planaridad y rectilinearidad de los bordes (SACMI, 2004).

La máquina rectificadora se compone de varias estaciones en serie con cabezales rotatorios que desgastan progresivamente las piezas, por medio de muelas de material abrasivo (SACMI, 2004).

Figura 10. **Máquina rectificadora**



Fuente: SACMI. (2004). *Tecnología cerámica aplicada. Vol. 2.*

### **1.1.3. Samboro, S.A.**

La empresa Samboro, S.A. está posicionada en el mercado regional comercializando sus productos cerámicos, pisos, azulejos y fachaletas. La diferenciación se logra por medio del uso de tecnología digital en la elaboración de los diferentes diseños y formatos, con lo que se logra la calidad del mercado europeo (Samboro, 2019).

Samboro, S.A. se ha caracterizado por invertir constantemente en tecnología, se ha podido hacer por la confianza de los socios en la empresa, lo que ha hecho que los clientes tengan la seguridad para encargarle sus proyectos (Samboro, 2019).

### **1.1.3.1. Historia**

La empresa Samboro, S.A. empezó en 1989 con la intención de fabricar teja, esto no se pudo hacer, por lo que se cambió a fabricar pisos, azulejos y fachaletas cerámicas, convirtiéndose en un proveedor importante del sector (Samboro, 2019).

El inicio de la empresa fue difícil por la falta de experiencia, deudas y maquinaria obsoleta, por lo que obligadamente se hicieron cambios estratégicos para encaminar el negocio en una nueva dirección, implementado automatización y robotización en la maquinaria (Ayau, 2017).

Conforme ha pasado el tiempo ha implementado cursos de instalación de cerámica, para asegurar la duración de los productos, con estas capacitaciones los instaladores han logrado pasar de instalar 7 metros cuadrados a 20 metros cuadrados cada día, el curso se hizo junto con la Cámara de la Construcción y el Instituto Técnico de Capacitación Profesional, la empresa junto con sus aliados ha creado el Día del Instalador, que se celebra cada año con reuniones, concursos y premios para incentivar a los instaladores (Morales, 2018).

### **1.1.3.2. Ubicación**

La fábrica de Samboro, S.A. se encuentra ubicada en el municipio de Villa Nueva del departamento de Guatemala (Samboro, 2019), desde donde se distribuye a las tiendas propias, clientes y distribuidores.

### **1.1.3.3. Mercado**

En 1997 se hizo una renovación de la fábrica, con lo que se empezó a exportar a Chile, Perú, Colombia, Venezuela, Panamá, Centroamérica, Belice, México, República Dominicana, Puerto Rico, Estados Unidos, Martinica y Sudamérica (Saboro, 2019).

La distribución de los productos se hace por diferentes canales, como distribuidores y constructores, y también se cuenta con tiendas propias en diferentes ubicaciones con 300 puntos de venta en el interior del país y más de 150 en la ciudad capital (Ayau, 2017).

“Hay mucha lealtad, nuestra marca está *top of mind* porque hemos hecho mucha publicidad en ese sentido, pero la mejor publicidad es el soporte y el servicio que brindamos, entonces, no hay mejor publicidad que un cliente contento” (Ayau, 2017).

## **1.2. Mantenimiento**

Se define al mantenimiento como el conjunto de actividades mediante las cuales los equipos o sistemas se mantienen o se reestablecen a un estado en el que pueden realizar las funciones productivas (Duffuaa, Raouf y Dixon, 2012).

El mantenimiento tiene como objetivo asegurar la competitividad de la empresa, por lo que es fundamental maximizar la confiabilidad de los equipos, reduciendo las fallas que provocan paros no programados, así se puede cumplir con los requerimientos de operación (Altmann, 2010).

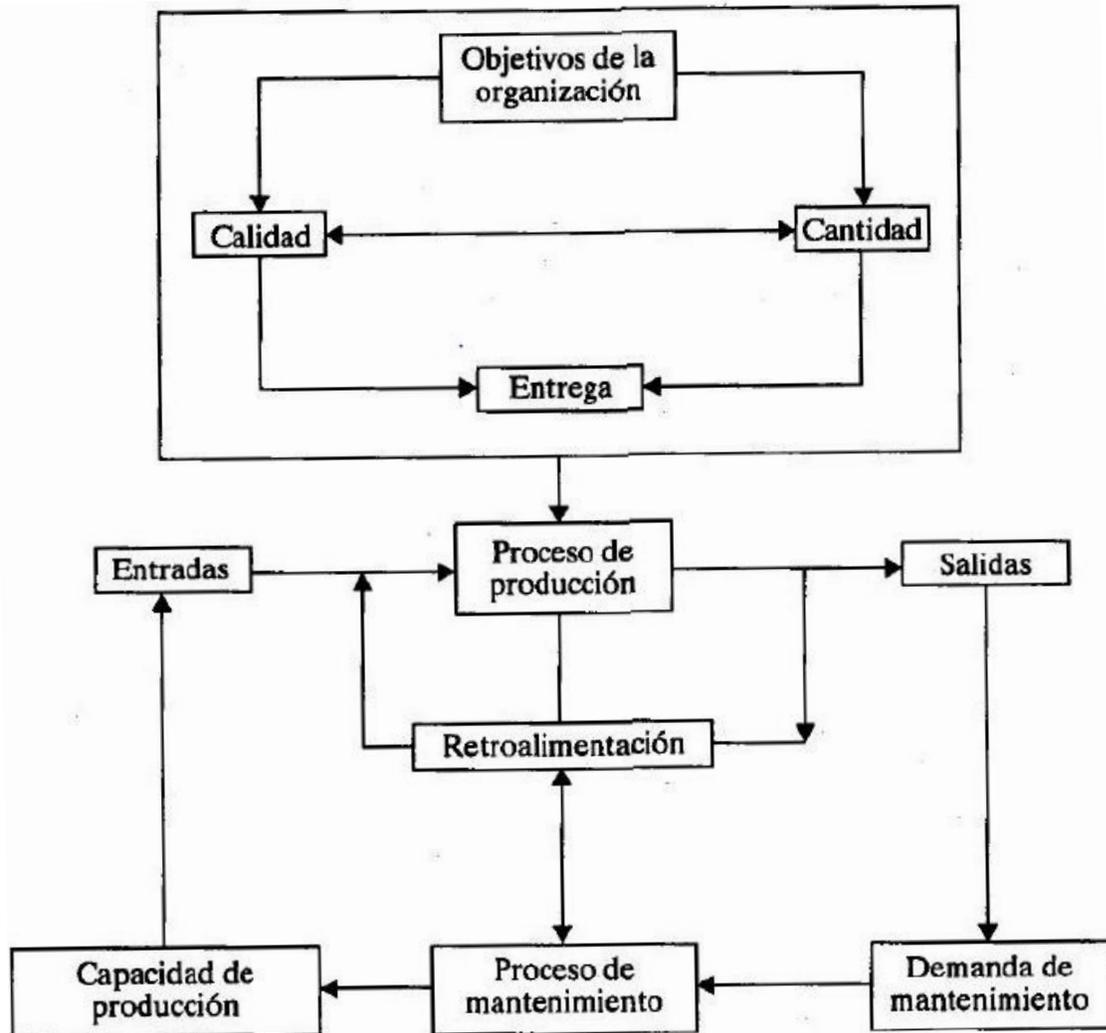
Como sistema se entiende la agrupación de los componentes que realizan un trabajo de forma combinada con la misma finalidad o el mismo objetivo, por lo que el mantenimiento es considerado como un sistema que conjuga las actividades que se realizan con producción. En la siguiente figura se muestran las relaciones dentro de una organización con sus objetivos, incluyendo los procesos de producción y mantenimiento (Duffuaa *et al.*, 2012).

En un sistema de producción se convierten las materias primas que entran a través de mano de obra y los procesos productivos en productos terminados para satisfacer las necesidades de los clientes, esta es su salida principal: los productos terminados, pero también se crea la demanda de mantenimiento debido a estas actividades, que es una salida secundaria del proceso productivo (Duffuaa *et al.*, 2012).

En el sistema de mantenimiento esa demanda de servicio que proviene del proceso productivo es la entrada, por medio del conocimiento, experiencia, mano de obra y repuestos, logra como salida de su proceso equipos reparados en buenas condiciones con la capacidad de producción requerida (Duffuaa *et al.*, 2012).

El objetivo y la razón de ser de un proceso de producción es la generación de utilidades y, como un objetivo secundario, incluye los aspectos económicos y técnicos del proceso productivo, el sistema de mantenimiento influye en esos objetivos, reduciendo el tiempo de paro durante la producción, ayuda a mejorar y a mantener la buena calidad de los productos, aumenta la productividad y las entregas a tiempo a los clientes, se deben estudiar más los sistemas de mantenimiento como se ha hecho con los de producción (Duffuaa *et al.*, 2012).

Figura 11. Relaciones en una organización con sus objetivos y los procesos de producción y mantenimiento



Fuente: Duffuaa, S.; Raouf, A. y Dixon, J. (2012). *Sistemas de mantenimiento*.

### 1.2.1. Fallas de mantenimiento

Es importante entender cómo se presentan las fallas porque representan riesgos potenciales, ayuda a entender cómo fallan los equipos y se pueden

mejorar las tareas de mantenimiento correctivas o preventivas. Se hace por medio del análisis de modo de falla, a cada uno le corresponde una tarea, el modo de falla se puede entender como la forma en que un equipo falla (Aguilar, Torres y Magaña, 2010).

La falla puede ser en dos estados diferentes, en un caso el equipo deja de funcionar y en el otro el equipo funciona, pero no cumple las necesidades de la operación respecto al estándar de desempeño deseado, esta es la falla funcional (Aguilar *et al.*, 2010).

Las empresas certificadas ISO 14001 consideran la eficiencia energética desde la perspectiva medioambiental, se considera como una falla el incremento del consumo energético y el bajo rendimiento, la eficiencia energética se debe tomar en cuenta ya que afecta la rentabilidad de las empresas (Altmann, 2010). Como otros modos de falla, la baja eficiencia energética puede ser a causa de:

- Desgaste y deterioro.
- Errores humanos en la ejecución de las tareas de mantenimiento, y en la operación del equipo.
- Problemas de diseño (Altmann, 2010).

La eficiencia energética depende de:

- Diseño del equipo
- Cómo se opera el equipo
- Cómo se mantiene el equipo (Altmann, 2010).

### 1.2.1.1. Tipos de fallas

Por el origen las fallas se pueden clasificar en:

- Fallas por mal diseño del equipo: los encargados de diseñar las máquinas no toman en cuenta algunas condiciones en las que podrán trabajar los equipos, por lo que se debe modificar el diseño (Valbor Soluciones, 2019).
- Fallas por mal uso: representan cerca del 39 % del total de fallas en un equipo, por usarlo para funciones fuera del diseño o parámetros que se establecieron para su buen uso (Valbor Soluciones, 2019).
- Fallas por desgaste del equipo: de los más conocidos, se puede mencionar desgaste, fatiga, corrosión, cavitación, representan un 11 % del total de fallas (Valbor Soluciones, 2019).

Se pueden clasificar también por el tiempo en que aparecen:

- Fallas tempranas: se presentan al inicio del ciclo de vida de los equipos, al empezar la operación de equipos nuevos, al poco tiempo desaparecen, también por ajustes hechos por mantenimiento y producción (Valbor Soluciones, 2019).
- Fallas adultas: se manifiestan a medio ciclo del tiempo de vida de los equipos, causadas por factores externos como mala operación, accidentes, mala calidad de mantenimiento (Valbor Soluciones, 2019).
- Fallas tardías: en el final del tiempo de vida de los equipos por el desgaste normal de los componentes debido al uso, se debe tomar la decisión de

reemplazar estos equipos o hacer *overhaul*, lo que sea más rentable (Valbor Soluciones, 2019).

## **1.2.2. Filosofías de mantenimiento**

La filosofía de mantenimiento de una empresa es la optimización de la producción y disponibilidad, sin descuidar la seguridad, con el mínimo de personal posible, para lograrlo, según Duffuaa *et al.*, (2012), se deben aplicar las siguientes filosofías:

### **1.2.2.1. Mantenimiento correctivo**

Este tipo de mantenimiento solo se realiza cuando se afecta la operación y cuando no se justifica el costo de otro tipo de mantenimiento (Duffuaa *et al.*, 2012).

Cuando se presenta un paro no programado y que afecta la operación de la empresa genera costos e improductividad, si solo se hace este tipo de mantenimiento puede representar que el mantenimiento preventivo, si se hace, no sea efectivo, pero también se puede aprovechar para ajustar el plan de mantenimiento preventivo (Valbor Soluciones, 2019).

### **1.2.2.2. Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo es el que se hace con la frecuencia establecida dependiendo de la variable con que se controla, se hace siguiendo recomendaciones de los fabricantes y por medio de los estándares para cada tipo de máquina, se hace de forma programada y presupuestada (Valbor Soluciones, 2019).

- Mantenimiento preventivo basado en el tiempo o uso: es el mantenimiento planeado que se hace para evitar fallas potenciales (Duffuaa *et al.*, 2012).
- Mantenimiento preventivo basado en la condición: conocido como mantenimiento predictivo, se hace manteniendo bajo control las variables que representan la condición de los equipos (Duffuaa *et al.*, 2012).

#### **1.2.2.3. Mantenimiento de oportunidad**

Este tipo de mantenimiento se hace cuando se presenta algún paro general y se pueden hacer tareas de mantenimiento (Duffuaa *et al.*, 2012).

Se puede aprovechar algún paro de producción para realizar tareas de mantenimiento sin ocasionar más paros, o bien paros en otras áreas que preceden el proceso para poder trabajar en estos espacios.

#### **1.2.2.4. Detección de fallas**

Este mantenimiento se relaciona con el mantenimiento predictivo y se hace para comprobar la presencia de fallas (Duffuaa *et al.*, 2012).

#### **1.2.2.5. Modificación del diseño**

Estas acciones pueden ser a causa de un cambio en los requerimientos de producción o una mejora al equipo, se realizan para llegar a una condición requerida (Duffuaa *et al.*, 2012).

#### **1.2.2.6. Reparación general**

También conocida como *overhaul* como una alternativa al reemplazo de equipos, cuando es más rentable, se trata de una intervención completa para reestablecer los equipos a condiciones aceptables (Duffuaa *et al.*, 2012).

#### **1.2.2.7. Reemplazo**

Es cuando en vez de hacer reparaciones se cambia a otro equipo (Duffuaa *et al.*, 2012).

### **1.2.3. Plan de mantenimiento**

Los equipos se pueden descomponer en los sistemas formados por componentes que están determinados a cumplir alguna función, estos sistemas comúnmente pueden ser: sistema de seguridad, sistema de lubricación, sistema eléctrico, sistema mecánico, sistema neumático, sistema hidráulico y sistema de control (García, 2010).

Para realizar el plan de mantenimiento se debe contar con el listado de equipos, codificar los equipos para identificarlos y determinar qué tipo de mantenimiento queda mejor para cada equipo, con la finalidad de mantener el nivel de disponibilidad exigido en la planta (García, 2010).

Las fases por las que se debe pasar para realizar un plan de mantenimiento al menos son: determinación de las áreas de la planta, levantamiento de listas de equipos, determinación de los sistemas y componentes de cada equipo, codificación de cada elemento a mantener y

asignar modelo de mantenimiento. Al terminar esto se puede hacer la lista de tareas que formará el plan de mantenimiento (García, 2010).

#### **1.2.3.1. Tareas del plan de mantenimiento**

El conjunto de las tareas de mantenimiento programado forma el plan de mantenimiento, se mantiene cambiando por ajustes con base en los indicadores de desempeño y análisis de lo que se va a presentar en la planta (García, 2010).

Para determinar las tareas que debe contener un plan de mantenimiento se deben seguir los siguientes pasos: análisis de la función, para conocer cómo se debe realizar la función satisfactoriamente; relacionar cada falla con las posibles causas; clasificar y jerarquizar las causas, se analizan con el fin de evitar que se presenten, y listar las tareas a partir de las fallas junto con sus especificaciones (Rey, 2014).

#### **1.2.4. Mantenimiento predictivo**

Este tipo de mantenimiento tiene como objetivo hacer las tareas de mantenimiento en el momento exacto en que interfieren con la confiabilidad de todo el sistema, el nivel óptimo para la realización del mantenimiento es cuando se alcanza un valor no deseado de la probabilidad que se presente la falla (Tavares, 2000).

Ese nivel de los valores se conoce como punto predictivo, puede determinarse de dos formas: por medio de análisis estadísticos y también por análisis de síntomas. Como resultado se tienen índices reales para prevenir las fallas. Involucra aspectos económicos y técnicos, ya que las máquinas no se intervienen mientras estén en condiciones funcionales (Tavares, 2000).

El mantenimiento predictivo se toma como parte o se incluye en el mantenimiento preventivo como una herramienta muy importante, se hace el seguimiento de cada una de las variables involucradas en la función de los equipos con el objetivo de predecir las fallas que pueden ocurrir y oportunamente intervenir el equipo (Olarte, Botero y Cañón, 2010).

Este mantenimiento hace uso de técnicas no invasivas que realiza las pruebas o mediciones con el equipo trabajando, por lo que no genera paros normalmente ni requiere desmontar piezas. Da la oportunidad de intervenir antes de que se produzca algún paro inesperado, por lo que se puede programar el mantenimiento y se pueden preparar los recursos necesarios, con lo que se minimiza el tiempo de paro (García, 2012).

Toda la recolección de datos y el análisis que se ha hecho no sirve de nada si después de encontrar algún valor que supere el límite para intervenir el equipo no se utiliza este, queda sin utilidad todo el trabajo anterior, ya que no se anticipa a que se presente la falla (García, 2012).

En el mantenimiento predictivo se utilizan ensayos no destructivos con el fin de monitorear el funcionamiento de los equipos, logrando detectar avisos indicadores del funcionamiento incorrecto de las partes. Cuando se detectan las fallas se puede anticipar al paro, e intervenir los equipos oportunamente programando las tareas de mantenimiento, evitando paros innecesarios a producción y alargando la vida útil de los equipos (Olarte, Botero y Cañón, 2010).

Tabla I. **Técnicas predictivas**

<b>Técnica</b>	<b>Variable</b>	<b>Instrumento</b>
VOSO	Ruido, temperatura, aspecto	Sentidos del ser humano
Análisis de vibraciones	Vibraciones en maquinaria rotativa	Analizador de vibraciones
Termografía	Temperatura superficial	Cámara termográfica
Inspecciones boroscópicas	Inspecciones visuales en sitios no accesibles. Imágenes por medio de un boroscopio	Boroscopio
Análisis de aceite	Composición del aceite relacionada con el desgaste de la máquina	Análisis físico-químico del lubricante
Análisis de ultrasonido	Ruido a ciertas frecuencias	Analizador de ultrasonidos

Fuente: García, S. (2012). *Organización y gestión de mantenimiento*.

#### **1.2.4.1. Ensayos no destructivos**

Los ensayos no destructivos más utilizados son:

- Análisis de vibraciones: estudia el comportamiento de máquinas rotativas por medio de las vibraciones que generan y cómo se comportan en el tiempo.
- Termografía: por medio del estudio de la temperatura de los equipos se determina el estado de funcionamiento.

- Análisis por ultrasonido: capta las ondas de alta frecuencia que generan los equipos durante su funcionamiento cuando presentan algún problema según el rango establecido.
- Análisis de aceite: por medio del estudio de las propiedades de los aceites se determina su estado física y químicamente (Olarte, Botero y Cañón, 2010).

El mantenimiento predictivo debe usarse cuando se requiera detectar las fallas o problemas en los equipos rápidamente y con eficacia, debido a que se observa la tendencia de las fallas se pueden programar las tareas de mantenimiento para reducir el impacto a producción por las interrupciones no planeadas, las tareas de análisis se hacen durante la operación de los equipos y, si se compara con el mantenimiento preventivo, el costo es menor respecto a las tareas de reparación y el tiempo de paro durante la producción, por lo que se puede estimar como una inversión evitando las pérdidas cuando se detienen las máquinas por fallas (Olarte, Botero y Cañón, 2010).

### **1.3. Compresores de aire**

El aire comprimido es aire presurizado, por lo que las moléculas que lo componen están más cerca entre sí. Cuando se comprime el aire se hace que el volumen se contenga en un espacio más pequeño. Al liberar el aire comprimido la presión se iguala con la atmosférica, expandiendo las moléculas. La energía que se genera en la expansión del aire es igual a la energía usada para comprimirlo, por lo que se puede decir que comprimir el aire es como almacenar la energía para usarla después (Atlas Copco, 2018).

Los compresores de aire se utilizan en diversas industrias, parte importante de los consumos totales de energía de las plantas industriales es la energía que consumen los compresores, se han hecho experimentos sobre el impacto del preenfriamiento del aire de admisión respecto al consumo energético, el resultado en la disminución del consumo de energía es de 0.65 % por cada 1°C que baja la temperatura del aire en la admisión, el consumo disminuye 0.243% por cada 1% que disminuye la humedad relativa en el mismo aire, por lo que se puede reducir el consumo energético de los compresores pretatando o preenfriando el aire de admisión (Guo, Ma, Zhang y Liu, 2017).

### **1.3.1. Aplicaciones del aire comprimido**

Los compresores de tornillo se utilizan en diversas industrias desde la maquinaria, la metalurgia y la energía eléctrica hasta industrias químicas y de transporte. La conservación de energía es la mejora de la estructura usada en los compresores, modular la velocidad del motor, recuperar el calor de la descarga al ambiente, restricción del flujo en las tuberías y prevenir las fugas en el sistema de aire comprimido (Guo *et al.*, 2017).

El aire comprimido se usa de dos formas en la industria, una es como una forma de energía y la otra como parte de los procesos, por eso estos dos tipos de uso, respectivamente, se conocen como aire de energía y aire activo (Atlas Copco, 2019).

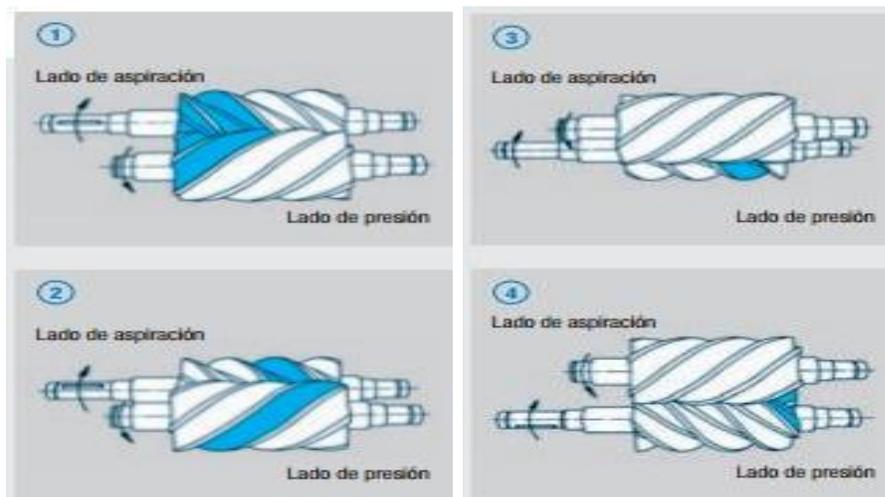
El aire de energía se usa para almacenar y transmitir energía para hacer trabajo mecánico, o sea lo consumen los equipos neumáticos dedicados a la producción, máquinas y herramientas neumáticas, para limpieza de piezas usando la presión del aire, el transporte o la refrigeración de equipos que lo necesiten a causa de los procesos productivos (Atlas Copco, 2019).

En cambio, el aire activo se usa como parte del proceso de producción, como un insumo o materia prima, porque entra en contacto directamente con los productos, por lo que en este aire la calidad es muy importante. Aire limpio y seco se puede generar y mejorar haciendo uso de compresores libres de aceite, y haciendo un tratamiento del aire con el equipo ahora disponible (Atlas Copco, 2019).

### 1.3.2. Funcionamiento de compresores de aire

Los compresores de tornillo son máquinas que comprimen el aire, por el movimiento de 2 tornillos, uno hembra y otro macho, el motor transmite energía mecánica, que hace girar los tornillos, haciendo succión por la admisión de aire, el aire aumenta la presión al avanzar por las cavidades (Kaeser México, 2017).

Figura 12. Fases de compresión de aire



Fuente: Mundo Compresor. (2019). *Diferentes tipos de compresores*.

- El aire es succionado en el compresor por dos tornillos de bloqueo.

- El aire es enviado al tanque de almacenamiento.
- Se llena el interior del compresor creado por lóbulos (macho) y alvéolos (hembra).
- Una vez almacenado genera calor.
- Se genera energía de flujo para aumentar la presión de fluidos como gases y vapores.
- Finalmente, el aire o fluido aumenta su presión, densidad y temperatura de una forma considerable (Kaeser México, 2017).

El aire se mueve en forma lineal, desde el lado de admisión hasta el lado de la descarga del aire a mayor presión por la tobera de salida (Mundo Compresor, 2019).

### **1.3.3. Mantenimiento del compresor**

Para asegurar la disponibilidad del aire comprimido y controlar los costos de operación, el sistema de aire comprimido debe tener fiabilidad y eficiencia. Por eso la importancia de usar equipo de calidad, así como de mantener los compresores por medio de una rutina efectiva. Si el aire comprimido es crítico para la operación, se debe cuidar el sistema completo (Atlas Copco, 2018).

Es más rentable hacer el mantenimiento durante la vida útil de los compresores que tratar de ahorrar esos costos, cuando se presentan las fallas se incrementa el consumo eléctrico, se interrumpe la producción y otros problemas por esta causa, además que se tienen que reemplazar los compresores (Atlas Copco, 2018).

La filosofía del mantenimiento predictivo se basa en la condición del equipo. Se determina por medio mediciones de vibración y ruido, tendencia de

temperatura, análisis de aceite y otros. La idea es poder determinar el momento en que se debe intervenir el equipo para que no se presenten las fallas (Toapanta, 2009).

El mantenimiento predictivo por medición de vibraciones tiene ventajas sobre otros métodos de mantenimiento, como la reducción de costos y el incremento de la fiabilidad de los equipos, por medio del monitoreo de la maquinaria, en especial las críticas por su importancia respecto al proceso de producción (Mosquera, Piedra y Armas, 2001).

La eficacia del mantenimiento predictivo se basa en los objetivos:

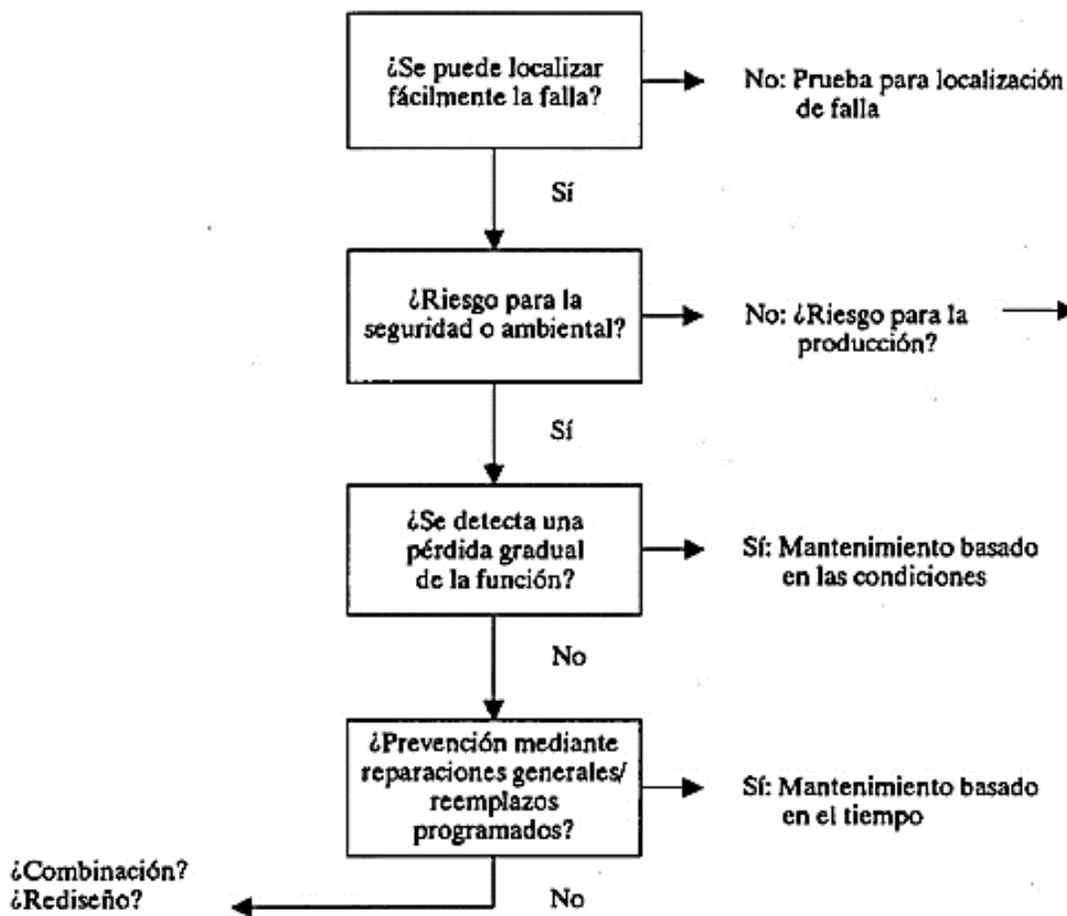
1. No impedir o limitar el funcionamiento de la máquina durante su ejecución.
2. Su costo de implantación debe ser menor que el ocasionado por otro tipo de mantenimiento.
3. Debe permitir la detección de la avería en fase incipiente antes de convertirse en catastrófica, así como la identificación o diagnóstico de la causa que la origina. (Mosquera *et al.*, 2001, pp. 4-5.)

Los indicadores de la condición del equipo o su estado de salud mediante la medición de vibraciones son análisis y control de estos datos, así como los aportes técnicos del personal capacitado (Mosquera *et al.* 2001).

El mantenimiento centrado en la confiabilidad elimina las tareas que no afectan la frecuencia de las fallas asegurando que se realicen solo las tareas correctas de mantenimiento. Los estudios del MCC del sistema son una lista de tareas de mantenimiento, programas y responsabilidades, por lo que se aumenta la disponibilidad, confiabilidad y eficiencia de los equipos (Duffuaa *et al.*, 2012).

Se debe definir claramente lo que se espera de cada activo, así se alinean los objetivos del mantenimiento según la confiabilidad y disponibilidad que se requieren de los activos, para determinar las estrategias que se deben aplicar en mantenimiento (Altmann, 2010).

Figura 13. Diagrama de árbol lógico simplificado para el MCC



Fuente: Duffuaa, S.; Raouf, A. y Dixon, J. (2012). *Sistemas de mantenimiento*.

#### **1.3.4. Operación recomendada de los compresores de aire**

La confiabilidad operacional muestra que no solo el departamento de mantenimiento es responsable por la confiabilidad general de los equipos, todos los involucrados son responsables como un sistema. La operación adecuada es fundamental para la eficiencia energética, se debe evitar la mala operación y la sobrecarga de la maquinaria, pues perjudican la confiabilidad y rendimiento energético. La eficiencia energética de un equipo se puede aumentar por medio de rediseños en el equipo, para superar la eficiencia del diseño (Altmann, 2010).

#### **1.3.5. Tipos de compresores de aire**

Existen diferentes tipos de compresores de aire y tienen diferentes aplicaciones. Esta tecnología se mantiene evolucionando, los fabricantes investigan durante muchos años en nuevos diseños adaptados a la demanda de los usuarios. Se usan en diversas industrias, por lo que tienen variedad de capacidades, se encuentran muchas alternativas y los fabricantes se adaptan a los usos requeridos (Mundo Compresor, 2019).

Por su aplicación principal se podrían dividir en cuatro grupos:

- **Compresores:** se usan para incrementar la presión de un gas comprimible.
- **Ventiladores:** son máquinas que comprimen muy poco los gases, se usan para soplar.
- **Bombas de vacío:** son equipos utilizados para extraer gases de recipientes, redes de tuberías o procesos que lo requieran.
- **Compresores *booster*:** trabajan con presión positiva en la admisión de aire, normalmente trabajan con un compresor tradicional conjuntamente, para elevar la presión final.

Por su funcionamiento básico se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Compresores de desplazamiento positivo:
  - Compresor de pistón: es el que con el movimiento del pistón dentro de un cilindro comprime el aire para ser usado.
  - Compresor de tornillo: se basa en el desplazamiento del aire, el aire se comprime a medida que avanza entre los tornillos.
  - Compresor de paletas: utiliza un rotor de paletas flotante dentro de una carcasa, posicionado excéntricamente.
  - Compresor de lóbulos o émbolos rotativos: estos se usan como soplantes, compresores de baja presión.
  - Compresores *scroll*: de desplazamiento orbital, se comprime el aire al reducir el volumen por medio de dos rotores con forma de espiral, aplicación típica exenta de aceite.
  - Bombas de vacío.
  
- Compresores dinámicos:
  - Compresores centrífugos radiales: por medio de un rotor donde ingresa aire al centro, se empuja el aire hacia afuera comprimiéndolo.
  - Compresores centrífugos axiales: la diferencia con los anteriores es que el aire se mueve paralelo al eje, usan varios discos llamados rotores y estatores (Atlas Copco, 2018.)

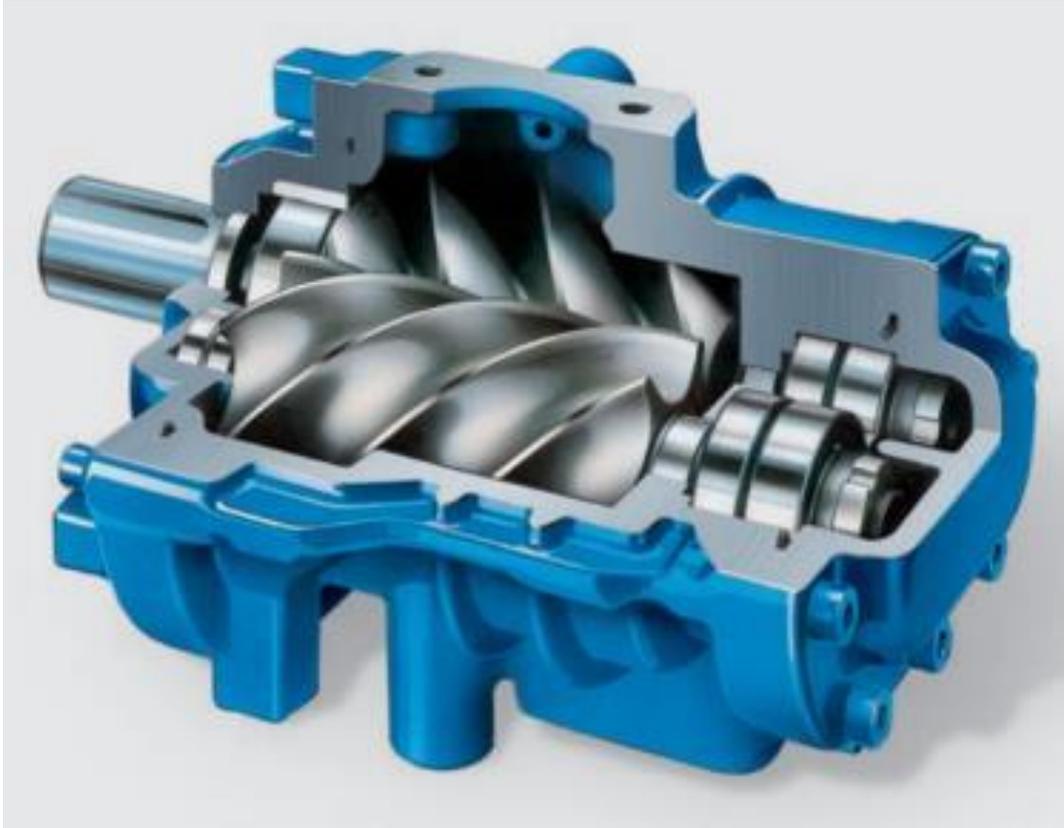
Las aplicaciones del aire comprimido son casi indefinidas, y son vitales para la productividad industrial en el mundo, se usan para accionar equipo rotativo. En equipo reciprocante se usa en labores de impacto, transporte,

atomizado, operaciones de *sand blast*, agitar y enfriar o refrigerar, operar controles. En industrias como servicio de vehículos, procesamiento de alimentos y bebidas, industria del metal, producción farmacéutica, plásticos, generación eléctrica, industria maderera y producción de electrónica (CAGI, 2012).

### **1.3.6. Compresor de tornillo**

El compresor de tornillo lubricado hace uso del aceite inyectado en los tornillos por varias razones, para lubricar, sellar y refrigerar la unidad compresora. Es el tipo de compresor más común por su uso en diferentes industrias, ya que el aceite que puede acarrear a la línea de aire comprimido no causa problemas en la gran mayoría de aplicaciones (Mundo Compresor, 2019).

Figura 14. Ilustración de unidad de tornillo



Fuente: Mundo Compresor. (2019). *Diferentes tipos de compresores*.

En el mercado existen muchos tipos de compresores de aire, como compresores de desplazamiento positivo, compresores reciprocantes y compresores centrífugos. Los compresores de tornillo son de desplazamiento positivo. El proceso se lleva a cabo en cuatro etapas: aspiración, compresión, inyección de aceite y aire de escape (Guo *et al.*, 2017).

Figura 15. **Compresor de aire**



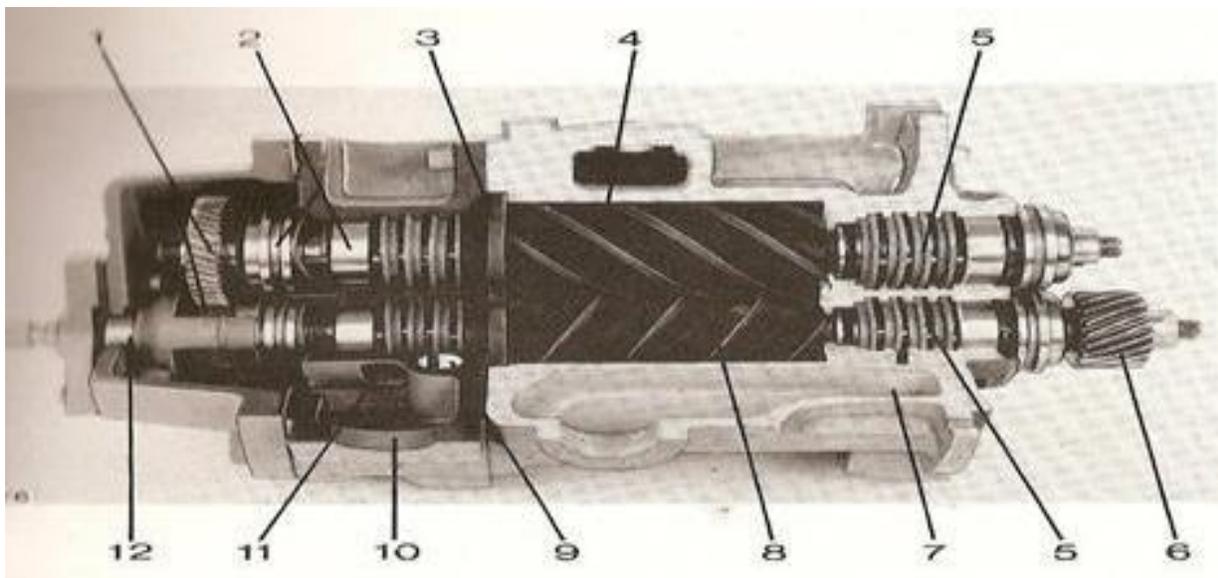
Fuente: Mundo Compresor. (2019). *Diferentes tipos de compresores.*

### **1.3.7. Partes de los compresores de tornillo**

- Engranaje de sincronización
- Rodamiento del rotor
- Separador
- Rotor hembra
- Empaques
- Piñón
- Canal refrigerante
- Rotor macho

- Orificio de ventilación
- Puerto de salida
- Orificio de drenaje
- Pistón de equilibrio (Kaeser México, 2017)

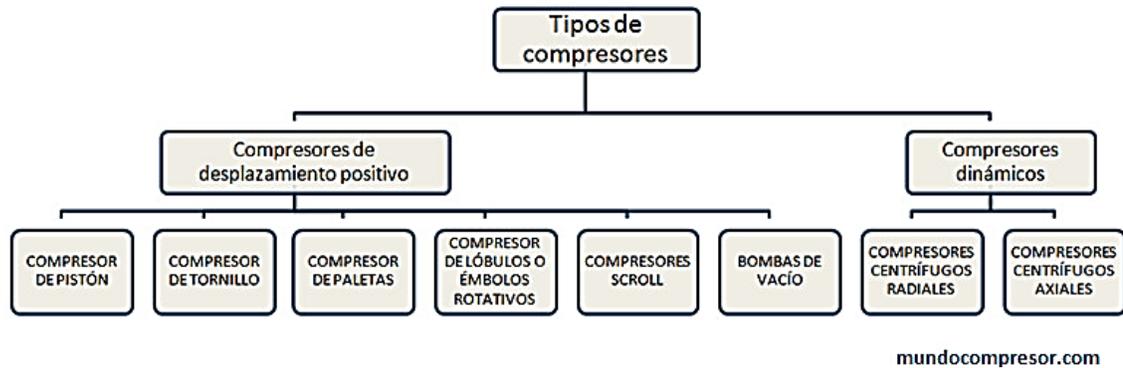
Figura 16. **Partes del compresor de tornillo**



Fuente: Kaeser México. (2017). *¿Cómo funciona un compresor de tornillo?*.

En la foto se aprecian los diferentes componentes. El bloque compresor comprende la caja de engranajes y las dos unidades compresoras. Los compresores de los tipos mencionados se adaptan a múltiples aplicaciones o normativas, como API o ATEX. Se adecuan por parte de los fabricantes para que puedan trabajar en aplicaciones específicas o los equipan con accesorios requeridos por los usuarios (Mundo Compresor, 2019).

Figura 17. Tipos de compresores de aire



Fuente: Mundo Compresor. (2019). *Diferentes tipos de compresores*.

#### 1.4. Calidad en mantenimiento

En general calidad se trata de la conformidad de los clientes con los productos o servicios que reciben, en cuanto a mantenimiento se refiere a lograr la mayor disponibilidad de los equipos al menor costo, contiene mano de obra, materiales, recursos y métodos de trabajo (Valbor Soluciones, 2018).

Respecto a los métodos de trabajo la calidad aplicada a mantenimiento se relaciona a procedimientos y documentación de tareas, pero se deben identificar las máquinas según su importancia, por medio de un análisis de criticidad, este orienta al plan de mantenimiento, documentando las tareas a detalle con sus precauciones y verificaciones finales para dar por terminada la tarea (Valbor Soluciones, 2018).

#### **1.4.1. ISO**

Por sus siglas en inglés International Organization for Standardization. Es una federación mundial de miembros, los comités técnicos de trabajo se encargan de la preparación de estándares internacionales, trabaja de cerca con IEC (International Electrotechnical Commission) todo lo relacionado a estándares electrotécnicos (ISO, 2014).

#### **1.4.2. Norma ISO 55000**

En esta norma internacional están contenidas las generalidades para gestionar los activos y sus sistemas, se identifican las prácticas en común para ser aplicadas ampliamente a diversos activos, organizaciones y culturas (ISO, 2014).

#### **1.4.3. Norma ISO 17359**

Esta norma internacional se trata de monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas para lo que proporciona guías usando parámetros como vibración, temperatura, tribología, tasas de flujo, contaminación, energía, desempeño, condición y criterios de calidad (ISO, 2018).

El monitoreo de condición es parte fundamental de la gestión de activos, de esta norma se desglosan un grupo de estándares que cubren el trabajo de monitoreo de condición y diagnóstico, contiene procedimientos generales que se deben considerar al implementar un programa de monitoreo de condición (ISO, 2018).

Incluye detalles de las etapas clave que deben cumplirse cuando se implementa un programa de monitoreo de condición, introduce el concepto de dirigir o direccionar las tareas de monitoreo de condición para determinar y detectar síntomas de modos de falla de causa raíz, y establece los criterios de alarma llevando a cabo diagnóstico y pronóstico, mejorando su confiabilidad (ISO, 2018).

#### **1.4.4. Norma ISO 5011:2014**

Esta norma establece y especifica los procedimientos para realizar pruebas de manera que los resultados sean uniformes, en las mismas condiciones, el equipo usado y un reporte que permite la comparación de desempeño directo de laboratorio de los filtros de aire (ISO, 2014).

Las características de desempeño básico de mayor interés son la restricción de flujo de aire o presión diferencial y eficiencia de recolección de polvo, esta norma aplica para filtros de aire usados en motores de combustión interna y compresores usados en aplicaciones automotrices e industriales (ISO, 2014).

La norma establece la precisión de las mediciones y las condiciones estándar para realizar las pruebas a los filtros de aire, así como los materiales y las condiciones de las pruebas, determina el procedimiento de pruebas para filtros de aire de tipo seco para aplicaciones industriales, incluyendo el equipo para las pruebas, incluye prueba de presión diferencial y restricción, prueba de eficiencia inicial, prueba de eficiencia de vida útil y capacidad de carga de polvo.



## **2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

Como segunda fase se hizo el desarrollo de la investigación, se utilizaron diferentes herramientas para la recolección de los datos de las variables y de información respecto al funcionamiento y eficiencia de los compresores de aire, para tener elementos para proponer alguna solución, y se identificaron las fallas que han presentado.

### **2.1. Recolección de datos**

La recolección de datos se hizo por medio de llenado de formatos en hojas electrónicas por medio de una rutina con la que se captaron diferentes datos durante la investigación. Se tomaron estos datos diariamente de lunes a viernes, por medio de la hoja electrónica en Google Drive (ver apéndice 1), tomando en cuenta datos desde septiembre de 2018 a octubre de 2019.

En este formato se registran la temperatura de la salida del compresor, horómetro, nivel de aceite, presión de salida y sirve como constancia de que se realizó la inspección diaria. Y se debe reportar cualquier anomalía encontrada al realizar la inspección VOSO, además de registrar la información, para darle más seguimiento o intervenirlo.

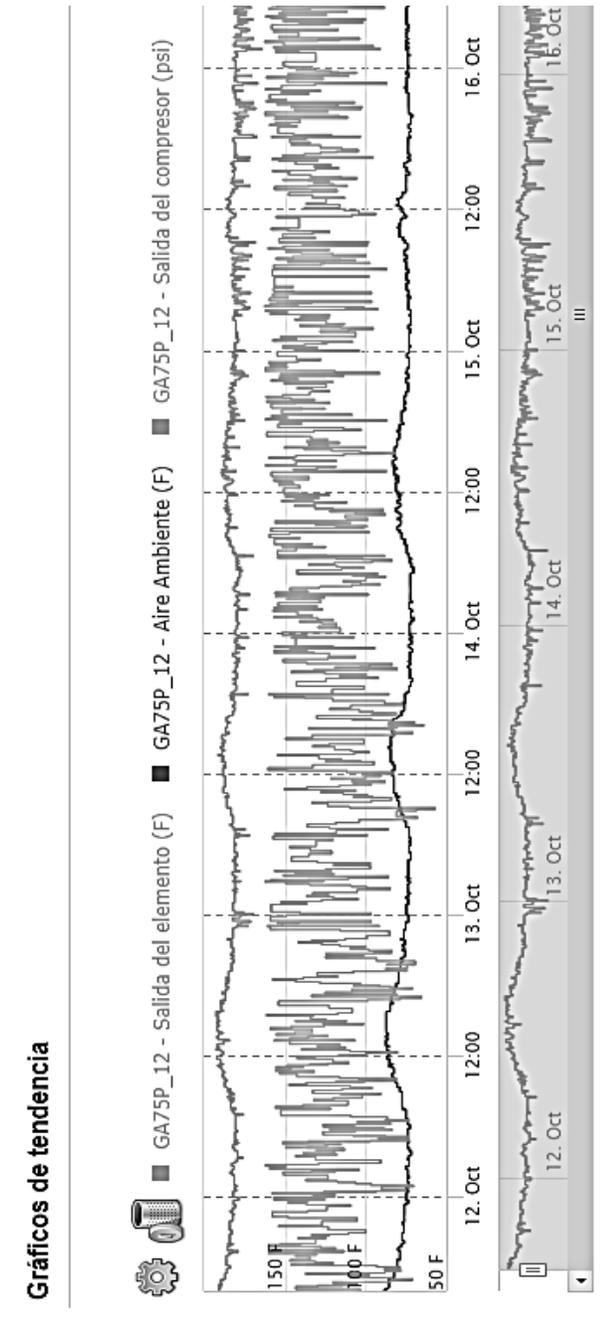
Durante la toma de datos se revisó el estado del área y de los compresores, ya que se han tenido problemas con la obstaculización del paso del aire fresco, así como de basura en el área, que ha tapado la admisión de aire de los compresores. Esto ha afectado a los compresores haciendo subir la

temperatura ambiente en el área y por consecuencia la temperatura de los compresores.

Además, se recuperaron datos de los controladores de los compresores, se contó con la información de un compresor para tomarlo como base en un plan piloto, ya que es el compresor que se usa como base, se mantiene operando la mayoría del tiempo para replicarlo en los demás (ver anexo 1). Hay datos descargados desde control del compresor 4, estos han sido usados para revisar la tendencia de las variables.

En la figura 18 también se muestran unas gráficas que se pueden personalizar para mostrar las variables que les interesen a los usuarios. Se puede apreciar la línea en la parte baja que corresponde a la temperatura del aire ambiente, en el medio con bastante oscilación la presión en la salida del compresor, y en la parte superior la temperatura en la salida del compresor.

Figura 18. Gráfica de tendencia



Fuente: Samboro, S.A. (2019). *Acceso remoto a control de compresor 4.*

## **2.2. Factores que afectan el funcionamiento de los compresores**

La temperatura del aire en la admisión del compresor, esta variable es de tipo cuantitativa y dependiente, de las condiciones del área y del ambiente. Para conocer a qué temperatura entra el aire al compresor, se ve en grados Celsius, esta temperatura no debe pasar de 46 °C como máximo y como mínimo 0 °C, pero lo ideal es que se mantenga a 20 °C.

La temperatura en la salida de aire comprimido del compresor, esta variable es de tipo cuantitativa y dependiente, por las condiciones de trabajo. Sirve para saber a qué temperatura sale el aire comprimido del compresor. Se ve en grados Celsius, esta temperatura no debe pasar de 46 °C.

La temperatura del aire residual en la salida del compresor, esta variable es de tipo cuantitativa y dependiente. Sirve para conocer la temperatura del aire residual que descarga al ambiente el compresor. Se toma en grados Celsius.

La saturación del filtro de aire, esta variable es de tipo cuantitativa y dependiente, por la contaminación contenida en el ambiente. Esta variable sirve para saber qué tan obstruido está el filtro de aire del compresor. Se toma en psi, desde valores negativos que van aumentando cuando se va saturando el filtro, al alcanzar el valor de -0.35 psi se activa una alarma y se usa para si llegara a alcanzar el valor máximo de -0.7 psi.

La presión de salida del compresor es una variable cuantitativa y dependiente por las condiciones de trabajo de cada equipo. Esta variable sirve para conocer la presión que está entregando a la red el compresor. Se toma en psi, se ajusta según lo requerido.

El caudal de salida del compresor es una variable cuantitativa y dependiente, por las condiciones de trabajo y del ambiente. Sirve para conocer la cantidad de aire comprimido que entrega el compresor. Estos datos se toman en pies cúbicos por minuto (CFM).

El consumo de energía es una variable cuantitativa y dependiente por las condiciones en la que trabajan los equipos. Sirve para conocer cuánta energía está consumiendo el compresor, se registra en kWh.

Por medio de observación directa se apreció cómo afecta la contaminación en el ambiente a los compresores, por lo que se han tenido que limpiar cada semana, con esto se han mantenido en mejores condiciones y con los radiadores de los intercambiadores de calor sin obstrucciones, que se determinó como otra causa que eleva la temperatura al perder la eficiencia de su operación.

Se recuperaron los datos para conocer en qué condiciones han estado operando los compresores y se pudieron identificar las subidas de temperatura, cuando esto sucede se muestra una alerta en la pantalla del control del compresor y queda grabado, además envía mensajes de texto y correos electrónicos como alerta, como muestra el anexo 2.

### **2.3. Plan de mantenimiento preventivo**

Se tuvo acceso a los planes de mantenimiento preventivo con que se hacen los servicios a los compresores, obteniendo el detalle de cada nivel de servicio y las frecuencias con las que se efectúan.

El compresor 4, al igual que los demás compresores, se mantiene por medio de un plan de mantenimiento preventivo basado en las horas que trabajan

los compresores y se programan las tareas de mantenimiento. Como ejemplo se muestra la tabla II de una propuesta para el servicio de un compresor.

**Tabla II. Propuesta plan de mantenimiento**

Este contrato anual tendría 3 tipos de visitas considerando que el equipo trabaja 8,000 horas anuales.

Cantidad	TIPO VISITA	DESCRIPCION
10	I	INSPECCION Y LIMPIEZA EXTERNA
1	A	SERVICIO DE 4000 HORAS LIMPIEZA EXTERNA Y CAMBIO DE FILTROS
1	B	SERVICIO DE 8000 HORAS, LIMPIEZA GENERAL, CAMBIO DE KIT DE 8000 HORAS

Fuente: Samboro, S.A. (2018). *Correo de la empresa.*

Los mantenimientos preventivos se programan según las horas de trabajo de los compresores, además de visitas del asesor e inspección visual, para registro de horas de trabajo con recomendaciones para mejoras en el sistema de aire comprimido.

Durante las visitas de rutina se verifica la correcta operación de los equipos del sistema y sus parámetros de funcionamiento, cuando es mantenimiento menor se realiza cambio de filtro de aire, filtro de aceite, mantos filtrantes, reapriete y limpieza de los componentes eléctricos y limpieza general del equipo. Cuando es mantenimiento mayor, además de lo que contiene el mantenimiento menor, se cambia filtro separador de aceite, aceite, revisión de válvulas y kit de admisión.

Esta propuesta se hizo para un contrato anual por el mantenimiento, como se puede ver basado en las horas de uso de un año, se proponen los cambios de los repuestos, y en esta ocasión se ofrece realizar inspecciones y limpieza.

## **2.4. Análisis de variables que afectan el funcionamiento de los compresores**

Los datos se analizaron para determinar cómo se comportaron los compresores durante el tiempo de la investigación y cómo se encontraban al realizar tareas de mantenimiento preventivo.

### **2.4.1. Análisis cualitativo y cuantitativo de variables**

Las variables se analizaron por medio de tablas para ordenar los datos y para poder compararlos y hacer las correlaciones entre los valores de las variables. También se hicieron gráficos de control para poder establecer los límites en los que normalmente han estado operando los compresores. En el análisis cuantitativo se describieron las variables y se compararon para determinar la diferencia entre los grupos de muestras.

Como se puede ver en la gráfica de tendencia mostrada en la figura 18 en el apartado 2.1, se puede ver cómo la temperatura ambiente afecta directamente a la temperatura de salida del compresor, ya que cuando sube la temperatura ambiente también sube la temperatura de salida, del mismo modo cuando esta baja se aprecia la misma tendencia.

En la tabla III a continuación se puede apreciar cómo se ordenaron los datos de las diferentes tablas que se recuperan desde el control del compresor para poder analizarlos en hojas electrónicas. Dejando los datos que se registran a la misma hora para cada variable para poder compararlas uno a uno, ya que de algunas se registran más datos.

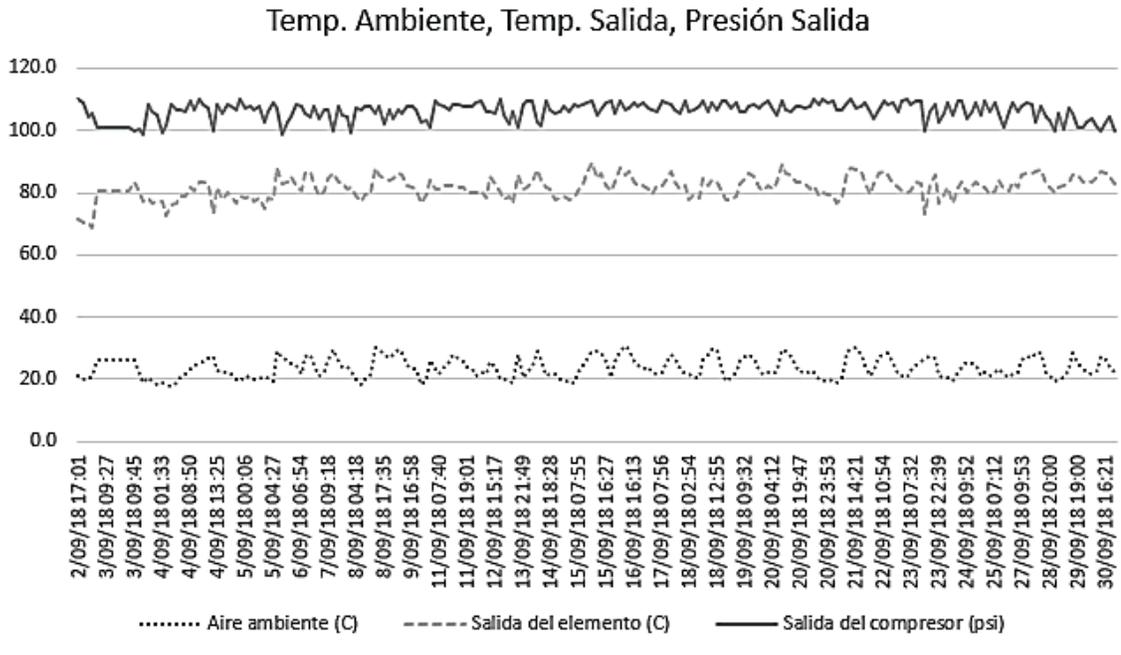
**Tabla III. Tabla de datos recolectados: temperatura ambiente, presión salida y temperatura de salida**

<b>Machine Time</b>	<b>Ambiente (F)</b>	<b>Presión Salida (psi)</b>	<b>Temperatura salida (F)</b>
9/01/2018 10:59	69.6	0.0	67.5
9/01/2018 11:14	71.8	127.1	165.2
9/01/2018 11:14	71.8	127.5	166.3
9/01/2018 11:14	71.8	128.1	167.0
9/01/2018 11:14	71.8	128.5	167.5
9/01/2018 11:14	71.8	128.9	168.3
9/01/2018 11:15	71.8	129.3	168.8
9/01/2018 11:15	72.0	129.7	169.7
9/01/2018 11:15	72.0	129.8	170.2
9/01/2018 11:15	72.0	125.6	165.0
9/01/2018 11:15	72.0	124.5	162.0
9/01/2018 11:15	72.0	123.5	159.4
9/01/2018 11:15	72.0	122.6	157.1
9/01/2018 11:15	72.0	122.3	158.0
9/01/2018 11:15	72.0	125.5	163.8
9/01/2018 11:15	72.0	126.5	165.9
9/01/2018 11:15	72.0	127.0	166.8
9/01/2018 11:15	72.0	127.4	167.5
9/01/2018 11:16	72.0	127.8	167.9
9/01/2018 11:16	72.0	128.3	168.6

Fuente: elaboración propia.

Al graficar estos datos, además de la tendencia observada en la gráfica de la figura 18 del apartado 2.1, se puede apreciar cómo además de la influencia de la temperatura ambiente el trabajo del compresor afecta la temperatura de la salida.

Figura 19. **Gráfica de temperatura ambiente, presión de salida y temperatura de salida**



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica presentada en la figura 19 se puede apreciar, además de la influencia de la temperatura ambiente en la temperatura de salida, cómo se afecta también por el trabajo del compresor. Para realizar esta gráfica se escogieron los minutos que tienen datos de las 3 variables de septiembre de 2018, ya que se registran más de algunos, por lo que se puede apreciar la fuerte influencia que realiza la generación de presión subiendo la temperatura de salida.

No se puede realizar la correlación entre las variables, no es representativo, porque no tienen una relación lineal, se trata de un fenómeno de causa y efecto, no se presentan al mismo tiempo, y se ve afectado por otros factores como la regulación de temperatura del compresor por medio de la válvula

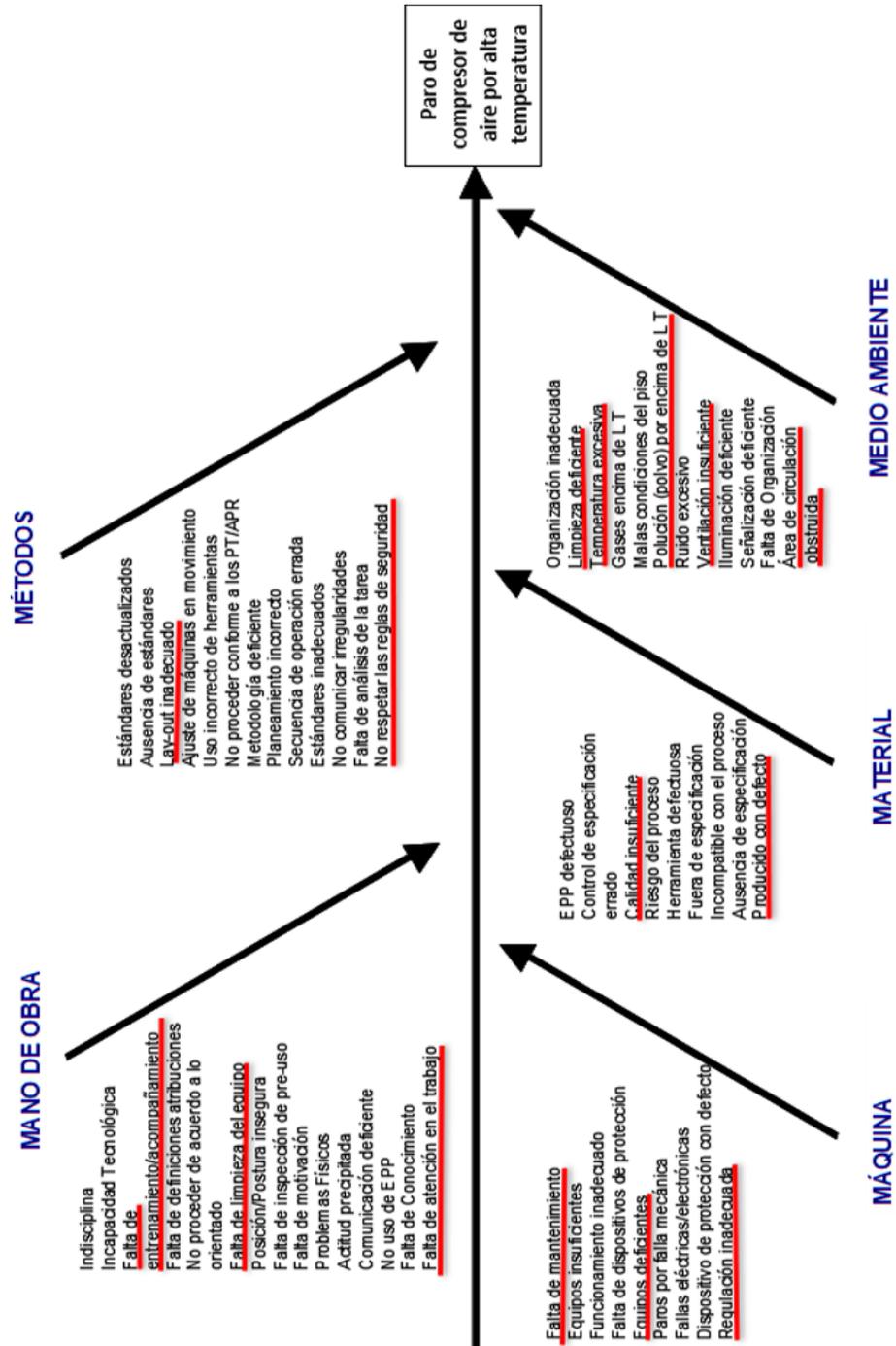
termostática y el ventilador que extrae calor del radiador. En el apartado 3.1 se presenta la diferencia de consumo, a diferentes temperaturas, y la diferencia en el costo de energía. En el siguiente apartado se realizan los análisis causa-efecto para determinar las causas que afectan la operación de los compresores.

## **2.5. Análisis de causa y efecto**

Después de haber realizado el análisis de las variables, se determinó por medio del análisis de causa y efecto cómo afectó cada variable el funcionamiento y la eficiencia de los compresores. Se pudo determinar que la temperatura de los compresores se puede ver afectada por diversos factores:

- Puede ser por contaminación ambiental como polvo que ha ido tapando los radiadores, haciéndolos perder eficiencia.
- Basura que ha llegado a tapar las entradas de aire, reduciendo el paso de aire.
- Tarimas que se han colocado muy cerca del área de compresores, que han evitado que entre aire fresco y que salga del área el aire residual.
- En el compresor que se tomó para el plan piloto ya se habían tenido problemas como el atascamiento de una válvula termostática, lo que también hizo que se elevara la temperatura.
- También se han tenido problemas de fallas falsas registrando alta temperatura por un falso contacto por una conexión dañada.

Figura 20. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Como se puede ver en la figura 20, respecto a la mano de obra se ha notado falta de entrenamiento y acompañamiento, falta de limpieza del equipo y falta de atención en el trabajo, que es la influencia del factor humano en el problema.

Respecto a los métodos utilizados se ha notado que puede haber una mejor distribución, por lo que se marca *lay-out* inadecuado, y no respetar las reglas de seguridad como cuando se usa la parada de emergencia sin ser necesario. En cuanto a la máquina se puede notar falta de mantenimiento, equipos deficientes y regulación inadecuada.

De los materiales usados en el mantenimiento es posible que sean de calidad insuficiente, o producidos con defecto por presentar fallas tempranas. Y respecto al medio ambiente se ha notado limpieza insuficiente, temperatura excesiva, polvo, ventilación inadecuada y área de circulación obstruida. Todo en conjunto genera el problema de alta temperatura en el compresor que además de mostrar alarmas también ha parado por estas causas.

### **2.5.1. Análisis 5 por qué's**

Como complemento al análisis causa-efecto en el apartado anterior, que se muestra en el diagrama de Ishikawa en la figura 21, se hizo este análisis, mostrando 2 casos diferentes, con causas diferentes y el mismo efecto.

El primer caso:

- ¿Por qué paró el compresor? Porque tiene alarma por alta temperatura.
- ¿Por qué el compresor tiene alarma por alta temperatura? Porque se encontró una bolsa obstruyendo el paso de aire de admisión.

- ¿Por qué se encontró una bolsa obstruyendo el paso de aire de admisión? Porque el compresor se encuentra en un área abierta cercana a áreas de empaque y almacenaje de producto terminado, y el personal deja restos de material de empaque en el suelo cuando abre tarimas.
- ¿Por qué dejan restos de material de empaque en el suelo? Porque no todo el personal cumple con recolectar y depositar los restos de material de empaque, falta supervisión de los encargados de bodega de empaque y producto terminado.
- ¿Por qué los encargados de estas áreas no supervisan la limpieza? Porque se enfocan en las tareas exclusivas de su trabajo y dejan las tareas de limpieza para el personal a cargo de esto.

En este caso se puede apreciar cómo afecta la poca colaboración del personal de otras áreas para mantener el orden y limpieza en general, y como en este caso afecta a los compresores.

El segundo caso:

- ¿Por qué paró el compresor? Porque tiene alarma por alta temperatura.
- ¿Por qué el compresor tiene alarma por alta temperatura? Porque no logra regular la temperatura de operación normal, se revisaron los ventiladores, están trabajando, recientemente se hizo un servicio mayor, se mantienen limpios los intercambiadores de calor (radiadores) para asegurar su eficiencia.

- ¿Por qué mantiene la temperatura alta con todos los dispositivos de enfriamiento trabajando? Porque en el servicio recién realizado se cambió la válvula termostática, pero se encontró con mal funcionamiento, la temperatura sigue en incremento.
- ¿Por qué la válvula termostática no funciona correctamente? Porque no hace el movimiento para abrir el paso de aceite y bajar la temperatura al alcanzar 40°C, por lo que el proveedor ofrece reemplazo por garantía, ya que es un repuesto nuevo y original.
- ¿Por qué la válvula no abre? Porque se quedó trabada en la posición cerrada, no abre cuando alcanza la temperatura de apertura y esto provoca que el compresor pare por alta temperatura.

En este caso el compresor para por alta temperatura, a pesar de que un servicio mayor se ha realizado recientemente y se considera en óptimas condiciones, pero se debe a una falla en la válvula termostática nueva y original, por lo que se cambia por garantía.

## **2.6. Análisis FODA**

La empresa se ha caracterizado por las inversiones que realiza en maquinaria, esto se toma como una fortaleza para poder renovar el equipo cuando se justifica o para mejorar alguna situación, así como el acceso a la capacitación para los empleados para que puedan hacerse cargo de nuevas tareas, con los fundamentos necesarios para llevarlas a cabo de la manera más adecuada.

Figura 21. **Análisis FODA del área de compresores**

FORTALEZAS	DEBILIDADES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión en maquinaria</li> <li>• Acceso a capacitación de los empleados</li> <li>• Contratación de servicio técnico especializado</li> <li>• Personal de mantenimiento de turno capacitado</li> <li>• Disposición a experimentar para encontrar mejoras</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de colaboración de personal cercano al área</li> <li>• Falta de capacitación de personal operativo</li> </ul>
OPORTUNIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avance en tecnología accesible</li> <li>• Mejores repuestos disponibles</li> <li>• Mejores técnicas de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incremento de la temperatura ambiente</li> <li>• Aumento de polvo en el ambiente</li> <li>• Basura o desechos que pueden obstruir la aspiración del aire</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

Como oportunidades se pueden tomar el avance de la tecnología, que ayuda a tener más y mejor información para el mantenimiento de los equipos, así como mejores soluciones en cuanto a repuestos. Como debilidad se puede mencionar la falta de colaboración del personal de otras áreas que por desconocimiento o sin intención afecta la operación de los compresores de aire. Las amenazas pueden ser como el incremento de la temperatura ambiente, la cantidad de polvo que ingresa a la empresa y la basura en el ambiente.



### **3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

Como solución se presentan las tareas de mantenimiento predictivo que puede incluirse en el plan de mantenimiento para monitorear la condición de los compresores y conocer el momento oportuno para realizar las intervenciones y los ahorros que pueden alcanzarse por medio de esta solución.

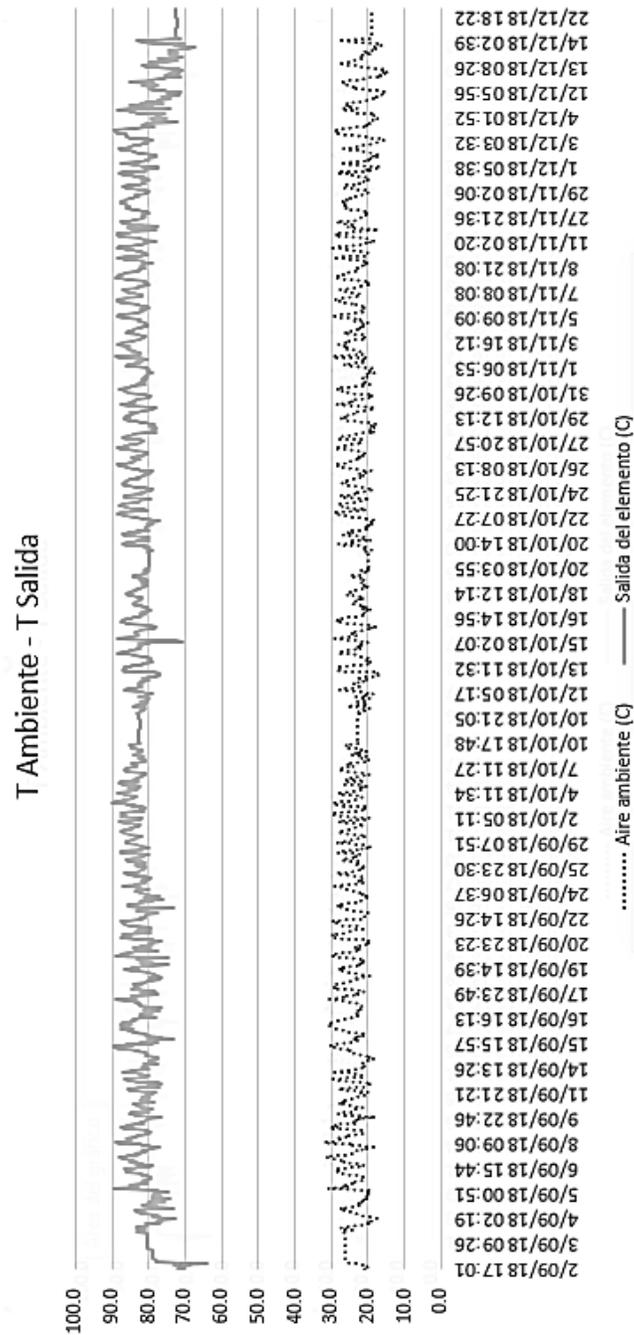
Con los datos que se tiene, se puede realizar las tareas de mantenimiento predictivo para obtener los beneficios proyectados, comparando por medio de gráficas que representan las tendencias de las variables. Debe realizarse seguimiento y análisis de estas variables para conocer la condición de los compresores de aire en operación.

#### **3.1. Análisis de los efectos del aire residual en la eficiencia de los compresores**

El aire residual, al no ser extraído de forma adecuada del área, hace que se incremente la temperatura del aire que es aspirado en la admisión de aire de los compresores.

Como se muestra a continuación, en la figura 22 el efecto de la temperatura ambiente en que se encuentra el compresor afecta la temperatura de salida del aire comprimido, y si el aire residual generado por los mismos compresores no se extrae del lugar, este hace que los compresores estén trabajando a temperaturas más altas. Se delimitan los datos de septiembre a diciembre de 2018, para poder ver la tendencia.

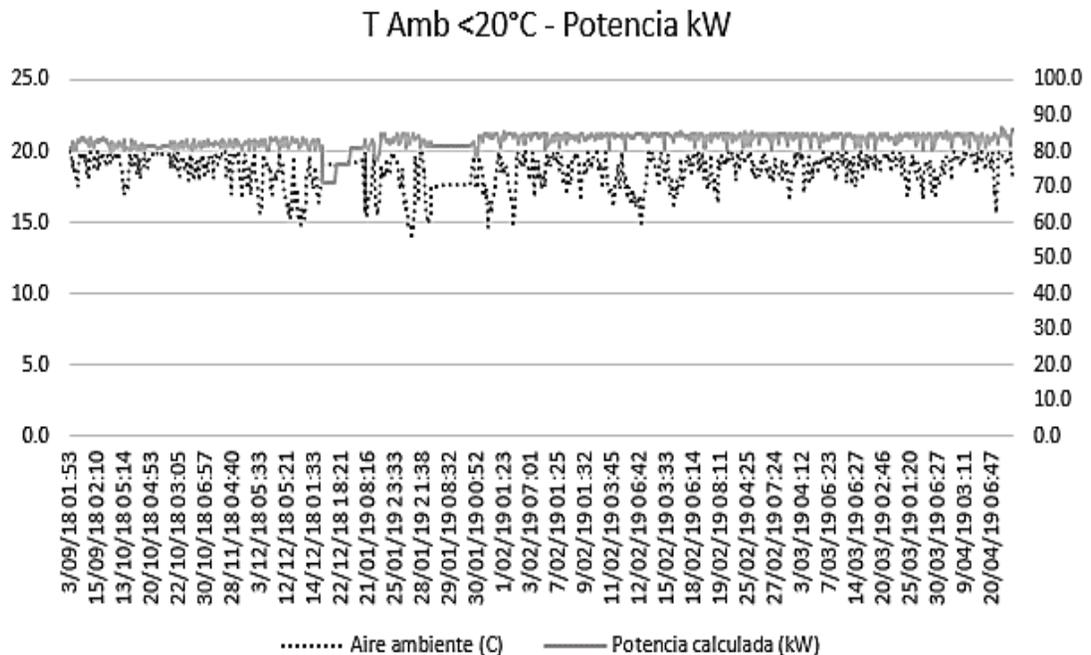
Figura 22. Gráfica de temperatura ambiente y temperatura de salida



Fuente: elaboración propia.

En condiciones que el compresor está trabajando a plena carga, y que solo se filtran los datos para conocer la temperatura de salida promedio a la que trabaja el compresor cuando la temperatura ambiente se mantiene en los siguientes rangos: como se muestra en la figura 24 con la temperatura ambiente menor a 20°C el promedio de temperatura ambiente es de 18.6 °C y la potencia calculada es de 82.8 kW en promedio, por 8,000 horas de trabajo al año, a USD 0.10/kWh el consumo es de USD 66,240/año. Con la línea punteada se muestran los datos de la temperatura ambiente y la escala en °C a la izquierda, y con la línea continua los datos de la potencia calculada en kW.

Figura 23. **Temperatura ambiente <20 °C y potencia**

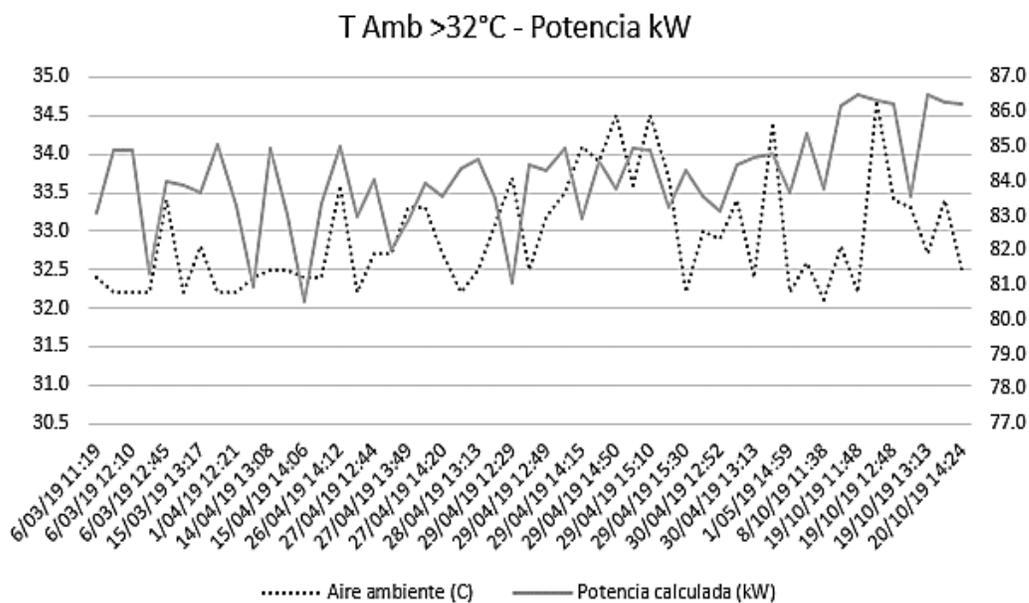


Fuente: elaboración propia.

En la figura 24 se muestra cuando la temperatura ambiente es mayor a 32°C, el promedio de temperatura ambiente es de 33.0 °C y la potencia calculada

es de 84.1 kW en promedio, por 8,000 horas de trabajo al año, a USD 0.10/kWh el consumo es de USD 67,280/año. Con la línea punteada se muestran los datos de la temperatura ambiente y la escala en °C a la izquierda, y con la línea continua los datos de la potencia calculada en kW.

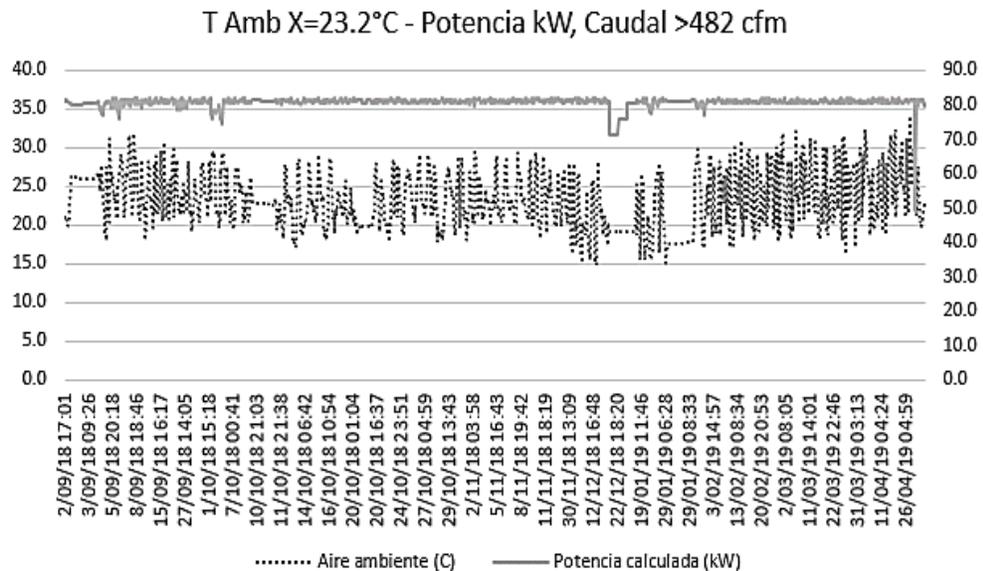
Figura 24. **Temperatura ambiente >32 °C y potencia**



Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la figura 25, cuando el caudal es mayor a 482 CFM con la temperatura ambiente promedio 23.2 °C y la potencia calculada es de 80.7 kW en promedio, por 8,000 horas de trabajo al año, a USD 0.10/kWh el consumo es de USD 64,560/año. Con la línea punteada se muestran los datos de la temperatura ambiente y la escala en °C a la izquierda, y con la línea continua los datos de la potencia calculada en kW.

Figura 25. Temperatura ambiente promedio 23.2 °C y potencia, caudal >482 CFM



Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar en los cálculos anteriores, al aumentar la temperatura ambiente, que es la temperatura a la que está aspirando el aire el compresor, aumenta la temperatura de salida y hace que suba el consumo eléctrico. Como se puede ver al comparar la mejor situación contra la peor, hay una diferencia entre USD 67,280 y USD 64,560, es de USD 2,720 al año por cada compresor que se puede tener de ahorro.

### 3.2. Acciones necesarias para poder implementar el plan de mantenimiento predictivo

Por medio de diferentes acciones detalladas a continuación se pueden contrarrestar los efectos adversos o no deseados en el área de compresores.

Delimitación del área que se requiere sin obstrucciones por medio de pintura en el piso, para poder determinar fácilmente su cumplimiento, por lo que el área marcada debe mantenerse libre de obstrucciones alrededor de los compresores ya que limitan el flujo de aire fresco al área, como se puede ver en la figura 26, donde se ve el área de compresores delimitada para asegurar el flujo de aire fresco.

En la siguiente figura se aprecia el área de compresores, delimitada con una línea pintada en el piso que marca el área que debe mantenerse libre de obstrucciones.

Figura 26. **Área de compresores delimitada**



Fuente: elaboración propia.

La limpieza de los compresores semanalmente sirve para evitar que se acumule polvo en los radiadores y en los paneles eléctricos, y que se mantengan limpios en general, que también sirve para que apliquen la técnica VOSO los operadores encargados de la lubricación y de esta tarea. Además, esta misma técnica se realiza por otros operadores que realizan recorridos diarios en el área para recolectar datos y asegurar la adecuada operación de los compresores, sin presencia de alarmas o cualquier desviación que puedan detectar. Como muestra de la asignación de la tarea de limpieza se tienen las órdenes de trabajo de lubricación en la figura 27 y los resultados de los recorridos diarios en la figura 28.

En el caso del compresor 4, los cojinetes no se deben lubricar, porque se lubrican con el aceite del mismo compresor y los lubricadores cada 2 semanas realizan la inspección V.O.S.O. en la que inspeccionan el nivel del ruido del equipo, alarmas que pudiera mostrar, el nivel del aceite y lo reponen si hace falta, además de realizar la limpieza general del compresor para asegurar el buen funcionamiento de los radiadores, además de hacer pruebas de parada. Como se puede ver en la figura 28, en la última línea mostrada aparece el compresor 4.

Figura 27. Orden de trabajo de lubricación con tarea para limpieza de compresores incluida

<b>REPORTE ORDEN DE TRABAJO</b>			
No. OT	<b>333402</b>	Fecha Inicio Plan	2019-01-26
Descripción	MP LUBRICACIÓN PLAN 4 SEMANAS	Final Plan	26/enero/2019
Plan de MP	MP-LUB-PLAN04W	Inicio Real	
Departamento	LUB	Final Real	
Equipo Principal	FIHU1 (Filtro Humedo 1 VT16)		
<b>COMENTARIOS DE OT</b>			
<b>EQUIPOS EN RUTA</b>			
RU-LUB-04W21D: Ruta Lubricación Plan 04W Día 21			
Correlativo	Codigo	Descripción	
10	FIHU2	Filtro Humedo 2 VT16	
20	FIHU3	Filtro Humedo 3 VT16	
30	FIHU4	Filtro Humedo 4 VT19	
40	FIHU5	Filtro Humedo 5 VT8	
50	FIHU6	Filtro Humedo 6 VT8	
60	FIHU7	Filtro Humedo 7 VT23	
70	FISE1	Filtro Seco 1 Camfil APC GS20	
80	FISE2	Filtro Seco 2 FD264	
90	FISE3	Filtro Seco 3 FD240	
100	FISE4	Filtro Seco 4 FDP144	
110	FISE5	Filtro Seco 5 156 Mangas	
111	FISE6	FILTRO SECO 6 FD324	
120	COMP1	Compresor de Aire 1 Gardner Denver	
130	COMP2	Compresor de Aire 2 Gardner Denver	
140	COMP3	Compresor de Aire 3 Kaeser CSD 75	
141	COMP4	Compresor de Aire 4 Atlas Copco GA75+	

Fuente: archivo de Samboro.

Diariamente se registran los datos que resultan de las inspecciones que se realizan para monitorear la condición de los equipos, como se puede ver a continuación en la muestra de la hoja electrónica que se usa en Google Drive.

Figura 28. Registro de recorridos diarios de técnica V.O.S.O.

Recorrido Diario ☆

Archivo Editar Ver Insertar Formato Datos Herramientas Complementos Ayuda Última modificación hace 12 horas por Mantenimiento.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
	Fecha	Cód. Equipo	Desc. Equipo	Temperatura	Nivel de Aceite	Horome	Presión salida PSI	Sensor de Presión
90	11/9/18	SECA2	K Secador de Aire Comprimido 2 Atlas Copco	4.2°C				
91	12/9/18	COMP1	K Compresor de Aire 1 Gardner Denver			26547,5		Apagado
92	12/9/18	COMP2	K Compresor de Aire 2 Gardner Denver			19687,1		Apagado
93	12/9/18	COMP3	K Compresor de Aire 3 Kaesser	71°F	A nivel	60997	99	
94	12/9/18	COMP4	K Compresor de Aire 4 Atlas Copco	86°C	A nivel	19000	98	Mantenimiento en 201
95	12/9/18	COMP5	K Compresor de Aire 5 Kaesser	79°F	Alto	1529	98	Mantenimiento en 471
96	12/9/18	COMP6	K Compresor de Aire 6 Kaesser	175°F	Alto	2024	99	Mantenimiento en 197
97	12/9/18	SECA1	K Secador de Aire Comprimido 1					Apagado
98	12/9/18	SECA2	K Secador de Aire Comprimido 2 Atlas Copco	5.0°C				
99	13/9/18	COMP1	K Compresor de Aire 1 Gardner Denver			26547,5		Apagado
100	13/9/18	COMP2	K Compresor de Aire 2 Gardner Denver			19687,1		Apagado
101	13/9/18	COMP3	K Compresor de Aire 3 Kaesser	69°F	A nivel	60997	106	En mantenimiento
102	13/9/18	COMP4	K Compresor de Aire 4 Atlas Copco	85°C	A nivel	19024	104	Mantenimiento en 201
103	13/9/18	COMP5	K Compresor de Aire 5 Kaesser	75°F	Alto	1529	106	Mantenimiento en 471
104	13/9/18	COMP6	K Compresor de Aire 6 Kaesser	176°F	A nivel	2048	106	Mantenimiento en 195
105	13/9/18	SECA1	K Secador de Aire Comprimido 1					
106	13/9/18	SECA2	K Secador de Aire Comprimido 2 Atlas Copco	4.7°C				

Fuente: Samboro, S.A. (2019). *Archivo de la empresa.*

La instalación de prefiltro en el lado que pasa el aire para la admisión se hace para evitar que la basura pueda taparlos y reducir la cantidad de polvo que

pueda pasar al filtro de aire, alargando la vida útil de este último. Se puede mostrar la cotización por la fabricación de este prefiltro.

Figura 29. Cotización por fabricación de prefiltro



**DISMEC**

**AIRE ACONDICIONADO - VENTILACION - FILTRACIONES ESPECIALES - INSTALACIONES MECANICAS**  
7<sup>a</sup>. Av. 7-44 Zona 7 Interior 2 Colonia Landívar. Tel. (502) 2440-9981 Telefax (502) 2471-7628 Guatemala, Guatemala C. A. 01007  
[ventas@dismec.com.gt](mailto:ventas@dismec.com.gt) / [www.dismec.com.gt](http://www.dismec.com.gt)

GUATEMALA 30 DE SEPTIEMBRE DE 2019 COTIZACIÓN No.: 05664/2018

jestrada@samboro.com  
 2449-5800

Señores:  
**SAMBORO**  
 Atn. Ing. Jose Estrada  
 Presente

**REFERENCIA:** Filtros tipo PLEAT

CTD	DESCRIPCION	P/TOTAL
01	Prefiltro liso de 69cm X 91cm X 1", material azul merv 3, marco de aluzinc, Malla en ambas caras	Q. 385. 00

**PRECIO INCLUYE IVA**

**NOTAS DE LA PRESENTE OFERTA:**

- **SOSTENIMIENTO DE OFERTA** 7 días
- **TIEMPO ENTREGA** 1 DIA DE FABRICACION
- **FORMA DE PAGO** 100% CONTADO contra entrega
- **LUGAR DE ENTREGA** TALLERES DISMEC
- **LES OFRECEMOS FILTROS PARA AIRE ACONDICIONADO Y VENTILACIÓN, GRASA, POLVO, OLORES (CARBÓN ACTIVADO), PARA PINTURA, BACTERIOLÓGICOS. SISTEMAS Y EQUIPOS PARA AIRE VENTILACION Y AIRE ACODICIONADO.**

**DE ACEPTAR LA PRESENTE COTIZACION FAVOR DE EMITIR ORDEN DE COMPRA O ENVIAR ESTA COTIZACION FIRMADA Y SELLADA POR SU EMPRESA.**

ATENTAMENTE

J. Ottoniel Rosas  
**GERENTE GENERAL**

Marcela Alejandra Rosas  
**MERCADEO - VENTAS**

Fuente: Samboro, S.A. (2019), *Correo de la empresa.*

La instalación de un sensor de presión diferencial en la admisión de aire, ya que el compresor en observación no lo tenía como los demás, es para poder

determinar la saturación del filtro de aire por medio de este valor, y dejar de hacerlo por observaciones que pueden ser subjetivas, además de la oportunidad de analizar la tendencia de estos valores como se puede ver en la figura 30.

Figura 30. **Sensor de presión diferencial instalado en compresor 4**



Fuente: elaboración propia.

Para el monitoreo de vibraciones por medio del uso del vibrómetro disponible y también por medio del sensor de vibraciones instalado en el compresor, como se puede ver en la tabla IV, se usan los datos como se

descargan del control del compresor 4, estos mismos datos se registran y se pueden descargar, lo que puede hacer posible la adquisición de equipo de análisis de vibraciones más profesional y la correspondiente capacitación o la subcontratación de estos servicios. También se puede hacer uso de los datos que registran los controles de los compresores.

**Tabla IV. Valores de vibración registrados en el control del compresor 4**

	A	B
1	Machine Time	Value (dBc)
2	3/09/2018 09:24	23
3	3/09/2018 09:24	23
4	3/09/2018 09:24	23
5	3/09/2018 09:24	23
6	3/09/2018 09:25	23
7	3/09/2018 09:25	23
8	3/09/2018 09:25	23
9	3/09/2018 09:25	23

Fuente: Samboro, S.A. (2019). *MeasurementPoints.zip*

La termografía se mide para conocer la tendencia de las temperaturas en diferentes partes del compresor, como la válvula termostática, intercambiadores de calor, filtros de aceite y separador de aceite (ver apéndice 2).

La técnica VOSO se refiere a ver, oír, sentir y oler, cualquier desviación que los trabajadores puedan reconocer durante las inspecciones diarias, o rutinas de mantenimiento con los propios sentidos o por medio de asistencia tecnológica al usar algún dispositivo.

Análisis de aceite (ver anexo 3) se hace para conocer el estado de los compresores, y para determinar cuándo es el momento de realizar el mantenimiento, ya que puede variar según las condiciones ambientales (ver anexo 4).

La propuesta sirve para extraer el aire residual que se queda en el área y sube la temperatura en la admisión de aire de los compresores, haciéndolos trabajar en temperaturas más elevadas que la temperatura ambiente.

### **3.3. Plan de mantenimiento predictivo**

El plan de mantenimiento está compuesto por las partes y los equipos que se pueden incluir para monitorear la condición como lo dice la norma ISO 17359 y los pasos que se deben seguir para cumplir con el objetivo de programar el mantenimiento de los equipos antes que fallen:

- Análisis costo-beneficio, para determinar qué opción es la mejor económicamente.
- Auditoría de equipos, para asegurarse de incluir los equipos y sus partes por medio de la identificación de estos y sus funciones.
- Auditoría de confiabilidad y criticidad, para determinar la criticidad de los equipos y asignar las prioridades correspondientes, además del registro y análisis de la información para registrar los modos de falla y sus efectos.
- Método de monitoreo, para determinar para cada parte monitoreada la técnica de medición, la frecuencia de las mediciones o la tasa de recolección de datos, las ubicaciones de las mediciones y los criterios de alarma inicial.
- Recolección de datos y análisis, las mediciones y sus tendencias, comparación de los datos adquiridos con los valores de alarma.

- Programar las tareas de mantenimiento, ya que por medio de la recolección de datos y su análisis comparándolo con los valores de alarma se determina el momento oportuno para realizar las tareas de mantenimiento.

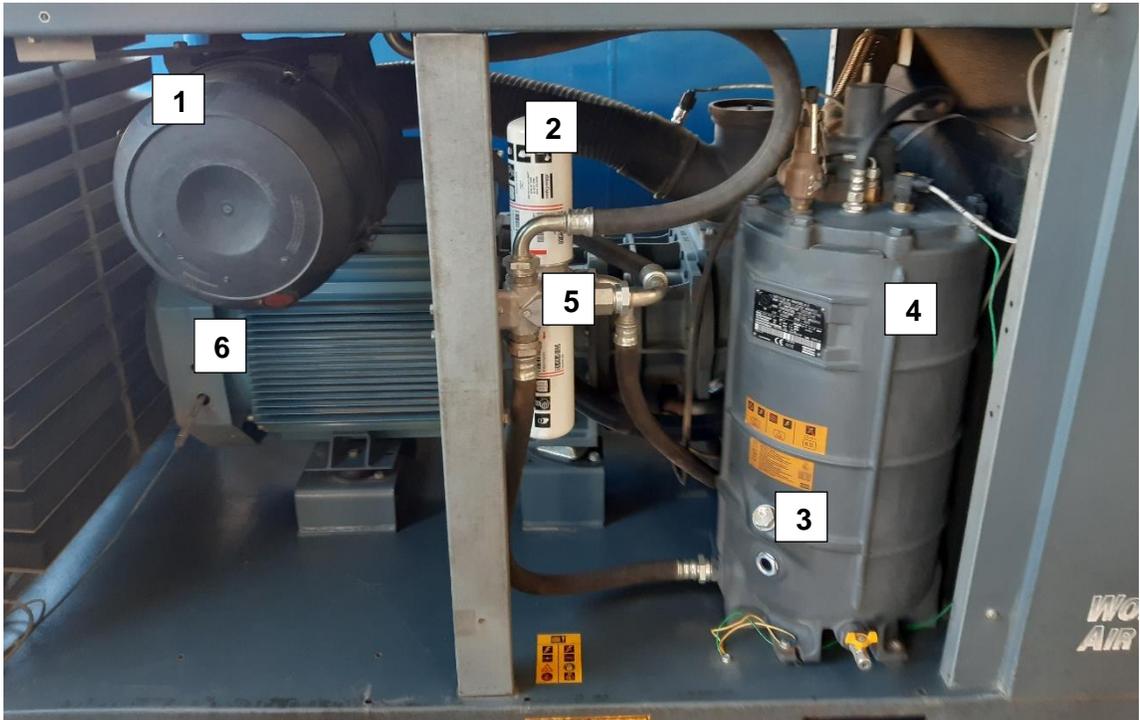
### **3.3.1. Partes del compresor a incluir en el plan de mantenimiento predictivo**

Las partes que se pueden incluir con los datos que se recolectan actualmente se describen a continuación, son las que se usan frecuentemente en los servicios.

- Filtro de aire, se usa en la admisión de aire y evita que entre contaminación al compresor.
- Filtros de aceite, se usan en la recirculación del aceite del compresor para retirar la contaminación que pueda pasar por el filtro de aire y por el desgaste de las piezas internas del compresor.
- Aceite, se utiliza para lubricar y refrigerar el compresor, además lubrica el cojinete del lado accionado.
- Separador de aceite, se usa para separar el aceite que sale de la unidad de tornillo mezclado con el aire comprimido.
- Válvula termostática, al pasar de 40 °C se abre para recircular el aceite y enfriar el compresor con la ayuda del radiador.
- Cojinete de lado no accionado del motor principal, usa un cojinete sellado libre de mantenimiento, en este punto se monitorea la vibración del motor.

En la figura 31 se señalan las ubicaciones de estas partes en las que se usan los repuestos mencionados en el compresor 4:

Figura 31. Ubicación de repuestos en el compresor 4



Fuente: elaboración propia. (2019). *Área de compresores de Samboro.*

### **3.3.2. Tareas del plan de mantenimiento predictivo**

Entre las tareas de mantenimiento predictivo que se puede implementar en la operación de los compresores con los recursos que se tienen se pueden incluir, como se menciona a detalle en el apartado anterior:

Inspecciones diarias, para realizar la verificación del cumplimiento de orden y limpieza en el área o para informar para su oportuna corrección, así como la inspección con la técnica VOSO.

Semanalmente se programa la limpieza general de los compresores, para asegurar que se mantengan en buenas condiciones para su operación, con tareas como limpieza general, limpieza de panel eléctrico, cambio de prefiltro y lavado de prefiltro que se quita.

Por medio de la información recolectada a partir de los datos del sensor diferencial de presión en la admisión de aire se puede conocer la condición del filtro de aire en uso, que se debe cambiar al llegar al valor de -0.14 psi, del que se mantiene alarma desde que alcanza los -0.07 psi, con lo que se asegura el aprovechamiento del uso de los filtros de aire. Además de la instalación del prefiltro para alargar la vida del filtro de aire principal.

El monitoreo de las vibraciones del motor principal se hace por medio de un sensor que recolecta los valores y los almacena en el control del compresor de la misma forma que lo hace con el sensor diferencial de presión, con lo que se asegura el monitoreo constante, y se pueden ver las alarmas cuando pasa del valor de 30 dB y se debe cambiar cuando alcanza el valor de 40 dB, esto pasa cuando la lubricación que se realiza periódicamente ya no logra bajar este valor al rango aceptado.

Se inició con la toma de termografías para conocer la tendencia de las temperaturas de las piezas mencionadas en el apartado posterior y poder tener una base de los valores de la operación normal, además de conocer cómo se afecta la operación del compresor cuando cambia la temperatura ambiente.

Por medio del análisis de aceite se hace el monitoreo de la condición de la operación del compresor, así como la eficiencia de los filtros en uso, se puede conocer si se encuentran partículas por el desgaste de algunas piezas, así como la condición del lubricante por medio del seguimiento de las propiedades que debe mantener y conociendo el momento en que se debe realizar el cambio.

### **3.3.3. Frecuencia de las mediciones para el plan de mantenimiento predictivo**

Como se puede ver en la tabla V, a continuación, se detallan las frecuencias o las tasas de recolección de los datos que se incluyen en el plan de mantenimiento predictivo.

Respecto a la frecuencia del monitoreo de vibraciones y de presión diferencial del filtro de aire, aparece como constante porque se almacenan los valores continuamente en el control del compresor.

La inspección VOSO se realiza diariamente por un mecánico y un electricista y además los lubricadores la realizan cada 2 semanas. La termografía se toma una vez al mes, para ir recolectando los valores e información sobre el comportamiento y la tendencia de la temperatura. El análisis de aceite se hace cada 2,000 horas de funcionamiento del compresor para monitorear la condición del aceite y detectar desgaste de piezas.

Tabla V. Frecuencia de mediciones de variables

Tarea	Frecuencia
Monitoreo de vibraciones	Constante
Monitoreo de presión diferencial en la admisión de aire	Constante
Inspección V.O.S.O	Diario
Termografía	1 vez al mes
Análisis de aceite	Cada 2000 horas de operación

Fuente: elaboración propia.

#### 3.3.4. Valores de alarma para cada parte monitoreada

A continuación, en la tabla VI, se detallan los valores con sus dimensionales para cada parte monitoreada incluida en el plan de mantenimiento predictivo, el valor con el que constantemente se comparan los datos recolectados para realizar las tareas de mantenimiento.

En el caso del filtro de aire al alcanzar el valor de -0.7 psi se debe programar el cambio, el filtro de aceite y el aceite, se debe cambiar cuando es indicado en el análisis de aceite, el separador de aceite cuando la presión diferencial alcanza los 14 psi, la válvula termostática se debe cambiar cuando se determina que no cumple con su función, debajo de los 40 °C debe estar cerrada, se tiene que apreciar diferencia de temperatura en la entrada y salida de la

misma, y sobre los 40°C debe igualar las temperaturas de su entrada y salida al estar abierta, los cojinetes del motor principal se cambian cuando alcanzan el valor de 30 dB.

Tabla VI. **Valores de alarma**

<b>Parte</b>	<b>Valor</b>
Filtro de aire	-0.7 psi
Filtros de aceite	Análisis de aceite
Aceite	Análisis de aceite
Separador de aceite	14 psi
Válvula termostática	Temperatura >40°C
Cojinetes del motor principal	30 dB

Fuente: elaboración propia.

Con todos los datos que se han expuesto anteriormente y con base en la norma ISO 17359 se propone el plan de mantenimiento predictivo que contiene las variables que se monitorean, las frecuencias a las que se toman los datos y se comparan con los valores de alarma para programar las actividades de mantenimiento correspondiente de cada repuesto. En la tabla VI se muestran estos datos que se relacionan a cada repuesto.

Tabla VII. Plan de mantenimiento predictivo

Parte	Valor Alarma	Tarea	Frecuencia	Actividad
Filtro de aire	-0.7 psi	Monitoreo de presión diferencial	Constante	Cambio de filtro de aire
Filtros de aceite	Análisis de aceite	Análisis de aceite	2000 horas	Cambio de filtros de aceite
Aceite	Análisis de aceite	Análisis de aceite	2000 horas	Cambio de aceite
Separador de aceite	14 psi	Monitoreo de presión diferencial	Constante	Cambio de separador de aceite
Válvula termostática	Temperatura >40°C	Termografía	Mensual	Cambio de válvula termostática
Cojinetes del motor principal	30 dB	Monitoreo de vibraciones	Constante	Cambio de cojinetes
Todas	Desviación	Inspección V.O.S.O	Diario	Limpieza, aviso

Fuente: elaboración propia.

Con las actividades descritas en la tabla VII se aplican las tareas de mantenimiento predictivo para monitorear la condición de cada parte, con lo que se programa oportunamente cada actividad de mantenimiento, asegurando la operación de los compresores eficientemente. Con esto se alcanzan los beneficios reduciendo costos de operación y el impacto ambiental por el mantenimiento realizado.

## **4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

A continuación, se detallan los resultados obtenidos de los análisis de datos y la comparación del plan de mantenimiento preventivo con el plan, incluyendo tareas de monitoreo de la condición por medio del mantenimiento predictivo de los compresores de aire.

### **4.1. Resultados del análisis de los factores que afectan la operación de los compresores**

En los análisis realizados en el capítulo 2 se puede apreciar la influencia que tiene la temperatura ambiente en la operación del compresor, provocando que suba la temperatura de salida del compresor, que es una variable crítica que puede hacer parar el compresor como protección por la alta temperatura.

La alta temperatura en la admisión de aire también provoca que los compresores pierdan eficiencia al hacer que consuman más energía para poder comprimir el aire para su uso en la planta, lo que también reduce el tiempo de vida de los lubricantes.

En el apartado 3.1 se muestran los efectos del aire residual sobre la eficiencia de los compresores, porque además de subir la temperatura a la salida del compresor, como se muestra en la figura 23, que sigue la tendencia de la temperatura en la admisión, esto provoca mayor consumo de energía, lo que al final es más gasto por la generación del aire comprimido.

Como se menciona en el apartado 3.2, las diferentes acciones aseguran que el compresor se mantenga monitoreado y en las mejores condiciones para la operación y se pueden realizar otras acciones como tomas de aire fresco o preenfriamiento del aire en la admisión si fuera necesario.

Al aplicar el plan de mantenimiento predictivo con base en la norma ISO 17359 se asegura el monitoreo de la condición del compresor, para programar el mantenimiento de este oportunamente, lo que genera ahorro respecto al plan de mantenimiento preventivo.

Además de los beneficios que se tienen para la empresa por el mantenimiento del compresor y los gastos durante la generación de aire comprimido, también se puede tomar como base para aplicar de manera sistemática el mantenimiento predictivo en otras áreas de la empresa, por medio de lo establecido en la norma ISO 17359, como se muestra en el apartado 3.3.

#### **4.2. Comparación de los planes de mantenimiento preventivo con los planes incluyendo mantenimiento predictivo**

El mantenimiento menor está diseñado según el fabricante en condiciones normales de operación detalladas en el anexo 4, para realizarlo cada 4,000 horas incluye cambio de cartucho de filtro de aire, cambio de elemento filtrante del panel eléctrico, comprobación de lecturas de presión y temperatura, limpieza de los radiadores y ventilador, limpieza de los motores eléctricos, comprobación de limpieza de la línea de barrido y comprobación de la válvula solenoide de venteo.

El mantenimiento mayor se realiza cada 8,000 horas, además de lo incluido en el mantenimiento menor, se incluye cambio de aceite y filtros de aceite y cambio del elemento separador de mismo.

En el plan de mantenimiento preventivo que se ha estado realizando por recomendaciones del proveedor, además de lo contenido en el plan propuesto al inicio, como se ve en la figura 19 del capítulo 2, también se cambian los filtros de aire cada 2,000 horas y los filtros de aceite cada 4,000 horas. A continuación, en el apartado 4.3, se comparan los costos por el mantenimiento y las diferencias en los planes de mantenimiento.

Con el plan de mantenimiento predictivo se hacen los cambios del filtro de aire según la saturación del elemento, por medio del valor de la presión diferencial que se debe cambiar al llegar al valor de -0.7 psi, por lo que al menos se usan durante las 4000 horas para los que están diseñados. Al igual que el elemento separador de aceite se debe cambiar al llegar a la presión diferencial de 14 psi, y además se debe ver el estado en el que se encuentra en cada cambio para verificar si es necesario reemplazarlo.

El cambio de filtros de aceite y del aceite se puede hacer según los informes del análisis de aceite, ya que de esta forma se monitorea la condición de estos, y se puede hacer el cambio oportuno, ya que por diferentes problemas que ocasionan acarreo de aceite siempre se debe reponer aceite para mantener el nivel adecuado para la operación.

En resumen, en cuanto al trabajo de mantenimiento por el cambio de repuestos se reduce como se muestra la diferencia de actividades entre la tabla VI que contiene 5 actividades y la tabla VII que solo tiene 2 actividades, ocupando menos tiempo de los trabajadores y generando menos paros por mantenimiento.

En cuanto al impacto ambiental de la misma forma se reduce, ya que son menos desechos los que se generan al utilizar al máximo los repuestos, reduciendo la cantidad que se usa en estas tareas.

Mediante el monitoreo de la condición del compresor se conoce el momento oportuno para programar las tareas de mantenimiento, y de ser necesario se pueden justificar algunas acciones para no incrementar el consumo de energía, evitando alta temperatura en la admisión de aire.

La empresa obtiene la reducción de costos por el mantenimiento al ocupar menos mano de obra y menos repuestos utilizados, y se reduce el costo como se muestra en el siguiente apartado.

#### **4.3. Comparación de costos**

Esta comparación se hizo tomando en cuenta los mantenimientos que se realizan en un año de servicio, para poder ver las diferencias entre cada plan de mantenimiento.

Tabla VIII. **Detalle de mantenimiento preventivo**

#### **Plan mantenimiento preventivo**

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
1	Mantenimiento menor	Q 8,756.04
1	Mantenimiento mayor	Q 60,749.95
2	Cambio filtro aire	Q 8,555.96
1	Cambio filtros aceite	Q 4,478.06
	<b>Total año</b>	<b>Q 82,540.00</b>

Fuente: elaboración propia.

Al aplicar el plan de mantenimiento predictivo se reducen los cambios de filtros de aire y de aceite adicionales, con lo que el costo de mantenimiento anual del compresor 4 disminuye, estos no son costos reales, se cambiaron para no mostrarlos por confidencialidad, pero se mantiene la proporción respecto al costo anual. La diferencia entre el costo anual del mantenimiento preventivo (Q. 82,540.00) respecto al mantenimiento predictivo (Q. 69,505.98) es de Q. 13,034.02, que significa una disminución del 16 % del costo anual.

Si se logra prolongar el uso de estos repuestos se logra aumentar la cantidad de ahorro, por lo que se debe mantener el monitoreo para conocer la condición de este compresor de aire.

Tabla IX. **Detalle de mantenimiento predictivo**

**Plan mantenimiento predictivo**

Cantidad	Descripción	Costo	
1	Mantenimiento menor	Q	8,756.04
1	Mantenimiento mayor	Q	60,749.95
	Total año	Q	69,505.98

Fuente: elaboración propia.

Al aplicar el plan de mantenimiento predictivo se pueden dejar de hacer los cambios de filtros anticipados, con lo que se logra el ahorro antes mencionado, y se mantiene monitoreada la condición del compresor, para poder programar el cambio de estos repuestos.

#### **4.4. Beneficios que se obtienen al implementar el plan de mantenimiento predictivo**

Al realizar el mantenimiento predictivo se tiene como principal beneficio que se conoce la condición en que están operando los compresores, además que se pueden programar las tareas de mantenimiento con base en la condición de los repuestos y no del tiempo que llevan instalados o trabajando.

Al hacer el uso durante el tiempo completo de los repuestos como lo ofrecieron al comprar este compresor se puede reducir el uso de filtros de aire al menos a la mitad, ya que están diseñados para usarse 4,000 horas, pero se han cambiado cada 2,000 horas.

El cambio de aceite puede hacerse al determinar el cambio por medio de los resultados de los análisis de aceite, ya que se analizan las propiedades del aceite que se tiene en uso, y durante la operación se va reponiendo el aceite que se consume por acarreo durante la operación, como ha pasado por fallas en el separador de aceite y los componentes relacionados.

Por el monitoreo de las vibraciones del motor principal se asegura la eficacia de la lubricación, así como se determina la condición de los cojinetes de este motor, con lo que se puede determinar si ocurre alguna falla y si se deben cambiar por sobrepasar el nivel aceptable.

La toma de las termografías se realizará una vez al mes, para complementar el plan de termografía que se realiza en la planta, como se ve en la termografía de la válvula termostática (ver apéndice 2) que debe abrirse a 40°C.

Por eso el plan de mantenimiento predictivo propuesto se detalla a continuación con el nombre de cada tarea y la frecuencia o el intervalo de horas de uso con el que debe realizarse para monitorear la condición de los compresores y programar las tareas necesarias para su mantenimiento. Como se menciona en los apartados 4.2 y 4.3, por la aplicación del mantenimiento predictivo se obtienen beneficios para el área de mantenimiento, para la empresa y para el ambiente.

En cuanto al mantenimiento, se dejan de usar 2 filtros de aire y 1 juego de filtros de aceite, ya que no hay necesidad de hacer los cambios, con lo que además del costo de los repuestos, se evita todo el trabajo administrativo para tener disponibles los repuestos, se reduce el tiempo de paro del compresor para mantenimiento, todo esto en vez de hacerlo 5 veces se hace solo 2 veces durante el año, lo que significa un ahorro del 60 % en todas estas actividades.

Lo mismo aplica para el impacto ambiental por la reducción de desechos que se generan por el mantenimiento del compresor, en cuanto al uso de filtros de aire se usan 2 cada año en vez de 4, como se hacía con los otros cambios y solo 1 filtro de aceite en vez de 2 al año, lo que significa 50 % de reducción del uso de filtros de aire y de aceite. Como se compara en el apartado 4.3, al evitar usar estos repuestos de más se tiene una reducción en el costo anual de 16 % por el mantenimiento del compresor. Además de los ahorros que se pueden tener al mantener la temperatura de admisión más cerca de 20°C de los valores presentados en el anexo 4, se logra un ahorro de USD 2,720 al año, como se muestra en el apartado 3.1, al comparar el consumo de energía por la diferencia de la temperatura del aire de admisión.

## **4.5. Discusión de resultados**

En este apartado se discuten los resultados por medio del análisis interno, evaluando las limitaciones durante la investigación y los efectos en los resultados, después en el análisis externo se evalúa la generalización de los resultados para otras empresas o industrias, y al final en la integración la comparación con los antecedentes de la investigación. La coherencia de la investigación se muestra en el apéndice 3.

### **4.5.1. Análisis interno**

Al analizar los factores que afectan el funcionamiento de los compresores de aire se encontró que la evaluación de la saturación del filtro de aire por observación podía ser subjetiva, ya que no se lograba hacer una comparación contra algún estándar, por lo que era una variable cualitativa que solo evaluaba la suciedad que se percibía en el filtro para determinar la saturación de este, con la instalación del sensor de presión diferencial en la admisión de aire esta variable cambió a ser cuantitativa, y con el registro de estos valores se mantiene monitoreada constantemente por medio del control del compresor (ver figura 31). Esto facilita el monitoreo y la comparación contra el valor de alarma, por lo que es de gran ayuda para aplicar el mantenimiento predictivo.

Se debe monitorear constantemente que no se obstruya el paso de aire fresco hacia los compresores, por lo que se delimitó el área que debe mantenerse despejada por medio de la señalización del piso alrededor de los compresores (ver figura 27), ya que por costumbre se ocupaba esta área con tarimas, por lo que se debe seguir recordando para que no lo hagan. Por eso se ha tenido que estar recordando a los operadores de los montacargas que dejen libre el área haciendo ver la importancia de mantener despejada el área señalizada.

Respecto al efecto de la temperatura del aire residual en muestra en el apartado 3.1, hay efectos que se tienen por el incremento de la temperatura en el aire de admisión al no extraer del área, ya que afecta la eficiencia del compresor de aire al aumentar el consume de energía. Esto es una oportunidad para invertir lo que se gasta en el exceso de consumo de energía, lo que además hace que los compresores trabajen en mejores condiciones. Todos los datos acerca de la operación del compresor se muestran en el anexo 5, ya que pueden servir de referencia sobre las prestaciones de los compresores de aire.

La aplicación del mantenimiento predictivo se realiza con base en la metodología de la norma ISO 17359 que sirve como guía para los pasos a realizar y asegura la secuencia lógica para la implementación, lo que puede aplicarse a los demás compresores y otras áreas de la empresa (ver tabla V). Por medio de la información obtenida se conoce la condición del compresor y se programan las actividades de mantenimiento, por lo que se obtienen beneficios como se muestra en el apartado 4.4.

#### **4.5.2. Análisis externo**

Es importante que se conozcan las condiciones y los límites de diseño de las máquinas (ver anexo 4) para tomarlos como referencia en las instalaciones que se hagan en cualquier industria.

Se debe realizar el análisis de los costos y los beneficios que se pueden obtener al aplicar mantenimiento predictivo para poder determinar si es conveniente utilizarlo en otras aplicaciones tomando en cuenta los costos por las diferentes estrategias en mantenimiento.

Así como se obtienen beneficios en esta investigación, además de aplicarlos a otras áreas de la empresa, se puede hacer en cualquier empresa que utilice compresores de aire, e incluso para otro tipo de máquinas, ya que la norma ISO 17359 no se limita a los compresores de aire pues proporciona las guías para la gestión del mantenimiento predictivo por el monitoreo de condición de los equipos y aplica para todas las máquinas.

#### **4.5.3. Integración**

Se comprueba lo que dijo Ballesteros (2018): entre el 40 % y el 60 % de las tareas deben ser de mantenimiento predictivo para reducir los costos por el monitoreo de la condición de los equipos. El mantenimiento predictivo es mucho más eficiente, como se muestra en los resultados de esta investigación, se reduce la mano de obra de mantenimiento preventivo al reducir la cantidad de cambios de repuestos en un 60 %, como se muestra en el apartado 4.4. Además se logra la reducción del 16 % en el costo anual, como se detalla en el apartado 4.3.

La eficiencia de los compresores se ve afectada por el incremento de la temperatura de admisión, que puede ser por diferentes causas, según Delgado (2014), como el cumplimiento del mantenimiento, la temperatura ambiental, contaminación y otros. En esta investigación, en el apartado 3.1, se encontró que hay una diferencia de USD 2,720 al año por la diferencia de la temperatura a la que trabaja el compresor.

Las estrategias de mantenimiento se comparan según las variables del costo, riesgo o beneficio, lo que ayuda en la toma de decisiones basadas en este análisis, como lo mostró Olsen (2017), y al hacer esta comparación con los datos recolectados se determinó un ahorro del 16 % del costo por realizar el

mantenimiento predictivo en los compresores de aire, como se muestra en el apartado 4.3 de esta investigación.

Para asegurar el mejor rendimiento energético, se debe evitar que los compresores trabajen a temperaturas elevadas, según Guo, Ma, Zhangy Liu (2017) el consumo de energía se reduce 0.65 % por cada 1 °C que baja la temperatura del aire de admisión y, como se comprobó, el ahorro que se menciona en el apartado 3.1 es con base en los datos del compresor trabajando con la temperatura del aire de admisión en promedio de 23.2 °C cuando es más eficiente que cuando trabaja en promedio de 33.0 °C. En esta investigación el porcentaje de reducción es del 0.41 % por cada 1°C. El ahorro por bajar 9.8 °C es de USD 2,720 del total anual de USD 67,280.

Al realizar los análisis de aceite se deben establecer objetivos alcanzables como menciona Neicamp (2019), por medio del seguimiento y análisis de los ahorros, como se muestra en el apartado 4.3, ya que el cambio de los repuestos y el aceite se hace con base en la condición que se muestra en los resultados de este análisis, por lo que se asegura la operación en las mejores condiciones con la calidad adecuada del aceite.



## CONCLUSIONES

1. Se identificaron los factores que afectan el funcionamiento de los compresores en el apartado 2.2, siendo estos la saturación del filtro de aire y contaminación ambiental. Las dos anteriores incrementan la temperatura de admisión (ver apartado 2.5), y las temperaturas: de admisión, de salida de aire comprimido, residual, pueden afectar la temperatura de admisión sino se extrae del área (ver apartados 2.5 y 3.1). El consumo de energía se incrementa como se detalla en el apartado 3.1 y en la siguiente conclusión.
2. El efecto que provoca el aire residual que no se extrae del área es el incremento de la temperatura del aire aspirado en la admisión del compresor, en el apartado 3.1 se determinó que el incremento de la temperatura del aire de admisión en 9.8 °C incrementa el costo de consumo de energía en USD 2,720 anualmente, lo que afecta la eficiencia de operación.
3. Entre los beneficios que se detallan en el apartado 4.4, el cambio de repuestos se reduce 60 %, se monitorea la condición del compresor, por la reducción del uso de filtros de aire y de aceite el impacto ambiental se reduce en 50 %, en el apartado 4.3 el costo anual por el mantenimiento del compresor se reduce en 16 %, el apartado 3.1 presenta el ahorro de energía en USD 2720 anualmente.
4. Se diseñó un plan de mantenimiento predictivo para los compresores de aire de la fábrica de Samboro, detallado en el apartado 3.3, por medio del

cual se programan las actividades de mantenimiento según la condición con base en la norma ISO 17359.

## RECOMENDACIONES

1. Los compresores se deben instalar y mantener en un área que ofrezca el mejor ambiente según el diseño de los fabricantes y, si es necesario hacer tomas de aire fresco hacia la admisión de los compresores, a los encargados de mantenimiento de esta empresa y de otras que usen compresores de aire se les sugiere esto.
2. A los encargados de la operación de compresores de aire: extraer el aire residual del área para asegurar que no recircule hacia la admisión subiendo la temperatura del aire en esta, además de tener un potencial de ahorro si se recupera el calor generado y se usa en otra aplicación en la empresa, con lo que además de mejorar la operación de los compresores se generan ahorros.
3. Al personal de mantenimiento y gerencia en la industria se les indica aplicar tareas de mantenimiento predictivo porque, además de generar ahorros, también ofrecen la oportunidad de conocer la condición de operación de los equipos, que siendo monitoreada adecuadamente permite programar el cambio de repuestos oportunamente.
4. A las empresas interesadas: analizar la posibilidad de implementar planes de mantenimiento predictivo con la guía de la norma ISO 17359, para obtener beneficios económicos.



## REFERENCIAS

1. Aguilar, J.; Torres, R. y Magaña, D. (2010). *Análisis de modos de falla, efectos y criticidad (AMFEC) para la planeación del mantenimiento empleando criterios de riesgo y confiabilidad*. (Tesis de Ingeniería Química). Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos, México.
2. Altmann, C. (2010). *El mantenimiento y la eficiencia energética*. Montevideo, Uruguay. Recuperado de <http://www.mantenimientomundial.com/notas/eficiencia-energetica.pdf>
3. Atlas Copco. (2018). *¿Qué es el aire comprimido?* Madrid, España. Recuperado de <https://www.atlascopco.com/es-es/compressors/air-compressor-blog>
4. Atlas Copco. (2019). *Aplicaciones de aire comprimido: ¿dónde se usa el aire comprimido?* Quito, Ecuador. Recuperado de <https://www.atlascopco.com/es-ec/compressors/wiki/compressed-air-articles/compressed-air-applications>
5. Ayau, M. (2017). *Construyendo una historia desde el piso*. First Tuesday UFM. Guatemala, Guatemala: Universidad Francisco Marroquín. Recuperado de <https://newmedia.ufm.edu/coleccion/first-tuesday-ufm/first-tuesday-construyendo-una-historia-desde-el-piso/>

6. Ballesteros, F. (2018). *La estrategia predictiva en el mantenimiento 4.0*. Madrid, España: Preditec. Recuperado de <http://www.reporteroindustrial.com/temas/La-estrategia-predictiva-en-el-mantenimiento-40+127360>
7. Compressed Air y Gas Institute. (2012). *Working with compressed air / applications*. Cleveland, Ohio, Estados Unidos de América. Recuperado de <https://www.cagi.org/working-with-compressed-air/applications.aspx#!prettyPhoto>
8. Delgado, J. (2014). *Diseño del sistema de aire comprimido para la planta de autoabastecimiento de paneles de madera de la Fundación Techo Guatemala* (Tesis de Ingeniería Mecánica). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
9. Duffuaa, S.; Raouf, A. y Dixon, J. (2012). *Sistemas de mantenimiento*. México D.F., México: Limusa.
10. Escuela de Organización Industrial. (2012). *La industria cerámica en ecoinnovación en procesos industriales*. Madrid, España. Recuperado de [https://www.eoi.es/wiki/index.php/La\\_Industria\\_Cerámica\\_en\\_Ecoinnovación\\_en\\_procesos\\_industriales](https://www.eoi.es/wiki/index.php/La_Industria_Cerámica_en_Ecoinnovación_en_procesos_industriales)
11. García, S. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
12. Guo, D.; Ma, Z.; Zhang, J. y Liu, M. (2017). Energy impact of air pre-cooling on screw air compressor. *Procedia Engineering*, (205), 937-944.

Recuperado de  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817347033>

13. International Organization for Standardization. (2014). *ISO 5011:2014 Inlet air cleaning equipment for internal combustion engines and compressors — Performance testing*. Ginebra, Suiza.
14. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 17359:2018 Condition monitoring and diagnostics of machines*. Ginebra, Suiza.
15. Kaeser México. (2017). *¿Cómo funciona un compresor de tornillo?* México D.F., México. Recuperado de <http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2017/06/08/como-funciona-un-compresor-de-tornillo/>
16. Morales, C. (2018). Samboro, una marca que da integralidad al piso. *Revista Gerencia*. (vol. 565). Recuperado de <https://www.revistagerencia.com.gt/samboro-una-marca-que-da-integralidad-al-piso/>
17. Mosquera, G.; Piedra, M. y Armas, R. (2001). *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*. (Tesis de Ingeniería Mecánica). Centro de Altos Estudios Gerenciales del Instituto Superior de Investigación y Desarrollo, Venezuela.
18. Mundo Compresor. (2019). *Diferentes tipos de compresores*. Madrid, España: Dujos Industrial Trade, S.L. Recuperado de

<https://www.mundocompresor.com/articulos-tecnicos/diferentes-tipos-compresores>

19. Neicamp, H. (2019). *Gestión efectiva del análisis de fluidos: 10 pasos para obtener la rentabilidad de la inversión*. Indianápolis, Indiana, Estados Unidos de América: Uptime. Recuperado de <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/managing-effective-fluid-analysis-10-steps-to-realize-your-return-on-invest>
20. Olarte, W.; Botero, M. y Cañón, B. (2010). *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria*. Scientia et Technica. (45) pp. 223-226.
21. Olsen, F. (2017). *Assessment method for review of existing maintenance strategies based on reliability, availability, risk, and cost parameters*. Stavanger, Noruega: Universidad de Stavanger.
22. Rey, F. (2014). *Elaboración y optimización de un plan de mantenimiento preventivo*. Técnica industrial., A. XVI vol. (308), 30-41.
23. Samboro. (2019). *¿Quiénes somos?* Ciudad de Guatemala, Guatemala. Recuperado de <https://www.samboro.com/es/empresa>
24. Società Anonima Cooperativa Meccanici Imola. (2004). *Tecnología cerámica aplicada vol. 2*. Castellón de la Plana, España: Faenza Editrice Ibérica.
25. Tavares, L. (2000). *Administración moderna del mantenimiento*. Río de Janeiro, Brasil: Novo Polo.

26. Toapanta, O. (2009). *Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores recíprocos y de tornillo*. (Tesis de Ingeniería Mecánica). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
  
27. Valbor Soluciones. (2019). *¿Cómo se clasifican los tipos de fallas en mantenimiento?* Cali, Colombia. Recuperado de <https://www.valborsoluciones.com/mantenimiento/como-se-clasifican-las-fallas>



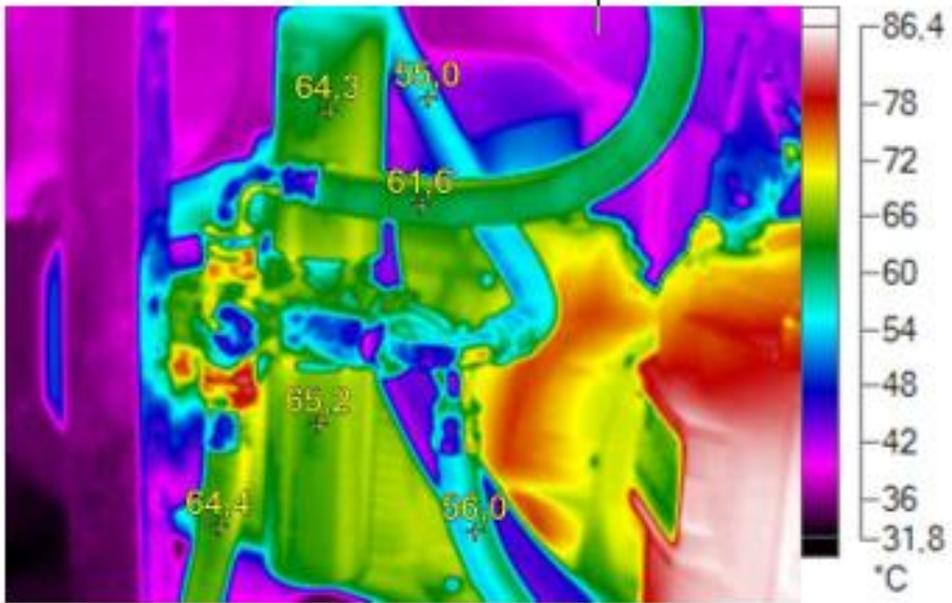
## APÉNDICES

### Apéndice 1. Muestra de hoja electrónica de Google Drive para toma de datos

A	B	C	D	E	F	G
Fecha	Cód. Equipo	Desc. Equipo	Temperatura	Nivel de Aceite	Horome	Presión salida PSI
1/3/19	COMP1	K Compresor de Aire 1 Gardner Denver			265500	
1/3/19	COMP2	K Compresor de Aire 2 Gardner Denver			196925	
1/3/19	COMP3	K Compresor de Aire 3 Kaeser	175°F	A nivel	63462	116
1/3/19	COMP4	K Compresor de Aire 4 Atlas Copco	65°C	A nivel	21761	113
1/3/19	COMP5	K Compresor de Aire 5 Kaeser				
1/3/19	COMP6	K Compresor de Aire 6 Kaeser	163°F	A nivel	5521	114
1/3/19	SFCA1	K Secador de Aire Comprimido 1				

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Termografía realizada al compresor 4



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 3. Matriz de consistencia de sistematización de la investigación

**Diseño de un plan de mantenimiento predictivo aplicado a los compresores de aire para la fábrica de pisos, azulejos y fachaletas cerámicas de Samboro, S.A. basado en la norma ISO 17359**

Preguntas	Objetivos	Resultados	Conclusiones	Recomendaciones
¿Cómo se puede mejorar el funcionamiento de los compresores de aire de la fábrica de pisos, azulejos y fachaletas cerámicas de Samboro?	Diseñar un plan de mantenimiento predictivo para los compresores de aire de la fábrica de pisos, azulejos y fachaletas cerámicas de Samboro basado en la Norma ISO 17359.	Tareas para el plan de mantenimiento predictivo, influencia de la temperatura ambiente en la temperatura de salida, incremento de consumo de energía por el incremento de la temperatura ambiente. Monitoreo de la condición de los compresores en base a ISO 17359. El mantenimiento predictivo reduce costos.	Se diseñó un plan de mantenimiento predictivo para los compresores de aire de la fábrica de Samboro, se detalla en el apartado 3.3, por medio del cual se programan las actividades de mantenimiento según la condición basado en la Norma ISO 17359.	Se sugiere a las empresas interesadas que analicen la posibilidad de implementar planes de mantenimiento predictivo con la guía de la norma ISO 17359, para obtener beneficios económicos.
1. ¿Qué factores afectan el funcionamiento de los compresores?	1. Identificar los factores que afectan el funcionamiento de los compresores.	Incremento de la temperatura de salida por influencia de la temperatura ambiente, y mayor consumo de energía por lo mismo, reduciendo la eficiencia de operación. El aire residual que no se extrae del área eleva en el aire en la admisión.	1. Se identificaron los factores que afectan el funcionamiento de los compresores, en el apartado 2.2, siendo estos la saturación del filtro de aire, contaminación ambiental, las dos anteriores incrementan la temperatura de admisión (Ver apartado 2.5); y las temperaturas de admisión, de salida de aire comprimido, residual, esta puede afectar la temperatura de admisión sino se extrae del área (Ver apartados 2.5 y 3.1) y el consumo de energía se incrementa como se detalla en el apartado 3.1 y en la siguiente conclusión.	1. Los compresores se deben de instalar y mantener en un área que ofrezca el mejor ambiente según el diseño de los fabricantes y si es necesario hacer tomas de aire fresco hacia la admisión de los compresores, a los encargados de mantenimiento de esta empresa y de otras que usen compresores de aire se les sugiere esto.
2. ¿Cómo se puede determinar si el incremento de la temperatura del aire residual afecta la eficiencia de estos?	2. Analizar el efecto del aire residual de los compresores al incrementar la temperatura en la admisión y cómo afecta la eficiencia de estos.	El aire residual que no se extrae del área hace que se incremente la temperatura del aire en la admisión y hace que se incremente el consumo de energía del compresor. Existe potencial de ahorro si se implementa recuperación de calor del aire residual.	2. El efecto que provoca el aire residual que no se extrae del área es el incremento de la temperatura del aire aspirado en la admisión del compresor, en el apartado 3.1 se determinó que el incremento de la temperatura del aire de admisión en 9.8°C incrementa el costo de consumo de energía en \$2,720 anualmente lo que se afecta la eficiencia de operación.	2. Se aconseja a los encargados de la operación de compresores de aire extraer el aire residual del área para asegurar que no se recicle hacia la admisión subiendo la temperatura del aire en la admisión, además de tener un potencial de ahorro si se recupera el calor generado y se usa en otra aplicación en la empresa. Con lo que además de mejorar la operación de los compresores se generan ahorros.
3. ¿Cómo se pueden mejorar las condiciones de trabajo de los compresores en un ambiente más adecuado para su operación óptima?	3. Determinar los beneficios que se logran con el mantenimiento predictivo de los compresores de aire en base a la norma ISO 17359.	Conocer la condición en la que opera el compresor y cambios de repuestos en base a esto y no por tiempo de uso, reducción de cambios de filtros ahorro en tiempo y dinero. Además que se evitan paros por mantenimiento innecesario, costo de mano de obra, y se reduce el impacto ambiental.	3. Entrar los beneficios que se detallan en el apartado 4.4, el cambio de repuestos se reduce 60%, se monitorea la condición del compresor, por la reducción del uso de filtros de aire y de aceite, el impacto ambiental se reduce en 50%, en el apartado 4.3 el costo anual por el mantenimiento del compresor se reduce en 16%, el apartado 3.1 presenta el ahorro de energía en \$2720 anualmente.	3. Al personal de mantenimiento y gerencia en la industria se les indica a aplicar tareas de mantenimiento predictivo por que además de generar ahorros también ofrecen la oportunidad de conocer la condición de operación de los equipos, que siendo monitoreada adecuadamente permite programar el cambio de repuestos oportunamente.

Fuente: elaboración propia.



## ANEXOS

### Anexo 1. Muestra de datos descargados desde control de compresor

	A	B
1	Machine Time <input type="text"/>	Value (F) <input type="text"/>
3701	1/03/2019 08:19	74.48
3702	1/03/2019 08:39	73.04002197
3703	1/03/2019 08:49	74.29998901
3704	1/03/2019 09:09	75.38
3705	1/03/2019 09:34	76.46001099
3706	1/03/2019 09:44	77.71997803
3707	1/03/2019 10:14	78.98
3708	1/03/2019 10:34	80.59998901
3709	1/03/2019 10:49	82.04002197
3710	1/03/2019 10:59	83.48
3711	1/03/2019 11:09	82.21997803
3712	1/03/2019 11:29	84.74002197
3713	1/03/2019 11:39	83.66001099
3714	1/03/2019 11:44	85.46001099

Fuente: Samboro, S.A. (2019). *MeasurementsPoints.zip*

## Anexo 2. Alerta por correo electrónico por alta temperatura en salida del elemento del compresor 4

**\*\*Parada general\*\* Salida del elemento-SAMBORO-COMPRESORES-GA75P\_12-API622903**

Recibidos x

mié., 6 feb. 8:41

SMARTLINK <no-reply@smartlink.allascope.com>  
para mí

**Información de evento**

Nombre del cliente	SAMBORO
Nombre del sitio	COMPRESORES
Centro de clientes	AC Mexico
Dispositivo causal	GA75P_12
Número de serie	API622903
Tipo de evento	Parada general
Sensor causante	Salida del elemento
Suceso de tiempo de máquina	8/02/2019 11:40
Suceso de tiempo de usuario	8/02/2019 08:40
Notification group	@SmartLinkNotificationGroup#1
Sitio web de SMARTLINK	

**Máquina de información**

Parámetro	GA75P_12	Unit
Tipo de producto	API622903	
Número de serie	Stopped	
Estado operativo	Isolated	
Estado de integración		
Estado de alarma		
Estado de alarma		
Salida del compresor	Shutdown	
Aire Ambiente	7.31	bar
Salida del elemento	22.80	C
Lado No acc. motor	73.20	C
Lado No Acc. Motor	23.00	d5c
Caudal salida calculado	31.00	d5m
Potencia calculada	0	ls
Horas de marcha	0	kW
Horas hasta el próximo servicio / Se ha superado el tiempo previsto	21,213	h
Horas de marcha hasta el próximo servicio / Se ha superado el número previsto de horas de marcha	20,103	h
Horas en carga	982	h
Arranques de motor	20,738	h
Relé de carga	148	
Siguiente nivel de servicio de RHT	37,525	
Siguiente nivel de servicio de RH	D	
Nivel de servicio de RTH	D	
Nivel de servicio de RH		
Device Alarm	1	
UD Filter	0	

Fuente: Samboro, S.A. (2019). Correo electrónico de la empresa.

### Anexo 3. Resultados de análisis de aceite del compresor 4

**LubeWatch®**  
Oil Analysis Program

**Reporte de Análisis de Lubricante**  
North America: +1-866-341-0487  
Central America: +1-317-808-0948

0	1	2	3	4
NORMAL	ANORMAL			CRITICO

Severidad General del Reporte

Información de Cuenta	Información del Componente	Información de muestra
Número de cuenta: LUB340-0004-0000 Nombre de Compañía: SAMBORO Contacto: Dirección:  Teléfono:	ID de Componente: COMPRESOR 4 ID Secundaria: Filtro de tipo de componente: COMPRESOR Fabricante: ATLAS COPCO Modelo: GA75+ Aplicación: PLANT/INDUSTRIAL Capacidad de sumidero: 6 galón	Número de Huella: 00009411058 Número de laboratorio: G-495116 Localización de Laboratorio: Guatemala City Analista de Datos: BPV Tomada: 25-sep-2019 Recibido: 02-oct-2019 Completado: 03-oct-2019
Información de filtro	Información Misceláneo	Información del Producto
Tipo de filtro: OTHER Índice de Micrón: 4		Fabricante del Producto: ATLAS COPCO Nombre del Producto: ROTO EXTEND SYN Grado de Viscosidad: ISO 46
Comentarios	Los datos marcados no requieren acción de mantenimiento en forma urgente. Se sugiere observar la tendencia de la condición del equipo y del lubricante. El NUMERO ÁCIDO se encuentra LEVEMENTE ALTO; Por favor envíe una muestra de lubricante nuevo para usar como REFERENCIA de BASE; Favor informar el tipo de compresor: de tornillo, centrífugo, de pistón, etc. Así se compara contra la matriz adecuada para el diagnóstico.	

Muestra #	Metales de Desgaste (ppm)										Metals Contaminantes			Fuente de Varios Metales (ppm)					Metales Aditivos (ppm)					
	Hierro	Cromo	Níquel	Aluminio	Cobre	Plomo	Estaño	Cadmio	Plata	Vanadio	Silice	Sodio	Potasio	Titanio	Molibdeno	Antimonio	Manganeso	Litio	Boro	Magnesio	Calcio	Bario	Fósforo	Zinc
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	42
2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	20

Muestra #	Información de muestra							Contaminantes			Propiedades de líquido					
	Fecha de toma	Fecha de recibo	Tiempo de Aceite h	Tiempo de unidad h	Cambio de Aceite	Aceite Agregado galón	Cambio de Filtro	Dilución de Combustible % de Vol	Hollin % de Vol	Agua % de Vol	Viscosidad 40 °C cSt	Viscosidad 100 °C cSt	Número de Ácido mg KOH/g	No. Básico ASTM4739 mg KOH/g	Oxidación abs/cm	Nitración abs/0.1 mm
1	04-mar-2019	04-abr-2019	6000	22555	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	47.3		0.35		6	4
2	25-sep-2019	02-oct-2019	2070	26248	Unk	0	Unk			<.1 - FTIR	46.5		0.25		5	4

Muestra #	Conteo de Partículas (partículas/mL)									Método de prueba
	Código ISO Basado en 4/6/14	> 4 µm	> 6 µm	> 10 µm	> 14 µm	> 21 µm	> 38 µm	> 70 µm	> 100 µm	
1	//									
2	//									

Los comentarios son un consultivo y se basan en el supuesto de que la muestra y los datos presentados son válidos. Lubricante o ausencia de tiempo del componente limita la evaluación. Ninguna garantía expresada o implícita. La incertidumbre de la medición está disponible bajo solicitud.

Comentarios Históricos	1	Los datos marcados no requieren acción de mantenimiento en forma urgente. Se sugiere observar la tendencia de la condición del equipo y del lubricante. Por favor envíe una muestra de lubricante nuevo para usar como REFERENCIA de BASE; Provea por favor la capacidad del colector de aceite (carter) de la unidad en la siguiente muestra;
------------------------	---	--

Fuente: Samboro, S.A. (2019). Correo electrónico de la empresa.

## Anexo 4. Condiciones de referencia y límites de operación del compresor 4

### Condiciones de referencia

Presión (absoluta) de entrada de aire	bar	1
Presión (absoluta) de entrada de aire	psi	14,5
Temperatura de entrada de aire	°C	20
Temperatura de entrada de aire	°F	68
Humedad relativa	%	0
Presión de trabajo		Consulte la sección Datos del compresor.

<b>En unidades refrigeradas por agua, también:</b>		
Temperatura de entrada del agua de refrigeración	°C	20
Temperatura de entrada del agua de refrigeración	°F	68

### Límites

Presión máxima de trabajo		Consulte la sección Datos del compresor.
Presión mínima de trabajo	bar(e)	4
Presión mínima de trabajo	psig	58
Temperatura de entrada máxima de aire	°C	46
Temperatura de entrada máxima de aire	°F	115
Temperatura ambiente mínima	°C	0
Temperatura ambiente mínima	°F	32

Fuente: Atlas Copco GA75+. (2020). *Manual de instrucciones*.

## Anexo 5. Datos del compresor 4

### GA 75+

		7,5 bar	8,5 bar	10 bar	13 bar	100 psi	125 psi	150 psi	175 psi
Frecuencia	Hz	50	50	50	50	60	60	60	60
Presión máxima (de descarga), unidades Workplace	bar(e)	7,5	8,5	10	13	7,4	9,1	10,8	12,5
Presión máxima (de descarga), unidades Workplace	psig	109	123	145	189	107	132	157	181
Presión máxima (de descarga), unidades Workplace Full-Feature	bar(e)	7,3	8,3	9,8	12,8	7,2	8,9	10,6	12,3
Presión máxima (de descarga), unidades Workplace Full-Feature	psig	106	120	142	186	104	129	154	178
Presión de trabajo de referencia	bar(e)	7	8	9,5	12,5	6,9	8,6	10,3	12

Continuación del anexo 5.

		<b>7,5 bar</b>	<b>8,5 bar</b>	<b>10 bar</b>	<b>13 bar</b>	<b>100 psi</b>	<b>125 psi</b>	<b>150 psi</b>	<b>175 psi</b>
Presión de trabajo de referencia	psig	102	116	138	181	100	125	150	175
Caída de presión sobre el secador, unidades Workplace Full-Feature	bar(e)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Caída de presión sobre el secador, unidades Workplace Full-Feature	psig	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63
Punto de ajuste de la válvula termostática	°C	40	40	40	60	40	40	40	60
Punto de ajuste de la válvula termostática	°F	104	104	104	140	104	104	104	140
Velocidad del eje del motor	r/min	2978	2978	2978	2978	3570	3570	3570	3570
Potencia nominal del motor	kW	75	75	75	75	75	75	75	75
Potencia nominal del motor	CV	100,6	100,6	100,6	100,6	100,6	100,6	100,6	100,6
Temperatura del aire en la válvula de salida, unidades Workplace	°C	27	27	27	27	27	27	27	27
Temperatura del aire en la válvula de salida, unidades Workplace	°F	81	81	81	81	81	81	81	81
Punto de rocío a presión, unidades Workplace Full-Feature	°C	3	3	3	3	3	3	3	3
Punto de rocío a presión, unidades Workplace Full-Feature	°F	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Temperatura del aire en la válvula de salida, unidades Workplace Full-Feature	°C	23	23	23	23	23	23	23	23
Temperatura del aire en la válvula de salida, unidades Workplace Full-Feature	°F	73	73	73	73	73	73	73	73
Consumo de energía del secador a plena carga, unidades Workplace Full-Feature	kW	2,4	2,4	1,4	1,4	2,6	2,6	1,6	1,6
Consumo de energía del secador a plena carga, unidades Workplace Full-Feature	CV	3,22	3,22	1,88	1,88	3,49	3,49	2,15	2,15
Consumo de energía del secador sin carga, unidades Workplace Full-Feature	kW	2,1	2,1	1,23	1,23	2,3	2,3	1,4	1,4

Continuación del anexo 5.

		7,5 bar	8,5 bar	10 bar	13 bar	100 psi	125 psi	150 psi	175 psi
Consumo de energía del secador sin carga, unidades Workplace Full-Feature	CV	2,82	2,82	1,65	1,65	3,08	3,08	1,88	1,88
Tipo de refrigerante, unidades Workplace Full-Feature		R410A	R410A	R410A	R410A	R410A	R410A	R410A	R410A
Cantidad de refrigerante, unidades Workplace Full-Feature	kg	1,1	1,1	0,83	0,83	1,3	1,3	1,05	1,05
Cantidad de refrigerante, unidades Workplace Full-Feature	lb	2,43	2,43	1,83	1,83	2,87	2,87	2,31	2,31
Consumo de agua de refrigeración (con una temperatura de entrada del agua inferior a 35 °C y un aumento de temperatura de 15 °C), unidades refrigeradas por agua	l/min	72	72	72	72	72	72	72	72
Consumo de agua de refrigeración (con una temperatura de entrada del agua inferior a 95 °F y un aumento de temperatura de 27 °F), unidades refrigeradas por agua	cfm	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54	2,54
Consumo de agua de refrigeración (con una temperatura de entrada del agua entre 35 y 40 °C y un aumento de temperatura de 10 °C), unidades refrigeradas por agua	l/min	108	108	108	108	108	108	108	108
Consumo de agua de refrigeración (con una temperatura de entrada del agua entre 95 y 104 °F y un aumento de temperatura de 18 °F), unidades refrigeradas por agua	cfm	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81	3,81
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por aire	l	25	25	25	25	25	25	25	25
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por aire	US gal	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60

Continuación del anexo 5.

		<b>7,5 bar</b>	<b>8,5 bar</b>	<b>10 bar</b>	<b>13 bar</b>	<b>100 psi</b>	<b>125 psi</b>	<b>150 psi</b>	<b>175 psi</b>
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por aire	Imp gal	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por agua	l	25	25	25	25	25	25	25	25
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por agua	US gal	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
Capacidad de aceite, unidades refrigeradas por agua	Imp gal	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50
Nivel de presión acústica (según ISO 2151 (2004))	dB(A)	73	73	73	73	73	73	73	73

Fuente: Atlas Copco GA75+. (2020). *Manual de instrucciones.*