



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO
PARA VARIADORES DE FRECUENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN
COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 kW**

Anael Juan Manuel Argueta Policarpio

Asesorado por el MSc. Ing. Jorge Enrique Mejía Morales

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO
PARA VARIADORES DE FRECUENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN
COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 kW**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANAEL JUAN MANUEL ARGUETA POLICARPIO
ASESORADO POR EL MSC. ING. JORGE ENRIQUE MEJÍA MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pèrez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carillo
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA VARIADORES DE FRECUENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 kW

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 28 de abril de 2014.


Anael Juan Mantre Argueta Policarpio

AGS-MIMPP-001-2019

Guatemala, 26 de febrero de 2019.

Director
Otto Fernando Andrino González
Escuela de **Ingeniería Eléctrica**
Facultad de Ingeniería
Su despacho.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Anael Juan Manuel Argueta Policarpio** con carné número **199910782**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a todos"



Maestro. Ing. **Jorge Enrique Mejía M.**
Asesor(a)

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

Maestra. Inga. **Sandra Ninett Ramirez F.**
Coordinadora de Ingeniería de Mantenimiento



Edgar Darío Álvarez Cotí
Maestro. Ing. **Edgar Darío Álvarez Cotí**
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZ.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



REF. EIME 28.2019.
21 DE MAYO 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y visto bueno del revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA VARIADORES DE FRECUENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 KW** presentado por el estudiante universitario; Anael Juan Manuel Argueta Policarpio, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andriano González
Director

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA VARIADORES DE FRECUENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS EN COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 kW**, presentado por el estudiante universitario: **Anael Juan Manuel Argueta Policarpio**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, Septiembre de 2019



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Mi madre** Ana María Policarpio, por ser mi apoyo incondicional, por su amor y comprensión, por confiar en mí y por sus consejos.
- Mi padre (q. e. p. d.)** Juan René Argueta, ejemplo de superación y perseverancia, gracias por cada una de sus anécdotas e historias que enriquecieron lo que hoy soy.
- Mis hijos** Manuel Argueta y Cesia Nálo. Aunque no han estado presentes en mi vida, que este logro sea de ejemplo de superación.
- Mi amada esposa** Nancy López, gracias por darme esa inspiración de seguir adelante, gracias por estar en mi vida y generar ese cambio.
- Mis hermanos** Ana Lucía y Ángel Argueta, gracias por su apoyo y estar en el trayecto de mi carrera.
- Mis abuelos** Antonieta Policarpio (q. e. p. d) y Olivia López, por su apoyo.
- Mis tíos y primos** Por su apoyo y cariño incondicional.

Mis amigos

A todos y cada uno de ellos por brindarme sus conocimientos y apoyo en el transcurso de mi carrera, por cada noche de desvelo y por su amistad.

AGRADECIMIENTOS A:

- | | |
|---|---|
| Guatemala | Mí querido país que me ha visto crecer y convertirme en un profesional. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ser mi casa de estudios, que me ha brindado la formación académica y profesional. Gracias a la gloriosa y tricentenaria universidad. |
| Facultad de Ingeniería | Por proporcionarme los conocimientos necesarios en toda mi formación académica. Siempre pondré a mi facultad en alto en cualquier parte del mundo donde esté. |
| Mis amigos de la facultad | Abner Castellanos, Alexis Bardales, Willian Colindres, Wuilmar Velàzquez, Andrés Recinos, Francisco Sologaistoa, Francisco Trujillo, Antonio Lucero (q. e. p. d.), Óscar Ramírez, Jorge Sandoval, Luis Piedrasanta y Jorge Mathamba, con quienes viví una gran experiencia, llena de horas de estudio, pero también en que pudimos compartir muchas aventuras y buenos momentos. Agradeceré siempre su apoyo y amistad. |

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Descripción.....	9
3.2. Formulación de preguntas	10
3.2.1. General.....	10
3.2.2. Específica 1	10
3.2.3. Específica 2	10
3.2.4. Específica 3	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	17
5.1. General.....	17
5.2. Específicos	17
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	19

7.	MARCO TEÓRICO	23
7.1.	Aire comprimido	23
7.1.1.	Aire atmosférico	23
7.1.2.	Resumen histórico.....	24
7.1.3.	Unidades	27
7.2.	Compresores.....	28
7.2.1.	Principio de funcionamiento	29
7.2.2.	Clasificación de compresores.....	35
7.2.2.1.	Compresores recíprocos	37
7.2.2.2.	Compresores de tornillo rotativo.....	39
7.2.2.3.	Control y regulación	41
	7.2.2.3.1. Control carga-vacío	42
	7.2.2.3.2. Control proporcional.....	43
	7.2.2.3.3. Control de velocidad variable.....	43
7.2.3.	Selección de compresores	44
	7.2.3.1. Análisis de demanda de aire	46
7.3.	Variadores de frecuencia en compresores.....	48
7.3.1.	Principio y funcionamiento.....	51
7.3.2.	Rectificador	51
7.3.3.	Bus de suavización	52
7.3.4.	Inversor PWM.....	52
7.3.5.	Aplicaciones de variadores de frecuencia en la industria.....	53
7.3.6.	Selección de un variador de frecuencia	55
7.4.	Motores	58
7.4.1.	Tipos de motores.....	58
7.4.2.	Motores asíncronos.....	59
7.4.3.	Clases de eficiencia en motores CA.....	59

	7.4.3.1.	Motores de eficiencia estándar	60
	7.4.3.2.	Motores de alta eficiencia	61
	7.4.3.3.	Motores eficiencia <i>premium</i>	62
7.4.4.		Normas aplicables a motores asíncronos.....	63
	7.4.4.1.	Normas NEMA.....	63
	7.4.4.2.	Normas IEC	64
	7.4.4.3.	Comparación entre las clasificaciones NEMA e IEC	64
7.5.		Mantenimiento	65
	7.5.1.	Tipos de mantenimiento	66
	7.5.2.	Mantenimiento preventivo.....	68
	7.5.3.	Criticidad de equipo	69
	7.5.4.	Mantenimiento de compresores.....	70
	7.5.5.	Mantenimiento de motores asíncronos.....	71
	7.5.6.	Mantenimiento de variadores.....	72
7.6.		Análisis de causa raíz como herramienta para mejorar la confiabilidad de un equipo.....	73
	7.6.1.	Confiabilidad.....	74
	7.6.2.	Disponibilidad	74
7.7.		Calidad de potencia.....	74
	7.7.1.	Armónicos.....	75
	7.7.2.	Parpadeo	76
	7.7.3.	Transitorio.....	77
	7.7.4.	Hueco de tensión.....	77
	7.7.5.	Desbalance.....	78
7.8.		Tierra física.....	78
	7.8.1.	Tipos de tierra física para variadores de frecuencia	79

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	81
9.	METODOLOGÍA	85
9.1.	Tipo de investigación.....	85
9.2.	Alcances de la investigación	85
9.3.	Diseño de investigación	85
9.4.	VARIABLES CUANTITATIVAS	86
9.5.	Indicadores.....	86
9.6.	Fases de estudios	88
9.6.1.	Selección de la muestra	88
9.6.2.	Recolección de datos	88
9.6.2.1.	Recolección de datos históricos	88
9.6.2.2.	Recolección de datos cuantitativos	89
9.6.3.	Análisis de datos cuantitativos	89
9.7.	Resultados esperados.....	89
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	91
10.1.	Gráfico de líneas	92
10.2.	Gráfico de dispersión	92
10.3.	Línea de tendencia.....	92
11.	CRONOGRAMA	95
12.	RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO.....	97
12.1.	Recursos.....	97
12.1.1.	Recurso humano	97
12.1.2.	Recurso material y equipo.....	97
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS













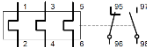
1.	Diagrama de flujo de protocolo de mantenimiento basado en el análisis de causa raíz.....	20
2.	Composición de aire atmosférico	24
3.	Aplicación más antigua conocida de aire comprimido.....	25
4.	Cambio de estado isotérmico.....	31
5.	Cambio de estado isocórico	32
6.	Cambio de estado isobárico.....	33
7.	Cambio de estado isentrópico.....	34
8.	Tipos de compresores.....	36
9.	Clasificación de compresores según la presión de generación.....	37
10.	Función de compresor de pistón	38
11.	Compresor de pistón	39
12.	Compresor de tornillo rotativo	40
13.	Unidad compresora	41
14.	Control de carga-vacío	42
15.	Control proporcional.....	43
16.	Control de caudal continuo a través de variador de frecuencia.....	44
17.	Pérdidas de presión en una estación de compresores.....	45
18.	Cálculo de un pequeño taller de pintura.....	45
19.	Medición de planta existente	47
20.	Componentes básicos de un variador de frecuencia	49
21.	Costos que componen un sistema de aire comprimido.....	49
22.	Estructura de costos en una estación de aire comprimido	50

23.	Variador de frecuencia por bloques	51
24.	Variador de velocidad con modulación por ancho de pulso	53
25.	Pérdidas de energía y eficiencia	61
26.	Comparación de eficiencia.....	62
27.	Comparación de eficiencia según normas	64
28.	Clasificación de eficiencia.....	65
29.	Adecuación de tabla de mantenimiento basada en horas para compresor de aire tipo tornillo.....	71
30.	Distorsión armónica en forma de onda de tensión.....	75
31.	Parpadeo Plt	76
32.	Ondas de tensión afectadas con sag.....	77
33.	Ondas de tensión afectadas por hueco de tensión	78
34.	Esquema TT (neutro conectado a tierra)	79
35.	Esquema IT (neutro aislado).....	80
36.	Cronograma de actividades	95

TABLAS

I.	Clases de calidad del aire comprimido según ISO 8573-1:2010	26
II.	Unidades y símbolos.....	28
III.	Unidades y símbolos derivados	28
IV.	Tipo de mantenimiento para motores asíncronos	72
V.	Indicadores	87
VI.	Indicadores, límites de temperatura ambiente del variador de frecuencia	87
VII.	Recurso financiero	98

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
	Amperímetro
	Bobina de contactor
	Cilindro
	Corriente alterna
	Corriente alterna trifásica
	Conductor general
	Devanados, bobinas
	Motor eléctrico de C.A.
Q	Quetzales
%	Porcentaje
	Transformador de tensión
	Tierra
	Vatímetro
	Voltímetro
	Relé térmico con contactos aux

GLOSARIO

ADA	Análisis de demanda de aire.
Aire comprimido	Aire cuyo volumen ha sido reducido por compresión.
Análisis de causa raíz	Metodología utilizada para identificar la causa de un evento después de ocurrido.
bar	Un bar es una unidad de presión, equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera.
Calidad de potencia	Se refiere a la calidad de la onda de tensión suministrada por la compañía eléctrica.
Compresor de aire	Máquina construida para aumentar la presión de un gas.
HP	Caballo de fuerza, siglas de la expresión en inglés <i>horsepower</i> , potencia necesaria para elevar verticalmente a la velocidad de 1 pie/minuto un peso de 33,000 libras.
IEC 60034 (2014)	Especifica las clases de eficiencia para motores eléctricos para operar en una fuente de voltaje sinusoidal.

IEC	Comisión Electrotécnica Internacional, siglas de la expresión en inglés International Electrotechnical Commission.
IEEE	Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, siglas de la expresión en inglés Institute of Electrical and Electronics Engineers.
ISO 8573-1 (2010)	Requisitos de calidad del aire comprimido que indican las cantidades máximas de contaminantes que este pueda tener.
ISO	Siglas de la expresión en inglés International Organization for Standardization, Organización Internacional de Estandarización, sistema de normalización internacional para productos de áreas diversas.
kW	Unidad de medida de potencia más utilizada, el kilovatio.
Mantenimiento	Es el destinado a la conservación de equipos previendo incidencias antes de que ocurran.
Motor eléctrico	Dispositivo que convierte energía eléctrica en energía mecánica.

Orden de trabajo	Documento escrito o electrónico que se utiliza para llevar el registro de mantenimientos preventivos y correctivos.
p.u.	El sistema por unidad es la relación entre esta cantidad y la cantidad base.
Parpadeo	Siglas de la expresión en inglés <i>flicker</i> , es un disturbio en la amplitud de la tensión.
Plt	Indica el nivel de severidad del <i>flicker</i> en un período largo.
Pst	Evalúa la severidad del <i>flicker</i> en períodos de observación de 10 minutos.
SI	Sistema Internacional de unidades que se utiliza en casi todos los países.
Sinamics	Familia de variadores de frecuencia de la marca Siemens.
THD	Distorsión armónica total, siglas de la expresión en inglés Total Harmonic Distortion, medida de la distorsión armónica presente en una señal.
Unidad compresora	Elemento compuesto por el tornillo hembra y macho donde por desplazamiento se comprime el aire sobre la tobera de descarga.

Variador de frecuencia Sistema de control de velocidad en un motor de CA por medio del control de frecuencia.

W El vatio o Watt es la unidad del Sistema Internacional para la potencia.

RESUMEN

En el 2017 la empresa fabricante de los compresores de aire tipo tornillo, con su subsidiaria en ciudad de Guatemala, invirtió más de trescientos mil quetzales en garantías por reemplazar variadores de frecuencia y equipos completos. La causa principal fue el fallo en tarjetas de potencia y banco de capacitores de los variadores de frecuencia de la marca Siemens de su línea Sinamics de procedencia alemana.

El tiempo de reparación de un variador de frecuencia de la capacidad entre 45 – 55 kW fue de 3 semanas y el reemplazo del compresor completo fue de 3 meses, lo cual impacta directamente en la elaboración de los productos que se fabrican en las plantas que utilizan estos compresores de aire.

Por tal razón se establece un procedimiento para el mantenimiento preventivo de los variadores de frecuencia contenidos en los compresores de aire, ya que es una herramienta para reducir las fallas y paros de producción, tomando en cuenta un análisis de la documentación de mantenimiento previa que aporta condiciones iniciales de arranque de cada uno de los equipos.

El mantenimiento preventivo de compresores está basado en horas de operación, en que los intervalos de mantenimiento estimados están en condiciones promedio. En condiciones adversas se reducen los intervalos de mantenimiento para mantener en rango las condiciones de operación que sugiere el fabricante, observando los siguientes puntos: acumulación de polvo, ventilación, sujeción de cables, valor de tierra física, calidad de potencia, temperatura y reapriete de bornes de tornillo.

Creando un registro de las condiciones en las que se encuentra el variador de frecuencia es posible identificar tendencias de operación como corriente, temperatura en el motor, temperatura en el variador de frecuencia, voltajes, sistema de enfriamiento y condiciones ambientales. Con esto se logra reducir paros de producción y evitar daños en variadores de frecuencia de compresores de aire, verificando a su vez condiciones actuales que ayudan a identificar cómo se encuentra la operación del sistema.

1. INTRODUCCIÓN

Los compresores de aire son aparatos altamente utilizados en la industria guatemalteca como fuente de energía, la cual es utilizada en herramientas neumáticas, transporte neumático, trabajos de pintura, entre otros, lo que los hace necesarios dentro de la industria.

Se tomarán como modelo tres compresores de aire de tornillo, que contienen variadores de frecuencia para su funcionamiento. Se utilizará el método de causa raíz para analizar el problema de investigación.

La demanda de aire comprimido dentro de cualquier planta no es constante, se hace necesario implementar equipos que puedan realizar el trabajo con la menor cantidad de consumo energético posible, lo que en la industria se conoce como eficiencia energética. Para ello los compresores de aire con variadores de frecuencia son la opción viable en determinados rangos de entrega de aire, donde los consumos pueden variar, por ejemplo, en cambios de turno en una empresa, mantenimientos de la planta o aumentando la producción.

Entre las mejoras considerables al utilizar compresores de tornillo de velocidad variable se tiene la presión constante del sistema. Para lograr ahorros en rangos de operación donde el consumo de aire no es el cien por ciento (100%) de la entrega del compresor, se implementan variadores de frecuencia, equipos que adaptan la velocidad del motor eléctrico para generar la cantidad de aire demandada por el sistema.

Cuando el mantenimiento eléctrico y mecánico no se realiza de forma correcta se presentan problemas de índole eléctrica en los equipos, específicamente en el variador de frecuencia, constituyéndose este punto en algo importante para el estudio.

El presente estudio analizará la raíz de los problemas eléctricos y se diseñará una estrategia de mantenimiento preventivo para alargar la vida útil de los compresores de aire, enfocado a los variadores de frecuencia que mueven el motor eléctrico de los compresores, para aumentar la confiabilidad y que estén en constante operación, evitando paros innecesarios de la maquinaria.

Se analizará registros de mantenimiento a la fecha, la calidad de potencia, tierra física y condiciones ambientales de tres plantas que tienen compresores de aire tipo tornillo, para establecer el mantenimiento preventivo que se deberá realizar, manteniendo los valores de estos parámetros dentro del rango solicitado por el fabricante.

Otros aspectos a evaluar son la temperatura ambiente y de operación, voltaje y ausencias de fase, variables importantes que ayudarán a establecer una estrategia de mantenimiento para evitar algún paro innecesario del compresor de aire.

También se determinará si es necesario implementar más protecciones eléctricas de las que el fabricante sugiere para evitar daños eléctricos a los variadores de frecuencia.

En cuanto al mantenimiento basado en horas de operación o mantenimiento preventivo del compresor de aire, lo sugerido por el fabricante

está enfocado en los consumibles, tales como filtro de aceite, aceite, filtro de aire, entre otros, los cuales se cambian periódicamente.

La investigación contempla los siguientes capítulos:

En el capítulo 1 se detallarán principios de aire comprimido, compresores de aire y su forma correcta de selección, según la demanda teórica o medida a través de un análisis de demanda de aire. También se abordarán compresores con variadores de frecuencia, calidad de potencia, requerimientos eléctricos y mecánicos solicitados por el fabricante, los cuales son determinantes en el buen funcionamiento del compresor.

En el capítulo 2 se recolectarán datos de tierra física a través equipo marca Fluke 1630, para medir resistencia de tierra utilizando pinzas. Se realizará medición de calidad de potencia utilizando equipo Dranetz Power Visa, clase A, así como los registros de mantenimiento de la empresa que presta el servicio de mantenimiento a los compresores de aire y variador de frecuencia.

Las mediciones de calidad de potencia, tierra física y las condiciones ambientales, se analizarán para cada una de las ubicaciones de los compresores de aire seleccionados.

En el capítulo 3 se tratará sobre el análisis de la información que existe en los formatos de arranque y órdenes de trabajo realizadas periódicamente a cada uno de los compresores de aire de tornillo, donde se plasma información importante como horas de operación, temperatura de la unidad compresora, amperajes y voltajes, además de poseer información de componentes que se cambian o mantenimientos especiales que se realizan en cada una de las órdenes de trabajo.

Partiendo de la información recopilada en las órdenes de trabajo sobre los mantenimientos realizados al compresor de aire y variador de frecuencia, se analizarán las fallas que los equipos han tenido específicamente en el variador de frecuencia debido a su alta vulnerabilidad en trabajo a altas temperaturas y voltajes de suministro.

En el capítulo 4 se establecerá la propuesta de mantenimiento preventivo para el variador de frecuencia a ser implementado en el futuro dentro de un sistema de gestión de mantenimiento, con base en lo sugerido por el fabricante del compresor de aire de tornillo y del variador de frecuencia, considerando además las condiciones ambientales y del suministro eléctrico, tomando como base el análisis del registro de mantenimiento de cada uno de los compresores, y la documentación proporcionada por la empresa que realiza esta labor.

Se establecerán las protecciones mínimas eléctricas con las que el compresor debe contar antes de su arranque inicial y las protecciones eléctricas necesarias para evitar fallos en variadores de frecuencia dentro de los compresores en su período de vida, para garantizar su correcto funcionamiento.

2. ANTECEDENTES

En el 2017 la empresa fabricante de los compresores de aire tipo tornillo, con su subsidiaria en Ciudad de Guatemala, invirtió más de trescientos mil quetzales en garantías por reemplazar variadores de frecuencia y equipos completos. La causa principal fue el fallo en tarjetas de potencia y banco de capacitores de los variadores de frecuencia de la marca Siemens, de su línea Sinamics, de procedencia alemana.

El tiempo de reparación de un variador de frecuencia de la capacidad entre 45 – 55 kW fue de 3 semanas y el reemplazo del compresor completo fue de 3 meses, lo cual impacta directamente en la elaboración de los productos que se fabrican en las plantas que utilizan estos compresores de aire.

Por tal razón es de mucha importancia establecer un procedimiento para el mantenimiento preventivo de los variadores de frecuencia contenidos en los compresores de aire, ya que es una herramienta para reducir las fallas y paros de producción.

El mantenimiento preventivo de compresores está basado en horas de operación, en los intervalos de mantenimiento estimados en condiciones promedio. Se sabe que en condiciones adversas habrá que reducir los intervalos de mantenimiento.

Toapanta (2009) plantea que la selección de la maquinaria que entra en una metodología de mantenimiento depende de su criticidad, costo,

confiabilidad e impacto de falla. La finalidad de un mantenimiento preventivo es evitar paradas innecesarias y no detener procesos en fábricas de producción.

Para establecer una rutina de mantenimiento es importante, en la caso del variador de frecuencia que se encuentra en los compresores de aire, encontrar las condiciones que dan origen a la falla y mantener en rango las condiciones ambientales de operación que sugiere el fabricante, las cuales proporcionan información a tomar en cuenta para la propuesta de mantenimiento.

Siemens (2008) establece que el mantenimiento preventivo para variadores de frecuencia sirve para conservar el estado nominal del equipo de forma general, en el que se deben observar los siguientes puntos: acumulación de polvo, ventilación, sujeción de cables y bornes de tornillo. Los intervalos efectivos para este mantenimiento dependen de las condiciones ambientales del lugar de instalación y de funcionamiento.

Delta Electronics, Inc. (2007) recomienda el mantenimiento preventivo en los variadores de frecuencia, para mantener en óptimas condiciones el motor y variador con revisiones regulares por personal calificado y revisiones básicas para detectar anomalías en la operación en determinados lapsos de tiempo.

Esta técnica permite que el personal de mantenimiento pueda identificar las condiciones actuales de los equipos y tomar acciones provisionales antes de que se de un fallo. También ayudará a crear un registro de las condiciones en las que se encuentra el variador de frecuencia, para identificar tendencias de operación, como corriente, temperatura en el motor, temperatura en el variador de frecuencia, voltajes, sistema de enfriamiento y condiciones ambientales.

Gardel (2013) establece que, desde un punto de vista del mantenimiento, la instalación de un variador de frecuencia aumenta el riesgo de fallo del compresor. Por lo tanto es importante detectar y diagnosticar fallas para evitar paros innecesarios del sistema a causa de este equipo.

Con un mantenimiento preventivo se puede evitar daños y a su vez verificar condiciones actuales que ayudan a identificar cómo se encuentra la operación del sistema y si se este requiere de mantenimientos correctivos programados.

Así mismo, Altmann (2006) dice que al analizar la causa raíz del problema se determinan los factores que afectan la confiabilidad operacional, haciendo frente a una situación con gran potencial de mejora. Frente al caso del fallo del variador de frecuencia en los compresores de aire, ayuda a comprender los eventos y mecanismos que actuaron como raíz del problema. Las causas pueden ser raíces físicas, humanas o latentes.

Por otro lado, Mantilla y Cardona (2005) identifican que los motores eléctricos son de los mayores consumidores de electricidad en la industria, tomando importancia los variadores de frecuencia, cuya función principal es ofrecer diferentes velocidades para realizar un trabajo, lo cual se trasmite en ahorros en los costos en aquellas máquinas accionadas por estos que no trabajan a plena carga la mayoría del tiempo.

Debido a que el consumo de aire comprimido es variable en el tiempo, la configuración del compresor de aire con un variador de frecuencia integrada se traduce en ahorros energéticos, y ajustando la velocidad de operación del motor eléctrico se suministra el caudal necesario para cubrir la demanda según se requiera.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1. Descripción

El problema a resolver por medio del presente estudio es reducir la falla de los variadores de frecuencia en compresores de aire de tornillo aumentando la confiabilidad de equipos, disponibilidad y la producción de operaciones, ello planteando un mantenimiento preventivo que reduzca las fallas ocasionales y repetitivas, extendiendo la vida útil de los variadores de frecuencia, los cuales dejan de funcionar por falta de mantenimiento en diferentes dispositivos internos.

A través de un análisis de causa raíz se debe encontrar el origen de las fallas, con respaldo de mediciones que indiquen los valores actuales de parámetros que el fabricante establece como condiciones normales de operación. Se analiza las condiciones ambientales en las cuales se encuentra operando el variador de frecuencia, verificando que se encuentran dentro de límites establecidos por el fabricante.

La medición de calidad de potencia, tierra física y temperatura de operación del variador de frecuencia en el compresor de aire tipo tornillo, aportarán valores cuantitativos de comparación con límites de operación establecidos por el fabricante. A través de la interpretación de estos valores se establecerán las correcciones necesarias y rutinas de mantenimiento preventivo, garantizando la continua operación del compresor de aire.

Parte del problema es la contaminación en los lugares de operación de los compresores de aire tipo tornillo, influyendo negativamente en la operación de los variadores de frecuencia, por lo tanto hay que mantener un control visual constante para evitar daños en las partes internas del mismo.

Por lo anterior se plantean las siguientes preguntas:

3.2. Formulación de preguntas

3.2.1. General

¿Qué mantenimiento preventivo puede evitar las fallas de los variadores de frecuencia en compresores de aire entre 45 y 55 kW?

Para proceder con el planteamiento del problema se formulan las siguientes preguntas:

3.2.2. Específica 1

¿Qué herramienta se debe aplicar para determinar las causas de fallas en los variadores de frecuencia de compresores de aire entre 45 y 55 KW?

3.2.3. Específica 2

¿Qué variables importantes se deben considerar para establecer un mantenimiento preventivo que mantenga en correcto funcionamiento el variador de frecuencia en un compresor de aire tipo tornillo?

3.2.4. Específica 3

¿Qué protecciones eléctricas se deben considerar para salvaguardar la operación de los variadores de frecuencia con base en mediciones de calidad de potencia y tierra física?

4. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se guía por la línea de investigación de Gestión de Mantenimiento, enfocada en la optimización de equipos y procedimientos para la mejora de la mantenibilidad, de la Maestría en Ingeniería de Mantenimiento, estableciendo un mantenimiento preventivo efectivo y definiendo una estrategia de mantenimiento preventivo a compresores de aire con variadores de frecuencia, estableciendo también el origen de las fallas de este equipo a través de un análisis de causa raíz y encontrando actividades e intervalos para ejecutar este mantenimiento.

Los compresores de aire juegan un papel importante dentro de las empresas en el territorio guatemalteco para la elaboración de cada uno de los productos que salen al mercado local e internacional, por lo tanto deberán contar con el mantenimiento establecido por un análisis de causa raíz. Es necesario para su operación de forma continua, manteniendo la confiabilidad en la operación.

El análisis de las fallas y revisión de registros de mantenimiento de los equipos se realiza con el objetivo de establecer la causa raíz y una estrategia de mantenimiento que ayude a mantener mayores eficiencias dentro de las empresas, por medio de un enfoque analítico al gestionar los fallos potenciales y sus causas asociadas en los variadores de frecuencia, lo cual ayudará a plantear y dar seguimiento a la gestión de mantenimiento preventivo eléctrico de los compresores de aire.

Dado que los variadores de frecuencia son equipos que aportan eficiencia al sistema de generación de aire, adaptándose a la demanda de aire comprimido, ahorran energía eléctrica y son necesarios hoy en día para minimizar el consumo energético en las plantas. Se deben tener protecciones eléctricas requeridas para poder salvaguardar la integridad de estos, debido a su vulnerabilidad a los cambios bruscos en la alimentación eléctrica.

La mayoría de empresas locales que venden variadores de frecuencia no cuentan con tarjetas electrónicas de control, electrónica de potencia y la mayoría de repuestos para estos equipos. Se vuelve más rigurosa la búsqueda de repuestos con variadores de frecuencia para motores de 37 kW hacia arriba, lo que hace necesario contar con una estrategia de mantenimiento preventivo para mantener en correcto funcionamiento al variador de frecuencia y el compresor de aire, alargando la vida útil del sistema integrado.

La investigación se propone analizar el historial de mantenimiento de los compresores con variadores de frecuencia, para determinar si existe algún parámetro que haya variado desde el arranque, lo cual podría haber dado indicios de fallo.

Verificar parámetros como calidad de la potencia que está llegando en cada uno de los compresores, medición de tierra física y factores ambientales como temperaturas que afectan directamente a fallos en estos equipos, ayudará a tomar medidas de ventilación apropiada en futuras instalaciones que incluyan compresores de aire con variadores de frecuencia y promoverá una estrategia de mantenimiento adecuada que reduzca el fallo en estos equipos.

Esta investigación tendrá lugar en tres empresas ubicadas en Guatemala, las cuales cuentan actualmente con compresores de aire tipo tornillo que

utilizan variadores de frecuencia para su funcionamiento, cada equipo con motores eléctricos entre 45 y 55 kW.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Diseñar un programa de mantenimiento preventivo basado en el análisis de causa raíz, que ayude a prolongar la vida del variador de frecuencia en compresores de aire entre 45 y 55 kW.

5.2. Específicos

- Emplear el análisis de causa raíz para determinar el origen de las fallas en los variadores de frecuencia de compresores de aire entre 45 y 55 KW.
- Medir la temperatura, calidad de potencia y tierra física propiciados al compresor de aire tipo tornillo, para aportar información para establecer rutinas de mantenimiento preventivo al variador de frecuencia.
- Establecer las protecciones y correcciones eléctricas para la mejora en el suministro de energía a un variador de frecuencia, con base en mediciones de calidad de potencia, tierra física y temperatura.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La investigación se apoya en los registros de mantenimiento proporcionados por la empresa fabricante de los compresores de aire que implementan variadores de frecuencia para su operación. Con base en los registros efectuados en los variadores de frecuencia de los compresores de aire se identificará la metodología utilizada hasta la fecha, con el fin de analizarla, para posteriormente completar una gestión que incluya un mantenimiento preventivo y dispositivos de protección eléctrica que ayuden a minimizar fallas futuras a estos equipos.

Se emplearán elementos de medición y estudio de calidad de potencia en cada uno de los compresores de aire, como herramientas para verificar la calidad de la energía que está llegando a cada uno de los equipos, debido a que los variadores son susceptibles a las variaciones en la alimentación eléctrica. Se determinará si las distorsiones en estos son factores que influyen en el daño de los variadores de frecuencia.

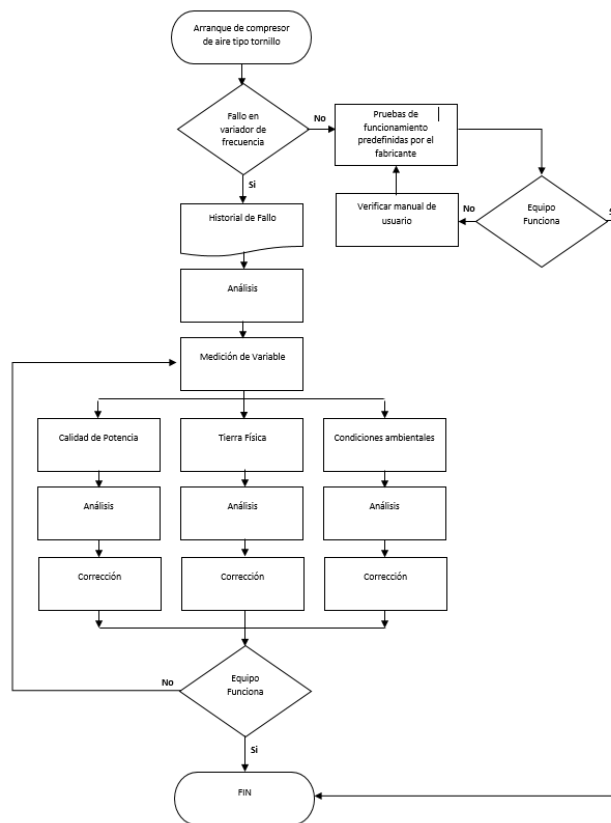
Partiendo del mejoramiento del sistema se harán las recomendaciones de las protecciones eléctricas mínimas que el sistema deberá poseer. La medición de tierra física se realizará específicamente utilizando equipo marca Fluke 1630, que mide resistencia de bucle y también la calidad de potencia, para la cual se utilizará el equipo Dranetz Power Visa, clase A.

Esta investigación será de mucha importancia para las empresas en las que se encuentran instalados los compresores de aire con variador de frecuencia y para el fabricante del compresor de aire de tornillo. Los resultados

de la investigación pretenden establecer mejoras y evitar daños a los variadores de frecuencia de estos equipos en la industria.

Se planifica que la investigación se realice tomando los antecedentes con tres empresas que han tenido fallo en variadores de frecuencia instalados en compresores de aire de tornillo, los cuales se seleccionarán por medio del tamaño de su motor eléctrico de 45 y 55 kW de consumo energético e historial de fallos.

Figura 1. **Diagrama de flujo de protocolo de mantenimiento basado en el análisis de causa raíz**



Fuente: elaboración propia.

La primera fase es verificar el funcionamiento correcto del compresor de aire tipo tornillo, revisar si existe un fallo en el variador de frecuencia o dentro del sistema mecánico o eléctrico.

Luego, en la segunda fase, se determina si la falla es recurrente y qué se ha realizado a la fecha para reducirla, por medio de un análisis de la documentación.

En la tercera fase se revisan variables importantes que inciden en la operación del variador de frecuencia, tales como calidad de potencia, tierra física y condiciones ambientales en las que se encuentra operando el variador de frecuencia.

En la cuarta fase se hacen las correcciones necesarias en conjunto con la reparación del variador de frecuencia, para garantizar que la operación sea continua y confiable. Y, por último, al determinar las causas del fallo se podrá realizar el programa de mantenimiento preventivo que reduce las probabilidades de fallo, aumentando la productividad y confiabilidad del sistema

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Aire comprimido

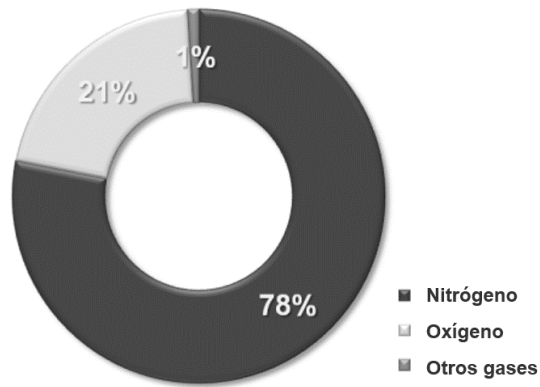
El aire comprimido es aire que se encuentra a una presión mayor a la atmosférica, capaz de realizar un trabajo cuando la presión a la que se encuentra es liberada. Una de las formas más fáciles de generar aire comprimido es a través de un compresor de aire, el cual convierte un movimiento mecánico en aire comprimido.

Una de las formas más comunes del aire comprimido en la vida cotidiana es el utilizado en los neumáticos de los vehículos de transporte: carro, bicicleta, motocicleta, autobuses, entre otros.

7.1.1. Aire atmosférico

La definición física / química de aire atmosférico es una mezcla de gases incolora, inodora e insípida, constituida principalmente por 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno. Alrededor del 1 % restante es argón con algunas trazas de dióxido de carbono y otros gases. Una composición exacta se da en la tabla a la derecha. (Kaeser, 2013).

Figura 2. **Composición de aire atmosférico**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.1.2. **Resumen histórico**

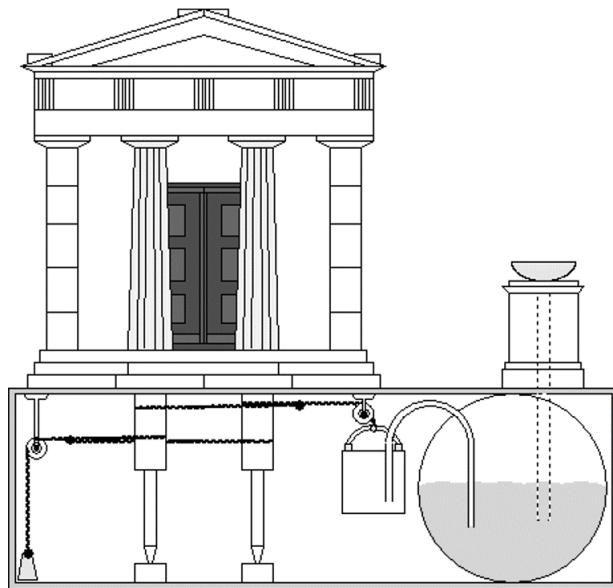
Según Cabrera (2016) el primer compresor de aire fue el pulmón del ser humano, el cual fue utilizado ampliamente para avivar fuego de fogatas como medio para elevar la temperatura. Los pulmones pueden producir de 0,02 a 0,08 bar de presión. Cuando inicia la época del cobre y el oro, los pulmones no eran capaces de mantener temperatura altas, la demanda de aire a mayor presión se hizo necesaria. Esto hace remembranza de cómo utilizaron el aire comprimido en épocas en que no existía la ciencia para demostrar este incremento de presión.

En el año 1500 D.C. se inventó el primer compresor a base de una bolsa flexible, que al aplastarse producía aire a mayor presión capaz de mantener la temperatura requerida para el trabajo de los metales. Años más tarde el ingeniero John Smeaton diseñó un cilindro impulsado a través de energía hidráulica que, al pasar de los años, empezó a ser más utilizado hasta el punto

de sustituir a su antecesor. Pasaron muchos años para que los compresores fueran evolucionando a los que hoy en día se encuentran en el mercado.

Según Kaeser (2013), Herón, filósofo de Alejandría, a finales del siglo I D.C. inventó un mecanismo para abrir la puerta del Templo de Alejandría, utilizando el fuego del altar, calentando aire en una cámara cerrada para su expansión, debido a su mayor volumen fue capaz de desplazar el agua contenida de un recipiente a otro, en donde el incremento de peso en el segundo recipiente es capaz de tirar una cuerda, haciendo que las puertas se abran (ver figura 3). Este es un sistema sencillo capaz de realizar un trabajo, tarea que no era posible realizar con la fuerza de un hombre.

Figura 3. **Aplicación más antigua conocida de aire comprimido**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Más tarde el aire comprimido fue utilizado como medio de transporte en el sistema de correo, transportando cartas y tarjetas a través de tuberías de hasta 400 kilómetros de longitud, siendo tan eficiente que se mantuvo vigente hasta 1976. (Kaeser, 2013).

A medida que pasaban los años los compresores empezaron a utilizarse en diferentes aplicaciones y actividades, en 1857 los emplearon en la minería para mantener los túneles ventilados, a través de ellos se movían grandes cantidades de aire para mantener al personal fresco longitudes de hasta 13 kilómetros. (Kaeser, 2013).

En la actualidad el aire comprimido es una de las fuentes de energía más utilizadas en procesos industriales, por su seguridad y facilidad de uso. Se encuentra clasificado según ISO 8573-1 (2010), donde se establece en los parámetros a considerar en calidad de aire: partículas sólidas, contenido de agua y contenido total de aceite.

Tabla I. **Clases de calidad del aire comprimido según ISO 8573-1:2010**

ISO 8573-1:2010	Partículas sólidas			Concentración másica	Agua		Aceite
	Cantidad máx. de partículas por m ³				Punto de condensación bajo presión de vapor	Líquido	
	0,1...0,5 μm	0,5...1 μm	1...5 μm	mg/m ³	°C	g/m ³	mg/m ³
0	Según la definición del usuario del equipo. Exigencias más elevadas que en la clase 1						
1	≤ 20.000	≤ 400	≤ 10	-	≤ -70	-	0,01
2	≤ 400.000	≤ 6.000	≤ 100	-	≤ -40	-	0,1
3	-	≤ 90.000	≤ 1.000	-	≤ -20	-	1
4	-	-	≤ 10.000	-	≤ +3	-	5
5	-	-	≤ 1000.000	-	≤ +7	-	-

Continuación de la tabla I.

6	-	-	-	≤ 5	≤ +10	-	-
7	-	-	-	5...10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5...5	-
9	-	-	-	-	-	5...10	-
x	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

Fuente: Festo. (2013). *Calidad del aire comprimido en la industria alimentaria y de bebidas.*

7.1.3. Unidades

El aire comprimido está relacionado con unidades de medición, las cuales difieren del país donde se utilicen. En Guatemala existe una mezcla de unidades empleadas en el medio, entre el Sistema Inglés y el Sistema Internacional de Unidades. Debido a la relación comercial con Estados Unidos de América muchas de las referencias en patrones de medición son utilizadas con base en el Sistema Inglés, como diámetros en tubería, caudal, presión, nomenclatura de cables eléctricos y potencia eléctrica de motores. Este sistema es ampliamente utilizado en Guatemala aunque lentamente está siendo reemplazado por el Sistema Internacional de Unidades.

Según Thompson y Taylor (2008), el Sistema Internacional de Unidades, universalmente abreviado como SI, es el sistema métrico moderno de medición. El SI se está convirtiendo en el sistema de medición dominante en el ámbito internacional.

En la figura 4 se observan las unidades básicas del SI y en la figura 5 las unidades derivadas que se utilizarán en esta investigación:

Tabla II. **Unidades y símbolos**

Unidad base	Abreviación	Unidad	
Largo	L	m	Metro
Masa	M	kg	Kilogramo
Tiempo	T	s	Segundo
Corriente Eléctrica	I	A	Amperios
Temperatura	T	kg	Kelvin
Intensidad de la luz	L	cd	Candela
Valor de substancia	N	mol	Mole

Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Tabla III. **Unidades y símbolos derivados**

Unidades derivadas	Abreviación	Unidad	
Fuerza	F	N	Newton
Presión	p	Pa, bar	Pascal, Bar
Temperatura	t	°C, °F	Grados
Trabajo	W	J, Nm	Joule, Newton Metro
Capacidad	P	W	Vatios
Voltaje	U	V	Voltios
Resistencia	R	Ω	Ohm
Frecuencia	f	Hz	Hertz

Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2. **Compresores**

Los compresores de aire son equipos altamente utilizados en la industria guatemalteca como fuente de energía, se utilizan para herramientas, transporte neumático, trabajos de pintura, soplado de botellas, entre otros. Son necesarios dentro de la industria privada y estatal, convirtiendo en energía el fluido, capaz

de efectuar un trabajo, impulsados por motores de combustión interna y eléctricos.

De las aplicaciones de aire comprimido en la actualidad es posible hacer referencia a los siguientes usos y aplicaciones:

- Construcción
- Minería
- Fabricación de productos químicos
- Suministro de energía eléctrica
- Instalaciones médicas
- Comercialización y reparación
- Fábricas para trabajar la madera
- Moldeo de plástico
- Fabricación y procesamiento de alimentos
- Fabricación y procesamiento del papel
- Industria textil
- Ingeniería ambiental
- Metalurgia industrial
- Gases industriales

7.2.1. Principio de funcionamiento

Según Hanlon (2001), por definición los compresores están destinados a comprimir sustancias gaseosas. Los compresores son utilizados para comprimir una amplia gama de gases en diferentes condiciones. Según Toapanta (2009), los compresores se analizan usando la ley de los gases ideales y una suposición de calor específico constante, la cual es aceptable para presiones aproximadas de hasta 1000 psi manométricos. Los cambios tienen origen en

sistemas reales en que los cálculos se vuelven complejos. Para fines prácticos se expresa la ecuación de un gas ideal así:

$$PV = nRT$$

Donde:

- P = presión del gas ideal
- V = volumen del gas ideal
- n = número de moles
- R = constante universal de los gases ideales
- T = temperatura del gas ideal

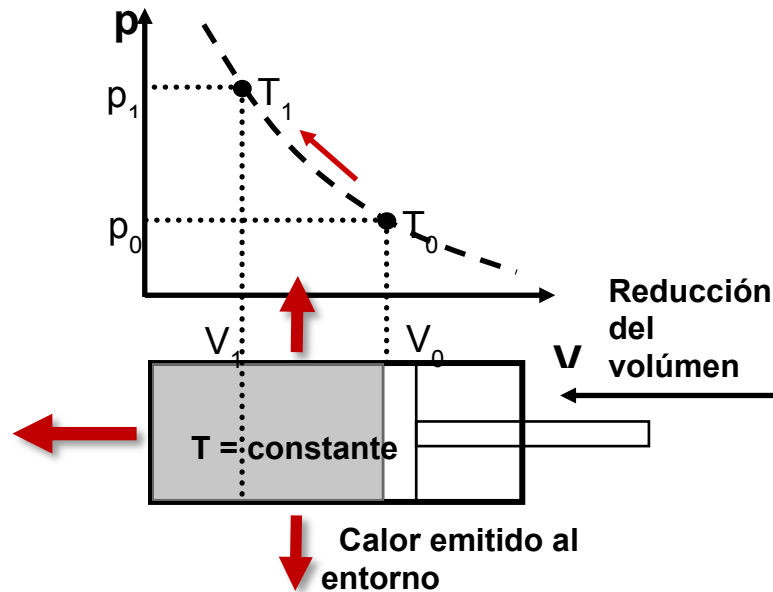
Se restringen cambios especiales y se manejan condiciones ideales para reducir variables.

Según Kaeser (2013), cuando el volumen se reduce a temperatura constante, la presión aumenta. Para un proceso isotérmico el calor debe ir hacia afuera, la declaración es presión x volumen = constante. En este caso la temperatura deberá disiparse completamente para determinar que no habría ningún cambio y llegar a mantenerse constante.

$$\text{Isotérmico: } T_0 = T_1 = \text{constante}$$

$$p_0 * V_1 = p_1 * V_1 = \text{constante}$$

Figura 4. **Cambio de estado isotérmico**



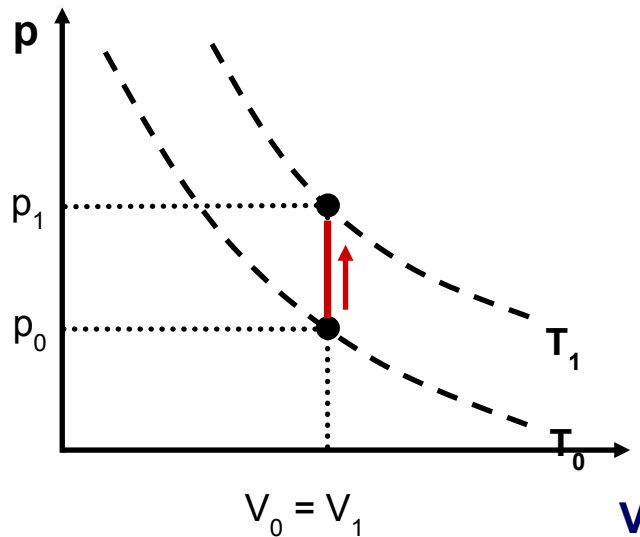
Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Además, Kaeser (2013) dice que cuando el volumen se mantiene constante en un tanque que es calentado, la presión interna aumenta. En el diagrama p-V en la figura 7 el cambio de estado es vertical. Para este cambio se asume un tanque que no tendrá cambios en su volumen, haciendo que la presión aumente de forma vertical.

Isocórico: $V_0 = V_1 = constante$

$$\frac{p_0}{p_1} = \frac{T_0}{T_1}$$

Figura 5. **Cambio de estado isocórico**



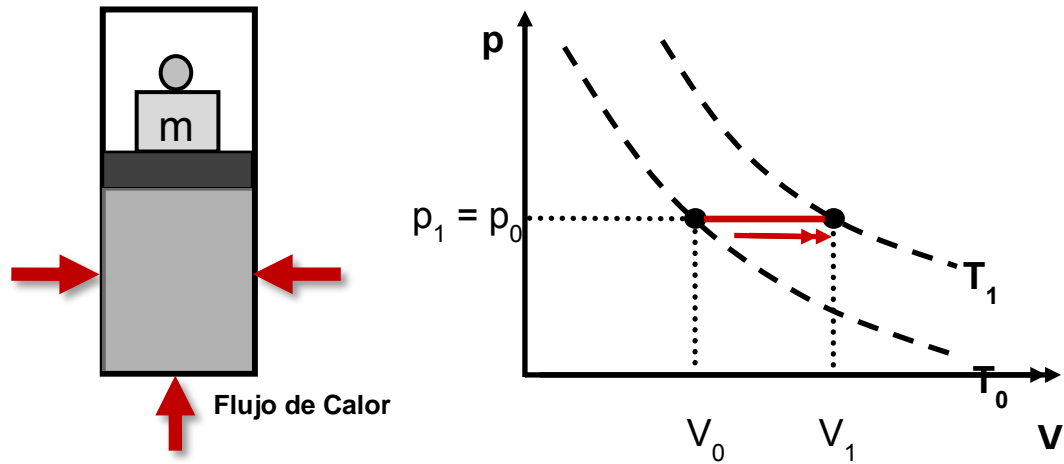
Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Así mismo, Kaeser (2013) refiere que cuando el volumen de un gas dentro en un cilindro se mantiene a presión constante por el peso de una masa sobre el pistón, y se aplica calor al gas, su volumen se incrementa desplazándolo hacia arriba (ver el diagrama p-V de la figura 8). Para el cambio isobárico el volumen es directamente proporcional al cambio de temperatura, manteniendo una presión constante.

Isobárico: $p_0 = p_1 = \text{constante}$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{T_0}{T_1}$$

Figura 6. **Cambio de estado isobárico**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

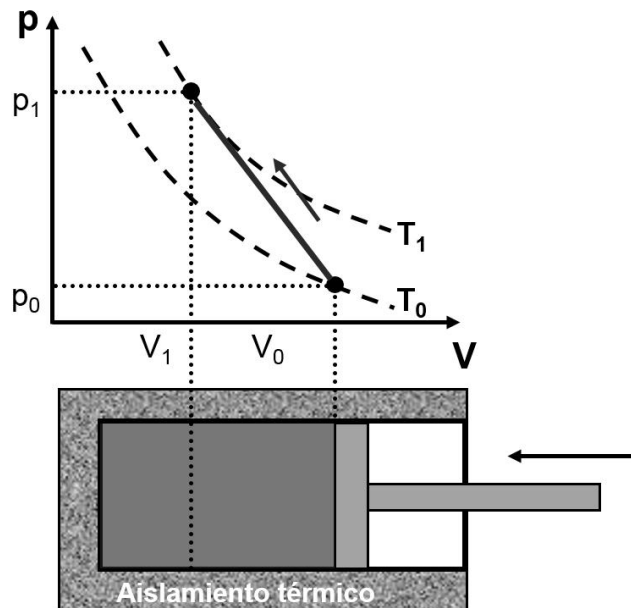
Con un cambio isentrópico se evita la transferencia de calor al exterior, y la presión y temperatura aumentan, lo que significa que habrá un aumento de temperatura en el momento de la compresión.

$$\text{Isentrópico: } p_0 < p_1$$

$$T_0 < T_1$$

$$V_0 > V_1$$

Figura 7. **Cambio de estado isentrópico**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

La primera ley de la termodinámica para un proceso de flujo estable es:

$$Q = (h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + w$$

Donde:

- Q = calor del gas ideal
- h1 y h2 = entalpías del gas en las condiciones 1 y 2
- v1 y v2 = volúmenes del gas en las condiciones 1 y 2
- g = gravedad
- w = trabajo realizado por el gas

La mayoría de gases reales se desvían de la ley de los gases ideales, para estos casos se utilizan tablas de propiedades termodinámicas, gráficas de compresibilidad o aplicar un factor.

Según Hanlon (2001), el trabajo de compresión de un compresor es aumentar la presión del gas, lo cual aumenta la temperatura fuera de este, por lo que es importante manejar de forma adecuada la temperatura del compresor de aire principalmete en la unidad compresora, siendo esta la encargada de realizar la compresión del gas, regularmente se encuentra sumergida en aceite, método capaz de mantener la temeperatura en rangos de operación dados por el fabricante.

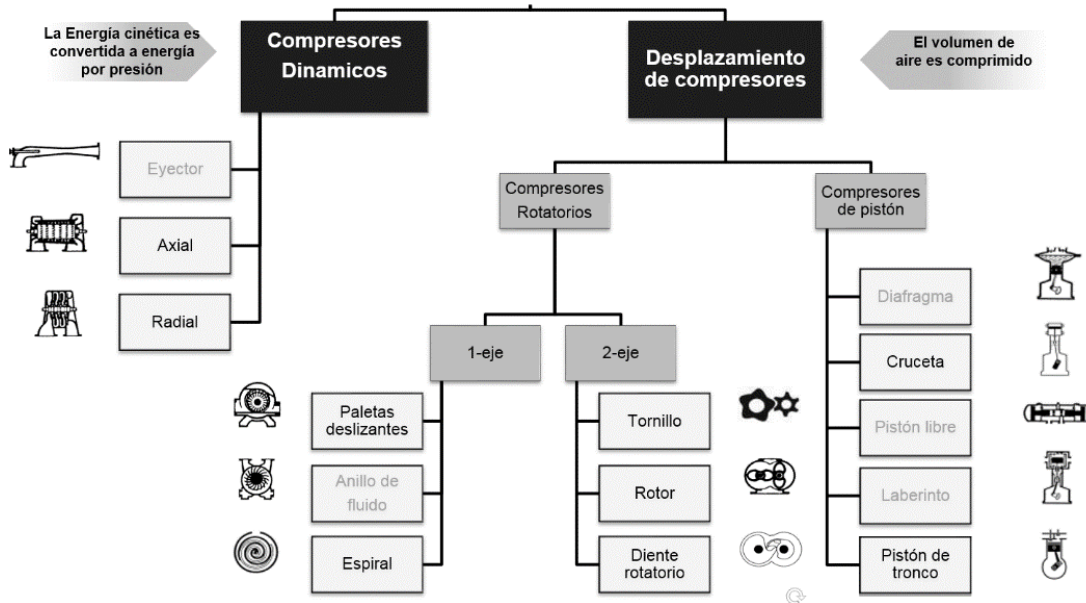
En la mayoría de los casos se busca incrementar la presión de un gas utilizando la menor potencia posible. Para ello la industria toma como referencia un indiador denomidado potencia específica, que está directamente relacionado con el consumo de kilovatios por pie cúbico por minuto (pcm, cfm por sus siglas en inglés) entregado.

$$P_{esp} \left[\frac{kW}{cfm} \right]$$

7.2.2. Clasificación de compresores

En la industria guatemalteca se utilizan diferentes formas de compresión de aire, entre las clasificaciones se hace referencia a los principios de compresión.

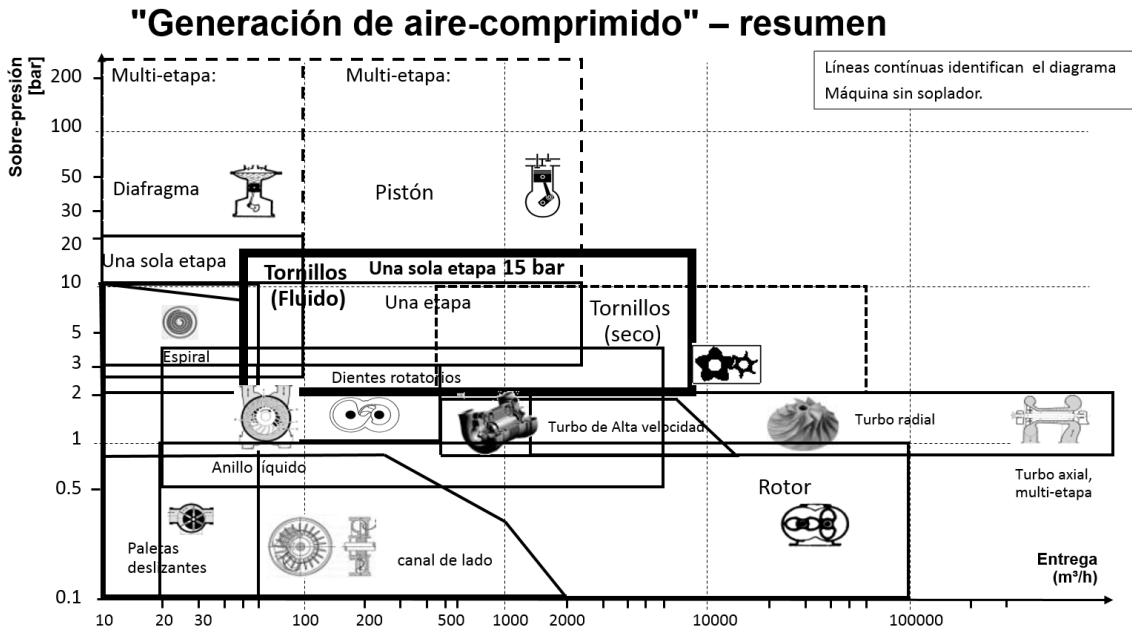
Figura 8. Tipos de compresores



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Existe un rango de cobertura para los compresores, lo que indica que cada una de las tecnologías existentes cubren cierta gama de la necesidad del mercado, haciendo énfasis en los compresor de tornillo lubricado.

Figura 9. **Clasificación de compresores según la presión de generación**



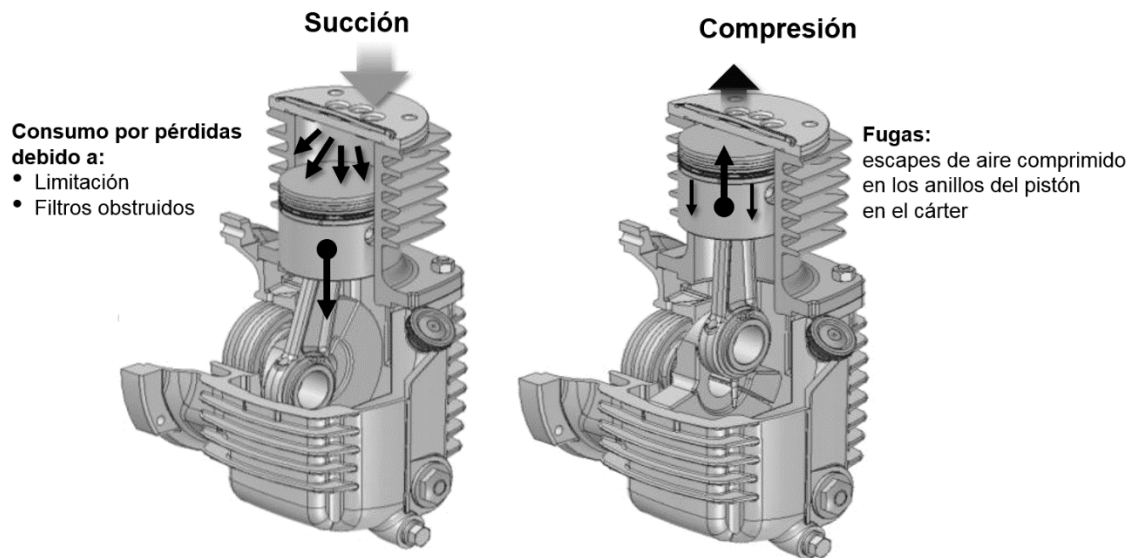
Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2.2.1. **Compresores reciprocantes**

Con respecto a compresores reciprocantes, Hanlon (2001) indica que los compresores reciprocantes consisten en un pistón actuando dentro de un cilindro donde el gas es comprimido. Estos son de los más utilizados en aplicaciones de bajo costo, son máquinas de movimiento alternativo y pueden ser de acción sencilla o de doble efecto.

Los de etapa sencilla tienen un pistón que ejecuta una carrera de succión y una de compresión de aire que es comprimido a mayor presión.

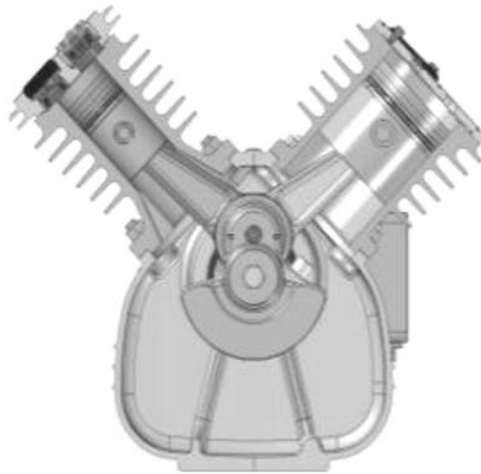
Figura 10. **Función de compresor de pistón**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Por otro lado, Toapanta (2009) explica que en los compresores recíprocos de doble etapa, en la primera fase se lleva el aire a una presión intermedia, pasando por un enfriamiento intermedio para terminar de ser comprimido en la segunda etapa, en que el aire es precomprimido en el primer cilindro y enfriado para ser llevado a una presión final en el segundo cilindro.

Figura 11. **Compresor de pistón**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

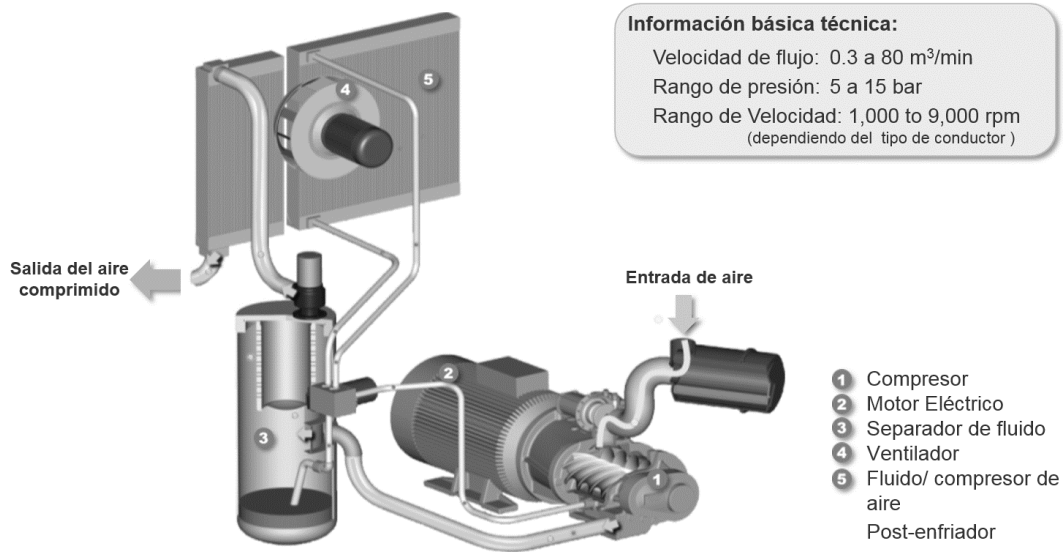
7.2.2.2. Compresores de tornillo rotativo

Como define Brown (2005), los compresores rotativos son máquinas de desplazamiento positivo. Del mismo modo, Hanlon (2001) indica que los tornillos rotatorios son compresores de desplazamiento positivo, con una entrega de aire constante, los cuales son populares por su simplicidad, bajo costo y fácil mantenimiento, lo que significa que producir aire con compresores rotativos es una de las formas más eficientes en el mercado.

Entre otros beneficios se encuentran: larga vida de la unidad compresora, compactos, bajo costo de mantenimiento y uso total de caballos de fuerza.

En la actualidad se encuentran compresores estacionarios para aplicaciones de la industria manufacturera o procesos de producción y compresores móviles para la industria de construcción y de pintura.

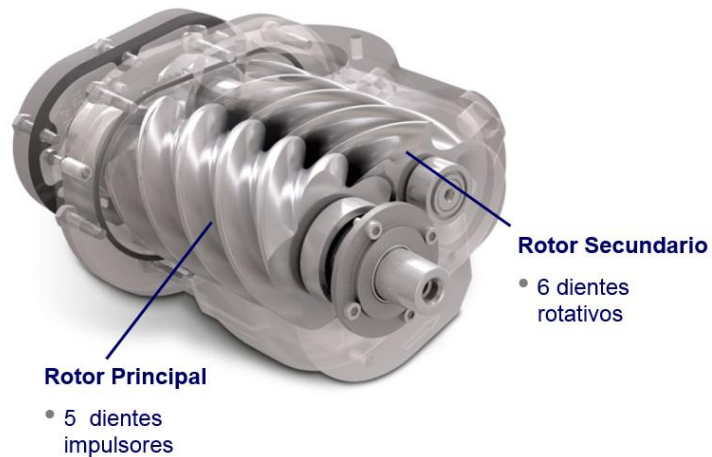
Figura 12. **Compresor de tornillo rotativo**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Una unidad compresora de aire contiene dos tornillos, un primario, el cual es impulsado a través de un motor eléctrico o un motor de combustión interna, los cuales están paralelos con una separación mínima cubierta por aceite, los tornillos giran en dirección opuesta, atrapando el aire entre los tornillos y la carcasa, moviendo y reduciendo el volumen a la salida.

Figura 13. **Unidad compresora**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2.2.3. **Control y regulación**

La demanda de aire comprimido dentro de una empresa es muy variable, depende de los turnos de trabajo y la simultaneidad en la operación de los equipos que utilicen aire comprimido. Los compresores son adquiridos para cubrir una demanda aparente, la cual se obtiene en el mejor de los casos sumando los consumos de aire comprimido de cada uno de los equipos y la información que proporciona el fabricante en la ficha técnica, dando como resultado un sistema sobredimensionado e ineficiente en el uso de energía eléctrica en condiciones de cargas parciales. Para ello existen diversos métodos de control y regulación en los compresores de aire tipo tornillo, con el fin de reducir los costos asociados a la generación de aire comprimido.

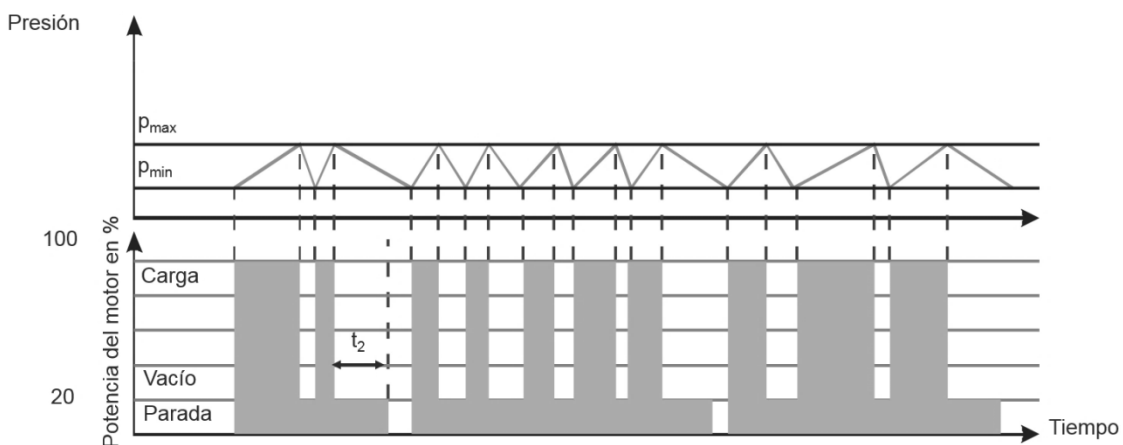
Los controles realizan la función de conectar y desconectar el compresor a una presión seleccionada. El control más sencillo es el arranque-paro del motor

eléctrico, este se encuentra en los compresores de pistón y en compresores de tornillo de hasta 5,5 kW.

7.2.2.3.1. Control de carga-vacío

Por otra parte, Kaeser (2013) indica que este tipo de control es uno de los más económicos y es conocido como dual. Este control permite que el motor funcione continuamente, trabajando en un rango de presión seleccionado, descargando el compresor cuando se encuentra en vacío y llevando el consumo energético entre un 15 y el 35 % de la potencia total del motor eléctrico. En carga consume el 100 % de la potencia del motor, resultando un sistema de control sencillo que permite obtener ahorros cuando los compresores se encuentran cercanos al 100 % de carga.

Figura 14. Control de carga-vacío

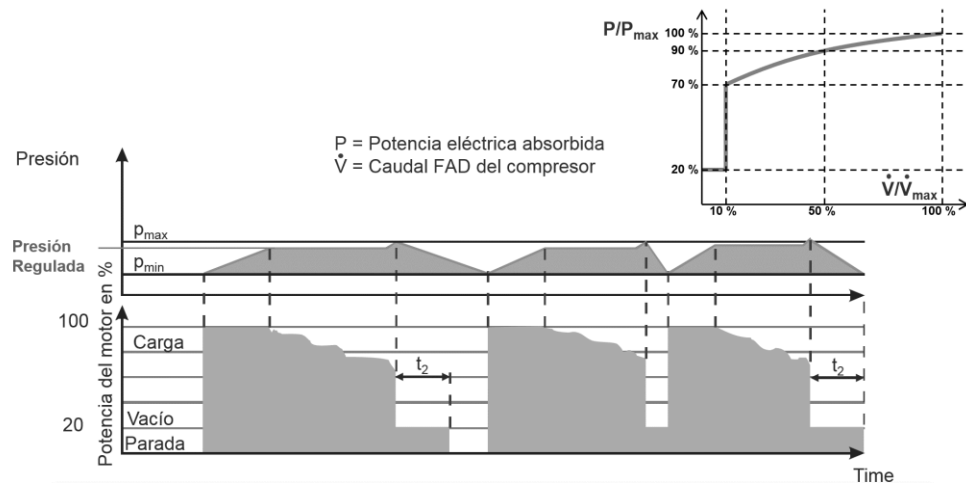


Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2.2.3.2. Control proporcional

Este tipo de control también es conocido como control por modulación, es simplemente la variación proporcional de la válvula de admisión tipo mariposa que deja admitir un volumen de aire determinado al compresor.

Figura 15. Control proporcional



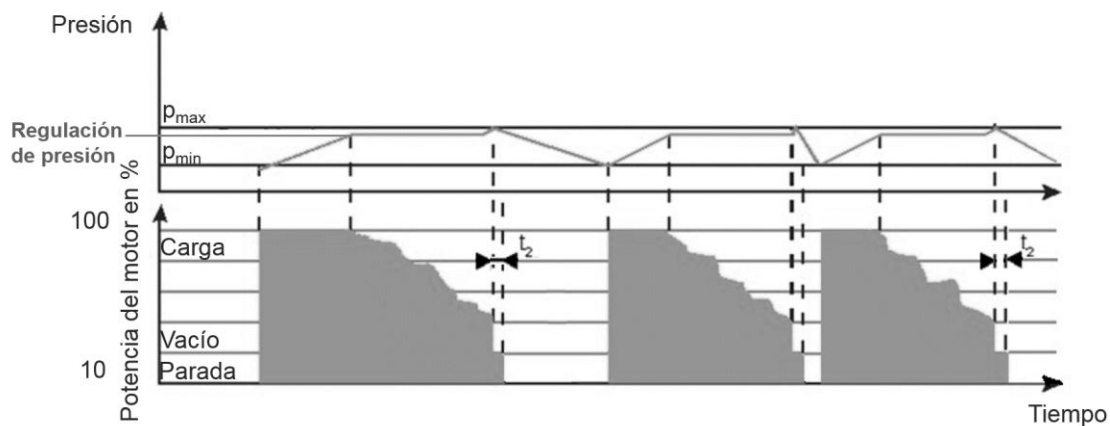
Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2.2.3.3. Control de velocidad variable

Con el control de frecuencia del motor eléctrico la velocidad se ve afectada, en consecuencia la entrega de aire del compresor puede variar entre 15 y 60 Hz. Cuando la operación es a 15 Hz, el consumo de corriente se ve disminuido considerablemente, dependiendo de la eficiencia del bloque de compresión.

El compresor llena la red de aire hasta alcanzar la presión máxima de trabajo, luego ajusta la velocidad del motor para seguir entregando una presión constante.

Figura 16. **Control de caudal continuo a través de variador de frecuencia**

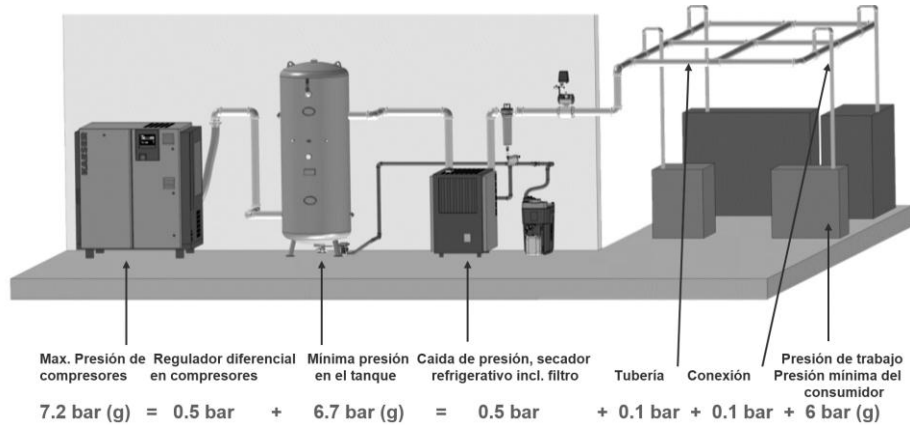


Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

7.2.3. Selección de compresores

Para una selección correcta del compresor de aire es necesario un análisis cuidadoso de todas las demandas requeridas de aire. Un plano de ubicación, un diagrama general de flujo, ubicación de puntos, un diseño general de tubería y cualquier condición de operación o factor de utilización de los mismos. Se deberá tomar en cuenta la presión de trabajo, la cual es usualmente establecida por el fabricante, por lo tanto habrá que tomar en cuenta la presión de pérdida en el tratamiento de aire y tubería.

Figura 17. **Pérdidas de presión en una estación de compresores**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido.*

Para determinar la demanda de aire de un sistema es necesario hacer la sumatorio de cada una, aplicando factores de corrección para evitar que el compresor seleccionado sea lo más ajustado posible para evitar consumos energéticos innecesarios. Por ejemplo:

Figura 18. **Cálculo de un pequeño taller de pintura**

Datos de operación	Pistola de pintura 1.5 mm boquilla de inyección ancha	Pistola de pintura 3 mm boquilla ancha	Pistola de soplado 2 mm	Destornillador neumático
Consumo de aire	150 l/min	320 l/min	240 l/min	400 l/min
Presión de trabajo	2.5 bar	5 bar	6 bar	6 bar
Cantidad	2	1	1	1
Utilización	50 %	25 %	10 %	20 %
Factor de concurrencia	0,8	1,0	1,0	1,0
Consumo de aire efectivo	2 x 150 x 0.5 x 0.8 120 l/min	320 x 0.25 x 1.0 80 l/min	240 x 0.1 x 1.0 24 l/min	400 x 0.2 x 1.0 80 l/min
Requerimiento total = 120 + 80 + 24 + 80 = 304 l/min + tolerancias				
Tolerancias permitidas • por fugas +10 % = 30 l/min • por mal cálculo +15 % = 46 l/min • como reserva +20 % = 60 l/min				

Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido.*

La sumatoria de todas las máquinas e instrumentos es necesaria para realizar el cálculo, luego deberá tomarse en consideración simultaneidad y utilización.

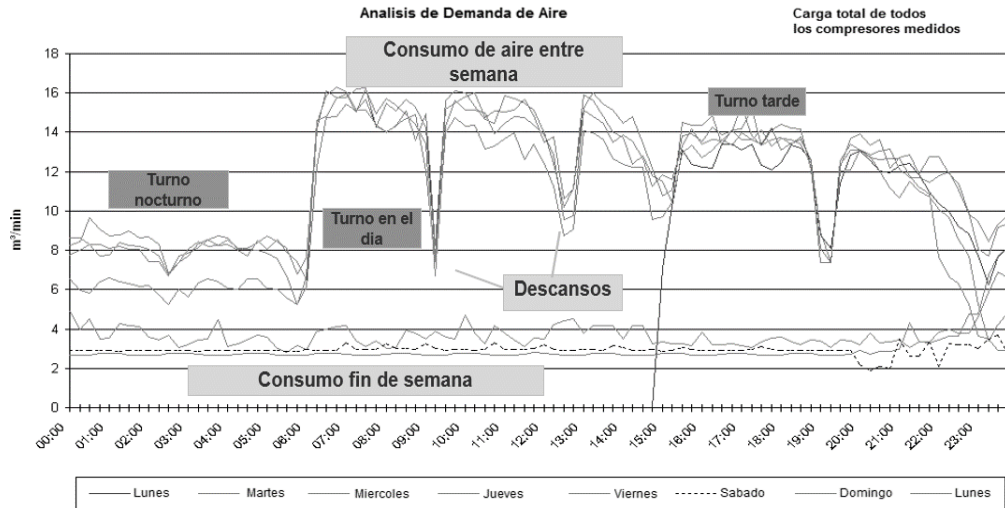
7.2.3.1. Análisis de demanda de aire

Si la estación de aire comprimido ya existe, es más fácil dimensionar una estación de aire más eficiente a través de un análisis de demanda.

Este tipo de medición se basa en llevar un control de los tiempos de operación del compresor, medición de potencia eléctrica, monitoreo de carga y vacío para compresores duales y la presión del sistema. Para compresores modulados existe la variable de medir el caudal de entrada. Esta información análoga es almacenada de forma digital durante el período de una semana mínimo, para luego ser evaluada a través de un software propio del fabricante.

Tras el análisis de la información se plantean alternativas eficientes, con un potencial de ahorro con equipos modernos y una mejora en la presión de trabajo en comparación de la estación de aire comprimido existente.

Figura 19. **Medición de planta existente**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Como se observa en la figura 21, la demanda máxima durante la semana fue de aproximadamente dieciséis metros cúbicos por minuto, durante cuatro días de la semana durante el día, y por la noche el consumo disminuye hasta seis metros cúbicos por minuto. Para ello la selección de equipos debe estar combinada para proporcionar el mejor y más económico sistema.

Al final, Kaeser (2013) sugiere tomar en cuenta las siguientes variables para diseñar un sistema de generación de aire comprimido.

- Presión de trabajo requerida
- Caudal de aire a cubrir
- Tipo de enfriamiento del compresor (aire o agua)
- Tipo de control del compresor
- Dimensionar tanque

- Ventilación del cuarto del compresor
- Dimensionar correctamente las líneas de aire comprimido
- Diseñar la instalación para fácil acceso de mantenimiento

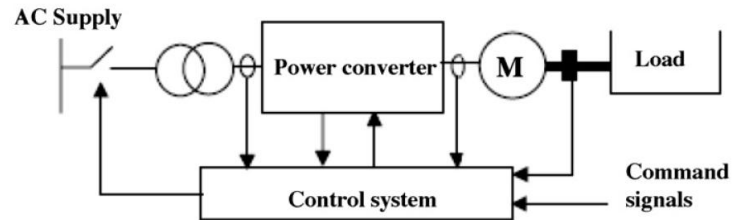
7.3. Variadores de frecuencia en compresores

Sobre variadores de frecuencia, Saidur (2011) define un variador de frecuencia como un dispositivo que regula la velocidad y fuerza rotacional o torque. Por otro lado, Mantilla y Cardona (2005) afirman que un variador permite que un motor eléctrico pueda producir la misma salida de flujo que se obtendría utilizando otros métodos de regulación con un menor consumo de potencia. Por lo tanto, habrá posibilidad de ahorro energético cuando las máquinas operan a cargas parciales durante grandes períodos de tiempo.

Adicionan Mantilla y Cardona (2005) que, debido a que la mayoría de sistemas operan por debajo de la carga nominal por tiempos largos, se han desarrollado métodos para reducir la salida en los motores eléctricos para cumplir con la demanda momentánea.

Acá es dónde los variadores de frecuencia toman importancia, ya que su función principal es variar la velocidad de trabajo, permitiendo ahorros energéticos en la maquinarias que no operan a plena carga.

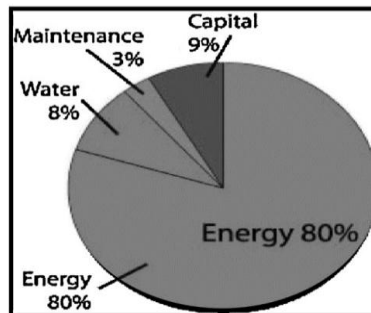
Figura 20. **Componentes básicos de un variador de frecuencia**



Fuente: Saidur, R.; Mekhilef, S.; Ali, M. B.; Safari, A.; Mohammed, H. A. (2011). *Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings.*

Los compresores de aire que utilizan un sistema de variación de velocidad ahorrarán energía en comparación con los sistemas de velocidad fija. Según Saidur (2011) se estima que un compresor con variador de velocidad proporciona un ahorro de hasta el 30 % en la energía eléctrica y una entrega de presión más constante. Esto puede representar cientos o miles de quetzales dependiendo del tamaño de la estación de aire. En la figura 23 se muestran los costos asociados a un estación de generación de aire comprimido.

Figura 21. **Costos que componen un sistema de aire comprimido**



Fuente: Saidur, R.; Mekhilef, S.; Ali, M. B.; Safari, A.; Mohammed, H. A. (2011). *Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings.*

Esto significa que durante la vida útil del compresor de aire los costos con mayor relevancia tienen que ver con la energía eléctrica, por lo que invertir en un compresor de aire eficiente es una variable importante de considerar.

Por otro lado, Kaeser (2013) dice que los costos asociados a la generación de aire comprimido se podrían expresar de la siguiente forma:

Figura 22. **Estructura de costos en una estación de aire comprimido**



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*.

Entre las ventajas principales de los variadores de frecuencia respecto a otras formas de control es posible encontrar.

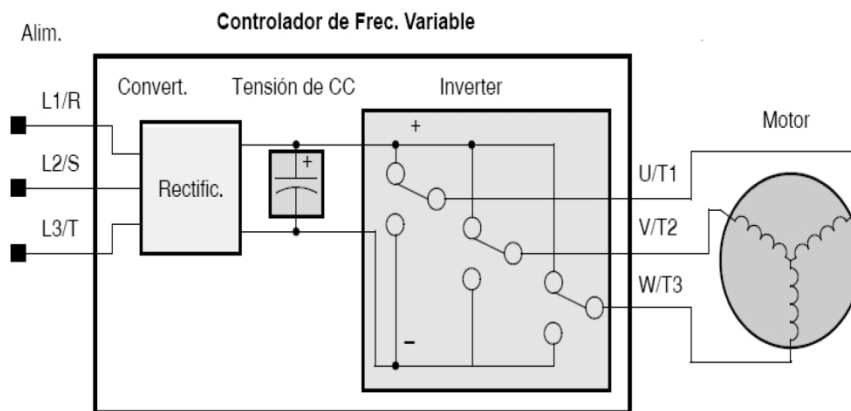
- Arranque suavizado
- Elimina la caída de voltaje
- Reduce choque de arranque de motor
- Desgaste de coplas o engranajes
- Reduce el desgaste funcionando a velocidades reducidas

- Reducción de vibraciones
- Reducción en mantenimiento de piezas giratorias

7.3.1. Principio y funcionamiento

Aunque existen diferentes tipos de variadores de frecuencia, la mayoría son similares en su principio de funcionamiento, contienen un rectificador en su primera etapa, un circuito intermedio de filtración que suaviza la salida del rectificador, un inversor que cambia nuevamente la corriente continua a corriente alterna y su sistema de control.

Figura 23. Variador de frecuencia por bloques



Fuente: Fluke Ibérica, S.L. (2004). *Cómo afectan los variadores de velocidad a la distribución de alimentación eléctrica.*

7.3.2. Rectificador

La forma más utilizada en los convertidores de frecuencia son los puentes rectificadores de diodos para variadores con tecnología de ancho de pulso PWM (pulse-width-modulation), que se logran a través de IGBT (transistores

bipolares de puerta aislada), utilizados en la sección de inversión de Fluke (2004). En la parte de la rectificación es donde se obtienen los armónicos para un conjunto de 6 diodos, se generan armónicos de la onda en el orden del 5to y 7mo, para los cuales se deberán calcular filtros LC de acuerdo a la carga que generen los armónicos.

7.3.3. Bus de suavización

Existe un bus de continuación, el cual es utilizado para suavizar la onda ya rectificada capaz de almacenar y filtrar a través de un circuito LC, para obtener un valor de voltaje constante.

7.3.4. Inversor PWM

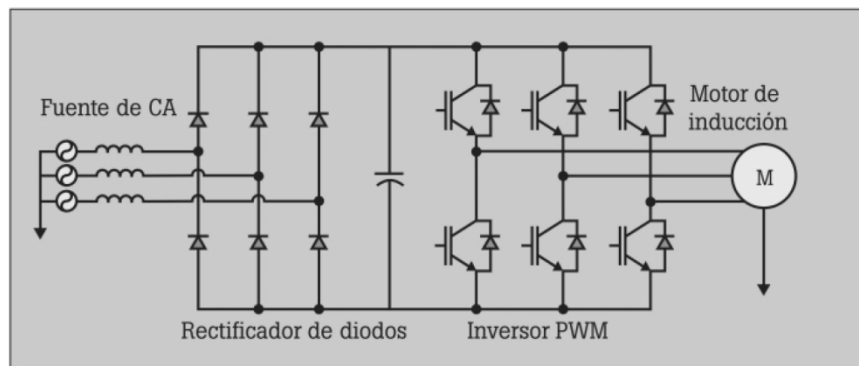
Los inversores son los encargados de generar una onda capaz de alimentar el motor eléctrico encendiendo y apagando para producir pulsos cuadrados, para así variar la frecuencia del motor. El número de pulsos y su ancho se ajustan en un tiempo de ciclo mayor para bajar la velocidad o tiempo de ciclo menor para subir la velocidad.

Como elementos de conmutación se utilizan los IGBT's obteniendo señales aproximadas a la onda sinusoidal mediante modulación de ancho de pulso. López (2007) indica que los inversores son electrónica de potencia en el campo de la energía eléctrica y tienen como función principal generar una onda sinusoidal con amplitud y frecuencia variable, según la necesidad por medio de fuentes CD.

Binti (2006) indica que el método PWM supera el mal rendimiento del motor, reduciendo la potencia desperdiciada y aplicando un tren de pulsos de

amplitud y frecuencia fija, variando el ancho de pulso proporcional a la tensión de entrada. El resultado final es el voltaje promedio en la carga, es el mismo voltaje de entrada pero con menos energía desperdiciada en la etapa de salida.

Figura 24. **Variador de velocidad con modulación por ancho de pulso**



Fuente: Fluke Ibérica, S.L. (2004). *Cómo afectan los variadores de velocidad a la distribución de alimentación eléctrica.*

7.3.5. Aplicaciones de variadores de frecuencia en la industria

Existen aplicaciones eléctricas en que se requiere que los motores eléctricos se ajusten a los requerimientos de la carga, entre las cuales es posible mencionar bombas, ventiladores, compresores de aire comprimido, entre otros.

En la antigüedad ya existían diferentes métodos para adaptar la entrega en un proceso con motores de velocidad fija, entre los cuales es posible mencionar:

- Poleas
- Reductores
- Abriendo y cerrando válvulas

Por otra parte el variador de frecuencia en un motor de inducción controla las características del motor eléctrico, realizando cambios de velocidad y par de arranque, adaptándose a los requerimientos de carga, logrando un ajuste y reducción del uso de la energía eléctrica cuando esta se encuentre en cargas parciales.

Las variaciones de frecuencia permiten una baja frecuencia para velocidades bajas y una alta frecuencia para hacer girar a altas velocidades, vienen en una amplia variedad de potencias, desde unos 0.18 kW hasta varios MW en aplicaciones muy específicas. (The Carbon Trust, 2007).

Para la variación de velocidad de un motor de inducción es posible expresar la siguiente ecuación:

$$n = \frac{120f_1}{p}(1 - s)$$

Donde:

- n: velocidad de rotación mecánica (rpm)
- f1: frecuencia fundamental de la tensión de alimentación (Hz)
- p: número de polos
- s: deslizamiento

Con la utilización de esta fórmula es posible ver que la velocidad de giro de un motor asíncrono siempre será menor a la de un motor síncrono.

Los motores se fabrican con una velocidad de trabajo fijo pero mediante el variador dicha velocidad puede controlarse de manera progresiva, para un motor de 4 polos a frecuencia de 15 Hz y deslizamiento del 4% es posible decir que estaría girando a 432 rpm.

$$n = \frac{120f(15)}{p(4)} (1 - s(0.04)) = 432 \text{ rpm}$$

7.3.6. Selección de un variador de frecuencia

- Entender beneficios y características de la aplicación donde se instala el variador de frecuencia. El mayor beneficio es la reducción de consumo de energía en sopladores, ventiladores, bombas y compresores de aire.

Dentro de las características del variador está que permite la optimización del trabajo requerido a una máquina o proceso, proporcionando la velocidad necesaria para realizar un trabajo.

- Por tamaño de carga, según la demanda de par máximo en lugar de caballos de fuerza. En condiciones de exigencia el motor puede exigir mayor par, el sobredimensionamiento puede ser necesario en cargas dinámicas. Cargas variables, arranques y paradas frecuentes.
- Opciones de frenado en un variador de frecuencia, con cargas de inercia alta pueden causar condiciones de sobretensión en el variador, en estos casos se considera una resistencia de frenado dinámico, se puede solicitar con el proveedor del variador de frecuencia. La resistencia de

frenado aporta un par adicional de frenado capaz de reducir el voltaje generado en la desaceleración.

- Control mediante entradas y salidas digitales y analógicas, generalmente desde un PLC (control lógico programable), se utilizan para arranque, paro protecciones, pulsadores manuales y señales análogas para aumento y reducción de velocidad en el variador de frecuencia.
- Comunicación, en la actualidad existen distintos de protocolos de comunicación digital comerciales, que permiten recibir y mandar información de control entre un PLC y un variador de frecuencia a través de un cable. Los más utilizados son el Ethernet, Profibus y DeviceNet. Esta comunicación permite el control del variador por un dispositivo maestro avanzado, prescindir de señales análogas y digitales, permitiendo el monitoreo de variables como velocidad, corriente, entre otros.
- Parámetros de protección eléctrica, se deberán especificar protecciones de ausencia de fase en la alimentación eléctrica y contactor de suministro de voltaje. Esto ayuda a incrementar la vida útil del variador de frecuencia.
- Manejo de armónicos, se deberán implementar filtros para reducir los efectos de distorsión de la onda sinusoidal que los variadores de frecuencia generan. La mayoría de fabricantes serios recomienda la implementación de dispositivos que ayuden a la reducción de armónicos.

La alimentación eléctrica es un factor a tomar en cuenta en la selección del equipo, en conjunto con el motor eléctrico. Un criterio de selección del motor

y variador de frecuencia es asumir que la carga del sistema requiere de un par constante.

En cuanto a las condiciones ambientales de operación de los variadores de frecuencia, estos poseen un ventilador interno para su sistema de refrigeración, la calidad de aire que se suministre afecta directamente el funcionamiento y la vida del equipo, por lo tanto se debe considerar las siguientes partículas suspendidas:

- Polvo magnético
- Polvo conductivo
- Humedad relativa

En la mayoría de ocasiones los variadores de frecuencia se encuentran en gabinetes eléctricos donde se deben cumplir las condiciones mínimas de instalación según el fabricante del equipo.

El motor asíncrono de inducción es el más utilizado en la industria por:

- Altos niveles de eficiencia
- Bajo costo y disponibilidad en el mercado
- Bajos costos de mantenimiento
- Protecciones
- Datos de placa del motor solicitados

Durante la puesta en marcha de un variador de frecuencia es necesario alimentar el equipo con datos de placa del motor eléctrico, de los cuales se pueden mencionar:

- Potencia en kW o HP
- Tensión en V
- Frecuencia en Hz
- Corriente en A
- Velocidad en rpm

En el mercado los voltajes más comunes en baja tensión son; 208, 230 y 460 V.

7.4. Motores

Según Weg (2018) los motores eléctricos son una parte esencial de cualquier proceso en la industria, ya que es una máquina que proporciona la fuerza y potencia mecánica para poder mover algo, con solo inyectarle energía eléctrica. Sabiendo esto se logra la siguiente clasificación:

- Motores de corriente continua o CC
- Motores de corriente alterna o CA

7.4.1. Tipos de motores

Los motores de corriente continua o CC tienen un uso bastante restringido en la industria, pero esto no quiere decir que no sean importantes en el proceso, estos motores son empleados en su mayoría donde se necesita un par motor bastante grande y se tiene la facilidad de control de velocidad y posición. Uno de los inconvenientes que tienen los motores de corriente continua es que al momento de querer variar la velocidad sus corrientes tienden a elevarse y con ello se provoca una distorsión en el sistema, la cual puede provocar una falla que no se desea.

Los motores de corriente alterna o CA son los más empleados por su versatilidad y construcción sencilla. Son motores que son construidos desde potencias fraccionarias de Hp hasta unos miles de Hp y para los cuales existe una diversidad de dispositivos de control y mando. Entre estos, los motores de inducción son los más utilizados, por su construcción sencilla y barata.

7.4.2. Motores asíncronos

El motor de corriente alterna asíncrono es aquel que tiene una construcción tal que hace que la velocidad de campo magnético del rotor sea inferior a la velocidad del campo del estator, donde se inyecta la corriente eléctrica. Este fenómeno se debe a los efectos de autoinducción que se presentan en los dos bobinados, tanto en el estator como en el rotor.

Este fenómeno se ve reflejado mecánicamente con una reducción de la velocidad del rotor, comparándola con la velocidad de sincronismo. Estas diferencias de velocidades guardan una relación que es conocida como deslizamiento y es una característica innata que tienen los motores de inducción.

7.4.3. Clases de eficiencia en motores CA

Espinosa, Martínez y torres (2015) establecen que cualquier máquina consume mucha más potencia de la que puede entregar, por lo que se considera la importancia de la eficiencia en el motor. La potencia consume un motor y no es posible convertirla en potencia de salida, lo cual se puede tomar como pérdida. La eficiencia es una forma de medir la potencia que desperdicia una máquina.

Se considera que, a una mayor eficiencia, hay menores pérdidas y razonablemente menores costos de operación. En un solo motor la eficiencia no es significativa, de lo contrario en una industria con una gran cantidad de motores se considera la eficiencia como un punto muy importante.

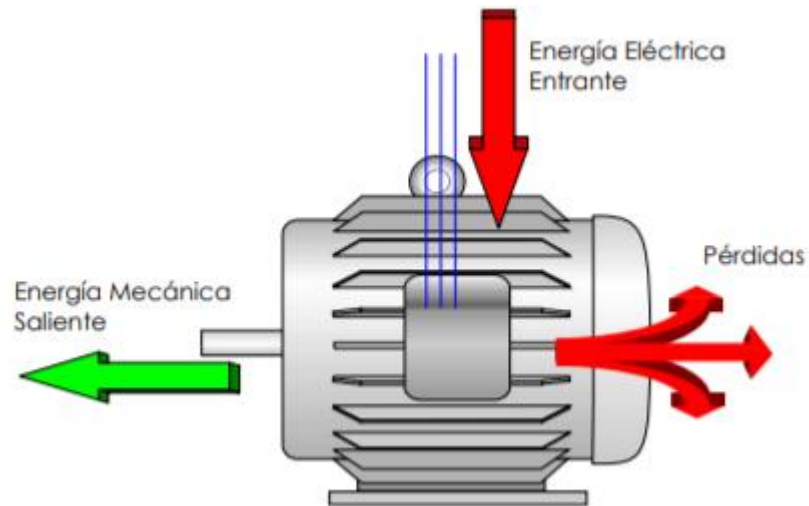
Dependiendo de la eficiencia se consideran tres tipos de motores eléctricos:

- Motores de eficiencia estándar
- Motores de alta eficiencia
- Motores de eficiencia *premium*

7.4.3.1. Motores de eficiencia estándar

Asistencia (2010) establece que en los motores estándar no se considera la eficiencia como la característica más importante, por lo contrario, su enfoque se establece en la funcionalidad y precio, de esto se puede considerar que son los motores con más de 15 años con eficiencia estándar. El rango de eficiencia de los motores estándar se encuentra entre 80 % y 90 %, por lo cual la potencia entregada nunca podrá ser igual a la potencia recibida eléctricamente, debido a las pérdidas que intervienen en la conversión de energía.

Figura 25. **Pérdidas de energía y eficiencia**



Fuente: Altmann, C. (2006). *El análisis de causa raíz, como herramienta en la mejora de la confiabilidad*.

7.4.3.2. Motores de alta eficiencia

Henríquez (2015) comenta que a este grupo corresponden aquellos motores, tipo jaula de ardilla, con tensiones menores a 600 V, cuya eficiencia está en el rango de 87 % y 96 %. A estos se les considera de alta eficiencia.

Los motores de alta eficiencia tienen ciertas características, como:

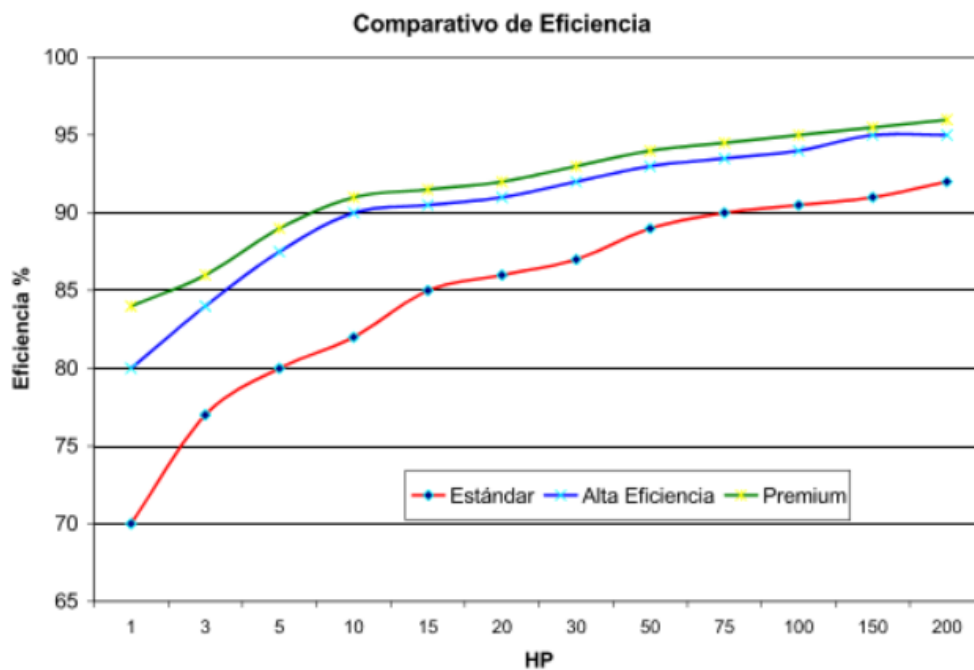
- Su contenido de cobre es mayor, lo cual es fundamental para disminuir las pérdidas de efecto Joule.
- Tienen una resistencia significativa a las variaciones de tensión comparada con los motores estándar.
- Provocan menos ruido que los motores estándar.

- Los fabricantes comúnmente ofrecen garantías amplias para motores de alta eficiencia.

7.4.3.3. Motores eficiencia *premium*

Amador, (2012) comenta que la innovación de los motores *premium* permite elevar todavía más la eficiencia de los motores eléctricos, para lo cual se ha desarrollado el proceso de construcción y la utilización de materiales de alta calidad, aunque esto implica costos más elevados. Tal como ocurre con los motores de alta eficiencia, se tiene especial cuidado en la manufactura de los elementos básicos para lograr una mayor eficiencia.

Figura 26. Comparación de eficiencia



Fuente: Altmann, C. (2006). *El análisis de causa raíz, como herramienta en la mejora de la confiabilidad.*

7.4.4. Normas aplicables a motores asíncronos

Como describe Arteaga (2013), las normas internacionales son esenciales para evaluar y aprobar la calidad de los productos, para así disminuir la circulación de productos que no llenan las expectativas mínimas de calidad. De esta manera se garantiza que los productos sean seguros para los usuarios. En el sector eléctrico de los países las regulaciones se establecen en las normas NEMA y las IEC.

7.4.4.1. Normas NEMA

Según Viteri (2016), las normas NEMA constan de diferentes estándares, lo cual dependerá de si se trata de un producto, proceso o procedimiento. La Asociación Norteamericana de Manufacturas Eléctricas (NEMA) es la agrupación de comercio para productores de dispositivos eléctricos, su objetivo es crear una estandarización. Las normas NEMA abarcan productos en áreas como equipo electrónico de potencia, aislamiento eléctrico, cables, entre otros aspectos. Sin embargo, el área en la que más se enfocan las normas NEMA es la de motores y los generadores.

Las normas NEMA han establecido un método de identificación con letras para cada tipo de motor de inducción de jaula de ardilla que se comercie en la industria, el cual se fabrica de acuerdo con determinado diseño. Se coloca en una clase específica, identificada con una letra (A, B, C, D y F), de acuerdo al diseño del rotor de la jaula de ardilla.

7.4.4.2. Normas IEC

Amador (2012) menciona que la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) es una norma recibida por la mayoría de países y especialmente los europeos. Se encuentran varias diferencias en la fabricación de motores y dependen mucho de la norma, pero lo más característico es que mientras que las dimensiones de IEC son en milímetros (mm), NEMA es en pulgadas (In).

7.4.4.3. Comparación entre las clasificaciones NEMA e IEC

Bojacá (2010) establece que en un primer aspecto las normas IEC establecen valores límites de eficiencia en forma separada de los motores de 60 y 50 Hz. Las normas IEC demuestran una sustentación técnica y teórica de las razones para la diferencia entre los valores de las dos frecuencias. En las normas NEMA simplemente se consideran los motores de 60 Hz. Examinando los valores que estipulan las diferentes categorías, se puede notar que hay equivalencia entre las categorías para 60 Hz.

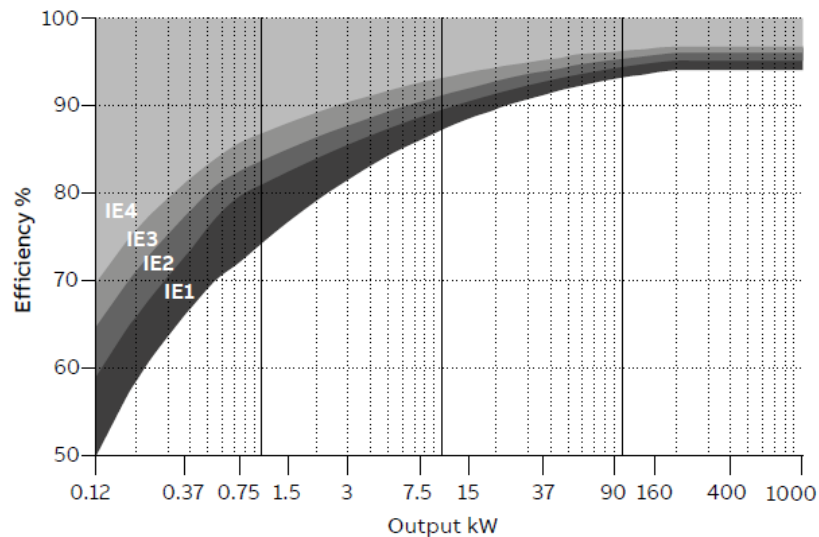
Figura 27. Comparación de eficiencia según normas

Niveles de Eficiencia	Clases de Eficiencia	
	IEC (Internacional)	NEMA (USA)
Estandar	IE1	-
Alta	IE2	Energy Efficient EPAct
Premium	IE3	Premium
Super-Premium	IE4	Super-Premium
Ultra-Premium	IE5	Ultra-Premium

Fuente: Brown, R. N. (1997). *Compressors selection & sizing*.

La clasificación de motores eléctricos basados en el estándar IEC 60034 de 2014, según ABB (2018), se muestra de la siguiente forma:

Figura 28. **Clasificación de eficiencia**



Fuente: ABB. (2018). *IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors.*

7.5. Mantenimiento

De acuerdo con Kardec y Nacif (2001), mantenimiento son acciones ordenadas que se toman para mantener en operación, reacondicionar un componente o grupos de componentes, con la finalidad de cumplir con los requerimientos mínimos que exige la operación.

Alarcón (2014) define al mantenimiento como una disciplina cuyo propósito radica en conservar las máquinas y el equipo en estado óptimo de operación, lo que incluye servicios, inspecciones, ajustes, reinstalación, calibración y reconstrucción. Esencialmente se basa en el desarrollo de

criterios, conceptos y técnicas que requiere el mantenimiento, suministrando una guía para toma de decisiones.

Según Sierra (2004), el mantenimiento se define como el conjunto de actividades en las cuales un equipo o sistema se mantienen en operación y con las cuales se puede realizar funciones designadas. Al tener irregularidades en el equipo o sistemas de producción se obtiene como resultado variantes excesivas en el producto, lo que ocasiona una producción defectuosa.

7.5.1. Tipos de mantenimiento

Según Benedetti (2004) el mantenimiento se puede dividir en: mantenimiento no planeado, el cual también es llamado mantenimiento reactivo. En este no se realiza ninguna acción para que el equipo opere en sus condiciones originales, o en condiciones seguras para prevenir fallas.

Según Sierra (2004) existen diferentes tipos de mantenimiento, siendo la comparación de los logros o beneficios obtenidos de ellos el mejor camino para definir su aplicabilidad, para establecer el mantenimiento preventivo como una división para lograr fines como resultados que abatan los costos.

Para Apaza (2011) el mantenimiento es la serie de tareas o trabajos que hay que ejecutar en algún equipo o planta, a fin de poder conservarlos eficientemente para que puedan brindar el servicio para el cual fueron creados. Para ello en esta investigación se plantearán tareas o trabajos que se ejecutarán en períodos de tiempo determinados por el análisis de causa raíz y parámetros determinados como críticos en la operación del variador de frecuencia.

Entre los procesos de mantenimientos más usados en la industria se encuentran: el mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo.

El mantenimiento correctivo es el que se centra en el conjunto de acciones a tomar, en el momento que una pieza, componente o grupo de componentes dejaron de operar de manera correcta, lo cual hace necesario su reparación o reemplazo, para que el todo al cual pertenece siga operando de una manera óptima. La ejecución de este tipo de mantenimiento es bastante barata, porque solo se actúa al momento de una falla, pero hace elevar los costos de producción, por los tiempos perdidos por las fallas y entre fallas. Así mismo los equipos tienden a tener menor vida útil, debido a que no se lleva un monitoreo de su condición y el nivel de deterioro se acrecienta.

El mantenimiento preventivo trata de programar acciones de cambio de piezas que se cree puedan dañarse, con el objetivo de no tener paradas inesperadas en producción. Este tipo de mantenimiento es bastante confiable, ya que se mantiene el equipo operando el mayor tiempo posible, pero tiende a ser bastante cara su ejecución, debido a que se cambian piezas por tiempo de operación, a disposición del fabricante. Para este estudio se toma como base los problemas ocurridos y la observación de las condiciones ambientales en las que se encuentra instalado el compresor de aire, para proponer este tipo de mantenimiento aumentando el tiempo de vida.

El mantenimiento predictivo es un tipo de mantenimiento enfocado al monitoreo de las variables críticas del equipo, con el objetivo de conocer el estado del equipo en cada momento, y con ello formar datos estadísticos del deterioro de los sistemas y tomar acciones programadas y focalizadas para corregir problemas que se puedan presentar en el futuro. Este tipo de

mantenimiento hace que los mantenimientos correctivos y preventivos sean disminuidos en gran manera, con lo cual la eficiencia del mantenimiento en sí se vea incrementada, al igual que la de la producción. Lo que hace caro a este mantenimiento es la adquisición del equipo y el adiestramiento del personal encargado de realizarlo.

7.5.2. Mantenimiento preventivo

Para Mejía (2007) el mantenimiento preventivo es un procedimiento que ha mostrado ser eficaz y su rasgo principal es examinar la maquinaria e instalaciones antes de que se presente una falla y detectar las fallas desde su fase inicial, para corregirlas en el momento oportuno. Para aplicarlo se requiere conocer los límites de operación de las máquinas, proporcionados por el fabricante.

Según IEEE (1998) el mantenimiento preventivo es una práctica de realizar inspecciones, pruebas y servicios de rutina, para que todo problema inminente pueda ser detectado, reducido o eliminado.

Sierra (2004) define el mantenimiento preventivo como la elaboración de un sistema de inspecciones periódicas programadas sobre el activo fijo de la planta, que puedan ocasionar paros en la producción o deterioro en máquinas y realizar en forma permanente el cuidado de mantenimiento adecuado de la planta para evitar tales condiciones, mediante la ejecución de ajustes o reparaciones, mientras las fallas potenciales están en estado inicial de desarrollo.

Por lo tanto, el mantenimiento preventivo es aquel que trata de mantener un equipo o sistema operando el mayor tiempo posible, empleando acciones

programadas de ajuste, reacondicionamiento y reemplazo de piezas que presentan daños y otras que se considera pertinente cambiar, tomando en cuenta la vida útil y el deterioro de las mismas. Estos criterios normalmente se efectúan tomando en cuenta fichas técnicas que proporcionan el fabricante y la misma experiencia en la parte de ingeniería a cargo de los equipos en mención.

El mantenimiento preventivo se caracteriza por ser invasivo, se tiene que sacar de operación el equipo o sistema en estudio y se procede al reemplazo de piezas, ajustes, entre otras.

Los planes de mantenimiento se realizan con base en el nivel de criticidad de los equipos, esto quiere decir que se les pone mayor importancia y frecuencia a los equipos que, según la operación y costo de los mismos, afectarían grandemente a la empresa si dejaran de operar.

7.5.3. Criticidad de equipo

El análisis de criticidad es una metodología que busca jerarquizar equipo y/o sistemas, en función de su impacto a la planta, ya que con ello se facilita la toma de decisiones focalizadas y puntuales.

Para lograr un buen análisis de criticidad se tienen que tomar algunos factores en cuenta, con el objetivo de que el fin primordial, que es optimizar recursos, se lleve a cabo:

- Establecer el alcance.
- Definir los criterios de evaluación.
- Definir la ruta y el método de evaluación para jerarquizar los sistemas en estudio.

7.5.4. Mantenimiento de compresores

Arias Galindo (2018) dice que todos los sistemas mecánicos y eléctricos requieren de diversos puntos de atención para asegurar que operen eficientemente. Es recomendable invertir en mantenimiento preventivo, en lugar de sufrir costosos tiempos muertos por reparaciones. Es importante establecer rutinas de mantenimiento para tener control de los equipos y que la operación sea la correcta. En cada uno de los equipos de un sistema de aire comprimido el mantenimiento preventivo busca un desempeño óptimo y dar mayor duración de los equipos, buscando un equilibrio en los gastos de ejecución y paros en producción.

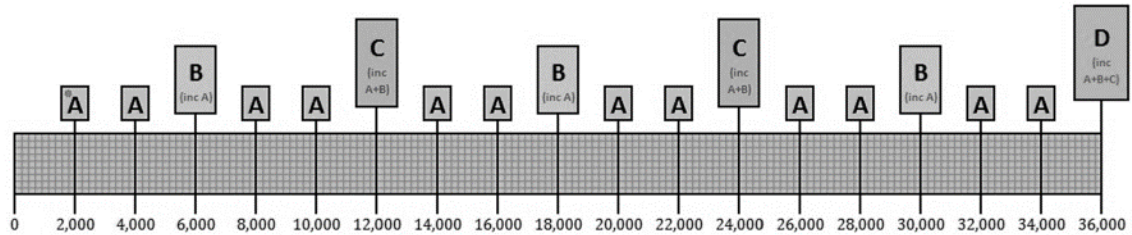
Toapanta (2009) señala que el monitoreo dinámico se realiza en función de los datos o variables específicas de funcionamiento de los compresores. Para reconocer las fallas en los compresores se debe conocer cómo se comportan en condiciones estándar y en el lugar de operación, para implementar un mantenimiento preventivo.

El mantenimiento está basado en las horas de operación, esto aplica para los consumibles, piezas en válvulas, acoples, fajas y cojinetes.

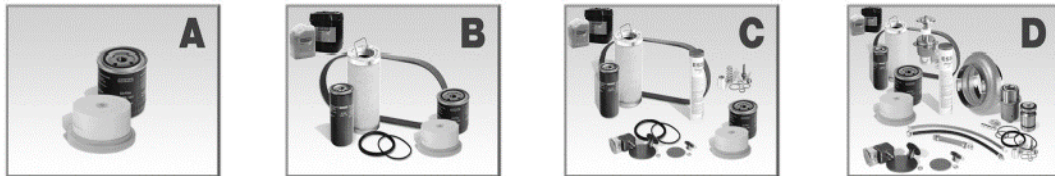
Con el mantenimiento correcto es posible garantizar que no haya pérdidas asociadas al incremento de diferenciales de presión debido a saturación en filtros. Para ello existen intervalos sugeridos por el fabricante, que extienden la vida útil de un compresor asegurando la eficiencia a largo plazo.

Figura 29. **Adecuación de tabla de mantenimiento basada en horas para compresor de aire tipo tornillo**

Paquetes de Mantenimiento COMPRESORES DE TORNILLO



Nota: Los intervalos de Mantenimiento aplican a condiciones normales de operación.
Condiciones ambientales desfavorables, como una atmósfera sucia o polvorienta, reducen los intervalos de mantenimiento.



Fuente: Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido.*

7.5.5. Mantenimiento de motores asíncronos

Los motores de inducción asíncronos son los más empleados en la industria debido a su sencillez y bajo costo de adquisición. Por este motivo se hace necesario crear e implementar planes de mantenimiento a este equipo, ya que al final es el que proporciona el movimiento necesario en cualquier proceso de la planta.

Como acciones concretas de los tipos de mantenimiento a un motor de inducción asíncrono es posible enumerar las actividades de la tabla siguiente:

Tabla IV. **Tipo de mantenimiento para motores asíncronos**

Mantenimiento correctivo	Mantenimiento Preventivo	Mantenimiento Preventivo
Rebobinado de Estator	Cambio de capacitores (monofásicos)	Medición de asilamiento de bobinas
Reparación de cunas de cojinetes de escudos	Cambio de platinas de centrífugo	Medición de índice de polarización
Rectificación de eje	Limpieza de bobinado	Medición de vibraciones en cojinetes
	Re-barnizado	Medición de vibraciones por rotor dañado
	Cambio de cojinetes	
	Cambio de puntas de cable recalentadas	
	Pintura completa de carcaza	

Fuente: elaboración propia.

7.5.6. Mantenimiento de variadores

Para la mayoría de la industria los variadores de frecuencia se utilizan en una gran gama de procesos y maquinaria industrial, llegando a formar parte integral de equipos críticos. Por tal razón es necesario realizar un mantenimiento que permita garantizar su operación. En la mayoría de los casos las empresas fabricantes de variadores de frecuencia sostienen una filosofía de mantenimiento correctivo para diversas tarjetas que componen el equipo, siendo el inversor de voltaje el de mayor criticidad.

Por esta razón, Siemens (2008) establece que la mayoría de piezas en un variador de frecuencia son componentes eléctricos. El mantenimiento deberá enfocarse en la limpieza, parámetros de operación y reemplazo de tarjetas, labores dirigidas a conservar y reestablecer el buen estado del variador.

Además, Rodríguez (2002) establece las pruebas necesarias para un diagnóstico de componentes defectuosos y otras condiciones que pueden afectar en la operación del motor eléctrico, regulado con variadores de frecuencia.

Urzúa (2013) define que los variadores de frecuencia se han incorporado profundamente en procesos y maquinarias industriales, formando parte relevante en la automatización industrial, llegando en muchas ocasiones a desempeñar trabajos críticos dentro de estos. Se hace necesario contar con herramientas que permitan garantizar la operatividad del proceso productivo.

7.6. Análisis de causa raíz como herramienta para mejorar la confiabilidad de un equipo

Este método se utiliza para encontrar la causa raíz de un problema, como herramienta de mejora y confiabilidad de un sistema. Con respecto a este método, Ovalles (2017) establece que es necesario encontrar la causa raíz que origina las fallas, a fin de implementar acciones correctivas y preventivas que disminuyan o erradiquen las mismas. Es necesario observar de cerca el origen de un problema o causa de este para deducir qué lo está ocasionando.

Para usar este método se identifican correctamente las causas que dan origen a una falla de manera individual, siguiendo los siguientes pasos:

- Identificar el problema
- Definición del problema
- Entender el problema
- Identificar la causa
- Acción correctiva
- Monitoreo

Hay que mencionar que Altmann (2006), indica que en un análisis de causa raíz hay que ir más allá, analizando acciones humanas que desataron la cadena causa-efecto, debido a procedimientos incorrectos, especificaciones

equivocada o falta de capacitación para realizar una tarea. Esto significa que habrá que hacer énfasis en los errores humanos en la aplicación de procedimientos.

El diagrama de causa-efecto identifica factores importantes que contribuyen a la generación de una falla. En este se analiza mano de obra, método, máquina, material, medio ambiente y medición.

7.6.1. Confiabilidad

La confiabilidad de un equipo la define Altmann (2006) como la probabilidad de que opere en condiciones preestablecidas sin sufrir daño. Un análisis de causa raíz permite descubrir eventos no deseables y eliminarlos. La confiabilidad por tanto aumenta la disponibilidad del equipo, haciendo más eficiente la operación de una empresa.

7.6.2. Disponibilidad

Con respecto a disponibilidad, Mesa (2006) establece que esto es objetivo principal del mantenimiento, siendo el porcentaje del tiempo en el que la máquina está lista para operar o producir. Por lo tanto, la disponibilidad de un equipo está ligada a la eliminación de fallas catastróficas en que los tiempos de paros pueden ser amplios e incurren en gastos innecesarios. Con un programa sólido de mantenimiento se mejora la confiabilidad, manteniendo valores de operación en condiciones idóneas.

7.7. Calidad de potencia

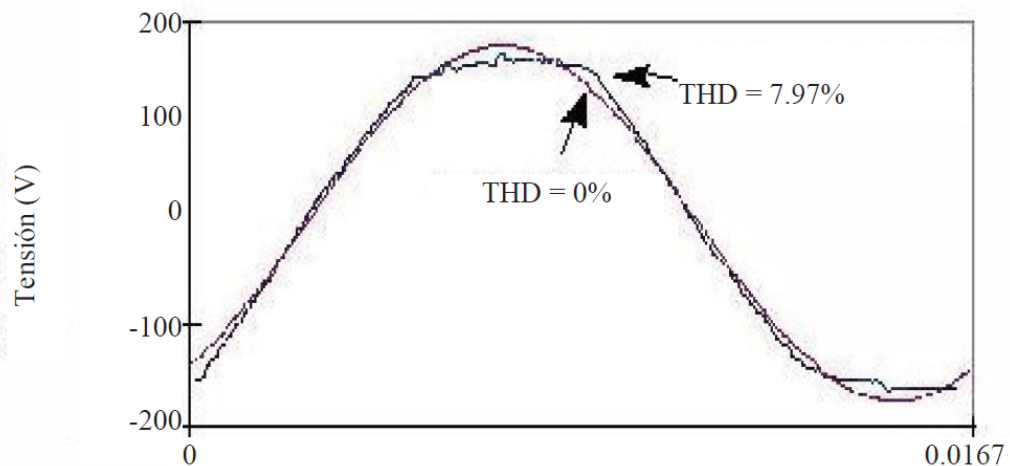
La calidad de potencia está definida como los parámetros en los cuales se debe mantener la onda de tensión. Según la Comisión de Regulación de

Energía y Gas (2005), es un conjunto de calificadores que permiten juzgar el valor de las desviaciones de la onda en forma, frecuencia y los efectos que estas puedan tener en equipos eléctricos.

7.7.1. Armónicos

Es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental, producido por los consumidores de energía debido a cargas industriales no lineales, las cuales pueden perjudicar a otros consumidores.

Figura 30. **Distorsión armónica en forma de onda de tensión**



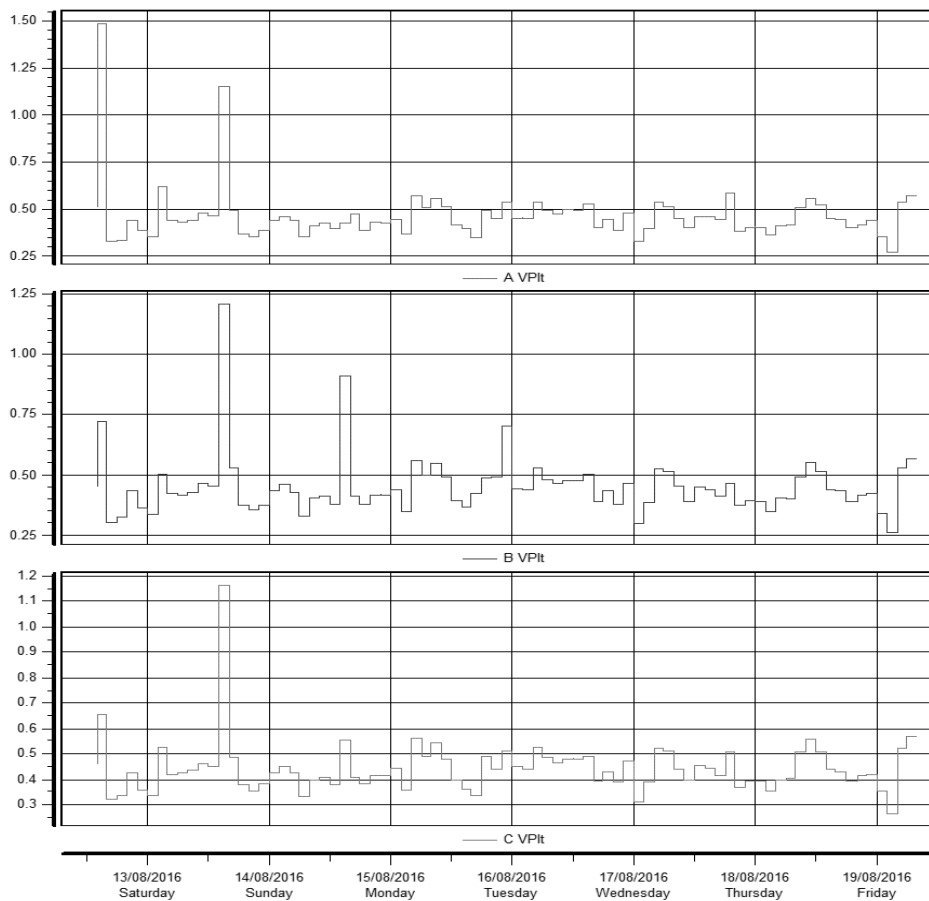
Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2005). *Calidad de potencia*.

Savostianik (2014) establece que debido a que la onda de voltaje a la salida de un varidador de frecuencia no es senoidal pura, contiene varios componentes múltiples de la frecuencia llamados armónicos.

7.7.2. Parpadeo

Impresión de inestabilidad visual de la energía. Según Holguin y Gomezcoello (2010) el parpadeo es una variación rápida y cíclica del voltaje, variando la luminosidad de las lámparas a una frecuencia detectable. Se define de corta duración Pst con un intervalo de observación de 10 min. El índice de severidad del *flicker* de larga duración Plt se evalúa en intervalos de 2 horas.

Figura 31. Parpadeo Plt

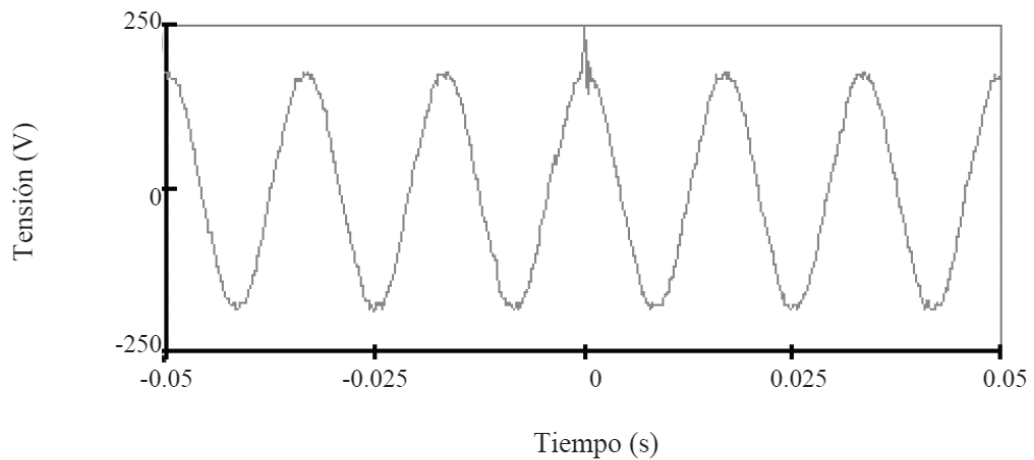


Fuente: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2005). *Powering and grounding electronic equipment*.

7.7.3. Transitorio

Es una perturbación eléctrica que afecta la onda de voltaje según la Comisión de Regulación de Energía y Gas (2005). Este es un evento de alta frecuencia sobrepuesto en la señal de CA.

Figura 32. Ondas de tensión afectadas con sag

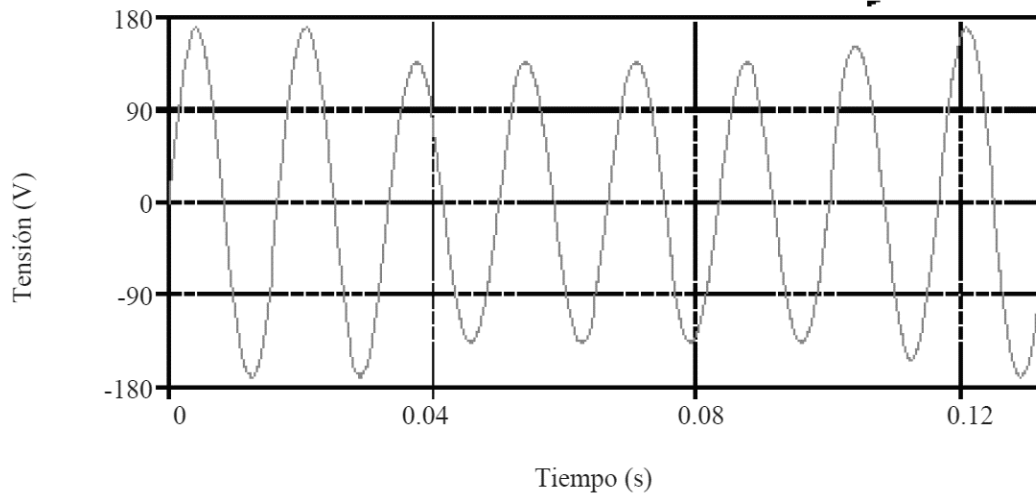


Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2005). *Calidad de potencia*.

7.7.4. Huevo de tensión

Es un huevo de tensión disminuyendo el valor eficaz de la tensión entre los valores de 0,9 y 0,1 p.u. de la onda fundamental, con duraciones entre 8 ms hasta unos segundos.

Figura 33. Ondas de tensión afectadas por hueco de tensión



Fuente: Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2005). *Calidad de potencia*.

7.7.5. Desbalance

El desbalance de tensión recomendado para sistemas de baja tensión trifásicos es del 2 %. En otras palabras es el desbalance de las fases respecto a la magnitud promedio del sistema, dividido por la magnitud promedio. También las tensiones de un sistema trifásico difieren en magnitud.

7.8. Tierra física

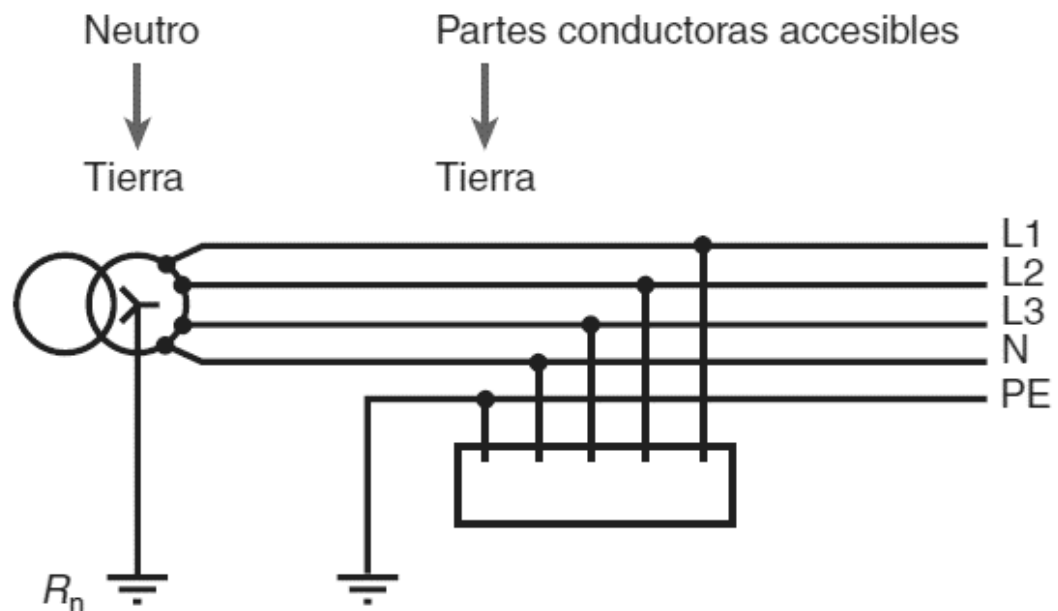
En la industria se cataloga según Schneider Electric, S.A. (2010) como una masa conductora de tierra, cuyo potencial eléctrico en cada punto se toma por conveniencia como igual a cero.

Entre los objetivos principales de la puesta a tierra está el punto de referencia a cero, así como proveer un camino para que circule la corriente de falla, garantizando que los equipos de protección operen para liberar la falla.

7.8.1. Tipos de tierra física para variadores de frecuencia

Entre las redes de tierra recomendadas por Siemens (2008) para variadores de frecuencia se encuentran la TT o redes aisladas IT. El esquema TT es el más económico y más utilizado en las instalaciones por sus excelentes características de protección.

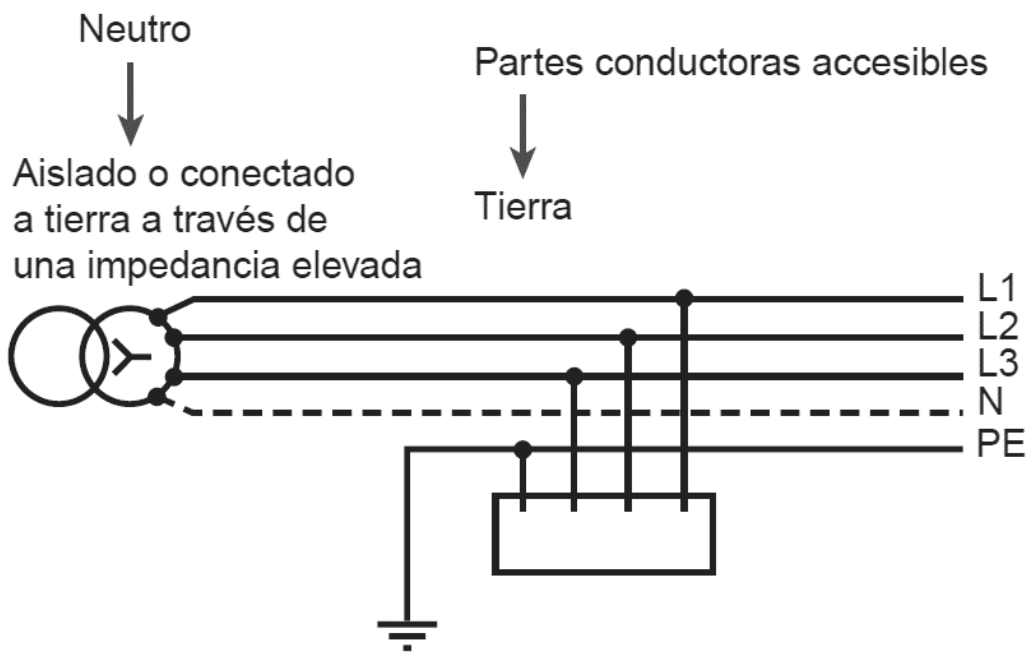
Figura 34. Esquema TT (neutro conectado a tierra)



Fuente: Schneider Electric, S.A. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas 2010*.

En el esquema IT no se realiza ninguna conexión entre el neutro y la tierra.

Figura 35. **Esquema IT (neutro aislado)**



Fuente: Schneider Electric, S.A. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas 2010*.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aire comprimido

1.1.1. Aire atmosférico

1.1.2. Definición de aire comprimido

1.1.3. Resumen histórico

1.1.4. Unidades

1.2. Compresores

1.2.1. Principio de funcionamiento

1.2.2. Clasificación de compresores

1.2.2.1. Compresores reciprocantes

1.2.2.2. Compresores de tornillo rotativo

1.2.2.3. Control y regulación

1.2.2.3.1. Control de carga-vacío

1.2.2.3.2. Control proporcional

- 1.2.2.3.3. Control de velocidad variable
 - 1.2.3. Selección de compresores
 - 1.2.3.1. Análisis de demanda de aire
- 1.3. Variadores de frecuencia en compresores
 - 1.3.1 Principio y funcionamiento
 - 1.3.2 Rectificador
 - 1.3.3 Bus de suavización
 - 1.3.4 Inversor PWM
 - 1.3.5 Aplicaciones de variadores de frecuencia en la industria
- 1.4. Motores
 - 1.4.1. Tipos de motores
 - 1.4.2. Motores asíncronos
 - 1.4.3. Clases de eficiencia en motores CA
 - 1.4.3.1. Motores de eficiencia estándar
 - 1.4.3.2. Motores de alta eficiencia
 - 1.4.3.3. Motores de eficiencia Premium
 - 1.4.4. Normas aplicables a motores asíncronos
 - 1.4.4.1. Normas NEMA
 - 1.4.4.2. Normas IEC
 - 1.4.4.3. Comparación entre las clasificaciones NEMA e IEC
 - 1.4.5. Tipos de motores
 - 1.4.6. Motores asíncronos
 - 1.4.7. Clases de eficiencia en motores CA
- 1.5. Mantenimiento
 - 1.5.1. Tipos de mantenimiento
 - 1.5.2. Mantenimiento preventivo

- 1.5.3. Criticidad de equipo
 - 1.5.4. Mantenimiento de compresores
 - 1.5.5. Mantenimiento de motores asíncronos
 - 1.5.6. Mantenimiento de variadores
 - 1.6. Análisis de causa raíz como herramienta para mejorar la confiabilidad de un equipo
 - 1.6.1. Confiabilidad
 - 1.6.2. Disponibilidad
 - 1.7. Calidad de potencia
 - 1.7.1. Armónicos
 - 1.7.2. Parpadeo
 - 1.7.3. Transitorio
 - 1.7.4. Hueco de tensión
 - 1.7.5. Desbalance
 - 1.8. Tierra física
 - 1.8.1. Tipos de tierra física para variadores de frecuencia
2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO A VARIADORES DE FRECUENCIA DE LOS COMPRESORES DE AIRE TIPO TORNILLO ENTRE 45 Y 55 kW, CON BASE EN UN ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ A TRES COMPRESORES CON VARIADORES SIEMENS
3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

9. METODOLOGÍA

9.1. Tipo de investigación

La investigación será de tipo cuantitativa explicativa, se harán mediciones en compresores de aire tipo tornillo con variadores de frecuencia para determinar la calidad de potencia, temperatura de operación y tierra física, y para obtener una comprensión acertada de las causas encontradas que originan el fallo de los variadores, así como para evidenciar los efectos negativos que tiene la variación de las condiciones de operación en comparación con las sugeridas por el fabricante.

9.2. Alcances de la investigación

Se escogió el alcance de la investigación cuantitativo explicativo, se pretende establecer las causas o razones de fallo de la muestra, para dar origen a un mantenimiento preventivo basado en mantener los indicadores establecidos por el fabricante en parámetros con valores permitidos en la operación.

9.3. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es no experimental, ya que es un estudio que se basa en variables que únicamente cambian en el tiempo y no se manipularán intencionalmente.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la investigación será un diseño longitudinal a través de segmentos. El análisis de causa raíz se hará de manera retrospectiva con el fin de obtener información de daños producidos e identificar sus causas. La recolección de datos en el tiempo actual se hará a través de equipos de medición, evaluando una o dos veces los mismos equipos.

Para las muestras de los tres equipos a evaluar se tomarán como referencia los equipos con el mayor número de fallos del variador de frecuencia de los compresores de aire tipo tornillo, entre las potencias de 45-55 kW, en los últimos tres años, para poder evaluar retrospectivamente sus fallos sobre la documentación presentada por la empresa fabricante del compresor de aire.

9.4. Variables cuantitativas

Se medirán calidad de potencia, voltaje, corriente, factor de potencia y armónicos, según IEEE1159, que establece los valores máximos de distorsión del suministro de energía eléctrica. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 2005)

Se medirá el valor de la tierra física para identificar su resistencia y fallas a tierra como cortocircuito a tierra en el motor, devanados del motor, cables de alimentación o dentro del variador de frecuencia. También se medirá temperatura del cuarto de compresores, del gabinete eléctrico, del motor eléctrico y de la electrónica de potencia.

9.5. Indicadores

El objetivo de mantener los parámetros establecidos por el fabricante es la clave para mantener una operación continua en el variador de frecuencia de un

compresor de aire tipo tornillo, en que el aumento de estos valores disminuye la confiabilidad de operación del compresor de aire. Los valores según el fabricante se presentaton en la tabla III.

Tabla V. **Indicadores**

Datos eléctricos	
Estructura de red	Redes TN/TT o redes aisladas (redes IT)
Frecuencia de red	47...63 Hz
Frecuencia de salida	0...300 Hz
Factor de potencia en la red - Onda fundamental	≥ 0.98
- Total	0,93...0.96

Fuente: Siemens. (2008). *Sinamics G150: convertidores en armario*.

El objetivo de medir la resistencia de tierra física es garantizar un valor entre 1- 5 Ohm, generalmente funcional para plantas industriales según IEEE 142-2007, resguardando la seguridad de las personas y de los equipos.

El objetivo de monitorear la temperatura ambiental al entorno del variador de frecuencia es garantizar que no exceda los valores del entorno para el cual fue diseñado.

Tabla VI. **Indicadores, límites de temperatura ambiente del variador de frecuencia**

Condiciones del entorno	en almacenamiento	en transporte	en servicio
Temperatura ambiente	-25... +55 °C	-25...+70 °C a partir de -40 °C durante 24 horas	0...+40 °C hasta + 50 °C con derating
Humedad relativa (sin condensación)	5...95 %	5...95 % a 40 °C	5...95 %

Fuente: Siemens. (2008). *Sinamics G150: convertidores en armario*.

El objetivo de estas mediciones es observar que los parámetros eléctricos medidos arrojen desviaciones identificables con el mal suministro de energía, fallos de puesta a tierra y condiciones ambientales que puedan ocasionar daños al variador de frecuencia dentro del compresor de tornillo.

9.6. Fases de estudios

Para esta parte se tendrá acceso a la documentación de mantenimiento de la empresa fabricante de tornillo, y de equipos que contengan variador de frecuencia en la construcción del compresor de aire para la sección de muestra.

9.6.1. Selección de la muestra

La selección de la muestra se llevará a cabo en la primera fase, consistirá en recolectar la documentación de mantenimientos y fallas de los compresores de aire tipo tornillo en que falló el variador de frecuencia en los tres equipos distintos. A la muestra seleccionada se le realizarán mediciones de las condiciones actuales de tierra física, calidad de potencia y temperatura.

9.6.2. Recolección de datos

Tomando como base la selección de muestra para un análisis de causa raíz de la falla en estos equipos.

9.6.2.1. Recolección de datos históricos

Se llevará a cabo en la segunda fase la recolección de datos históricos de mantenimiento del proveedor del compresor de aire, identificando fallos en la

operación del variador de frecuencia, que permitirán entender las causas y consecuencias que se analizarán posteriormente.

9.6.2.2. Recolección de datos cuantitativos

La recolección de datos se realizará para la tierra física utilizando el equipo marca Fluke 1630, referencia que se analizará posteriormente. Para la calidad de potencia se utilizará el equipo Dranetz Power Visa, clase A, que serán indicadores. Para la recolección de datos de temperatura también se utilizará el medidor marca Fluke 62Max, para posteriormente ser analizarlos.

9.6.3. Análisis de datos cuantitativos

En la última fase, con la selección de documentación histórica de daños y recolección de datos cuantitativos, será posible analizar e interpretar los datos.

La manera a realizarse se describirá en el siguiente capítulo de técnicas de análisis.

9.7. Resultados esperados

Se espera obtener el número de fallas por equipo, las tendencias en la calidad de potencia suministrada al variador de frecuencia basadas en la norma IEEE 1159, el valor de tierra física dentro de los valores que establece IEEE 142-2007 y las condiciones ambientales en la cuales están operando los variadores de frecuencia de los compresores de aire tipo tornillo analizados, con el objetivo de evitar fallas prematuras y prolongar la vida útil de los equipos con la aplicación del mantenimiento preventivo a los variadores de frecuencia.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

La obtención del historial de fallos y mantenimiento de los variadores de frecuencia de cada uno de los tres compresores de aire seleccionados, en la base de datos del proveedor del equipo, proporcionará información para identificar fallos recurrentes y mantenimientos del equipo según lo recomendaba el manual del fabricante.

Con la información obtenida se puede tomar la decisión de realizar mediciones recomendables de calidad de potencia, mediciones de tierra física y temperatura del equipo, así como verificar las condiciones de operación, que serán comparadas con los datos que indican las normas IEEE 1159, IEEE 142 - 2007, para determinar si se encuentran dentro del rango de suministro de energía, baja resistencia y temperatura adecuada de operación.

Si se encuentran fuera de límites según las normas y rangos ya citados, se deben mejorar las condiciones de calidad de potencia con filtros, reactores o capacitores, para los valores de tierra física las correcciones necesarias para disminuir los valores de ohmios, y para condiciones de temperatura mejorar la ventilación del variador de forma natural o forzada a través de ventiladores.

Para conservar el variador de frecuencia de los compresores de aire tipo tornillo en operación es necesario analizar la calidad de energía, su correcta tierra física y condiciones ambientales, haciendo las correcciones necesarias para su operación continua.

Las técnicas de análisis a utilizar en la investigación serán las siguientes:

10.1. Gráfico de líneas

Se utilizará el gráfico de líneas para representar la forma de onda sinusoidal de voltaje, corriente y frecuencia en función del tiempo, emitida por el equipo Dranetz Power Visa, clase A. Esta gráfica dará un estudio comparativo de la onda medida respecto a los valores según IEEE 1159 y los valores sugeridos por el fabricante.

10.2. Gráfico de dispersión

Se utilizará este tipo de gráfico para ver el comportamiento de la variable de temperatura como parámetro dependiente. Teniendo límites de temperatura para la operación del variador de frecuencia del compresor de aire, se tomarán mediciones durante el tiempo de una semana y se realizará el gráfico de tendencia en el tiempo, para que sea posible verificar las temperaturas de operación en el transcurso del día. La función del gráfico es hacer un estudio comparativo para la temperatura tomada en cada equipo de muestreo.

10.3. Línea de tendencia

La norma IEEE 1159 recomienda prácticas para el monitoreo de la calidad de potencia y establece los límites permitidos a la energía eléctrica suministrada, por lo cual se debe evaluar los componentes de la onda.

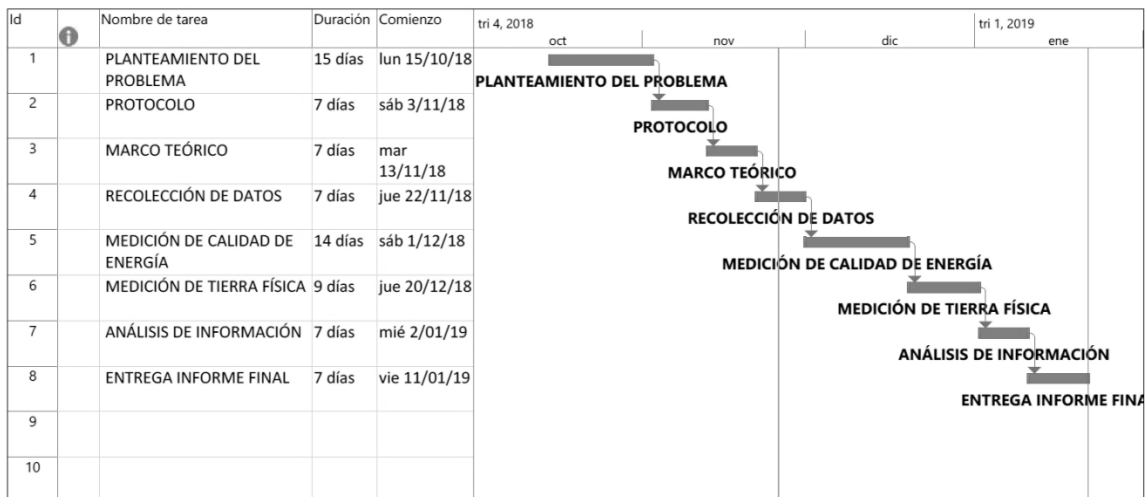
Se debe crear una tendencia de los diferentes tipos de perturbaciones y el efecto que tienen sobre un sistema de potencia, frecuencia y distorsión de la onda. Cada uno aportará valores que determinan la calidad de energía.

La tierra física se evalúa en función de la norma IEEE 142-2007, por lo que se tomará la medición y se realizará un gráfico del comportamiento de este valor.

11. CRONOGRAMA

La ejecución del proyecto tendrá como inicio el día 12 de marzo de 2018, con fecha de finalización el 20 de junio de 2018.

Figura 36. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. RECURSOS NECESARIOS Y FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

12.1. Recursos

Los recursos utilizados en el trabajo de investigación son descritos a continuación:

12.1.1. Recurso humano

- Investigador: persona que realiza el estudio de investigación para implementación del mantenimiento preventivo.
- Asesor: persona encargada de asesorar la investigación de manera profesional.
- Técnico especialista: persona subcontratada para realizar estudios de calidad de potencia y mediciones de tierra.
- Soporte técnico: persona encargada de brindar la documentación de los mantenimientos en cada uno de los equipos a analizar.

12.1.2. Recurso material y equipo

- Medidor de calidad de potencia Dranetz Power Visa, clase A
- Medidor de resistencia para la tierra física y aislamiento Fluke 1630
- Medidor de temperatura Fluke 62Max

- Computadora
- Agenda
- Cuaderno de notas
- Impresora
- Teléfono móvil

Tabla VII. **Recurso financiero**

Description del recurso	Cantidad	Total
Renta de medidor de calidad de potencia	#9 días	Q, 10 500,00
Personal técnico	#4 días	Q, 6 000,00
Equipos y suministros de oficina	#1	Q, 1 000,00
Costo de utilizar medidor de tierras	#4	Q, 1 000,00
Transporte	#4	Q, 2 400,00
Viáticos	#4	Q, 400,00
Telefonía e internet	#1	Q, 100,00
Total, costos		Q. 21 400,00

Fuente: elaboración propia.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB . (2011). *IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*.
2. ABB. (2018). *IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors*.
3. Alarcón García, J. M. (2014). *Implementación de un sistema de mantenimiento preventivo, auxiliado por un software, para una línea de pintura electroforética*. Puebla, Cholula, México: Universidad de las Américas.
4. Altmann, C. (2006). *El análisis de causa raíz, como herramienta en la mejora de la confiabilidad*. Uruguay: Congreso Uruguayo de Mantenimiento.
5. Apaza Loza, R. (2011). *Mantenimiento preventivo de un compresor de aire*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.
6. Arias Galindo, J. R. (2018). *Plan de mantenimiento preventivo para el sistema de aire comprimido para la planta San Gabriel, Cementos Progreso, S.A*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.

7. Benedetti Gómez, M. (2004). *Plan de mantenimiento para los equipos de la empresa Maderas El Ceibal*. Cartagena, Colombia: Universidad Tecnológica de Bolívar.
8. Binti Syed Mustaffa, S. A. (2006). *Variable speed drives as energy efficient strategy in pulp and paper industry*. Johor, Malasia: Forgrad.
9. Brown, R. N. (1997). *Compressors selection & sizing*. Houston, USA: Butterworth-Heinemann.
10. Brown, R. N. (2005). *Compressors selection and sizing*. Houston, USA: Elsevier.
11. Cabrera, A. (2016). *Historia de los compresores de aire*. Recuerdo de. <http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2016/02/05/historia-de-los-compresores-de-aire/>.
12. Carbon Trust. (2007). *Variable speed drives. Introducing energy saving opportunities for business*. London, England: Queen's Printer and Controller of HMSO.
13. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2005). *Calidad de potencia*. Bogotá, Colombia.
14. Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2012). *Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Recuperado de. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/c2dae01dccebf05105257a4c00719a8f?OpenDocument>.

15. Delta Electronics, Inc. (2007). *VFD-E. Microvariador de frecuencia para motores CA, de alto desempeño y opciones flexibles*. Neihu, Taipei, Taiwan, China: Delta Electronics Inc.
16. Dranetz. (2005). *PowerVisa™ USER'S GUIDE*. New Jersey, Estados Unidos de América: Edison.
17. Fernández Díez, P. (2017). *Ingeniería energética*. Recuperado de http://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=http%3A%2F%2Fmanager.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemId%3D39%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38.
18. Festo. (2013). *Calidad del aire comprimido en la industria alimentaria y de bebidas. Conocimientos profesionales y soluciones para la industria alimentaria y de bebidas*. Alemania.
19. Fluke Ibérica, S.L. (2004). *Cómo afectan los variadores de velocidad a la distribución de alimentación eléctrica*. Madrid, España.
20. Gardel, P. E. (2013). *Aportaciones al mantenimiento predictivo de motores de inducción mediante una metodología de diagnóstico basada en el uso combinado de técnicas estadísticas y redes neuronales artificiales*. Valladolid, España: Universidad de Valladolid.
21. Gómez, R. M. (2015). *Análisis del suministro eléctrico, mejoras de los índices y niveles de calidad en la distribución de energía eléctrica*. Alicante, España: McGraw-Hill.

22. Hanlon, P. C. (2001). *Compressor handbook*. New York, USA: McGraw-Hill.
23. Holguin, M.; Gomezcoello, D. (2010). *Análisis de calidad de energía eléctrica en el "nuevo campus" de la Universidad Politécnica Salesiana*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politecnica Salesiana.
24. IEEE Industry Applications Society. (1998). *IEEE guide for maintenance, operation, and safety of industrial and commercial power systems*. New York, Estados Unidos de América.
25. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2005). *Powering and grounding electronic equipment*. New York, USA.
26. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2007). *Grounding of industrial and commercial power systems*. IEEE Std 142™-2007. New York, United States of America.
27. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (2014). *Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. New York, United State of America.
28. International Electrotechnical Commission. (2016). *Rotating electrical machines. Part 30-2: efficiency classes of variable speed AC motors (IE-code)*.
29. International Organization for Standardization. (2016). *ISO 9001:2015*. Switzerland.

30. Kaeser Kompressoren AG. (2013). *Manual de seminario de aire comprimido*. Coburg, Germany.
31. López Mesa, D. J.; Camacho Muñoz, G. A.; Díaz Chávez, J. O.; Gaviria López, C. A. (2007). *Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos de AC*. Cauca, Colombia: Universidad del Cauca.
32. Mantilla, L. F.; Cardona, J. A. (2005). *Gestión energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad*. Santander, España: Universidad de Cantabria.
33. Mejía Tapia, E. (Septiembre de 2007). *Aspectos a considerar para la organización del departamento de mantenimiento en una empresa*. Hidalgo, México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
34. Mesa Grajales, D. H.; Ortiz Sánchez, Y.; Pinzón, M. (2006). *La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas*. Scientia et Technica, 155-160.
35. Nava Hernández, E. I. (2017). *Compresores con control de velocidad variable con convertidor de frecuencia*. Recuperado de <http://airecomprimidokaeser.com/index.php/2017/06/22/compresores-con-control-de-velocidad-variable-con-convertidor-de-frecuencia-2/>.

36. Ovalles Acosta, J. D.; Soler, V. G.; Pérez Molina, A. I. (2017). *Herramientas para el análisis de causa raíz (ACR)*. Alcoy, España: Pontificia Universidad Católica.
37. Ramírez, J. S.; Cano, E. A. (2010). *Sistema de puesta a tierra: diseñado con IEEE-80 y evaluado con MEF*. Bogotá, Colombia: Blanecolor Ltda.
38. Rodríguez, D. (2002). *Medidas en variador de velocidad*. España: Universidad de Cantabria.
39. Saidur, R.; Mekhilef, S.; Ali, M. B.; Safari, A.; Mohammed, H. A. (2011). *Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings*. Malasia, Singapur: Universidad de Singapur.
40. Savostianik, M. (2014). *Protección de fallas a tierra con varidores de frecuencia*.
41. Schneider Electric, S.A. (2010). *Guía de diseño de instalaciones eléctricas 2010*. Barcelona , España.
42. Siemens. (2008). *Sinamics G150: convertidores en armario*. Nürnberg, Alemania.
43. Sierra Álvarez, G. A. (2004). *Programa de mantenimiento preventivo para la empresa metalmecánica industrias AVM S. A.* Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

44. The Carbon Trust. (2007). *Variable speed drives. Introducing energy saving opportunities for business*. London, England: Queen's Printer and Controller of HMSO.
45. Thompson, A.; Taylor, B. N. (2008). *Guide for the use of the International System of Units (SI)*. New York: National Institute of Standards and Technology Special Publication 811.
46. Toapanta, O. G. (2009). *Implementación de un análisis de mantenimiento basado en condición de los compresores recíprocos y de tornillo*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
47. Urzúa, A. (2013). *Mantenimiento de variadores de frecuencia*. *Electro Industria*, XIII(140), 10-11. Recuperado de <http://www.emb.cl/electroindustria/flipbook/201301/#/11>.
48. Vélez, H. A. (2016). *Estudio de causas de falla en variadores de frecuencia bajo ambientes industriales*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
49. Vuckovic, A. (2014). *Investigating the effects of unbalanced voltages and voltage harmonics on a three-phase induction motors performance*. Perth, Western Australia.
50. WEG. (2016). *Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM*. Jaraguá do Sul, Brasil.

51. WEG. (2018). *Guía práctica de capacitación*. Recuperado de <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb1/hee/WEG-guia-practica-de-capacitacion-tecnico-comercial-50026117-brochure-spanish-web.pdf>.
52. Wildi, T. (2006). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. 6a ed. México: Pearson Educación.