



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

**TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN
RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN
MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA**

Ing. Luis Cristián García Estrada

MSc. Inga. Química Sandra Ninett Ramírez Flores

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN
RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN
MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. LUIS CRISTIÁN GARCÍA ESTRADA

ASESORADO POR LA MSC. INGA. QUÍMICA SANDRA NINETT RAMÍREZ
FLORES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ARTES EN INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

GUATEMALA, ENERO DE 2022

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. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADORA	Inga. Rocio Carolina Medina Galindo
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 16 de mayo de 2020.



Ing. Luis Cristián García Estrada

Facultad de Ingeniería

Decanato
24189101-
24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.020.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA**, presentado por: **Luis Cristián García Estrada**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, enero de 2022

AACE/gaac



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.020.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA”

presentado por **Luis Cristián García Estrada** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Ingeniería de mantenimiento** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”



Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala 19 septiembre 2021.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **Trabajo de Graduación** titulado: **“TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA”** del estudiante **Ing. Luis Cristián García Estrada**, con número de carné **200010518** del programa de **Maestría en Ingeniería de Mantenimiento**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

Mtra. Inga. Rocío Carolina Medina Galindo
Coordinadora
Maestría en Ingeniería de Mantenimiento
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 04 de noviembre de 2020

MA. Ing. Edgar Darío Álvarez Coti
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

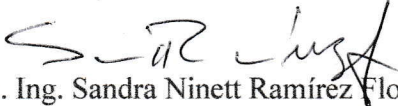
Estimado MA. Ing. Álvarez Coti:

Por este medio informo que he revisado y aprobado como asesora, el Trabajo de Graduación titulado "TÉCNICAS PREVENTIVAS PARA LA DETECCIÓN DE CORROSIÓN ELÉCTRICA EN RODAMIENTOS DE BOLAS POR CIRCULACIÓN DE CORRIENTES EN MODO COMÚN EN MOTORES ELÉCTRICOS DE 425 KW ACCIONADOS POR VARIADORES DE FRECUENCIA.", del estudiante **Luis Cristián García Estrada**, quien se identifica con número de carné: 200010518 del Programa de Maestría en **Ingeniería de Mantenimiento**.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

"Id y enseñad a todos"


MSc. Ing. Sandra Ninett Ramírez Flores
Colegiado No. 437

Sandra Ninett Ramírez Flores
INGENIERA QUÍMICA, COL. No. 437
MSc. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO

ACTO QUE DEDICO A:

- | | |
|---------------------------|--|
| A Dios | Por estar siempre a mi lado llenándome de bendiciones e iluminando nuestras vidas. |
| Mis padres | Quienes con su apoyo, dedicación y ejemplo me han acompañado siempre. |
| Mis hermanas | Quienes con sus consejos han estado siempre conmigo. |
| A mi esposa e hija | Quienes con su apoyo y paciencia han contribuido a este logro. |

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser mi casa de estudios.

Ingenio Santa Ana Lugar donde trabajo y por el apoyo brindado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XVII
OBJETIVOS.....	XXI
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Importancia de la Calidad de Energía Eléctrica	1
1.2. Cargas eléctricas Lineales y No Lineales	1
1.3. Clasificación de fenómenos electromagnéticos	2
1.4. Motores Eléctricos.....	3
1.4.1. Partes de un motor eléctrico.....	4
1.4.1.1. Estator o inductor	4
1.4.1.2. Rotor o inducido	4
1.4.2. Clasificación de los motores.....	4
1.4.2.1. Motores de Corriente Directa o continua	5
1.4.2.2. Motores de corriente alterna.....	5
1.4.2.3. Motores universales	8
1.5. Distorsión Armónica.....	8
1.5.1. Norma IEEE 519 2014.....	9
1.5.2. Norma IEC EN 61642.....	12
1.5.3. Definición de armónicos	13

1.5.4.	Indicadores eléctricos de distorsión armónica.....	13
1.5.5.	Efectos de las corrientes armónicas.....	14
1.5.6.	Resonancia de capacitores	14
1.5.7.	Compensación del factor de potencia	14
1.6.	Variadores de frecuencia	14
1.6.1.	Funcionamiento de un variador de frecuencia	15
1.7.	Rodamientos.....	16
1.7.1.	Estructura de los rodamientos.....	17
1.7.2.	Capacitancias características.....	18
1.8.	Circuito en modo común.....	20
1.8.1.	Medición de corrientes en modo común.....	21
1.8.2.	Criterios de selección de metodología	21
1.9.	Bobina Rogowski.....	23
1.10.	Corrosión	23
1.10.1.	Tipos de corrosión.....	24
1.10.1.1.	Corrosión Generalizada (uniforme).....	24
1.10.1.2.	Corrosión localizada.....	24
1.10.1.3.	Corrosión Galvánica.....	24
1.10.1.4.	Corrosión Intergranular	25
1.10.1.5.	Corrosión por Picadura o “Pitting”	25
1.10.1.6.	Daño por cavitación	25
1.10.1.7.	Corrosión microbiológica.....	26
1.10.1.8.	Corrosión combinada con fenómeno físico	26
1.10.1.9.	Corrosión por erosión.....	26
1.10.1.10.	Corrosión por fisuras.....	26
1.10.1.11.	Corrosión por fatiga.....	27
1.10.1.12.	Corrosión filiforme	27
1.10.2.	Control y técnicas preventivas para la corrosión.....	28
1.10.2.1.	Diseño.....	28

1.10.2.2.	Selección de los materiales	30
1.10.2.3.	Recubrimientos protectores.....	30
1.10.2.4.	Inhibidores (tratamiento químico)	31
1.10.2.5.	Protección catódica	31
1.10.2.6.	Protección anódica	33
1.11.	Vibraciones mecánicas	34
1.11.1.	Parámetros a monitorear	34
1.11.2.	Límites permisibles para vibraciones.....	35
2.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
2.1.	Visita de campo para reconocimiento.....	37
2.2.	Visita de muestreo y medición de variables.....	40
2.2.1.	Presencia de corriente eléctrica en puestas a tierra.....	42
2.2.2.	Medición de calidad de energía	45
2.2.3.	Medición de vibraciones mecánicas.....	46
2.3.	Calidad de energía en motores eléctricos.....	47
2.4.	Vibraciones mecánicas que experimenta el par motor-ventilador	48
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	49
3.1.	Tendencia de variables operativas de motores eléctricos	49
3.1.1.	Variables de origen eléctrico	50
3.1.2.	Variables de origen mecánico	53
3.2.	Calidad de energía a la que se exponen los motores eléctricos.....	56
3.3.	Incidencia de falla en rodamientos de motores eléctricos	57
3.3.1.	Tiempo medio entre paradas	57
3.3.2.	Disponibilidad.....	58
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	61
4.1.	Técnicas de control de la corrosión para motores eléctricos	61

4.2.	Validez externa.....	64
4.3.	Validez interna.....	68
4.4.	Divulgación.....	69
CONCLUSIONES.....		71
RECOMENDACIONES		73
REFERENCIAS		75
APÉNDICES.....		83
ANEXOS.....		89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Motores más utilizados según el tipo de alimentación.....	6
2.	Esquema del circuito principal de un variador de frecuencia.....	16
3.	Estructura de los rodamientos	17
4.	Capacitancias parásitas equivalentes en el motor de inducción.....	19
5.	Corrosión eléctrica en pista interna y elementos rodantes	21
6.	Bobina de Rogowski.....	23
7.	Anillo de ferrita para filtro de modo común	29
8.	Filtro LC utilizado como elemento de choque.....	30
9.	Clasificación de los inhibidores de corrosión.....	31
10.	Límites de vibraciones permisibles según norma ISO 10816-3.....	35
11.	Límites de vibraciones para velocidad y aceleración en RMS.....	36
12.	Check list de condiciones operativas.....	39
13.	Distribución de puntos para medición de vibraciones.....	41
14.	Localizador de paso de corriente eléctrica TKED 1	42
15.	Detección de circulación de corrientes eléctricas en rodamientos	43
16.	Refuerzo de tierras físicas en motor de ventilador inducido 1	44
17.	Instalación de carbones de tierra en contacto con eje de motor.....	44
18.	Medidor de vibraciones Adash VA4 Pro y acelerómetro	47
19.	Correlación entre voltajes	50
20.	Comportamiento de desviaciones estándar de voltajes	51
21.	Comportamiento de desviaciones estándar de corrientes.....	52
22.	Medición de resistencia a tierra	52

23.	Cable para bajadas de corriente para pararrayos	53
24.	Comportamiento de la aceleración en el motor inducido 1.....	54
25.	Comportamiento de la aceleración en el motor inducido 2.....	55
26.	Deterioro en rodamiento.....	55
27.	Reparación en aislamiento eléctrico de rodamiento.....	56
28.	Efecto de la circulación de corrientes en modo común	63
29.	Cable utilizado por ABB para puestas a tierra.....	67

TABLAS

I.	Clasificación de fenómenos electromagnéticos según la IEC	2
II.	Base para los Límites de Corriente Armónica	9
III.	Límites de Distorsión de Corriente (desde 120 V hasta 69.000 V)...	10
IV.	Clasificación y Límites de Distorsión	11
V.	Límites de distorsión de voltaje	12
VI.	Descripción de elementos de la figura 5.....	19
VII.	Factibilidad para la medición de corrientes en modo común.....	22
VIII.	Protección Catódica Pasiva y Protección Catódica Activa	32
IX.	Metales y soluciones capaces de ser protegidos anódicamente.....	34
X.	Mediciones de circulación de corrientes en rodamientos	45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AMM	Administrador del Mercado Mayorista.
ANOVA	<i>Analysis Of Variance</i> . Análisis de varianza, por sus siglas en inglés.
ESD	<i>Electrostatic discharge</i> , Descarga electrostática, por sus siglas en inglés.
ISGEC	<i>Indian Sugar & General Engineering Corporation</i> , Azúcar India & Corporación de Ingeniería General, por sus siglas en inglés.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, por sus siglas en inglés.
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistors</i> . Transistor Bipolar de Puerta Aislada, por sus siglas en inglés.
IEC	<i>International Electrotechnique Commission</i> , Comisión Electrotécnica Internacional por sus siglas en inglés.

AETNA	Marca de cable aislado eléctricamente especial para instalaciones donde se utilicen variadores de frecuencia.
NEMP	<i>Nuclear Electro Magnetic Pulse</i> , Pulso electromagnético nuclear, por sus siglas en inglés.
PCC	<i>Point common coupling</i> , punto de acoplamiento común, por sus siglas en inglés.
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , Modulación por Ancho de Pulso, por sus siglas en inglés.
RMS	Raíz Media Cuadrática.
SIGES	Sistema Integrado de Gestión.
SCC	<i>Stress Corrosion Cracking</i> , <i>Corrosión bajo tensión</i> , por sus siglas en inglés.
SRB	<i>Sulfate-Reducing Bacteria</i> , Bacterias Reductoras de Sulfato por sus siglas en inglés.
V.O.S.O	Técnica de inspección: Ver, Oír, Sentir y Oler.
TMEP	Tiempo medio entre paradas, también conocido como MTBF <i>Mid Time Between Failures</i> , por sus siglas en inglés.
THD	<i>Total harmonic distortion</i> , Distorsión armónica total, por sus siglas en inglés.

GLOSARIO

Bobina Rogowski	Bobina transductora de corriente, su área transversal es constante y se construye uniformemente arrollada sobre un material diamagnético.
Cargas lineales	Estas se comportan como cargas convencionales de manera lineal, lo anterior significa que, al aplicar una tensión, la forma de onda de la corriente conserva esa misma forma.
Cargas no lineales	Una carga donde la forma de onda de la corriente de estado estable no sigue la forma de onda del voltaje aplicado.
Componente espectral	Es un elemento del espectro de frecuencia que distribuye las amplitudes para cada frecuencia de un fenómeno ondulatorio.
Corriente de Flecha	La descarga de corriente puede causar cordones de soldadura en cojinetes que no están aislados adecuadamente en motores eléctricos. La descarga de corriente a menudo es causada por picos de voltaje de los variadores de frecuencia.

Distorsión armónica	Medida de cuánto la carga eléctrica, pasiva o activa, distorsiona la forma de onda perfecta de la potencia proporcionada por el suministrador eléctrico.
Filtro LC	Filtro compuesto por una bobina (L) y un capacitor (C) utilizado para cancelar o realzar frecuencias o componentes de frecuencias a las cuales está sintonizado.
Flicker	Disturbio en la amplitud de la tensión. Se puede apreciar de forma visual en la fluctuación de la luminiscencia en las lámparas que son alimentadas con una fuente común. Su origen está en las fluctuaciones bruscas de la tensión en la red.
Inter armónicas	Son las componentes de frecuencias que no son un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. El orden se establece por la relación entre la frecuencia de Inter armónico y la fundamental.
Resonancia	Fenómeno que se produce en un circuito eléctrico a una frecuencia de particular cuando las Impedancias o admitancias de los elementos del circuito se cancelan entre sí. En algunos circuitos, esto sucede cuando la impedancia entre la entrada y la salida del circuito es cercana a cero ohmios.

Sinusoidal	Se llama sinusoidal porque sigue la forma de la función matemática SENO .
Tableau	Software utilizado para representación gráfica y análisis de datos.
Zafra	Periodo del año comprendido entre noviembre y mayo durante el que se realiza la cosecha y procesamiento de la caña de azúcar.

RESUMEN

En el departamento de cogeneración perteneciente a una planta de generación térmica, ubicada en el departamento de Escuintla, se tiene instalada la caldera marca ISGEC que opera a una presión de vapor de 1 200 kgf/cm², en dicha caldera se tienen dos equipos denominados ventiladores inducidos 1 y 2, que se encargan de la extracción de los gases producto de la combustión, impidiendo que se acumule la presión dentro del hogar de la caldera y evitando que se tenga que regular o disminuir la generación eléctrica destinada para la venta al sistema nacional interconectado.

Durante el periodo de zafra 17-18, comprendido entre noviembre del 2017 y mayo del 2018, se escuchó ruido de rozamiento y golpeteo en el cojinete del lado no acoplado del motor eléctrico que acciona el ventilador inducido 1, se procedió a realizar mediciones de calidad de energía eléctrica con el equipo AEMC 8336 para luego comparar los datos muestreados de la distorsión armónica contra la norma IEEE 519-2014.

En la comparación se apreció que los parámetros eléctricos se encontraban dentro de rangos aceptables, además se hicieron mediciones de vibraciones mecánicas con el equipo Adash A-4400 VA4 Pro, para analizar si los valores medidos se encontraban en rangos aceptables según lo determinado en la norma ISO 10816-3 y las recomendaciones del fabricante de dicho medidor de vibraciones para establecer las posibles causas de dicho ruido.

Por otro lado, se utilizó el equipo TKED 1 para la detección de campo magnético producido por la circulación de corrientes en modo común en el cableado de puesta a tierra del motor.

Luego de analizar la información recabada y tabulada juntamente con el departamento de mantenimiento predictivo, se acordó que debía cambiarse ese rodamiento para evitar dañar el motor y todos los componentes del conjunto motor-ventilador inducido 1.

Para el cambio del rodamiento se programó sacar de línea el motor del ventilador inducido 1, para evitar con esto afectar la generación y reducir la venta de energía eléctrica de la planta, ya que de hacerlo sin previo aviso tendría que regularse la generación y venta de energía eléctrica de 44.2 MW a 30 MW, sufriendo penalización por desvíos de potencia con el AMM.

Se procedió a examinar el rodamiento dañado partiéndolo por la mitad y pudo apreciarse que presentaba estrías en las pistas internas de los aros interior y exterior, en vista de lo anterior, se procedió a realizar una revisión y reforzamiento de las tierras físicas y sus puntos de conexión al motor que acciona el ventilador inducido 1.

Posterior a mejorar el aterrizaje del motor del ventilador inducido 1, se continuó con el monitoreo periódico de las variables mecánicas y eléctricas, notando solamente la disminución de las vibraciones mecánicas al inicio.

Luego de aproximadamente un mes de operación del equipo, se escuchó nuevamente ruido en el mismo rodamiento, razón por la cual se continuó investigando la causa de dicha falla, se observó que las mejoras a la red de tierras

no fueron suficientes para solventar el problema y luego de operar de manera supervisada durante la zafra 18-19.

En enero del 2019, se procedió a cambiar nuevamente el rodamiento con la variante de que se instaló un rodamiento de tipo aislado eléctricamente, logrando con este rodamiento una operación más estable y evitando realizar paradas preventivas del equipo para revisión de las condiciones físicas del rodamiento, ya que los monitoreos realizados no mostraron indicios de falla del rodamiento.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Descripción del problema

El problema existente es el deterioro acelerado de los rodamientos traseros del motor del Ventilador Inducido 1 por corrosión eléctrica. Al momento de realizar la intervención correctiva buscando disminuir el ruido y las vibraciones en el motor del Inducido uno de la caldera marca ISGEC, se procede a desarmar la parte trasera del motor y posteriormente a desmontar el rodamiento de dicho extremo del motor, se ha encontrado que este rodamiento presenta estrías en toda la parte interna de las pistas externa e interna, además los elementos rodantes presentan un color gris oscuro producto del arqueado eléctrico que se da cuando el motor se encuentra en funcionamiento.

Delimitación

En el departamento de Cogeneración, específicamente en la Planta Térmica de 62.4 MW, se tiene instalada una caldera de marca ISGEC con una capacidad de 1 200 kgf/cm², la caldera es alimentada con bagazo y carbón en época de zafra y en época de no zafra exclusivamente con carbón. Con la combustión se producen gases en el hogar de la caldera que deben desalojarse por el accionamiento de los ventiladores inducidos, los ventiladores son alimentados y controlados por variadores de frecuencia para ajustarse según sea la demanda de vapor para la producción de azúcar y energía eléctrica.

Consecuencias

El panorama en la planta tomando en cuenta la realización de esta investigación, es que se reducirían considerablemente los tiempos perdidos por paros de equipos y consecuentemente, se tendría una disminución de los costos en el presupuesto de mantenimiento. Por otro lado, de no realizarse la investigación continuarían teniéndose paros de maquinaria y se mantendrían los costos en el presupuesto, afectando de esta manera los índices de disponibilidad y los índices de costos para la producción del MW h - de la planta.

Preguntas orientadoras

Tomando en consideración la problemática descrita, se plantean las siguientes preguntas:

Pregunta orientadora central

¿Cómo se puede detectar la corrosión eléctrica en rodamientos de bolas de motores eléctricos de 425 KW accionados por variadores de frecuencia?

Preguntas Auxiliares

- ¿Cómo se establece la tendencia de las variables operativas de los motores eléctricos accionados por variador de frecuencia?

- ¿Cómo puede determinarse la calidad de energía a la que se exponen los motores eléctricos accionados por variador de frecuencia?
- ¿Qué técnicas de control preventivas permiten determinar la incidencia de falla en los rodamientos de los motores eléctricos al ser accionados con variador de frecuencia?
- ¿Cómo pueden determinarse las técnicas de control de la corrosión eléctrica en rodamientos de motores accionados por variadores de frecuencia?
- ¿Pueden establecerse técnicas para divulgar la metodología más apropiada para prevenir la corrosión eléctrica en los rodamientos de los motores accionados por variador de frecuencia?

OBJETIVOS

Objetivo general

Aplicar técnicas preventivas para la detección de corrosión eléctrica en rodamientos de bolas de motores eléctricos de 425 kW accionados por variadores de frecuencia.

Objetivos específicos

1. Establecer tendencia documentada de variables operativas de motores eléctricos.
2. Determinar la calidad de energía a la que se exponen los motores eléctricos accionados por variador de frecuencia.
3. Determinar la incidencia de falla en los rodamientos de los motores eléctricos al ser accionados con variador de frecuencia.
4. Determinar las técnicas de control de la corrosión que permitan el buen desempeño de los motores eléctricos y además ayuden a prolongar la vida útil de los rodamientos.

5. Establecer técnicas para divulgar la metodología más apropiada para prevenir la corrosión eléctrica en los rodamientos de los motores accionados por variador de frecuencia.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La investigación utiliza el tipo de estudio descriptivo y tiene un enfoque mixto, teniendo un alcance metodológico de tipo experimental, esto es debido a que se toma en cuenta la observación cuantitativa midiendo las variables para la evaluación del comportamiento de las corrientes en modo común en rodamientos de motores eléctricos alimentados con variador de frecuencia, se realizaron mediciones de variables del tipo eléctrico y del tipo mecánico.

Con las variables de tipo eléctrico se realizaron distintos muestreos, para determinar el efecto que tenía el realizar un cambio o mejora a la red de tierras de conjunto motor-ventilador inducido 1 de la caldera ISGEC, dichos muestreos incluían:

- Muestrear la presencia e intensidad de campo magnético en el cableado de puesta a tierra del motor en el área cercana a los rodamientos frontal y trasero, además de muestrear el punto de puesta a tierra del chasis del motor. Para esta variable no se obtuvo un cambio considerable al momento de mejorar las puestas a tierra de los equipos.
- Muestrear la calidad de energía eléctrica, voltaje, amperaje y la distorsión armónica a la entrada de alimentación del variador que controla el motor que acciona el ventilador inducido 1.

Para estas variables se realizó un análisis estadístico correlacional para los valores muestreados antes y después de realizar mejoras a las puestas a tierra del conjunto motor-ventilador inducido 1, pudo apreciarse que las

tendencias se mantenían y que dichas mejoras a las puestas a tierra no representaban un cambio significativo en la calidad de energía, voltaje, amperaje y la distorsión armónica a la entrada de alimentación.

Además, comparando contra la norma IEEE 519 2014 se estableció que la distorsión armónica presente en la línea de alimentación del variador se encuentra en valores aceptables ya que se mantiene por debajo del 10 % que establece la norma.

- Muestrear vibraciones mecánicas. Para este tipo de variable se obtuvieron valores de velocidad y aceleraciones para los lados libre y acoplado del motor que acciona el ventilador inducido 1, estos valores se compararon contra la norma ISO 10816-3 y también contra las gráficas y valores límites de vibraciones para velocidad y aceleración en RMS desarrolladas y establecidos por el fabricante del equipo utilizado para la medición de estas variables Adash VA4 Pro.

Las tendencias observadas del incremento en los valores de aceleraciones fueron más notorias en el rodamiento del lado no acoplado del motor. Además, los cambios en el sistema eran más perceptibles con este tipo de variables, razón por la que se realizó un análisis gráfico comparativo de las tendencias y el comportamiento de las aceleraciones entre los rodamientos del lado no acoplado de los motores que accionan los ventiladores inducido 1 e inducido 2.

Además, fue tomado en cuenta el punto de vista cualitativo, esto debido a que se realizó la revisión documental al momento de investigar antecedentes de la problemática, considerando los análisis de fallas y recomendaciones de los

fabricantes de rodamientos para la solución y eliminación de la circulación de corrientes en modo común.

Así mismo, el diseño de la investigación es de carácter experimental, debido a que se realizaron varias implementaciones técnicas, llevando a cabo el muestreo de las variables y su respectivo análisis estadístico para identificar el grado de beneficio que se tenía al momento de poner en operación los equipos. Para el desarrollo de la investigación las tareas se dividieron en cuatro fases, estas se describen a continuación:

Fase uno, en esta fase se recabó información que se utilizó como guía de trabajo para establecer las metodologías y técnicas para la medición de corrientes en modo común de los rodamientos del motor eléctrico controlado con variador de frecuencia. Además, se tuvo acceso a los manuales de los fabricantes de rodamientos NSK y FAG donde son expuestos los tipos de fallas de los rodamientos, sus causas y efectos en los equipos.

En la fase dos, se procedió a muestrear las variables de tipo eléctrico y mecánico junto con el personal de mantenimiento eléctrico y predictivo de la planta, se descargaron los datos de la memoria de los equipos utilizados y se procedió a tabular y ordenar en hojas de cálculo la información recolectada durante los muestreos realizados.

En la fase tres, se realizó el análisis estadístico de tipo descriptivo con el software Minitab18 y se finalizó con un análisis gráfico, partiendo de las hojas de cálculo que contenían los muestreos realizados a las variables de tipo eléctrico y mecánico, para el comportamiento de las aceleraciones en valores RMS de los rodamientos del lado no acoplado de los motores que accionan los ventiladores inducido 1 e inducido 2, en dicho análisis pudo notarse que el rodamiento del lado

no acoplado del motor inducido 1, presentaba mayores desviaciones por arriba de los límites críticos de operación recomendados por el fabricante Adash.

Por otro lado, inicialmente se buscó establecer la variabilidad que exhiben las corrientes en modo común, que se presentan en los motores eléctricos accionados por variador de frecuencia al estar bajo diferentes condiciones operativas, pero al tomar varias muestras bajo diferentes condiciones operativas, antes y después de mejorar la red de tierras del conjunto motor-ventilador inducido 1, pudo notarse que la intensidad de dichas corrientes no presentaba cambio significativo, razón por la cual no se tomó como válida esta vía de estudio.

En la fase cuatro, se definió que la propuesta de solución más efectiva para la cancelación de circulación de corrientes en modo común, era el cambio del rodamiento instalado en el lado no acoplado del motor que acciona el ventilador inducido 1, de un rodamiento de uso común por uno con recubrimiento de película aislante eléctricamente.

Posterior al cambio de dicho rodamiento se procedió a muestrear nuevamente las variables de tipo eléctricas y mecánicas, obteniéndose una notable disminución de las aceleraciones en G's para la medición de vibraciones en la dirección horizontal, evidenciándose con ello la cancelación de circulación de corrientes en modo común en el motor que acciona el ventilador inducido 1 y sus efectos en el rodamiento.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se constituye como una innovación, porque se realizó un monitoreo y registro documentado de las condiciones y variables operativas del rodamiento instalado en el lado no acoplado del motor que acciona el ventilador inducido 1. Además de lo anterior, se implementaron mejoras a las puestas a tierra de dicho motor, instalando cableado especial para bajada de corrientes de pararrayos y colocando un carbón tipo escobilla de puesta a tierra en el lado acoplado del eje del motor, todo con la finalidad de cancelar o disminuir la circulación de corrientes en modo común en el motor eléctrico que acciona el ventilador inducido 1.

En la generación térmica se tiene el proceso de combustión del carbón, dicho proceso genera gases que se acumulan en el hogar de la caldera que deben ser desalojados para evitar la acumulación de presión interna y también que el fuego se apague por la falta de oxígeno, los gases son extraídos a través de ductos por el funcionamiento de los ventiladores de tiro inducido, que a su vez son accionados por motores eléctricos energizados y controlados a través de variadores de frecuencia.

El problema que se presenta en la planta de Generación Térmica durante la época de zafra comprendida de noviembre a mayo, específicamente en los inducidos de la caldera ISGEC, son las fallas debido a la corrosión eléctrica que sufre el cojinete trasero del motor del ventilador inducido 1 al ponerse en servicio controlado por un variador de frecuencia.

La corrosión eléctrica se origina por la circulación de corrientes en modo común desde el bobinado del motor hacia el rotor a través del rodamiento, rompiendo la capacidad aisladora del lubricante, provocando la aparición de picaduras que por el continuo paso de los elementos rodantes, causan la erosión en las superficies internas de las pistas externa e interna del rodamiento, hasta formar estrías en dichas superficies, llevando con esto a disminuir la vida útil del rodamiento por su constante movimiento.

Para corregir la corrosión eléctrica en los rodamientos, el fabricante del motor eléctrico Siemens en su manual de servicios, Motores IEC Estándar Bajo-Voltaje menciona una de las técnicas para la eliminación de las corrientes que originan dicha corrosión, esta técnica consisten en instalar un rodamiento recubierto con una película aislante eléctrica en el extremo no acoplado del motor. En el desarrollo de la investigación pudo establecerse que además de realizar el cambio del rodamiento instalado en el lado no acoplado del motor eléctrico que acciona el ventilador inducido 1, es necesario el reforzamiento de la red de tierras de la instalación, esto con el fin de prolongar la vida útil de la película aislante del rodamiento.

El enfoque de la investigación es mixto, del tipo cuantitativo porque se realiza la medición y muestreo de variables de tipo eléctrico y mecánico, para la evaluación por medio de la estadística descriptiva partiendo de la información ordenada en hojas de cálculo. También toma en cuenta el tipo de vista cualitativo, porque se utilizará la revisión documental cuando se investigan antecedentes del problema y su respectivo marco teórico.

Además, la investigación es de tipo experimental, se busca llegar a resultados previos expuestos en los antecedentes aplicando las técnicas utilizadas. Por otro lado, la investigación presenta la sistematización de técnicas

para la prevención de la corrosión eléctrica en rodamientos de motores eléctricos accionados con variadores de frecuencia.

En vista de la problemática existente, la gerencia del departamento de Generación Eléctrica autorizó la realización de investigaciones e implementación de planes que ayuden a mejorar el desempeño de los equipos; así como, a mejorar los índices de disponibilidad de la planta de Generación Eléctrica y que contribuyan a la reducción de costos en la ejecución presupuestaria.

El esquema que se llevó a la práctica en la investigación está formado por cinco fases:

Siendo la primera fase la revisión bibliográfica para formar una base de conocimientos y antecedentes del problema.

En la segunda fase, se construye la tendencia del comportamiento de las variables de tipo eléctrico y mecánico, esto se hace realizando muestreos, descargando la información de los equipos utilizados para la medición, ordenando y tabulando los datos obtenidos.

En la tercera fase los datos recolectados en planta son analizados de manera descriptiva para establecer la variabilidad que exhiben las variables de tipo eléctrico y mecánico, además se hace una comparación de las variables de tipo eléctrico contra la norma IEEE 519-2014 y las variables de tipo mecánico contra la norma ISO 10816-3 y la gráfica establecida por el fabricante del equipo Adash VA4 Pro.

Posteriormente, en la fase cuatro se presenta propuesta implementada como la solución a la problemática de circulación de corrientes en modo común, en esta propuesta se plantean las técnicas establecidas en las fases anteriores

que ayudan a disminuir el efecto de las corrientes en modo común sobre los rodamientos de los motores eléctricos controlados con variador de frecuencia.

Por último, se tiene la fase cinco, es en esta fase donde se determinan las técnicas para la difusión y capacitación del personal electricista con el fin de prevenir que se presenten nuevamente corrientes en modo común en los equipos accionados por variador de frecuencia.

En el capítulo I de investigación se desarrollarán los temas que corresponden al marco teórico, se presentarán conceptos de potencia eléctrica, de distorsión armónica, sus fuentes y efectos en los rodamientos de motores eléctricos controlados por variador de frecuencia, se concluye analizando diferentes técnicas utilizadas para mitigar los efectos de las corrientes en modo común en rodamientos, además se presentan las bobinas Rogowski como un instrumento para realizar el monitoreo de las variables de origen eléctrico, presentes en el sistema.

Además, se presentan las vibraciones mecánicas características de todo cuerpo en reposo y los límites aceptables para los distintos rangos de potencia que representan la operación segura para los equipos.

En el capítulo II se hizo el desarrollo de la investigación. En esta sección se describe la manera en que se realizó la visita de campo al punto donde se encuentra instalado el motor que acciona el ventilador inducido 1, además se presentan los equipos utilizados para realizar los muestreos de las variables de tipo eléctrico y mecánico, variables que son ordenadas y tabuladas en los anexos 2, y 3 y que son utilizadas para el análisis estadístico, gráfico y además comparativo contra las normas IEEE 519-2014 e ISO 10816-3.

En el capítulo III se presentan los resultados obtenidos en la investigación. En este capítulo, se exponen las tendencias establecidas, según la estadística descriptiva, de las variables de tipo eléctricas y mecánicas, además del comportamiento de los puntos muestreados en el motor que acciona el ventilador inducido 1 antes y después de implementar las distintas técnicas para detectar, prevenir o cancelar la circulación de corrientes en modo común y los índices Tiempo medio entre paradas y la Disponibilidad que se ven afectados directamente ante la problemática que presenta la instalación de dicho motor.

En el capítulo IV se discuten los resultados obtenidos en la investigación. En esta sección se describe qué técnicas se implementaron para controlar y disminuir la corrosión por picadura y erosión en los rodamientos, causadas por la circulación de corrientes en modo común. Además, se presenta la relación que tienen las técnicas implementadas con los antecedentes utilizados como referencia y apoyo a la investigación y sus objetivos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Importancia de la Calidad de Energía Eléctrica

La calidad en la energía eléctrica ha pasado a ser un objetivo fundamental para las compañías generadoras de energía eléctrica.

Ferracci (2004) hace notar que los principales motivos para considerarla de esta manera son los siguientes:

La búsqueda de aumentar la competitividad económica entre las demás empresas.

El uso cada vez más generalizado de equipos sensibles a las distorsiones de tensión, y que además introducen distorsiones a la red eléctrica.

La participación creciente de plantas generadoras de electricidad en el mercado eléctrico nacional (p. 5).

1.2. Cargas eléctricas Lineales y No Lineales

Se denominan cargas lineales a las resistencias, inductancias, capacitancias o combinación de estos componentes pasivos debido a que, al momento de aplicarles un voltaje senoidal, se genera una corriente eléctrica proporcional que conserva la forma senoidal del voltaje aplicado.

Téllez (2003) hace la observación que “la curva característica Corriente-Voltaje de una carga define si es del tipo lineal o no lineal y expone que la no linealidad no necesariamente se limita a equipos que utilizan semiconductores” (p. 7).

1.3. Clasificación de fenómenos electromagnéticos

Sánchez (2009) utiliza la clasificación propuesta por la IEC (p. 26) (*International Electrotechnique Commission*), siendo la mostrada en la tabla I:

Tabla I. **Clasificación de fenómenos electromagnéticos según la IEC**

Fenómenos en baja frecuencia:
Distorsiones Armónicas, Inter armónicas
Sistemas de señalización, Onda portadora en línea de alta tensión.
Fluctuaciones de voltaje (<i>flicker</i>)
Cortes momentáneos e interrupciones prolongadas de voltaje
Desbalance de voltajes entre fases o neutro
Fluctuaciones en frecuencia
Voltajes inducidos en baja frecuencia
Corriente directa que se hace presente en redes de corriente alterna
Fenómenos radiados en baja frecuencia:
Campos electromagnéticos.
Campos eléctricos.
Fenómenos transferidos en altas frecuencias.
Componentes inducidos de onda continua (CW) de Voltajes o corrientes.

Continuación de la Tabla I.

Transitorios unidireccionales.
Transitorios oscilantes.
Fenómenos radiados de alta frecuencia:
Campos magnéticos.
Campos eléctricos.
Campos electromagnéticos.
Ondas continuas.
Transitorios.
Fenómenos de descarga electrostática:
Descarga electrostática ESD
Pulso electromagnético nuclear:
NEMP

Fuente: Sánchez, M. A. 2009. Recuperado de:
<https://es.slideshare.net/shinela7/librocalidaddeenergía>

1.4. Motores Eléctricos

En la Guía de Especificación Motores eléctricos de grupo WEG (2016) se tiene el concepto: “el motor eléctrico es el elemento que se encarga de transformar la energía potencial eléctrica en energía mecánica en movimiento” (p. 6). Los motores de inducción electromagnética son los más utilizados de todos los tipos de motores eléctricos, lo anterior se cumple porque combinan las ventajas de eficiencia en el uso de la energía eléctrica y su bajo costo, facilidad para su accionamiento.

1.4.1. Partes de un motor eléctrico

En el Manual Técnico Motores Eléctricos (2011) se especifica que “los motores eléctricos se componen de dos partes principales” (p. 4).

1.4.1.1. Estator o inductor

El estator es la parte externa del motor y se mantiene estática, en esta parte se encuentran los bobinados, que debido a la circulación de corriente eléctrica generan el campo magnético que origina el movimiento en el rotor.

1.4.1.2. Rotor o inducido

El rotor es la parte del motor que transmite en forma de movimiento el efecto del campo magnético originado en el estator debido a la circulación de corrientes eléctricas inducidas. En el Manual Técnico Motores Eléctricos (2011) se menciona que “la velocidad de rotación se mide en revoluciones por minuto RPM y depende de la cantidad de polos magnéticos instalados en el estator” (p. 4). Para mejorar el funcionamiento del motor, el rotor se arma junto con sus rodamientos, estos permiten que la fricción entre piezas para la transformación de energía eléctrica a mecánica sea mínima.

1.4.2. Clasificación de los motores

Los motores eléctricos pueden clasificarse según el tipo de corriente con que se alimentan y se describen a continuación:

1.4.2.1. Motores de Corriente Directa o continua

En el Manual Técnico Motores Eléctricos (2011) se indica que “La principal ventaja de este tipo de motores es la capacidad de regular su velocidad de rotación y con ello modificar su par de rotación” (p. 3), entre las desventajas de este tipo de motores también menciona que “por sus características de construcción y accionamiento tienen el inconveniente de ser de un costo más elevado que los accionados con corriente alterna.”

En el Manual Técnico Motores Eléctricos (2011) clasifican estos motores “según la configuración eléctrica de sus conexiones internas de la siguiente forma” (p. 5):

- Derivación
- Independiente
- Serie
- Compuesto

1.4.2.2. Motores de corriente alterna

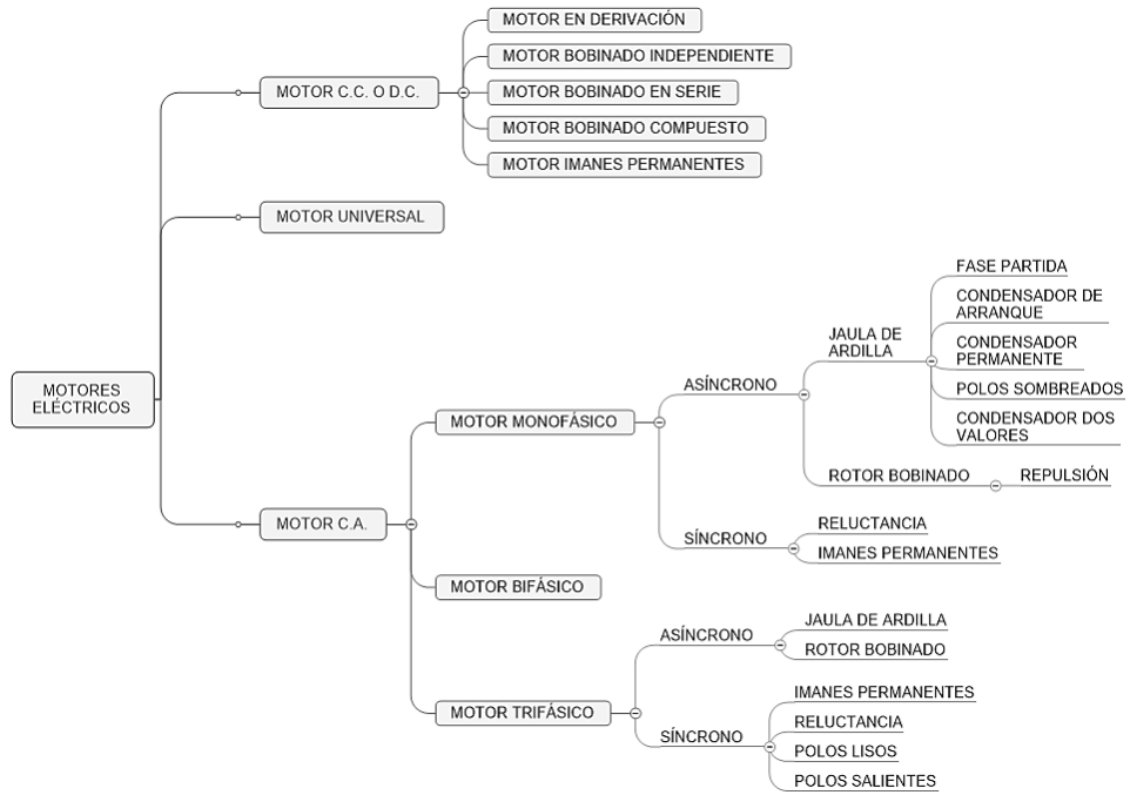
Estos motores son los más utilizados y de mayor aplicación en la industria, de acuerdo con el Manual Técnico Motores Eléctricos (2011) esto “se debe al tipo de alimentación y se clasifican en tres tipos” (p. 4 y p. 5):

- Motores Monofásicos (1 fase)
- Motores Bifásicos (2 fases)
- Motores Trifásicos (3 fases)

- Características de motores eléctricos

A continuación, se muestra un diagrama resumen de los motores más utilizados según el tipo de alimentación utilizada para energizarlos, no se incluyen motores de usos específicos:

Figura 1. **Motores más utilizados según el tipo de alimentación**



Fuente: Autor corporativo, extraído de:

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6e/h82/WEG-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>, 2016. p. 6.

En el Manual de Motores Eléctricos (2006) se indica que “parte de las características principales de los motores de corriente alterna son las siguientes” (p. 8 y p. 12):

Corriente eléctrica: en el Manual de Motores Eléctricos (2006) se define como la “rapidez del flujo de carga eléctrica que pasa por un punto establecido en un conductor eléctrico en un tiempo determinado” (p. 9).

Potencia: En el Manual de Motores Eléctricos (2006) es definida como “la rapidez con que se efectúa un trabajo, además indica que su unidad de medida es el kilowatt” (p. 8 y p. 12).

Clasificación de la potencia:

Potencia aparente: en la Guía de Especificación Motores eléctricos de grupo WEG (2016) se define como “la potencia que existiría si no se tuviera un desfase entre la corriente y el voltaje del sistema. Su unidad de medida es el Volt-Amper (VA)” (p. 6).

Potencia activa: en la Guía de Especificación Motores eléctricos de grupo WEG (2016) está definida como “la cantidad de potencia que realiza el trabajo. Su unidad de medida es el Watt” (p. 6).

Potencia reactiva: en la Guía de Especificación Motores eléctricos de WEG (2016) se define como “la cantidad de potencia aparente que no realiza trabajo, su característica principal es que solamente es transferida y almacenada a los elementos pasivos del circuito eléctrico. Su unidad de medida es el Volt Amper Reactivo (VAR)” (p. 6).

Factor de potencia: en la Guía de Especificación Motores eléctricos de WEG (2016) indica que “este valor se establece relacionando la potencia activa (P) y la potencia aparente (S)” (p. 6), además se establece en la Guía de Especificación Motores eléctricos de WEG (2016) que “el factor de potencia no

puede ser mayor a la unidad y que normalmente se encuentra entre 0.8 y 0.85 y sus unidades de medida están en %” (p. 10).

Eficiencia: con este factor se establece el grado de aprovechamiento y pérdida de la energía o potencia de cualquier equipo eléctrico. En el Manual de Motores Eléctricos (2006) se define que “la eficiencia es la relación del trabajo de salida y el trabajo de entrada” (p. 12).

1.4.2.3. Motores universales

Este tipo de motores está construido para operar por tiempos cortos e intermitentes, además el Manual de Motores Eléctricos (2006) indica que “tiene como desventaja su baja eficiencia, alrededor del 51 %” (p. 4 y p. 5). Estos motores son empleados en equipos de baja potencia como taladros, pulidoras, licuadoras, etc.

1.5. Distorsión Armónica

En la industria existen equipos denominados cargas lineales y cargas no lineales, estos últimos utilizan electrónica de potencia para mejorar el rendimiento en los trabajos, aumentando también el manejo de los distintos procesos, Téllez (2003) indica que “esta integración de la electrónica de potencia a distintos sistemas viene a producir deformaciones del voltaje y corriente con referencia a la forma de onda senoidal original de la corriente y voltaje de alimentación, es entonces que la señal está distorsionada” (p. 3), Téllez (2003) además menciona que “las distorsiones pueden deberse a los siguientes fenómenos: Transitorios como el arranque de motores, conmutación de capacitores utilizados para la modificación/corrección del factor de potencia, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito” (p. 3).

1.5.1. Norma IEEE 519 2014

Esta norma aplica principalmente donde existen armónicos introducidos por cargas no lineales, IEEE (2014) “con el objetivo de prevenir las alteraciones en la calidad de energía” (p. 2). En esta norma se establecen límites de distorsión para el voltaje y para la corriente armónicos para tensiones de 120V hasta 69kV, en las tablas II y III se muestran estos límites.

Tabla II. Base para los Límites de Corriente Armónica

SCR en el PCC	Voltaje de Frecuencia Armónica Individual	Asunción Relacionada
	Máximo (%)	
10	2.5-3.0 %	Sistema dedicado
20	2.0-2.5 %	1 - 2 grandes consumidores
50	1.0-1.5 %	Consumidores relativamente grandes
100	0.5-1.0 %	5 - 20 consumidores de tamaño mediano
1000	0.05-0.10 %	Consumidores muy pequeños

Fuente: Rici, 2008. *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/58301735/IEEE-519-1992-en-Espanol> (p. 75)

Tabla III. Límites de Distorsión de Corriente (desde 120 V hasta 69.000 V)

Orden Armónico Individual (Armónicos Impares)						
Isc / IL	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20*	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20 < 50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50 < 100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100 < 1 000	12	5.5	5	2	1	15
>1 000	15	7	6	2.5	1.4	20

*Todo equipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, sin tener en cuenta la relación Isc/IL real.

Donde:

Isc = máxima corriente de cortocircuito en el PCC.

IL = máxima corriente de carga demandada (componente de frecuencia fundamental) en el PCC.

Fuente: Rici, 2008. *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/58301735/IEEE-519-1992-en-Espanol> (p. 77)

Otros factores a ser considerados según Rici (2008) son: “los límites y la profundidad de la muesca de conmutación, el factor de distorsión armónica total (THD) y el área de la muesca del voltaje de línea a línea en el PCC” (p. 75). En la tabla IV se muestran estos límites.

Tabla IV. **Clasificación y Límites de Distorsión**

	Aplicaciones Especiales*	Sistema en General	Sistema Dedicado†
Profundidad de la Muesca	10 %	20 %	50 %
THD (Voltaje)	3 %	5 %	10 %
Área de la Muesca (A_N)‡	16400	22800	36500

NOTA: El valor A_N para otros sistemas mayores a 480 V puede ser multiplicado por $V/480$.

*Las aplicaciones especiales incluyen hospitales y aeropuertos.

†Un sistema dedicado es exclusivamente dedicado a la carga del convertidor.

‡En voltios-microsegundos a la relación voltaje y corriente.

Fuente: Rici, 2008. *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Recuperado de:
<https://es.scribd.com/doc/58301735/IEEE-519-1992-en-Espanol> (p. 77)

La norma IEEE 519 establece los límites de tensión armónica aceptables de la siguiente forma:

Los valores diarios del percentil 99 muy corto (3 s) deben ser menos de 1.5 veces los valores dados en tabla V.

Los valores semanales de percentil 95^o corto (10 min) deben ser menores que los valores dados en la tabla V.

Todos los valores deben estar en porcentaje del voltaje de frecuencia de potencia nominal en el PCC, la tabla V se aplica al

voltaje armónicos con frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de potencia. (IEEE Std 519, 2014, p. 19).

Tabla V. **Límites de distorsión de voltaje**

Voltaje de bus V en PCC	Individual armónico (%)	Armónico total distorsión THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1	1.5

Fuente: IEEE Std 519, 2014, p. 19

1.5.2. Norma IEC EN 61642

A esta norma también se le conoce como: Norma de Redes industriales de corrientes eléctricas alternas distorsionadas por armónicos, empleando filtros y capacitores a instalar en paralelo. La norma UNE-EN 61642:1997 (2007) tiene como objetivo “identificar los problemas y proporcionar las recomendaciones para las aplicaciones generales de los filtros armónicos de corriente alterna en redes de energía afectadas de manera nociva por la presencia de voltajes y corrientes armónicas” (p. 7).

1.5.3. Definición de armónicos

Asea Brown Boveri (2010), define los armónicos como “las componentes espectrales de una onda distorsionada y su utilización permite analizar cualquier onda periódica que no sea del tipo sinusoidal, descomponiéndola en sus distintas componentes sinusoidales” (p. 20).

1.5.4. Indicadores eléctricos de distorsión armónica

La distorsión armónica es un fenómeno eléctrico que puede medirse por medio de diferentes indicadores que permiten cuantificar y evaluar la distorsión o perturbación de las formas de onda del voltaje y de corriente eléctrica comparándolas con la onda fundamental. Por otro lado, Ferracci (2004) establece que “las perturbaciones eléctricas pueden agruparse en cuatro categorías según la característica que afecten” (p. 8), estas son:

- Perturbaciones que afecten la amplitud.
- Perturbaciones que afecten la forma de onda.
- Perturbaciones que afecten la frecuencia.
- Perturbaciones que afecten la simetría de la tensión.

Ferracci (2004) además indica que “una perturbación puede afectar o modificar a varias de las características del listado anterior” (p. 8).

1.5.5. Efectos de las corrientes armónicas

Para describir de mejor manera los efectos perjudiciales de las corrientes armónicas, esta investigación se limitará a mencionar los dos principales fenómenos que se experimentan en una red de energía eléctrica y que afectan principalmente las capacitancias utilizadas para compensación del factor de potencia en la planta.

1.5.6. Resonancia de capacitores

Los capacitores aumentan la distorsión eléctrica en un sistema y contribuyen a producir el fenómeno de resonancia aumentando la distorsión enormemente, su efecto es que hace explotar capacitores o transformadores, si es que las protecciones eléctricas no accionan debido a la presencia en el sistema de corrientes armónicas.

1.5.7. Compensación del factor de potencia

Procobre de México (2000) propone que la solución al problema de la compensación de reactivos en sistemas distorsionados “consiste en agregar una bobina de inducción en serie con el capacitor de compensación de reactivos provocando con esto que las componentes de alta frecuencia sean rechazadas y desviadas a tierra por la configuración serie inductancia-capacitor” (p. 16).

1.6. Variadores de frecuencia

Asea Brown Boveri (2010) define que “un variador de frecuencia es un regulador eléctrico controlado de tipo industrial que se encuentra ubicado entre la fuente de alimentación y el motor eléctrico”

(<https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>). El variador de frecuencia permite mejorar diversos aspectos como el consumo de potencia eléctrica, también se tiene el aspecto financiero al reducir costos por consumos eléctricos, según indica Asea Brown Boveri (2010) “alarga la vida de los equipos, previniendo el deterioro y evita paradas inesperadas, mejorando así los índices de productividad” (<https://new.abb.com/drives/es/que-es-un-variador>).

1.6.1. Funcionamiento de un variador de frecuencia

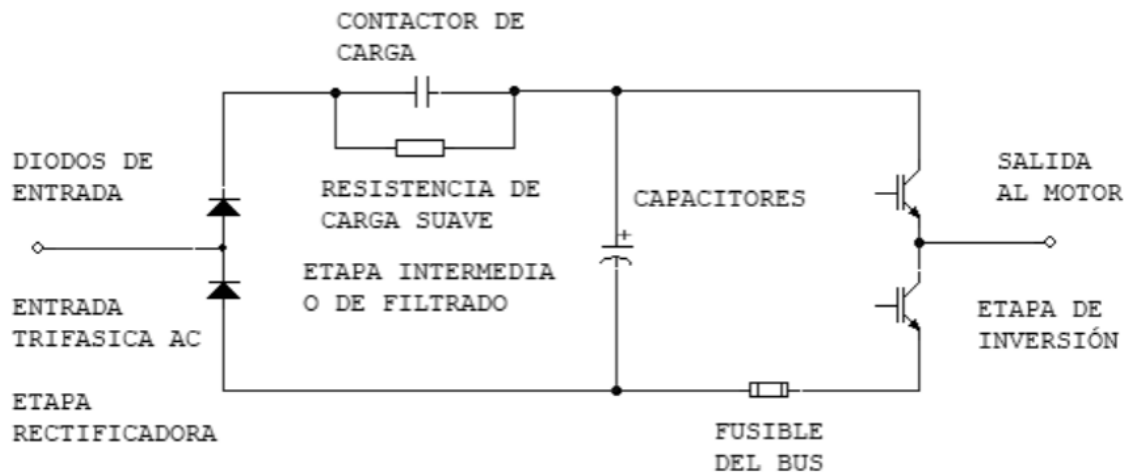
Los variadores de frecuencia están compuestos u organizados por tres secciones básicas que se describen a continuación:

- **Etapa Rectificadora:**
En esta etapa, la tensión de entrada al variador es rectificadora a corriente continua por medio de diodos semiconductores.
- **Etapa Intermedia:**
También se le denomina Etapa de Filtrado y se encarga de suavizar o recortar la amplitud de la tensión rectificada para disminuir la distorsión que pueda inyectarse a la onda senoidal y con esto reducir la emisión de componentes armónicos.
- **Etapa Inversora:**
En esta etapa se convierte nuevamente la señal de tensión continua producto de la rectificación y el filtrado a otra señal alterna de frecuencia variable, ésta varía su frecuencia por medio de pulsos de control aplicados a la compuerta de accionamiento de los IGBT'S.

- Etapa de Carga:
Esta etapa se encarga de controlar la carga de los capacitores de suavizado mitigando el efecto de energizarlos, con esto se evitan el daño y deterioro prematuro en los capacitores.

En la figura 2 se muestran las diferentes secciones que conforman un variador de frecuencia.

Figura 2. **Esquema del circuito principal de un variador de frecuencia**



Fuente: Autor corporativo, extraído de: <http://arayaingenieria.blogspot.com/2011/02/respuestas-sobre-variadores-de.html>, 2011. p. 1.

1.7. Rodamientos

Los rodamientos son elementos móviles que contienen elementos rodantes que soportan cargas dinámicas y estáticas.

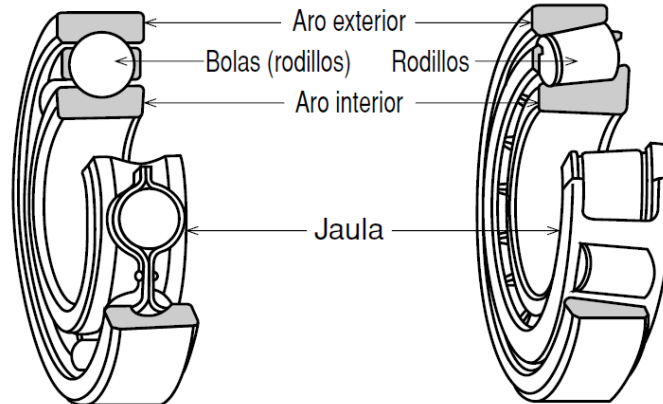
Existen de diferentes tamaños y tipos para las distintas aplicaciones, estos son del tipo radial y del tipo axial, existen aplicaciones especiales donde es

necesario instalar un rodamiento diseñado para cargas combinadas. La lubricación y enfriamiento de los rodamientos son fundamentales para garantizar que no sufran desgastes excesivos al punto de presentar fallas que ameriten su cambio inmediato.

1.7.1. Estructura de los rodamientos

Los componentes básicos de los rodamientos son: Pista o aro exterior, pista o aro interior, elementos rodantes y jaulas. En la figura 3 se indica la disposición de las partes de un rodamiento.

Figura 3. Estructura de los rodamientos



Fuente: Autor corporativo, Nachi-Fujikoshi Corp. Conocimiento básico para lo... Básico-
Utilización segura de los cojinetes 2005, p. 8.

1.7.2. Capacitancias características

En un sistema con variador de frecuencia, se presentan distintas capacitancias del tipo parásitas, que afectan el desempeño de los equipos debido a la resonancia característica con ciertas frecuencias del sistema. (Quintero, Rosero, y Mejía, 2013) indica que “las capacitancias parásitas se encuentran en:

- El motor.
- Entre las bobinas del estator o inducido.
- Entre el estator o inducido y el rotor.
- En los rodamientos” (p. 84), estas capacitancias se hacen más sensibles cuando se desarrolla la velocidad de rotación donde el único contacto entre piezas en movimiento se da a través del lubricante.

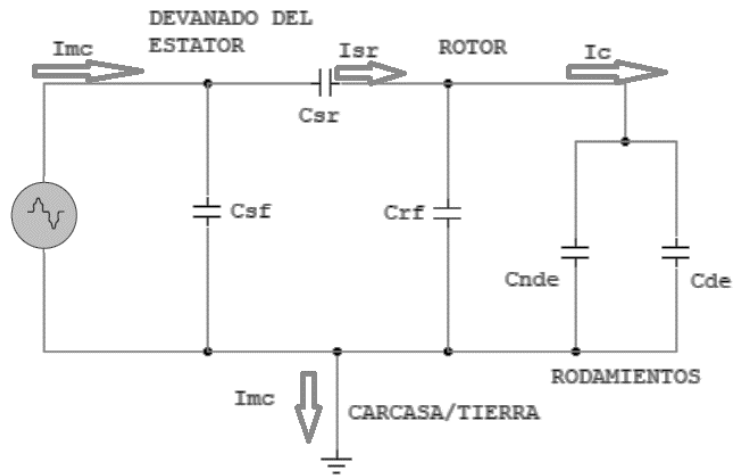
Para que el efecto de estas capacitancias parásitas sea perjudicial en los equipos, debe existir entre los componentes internos una circulación de campo eléctrico a través de un material denominado dieléctrico.

En el motor hacen la función de este material dieléctrico: el aire, los aisladores plásticos y el esmalte que cubre los bobinados, estos materiales a bajas frecuencias presentan valores capacitivos muy pequeños por lo que se observa una muy alta impedancia entre superficies y con esto una mayor dificultad para la circulación de corrientes parásitas de un componente a otro.

Por el contrario, cuando se hace el accionamiento de un motor eléctrico, por un variador de frecuencia que trabaja cambiando a múltiplos de la frecuencia nominal (60 Hz), en el orden de los kHz, los materiales dieléctricos presentan baja impedancia obteniéndose con esto: una mayor disposición para que, se produzca la circulación de corrientes parásitas de un punto a otro.

En la figura 4 se muestra el equivalente eléctrico de las capacitancias en un motor de inducción, en la tabla VI se da el detalle de los componentes.

Figura 4. **Capacitancias parásitas equivalentes en el motor de inducción**



Fuente: Quintero Sarmiento, D. R., Rosero García, J., y Mejía López, W. 2013. Medición de Corrientes EDM sobre Rodamientos en el Conjunto: *Motor de Inducción y Variador de Frecuencia*. INGE CUC, 9(2), p. 85.

Tabla VI. **Descripción de elementos de la figura 5**

Elemento	Descripción
V_{cm}	Tensión de modo común.
I_{mc}	Corrientes eléctricas en modo común.
C_{sf}	Capacitancia entre devanado en el estator y la carcasa del motor.
C_{sr}	Capacitancia entre el rotor o inducido y el devanado del estator.
C_{rf}	Capacitancia entre la carcasa fija del motor y el rotor.

Continuación de la Tabla VI.

Isr	Corriente circulante desde el devanado del estator o inductor hacia el rotor o inducido del motor.
Ib	Corriente de rodamiento
Cnde y Cde	Capacitancias en los rodamientos

Fuente: Quintero Sarmiento, D. R., Rosero García, J., y Mejía López, W. (2013). Medición de Corrientes EDM sobre Rodamientos en el Conjunto: *Motor de Inducción y Variador de Frecuencia*. INGE CUC, 9(2), p. 84-85.

1.8. Circuito en modo común

Cuando se tiene una fuente de alimentación trifásica, esta se mantiene equilibrada y sus componentes vectoriales se mantienen equilibrados bajo condiciones normales, es decir su vector resultante es 0, con lo que se tiene una ausencia de voltaje en el neutro del sistema.

Por otro lado, al tener una fuente conmutada en la que la señal senoidal original, es convertida a una tensión continua y finalmente se convierte de vuelta a senoidal se tiene un vector resultante distinto de 0, ocasionando la aparición de una tensión en el neutro. A esta tensión resultante diferente de 0 se le conoce como tensión de modo común y (Quintero, Rosero, y Mejía, 2013) indica que “posee frecuencias directamente proporcionales a la capacidad de cambio de polaridades a las salidas del variador de frecuencia” (p. 84).

(Quintero, Rosero, y Mejía, 2013) indica que “la relación entre la tensión en modo común y las capacitancias parásitas dan origen a las corrientes de rodamientos” (p. 84). Estas corrientes son perjudiciales para los rodamientos

comunes, ocasionando deterioro acelerado del lubricante y de las pistas interna y externa del rodamiento; este desgaste, en el rodamiento, se presenta en forma de picaduras y estrías y es comúnmente conocido como corrosión eléctrica, en la figura 5 pueden apreciarse los efectos de este fenómeno sobre un rodamiento y sus elementos rodantes.

Figura 5. **Corrosión eléctrica en pista interna y elementos rodantes**



Fuente: Autor corporativo, NSK Bearing Doctor Diagnóstico Rápido de Fallas en Rodamientos, 2005, p. 30.

1.8.1. Medición de corrientes en modo común

(Quintero, Rosero, y Mejía, 2013), indica que para realizar la medición de corrientes en modo común de rodamientos “debe seguirse un procedimiento complejo y en muchas ocasiones no se puede registrar una medición directamente dado que la frecuencia de dichas corrientes se encuentra en el orden de los MHz” (p. 86) y puede confundirse con las variaciones de campo en el motor producidas por el variador.

1.8.2. Criterios de selección de metodología

Los criterios de selección de una metodología a utilizar para la medición de corrientes en modo común se enfocan en las características inherentes del proceso, esto es la frecuencia de conmutación del variador, la complejidad para

montar los equipos, tomando en cuenta su disponibilidad y el costo que esto implica.

En el estudio que se documenta por (Quintero, Rosero, y Mejía, 2013) se sostiene que “la factibilidad del método de medida de corrientes en rodamientos se establece según los criterios de la tabla VII” (p. 86).

Tabla VII. Factibilidad para la medición de corrientes en modo común

Método	Ancho de Banda	Simplicidad de montaje	Disponibilidad del equipo	Costo del equipo
Bobina Rogowski Integradora	☒	☒		
Bobina Rogowski simple	☒	☒	☒	☒
Transductor Pearson	☒	☒	☒	☒
Antena RF	☒			

Fuente: Quintero Sarmiento, D. R., Rosero García, J., y Mejía López, W. Medición de Corrientes EDM sobre Rodamientos en el Conjunto Motor de Inducción y Variador de Frecuencia. INGE CUC, 9(2), 2013. p. 86.

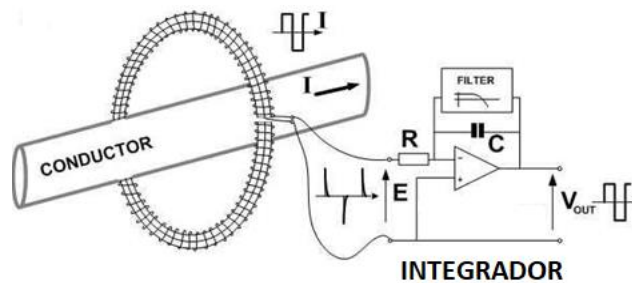
En la tabla VII puede notarse que la bobina Rogowski simple y el transductor Pearson, son los más indicados para realizar las mediciones, debido a que cumplen con los cuatro criterios establecidos como base para considerar la factibilidad de la metodología a implementar, para realizar las mediciones de corrientes en modo común y que dañan los rodamientos de los motores.

1.9. Bobina Rogowski

En la figura 6 se representa una bobina Rogowski junto con su integrador. La función del integrador es convertir y adecuar la corriente que sale de la bobina, a un voltaje que pueda utilizarse para interpretar la información de la medición.

Esta bobina se caracteriza por tener un núcleo de material poco magnetizable, la bobina no presenta dificultad en su instalación debido a que gracias a su construcción puede separarse por la mitad, formando extremos sueltos que al momento de instalarse, para realizar la medición, se unen formando una trayectoria cerrada a través de la cual circula la corriente a medir.

Figura 6. Bobina de Rogowski



Fuente: Desconocido. (2019) Hacer una bobina de Rogowski (3 / 5 paso). Recuperado el 17 de 08 de 2019 de: https://www.askix.com/hacer-una-bobina-de-rogowski_4.html

1.10. Corrosión

La corrosión es el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque químico en su entorno. Smith (2006) indica que debido a que “la corrosión es una reacción química, la rapidez con la que ésta se produce dependerá en

gran medida de la temperatura y de la concentración de los elementos reactivos y productos” (p. 719).

1.10.1. Tipos de corrosión

Existen diversos tipos de corrosión, estos se diferencian por la naturaleza de los materiales y el entorno en el cual se encuentran. A continuación, se presentan los distintos tipos de corrosión que afectan los metales, cuyo efecto puede mitigarse utilizando técnicas que se describen más adelante.

1.10.1.1. Corrosión Generalizada (uniforme)

Con este tipo de corrosión Schwitzer (2010) establece que “se presenta sobre toda la superficie del material, causando su deterioro por completo, se tiene mayor pérdida de material en la superficie expuesta, pero tiene la ventaja de ser fácilmente controlable” (p. 27).

1.10.1.2. Corrosión localizada

La corrosión localizada se presenta en secciones específicas de una superficie expuesta, lo anterior obedece a las siguientes condiciones: Pedferri, (2018) “la no homogeneidad para el material o el medio ambiente y un ataque localizado específico debido a la presencia de especies agresivas” (p. 7).

1.10.1.3. Corrosión Galvánica

Este tipo de corrosión es causado por las condiciones no homogéneas, cuando metales con diferentes características atómicas, se encuentran sumergidas en un medio electrolito y entran en contacto o se unen física o

eléctricamente. Además, Zaki (2006) establece que: “el metal con menor potencial electroquímico tiende a corroerse más fácilmente” (p. 126).

1.10.1.4. Corrosión Intergranular

Esta corrosión se desarrolla en los límites del grano del metal o aleaciones metálicas. Schweitzer (2010) indica que “el límite del grano del metal opera como un ánodo y el área más grande tiene la función del cátodo, generándose un flujo de energía desde el área anódica pequeña al área catódica grande” (p. 32), produciéndose de esta forma un ataque rápido que se aloja profundamente en el metal.

1.10.1.5. Corrosión por Picadura o “Pitting”

Las picaduras o pitting Zaki (2006) las define como: “ataques corrosivos altamente localizados que generan cavidades en el metal” (p. 126). Además, la cantidad y profundidad de las picaduras varía bastante, hasta el punto de que el daño resulta difícil de evaluar.

1.10.1.6. Daño por cavitación

La cavitación no es una forma de corrosión por sí sola, Zaki (2006) expone que “debe combinarse con un daño mecánico para considerarse como una corrosión localizada en la superficie de un material” (p. 246). La cavitación es una falla mecánica que tiene su origen en la implosión de un líquido sobre la superficie de los materiales que se encuentran en contacto directo con el mismo.

1.10.1.7. Corrosión microbiológica

Este tipo de corrosión posee la tendencia de presentarse en suelos ácidos o neutros con un alto contenido de sal, además Schweitzer (2010) comenta que “es causada por la actividad de microorganismos vivos en el terreno” (p. 50). Los microorganismos más dañinos para los metales enterrados y que propician la corrosión son las Bacterias Reductoras de Sulfato SRB que se desarrollan y viven en ambientes anaeróbicos, además son adaptables y generalmente pueden resistir una temperatura de 60 °C, Pedferri (2018) menciona que “pueden generarse en ocasiones tasas de crecimiento de la corrosión hasta de 1 mm/año” (p. 440).

1.10.1.8. Corrosión combinada con fenómeno físico

Esta corrosión se presenta de manera específica en un área de trabajo con ciertas condiciones ambientales y que además se encuentra limitada a un fenómeno físico puede considerarse como una corrosión del tipo localizada.

1.10.1.9. Corrosión por erosión

Esta corrosión se presenta al tener un flujo o golpe de partículas con ciertas características corrosivas sobre superficies metálicas, Pedferri (2018) indica que “el grado o velocidad del efecto de la corrosión depende del grado de turbulencia del fluido” (p. 314).

1.10.1.10. Corrosión por fisuras

Esta corrosión se presenta en acoplamientos o anclajes de material que tienen una carga de tensión aplicada, esta corrosión se presenta de forma

localizada en grietas que penetran los materiales en una dirección que es perpendicular a su esfuerzo de tensión o bajo superficies recubiertas. Smith (2006) “También es conocida como Corrosión Bajo Tensión (SCC) o fatiga por corrosión dependiendo de si la tensión de tracción es constante o varía periódicamente” (p. 861).

1.10.1.11. Corrosión por fatiga

Este tipo de corrosión Schweitzer (2010) indica que “se presenta donde los esfuerzos mecánicos cíclicos han provocado fisuras en los materiales con lo que se desarrollan corrosión hasta que el material se debilita completamente hasta provocar su falla” (p. 74).

1.10.1.12. Corrosión filiforme

Schweitzer (2010) comenta que “Los metales con recubrimientos o películas semipermeables pueden sufrir este tipo de corrosión que resulta en numerosos filamentos de corrosión distribuidos de forma aleatoria como hilos debajo de dichos recubrimientos.” (p. 75), además Schweitzer (2010) establece que “los factores que propician el desarrollo de este tipo de corrosión son” (p. 217):

- Alta humedad, aproximadamente de 65 a 95 % de humedad relativa a temperatura ambiente.
- Suficiente permeabilidad al agua de la película de recubrimiento.
- Estimulación por impurezas entre la superficie del metal y la capa protectora.
- Presencia de defectos de la película, micro poros o discontinuidades.

1.10.2. Control y técnicas preventivas para la corrosión

Existen diferentes formas, criterios y técnicas para controlar los efectos de la corrosión, además son diversos los factores que determinan el empleo de una metodología o técnica específica. Las técnicas preventivas pueden asociarse en dos grandes grupos, estos son:

- Analíticas: sirven para detectar las fallas y sus posibles causas. Surgen la mayoría de veces en respuesta a una falla durante la operación de los equipos.
- Operativas: sirven para tomar acciones preventivas ante posibles fallas menores o mayores en los equipos. Son aplicadas especialmente en la etapa de diseño.

A continuación, se detallarán diferentes métodos establecidos para el control de la corrosión, considerando los siguientes criterios:

1.10.2.1. Diseño

Para el diseño de piezas o mecanismos, deben considerarse todos los tipos de corrosión, además del grado de exposición al ambiente y las características del mismo.

Para el caso de la corrosión por circulación de corrientes a través de los rodamientos. Asea Brown Boveri (2016) define como parte del diseño de los motores “el uso de rodamientos aislados o construcciones de rodamientos aisladas, filtros de modo común, cables y métodos de conexión a tierra adecuados”,

(https://library.e.abb.com/public/9ca5bc1a16274a7298f18bafc0cfef72/Standard_Manual_LV_Motors_ES_revG%20web.pdf).

Las componentes armónicas de la corriente y el voltaje pueden reducirse de distintas maneras desde la etapa de diseño de las instalaciones de los variadores de frecuencia, Asea Brown Boveri (2013) menciona que “los factores que disminuyen las corrientes armónicas son:

- Inductancias de DC o AC, estándar en los variadores ABB.
- Mayor número de pulsos en el rectificador.
- Rectificadores activos.”

(<https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/newsletters/actualidad-colombia/actualidad-413.pdf?sfvrsn=2>)

En la figura 7 se presenta un anillo de ferrita que es utilizado como filtro de modo común y que debe instalarse en cada fase a la salida de las tres fases y el neutro del variador de frecuencia hacia el motor eléctrico, además en la figura 8 se muestra un filtro LC que es utilizado como elemento de choque para las componentes armónicas a la salida del variador de frecuencia.

Figura 7. Anillo de ferrita para filtro de modo común



Fuente: ABB PRODUCT-DETAILS. Recuperado de:
<https://new.abb.com/products/3AUA0000032859/3aua0000032859>

Figura 8. Filtro LC utilizado como elemento de choque



Fuente: Filtros senoidales FLC. Recuperado de: <https://www.vmc.es/es/filtros-senoidales-flc>

Además, en el anexo 1 se muestran las recomendaciones que hace el fabricante ABB para la selección de aislamiento de devanados, para diferentes rangos de potencia y de tensión de alimentación para motores ABB accionados por variador de frecuencia.

1.10.2.2. Selección de los materiales

La corrosión puede disminuirse, utilizando el material apropiado para el tipo de ambiente en el que se instala la pieza o maquinaria. Zaki (2006) menciona que “el material además debe cumplir con los requerimientos de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y la erosión bajo ciertas condiciones de servicio” (p. 480).

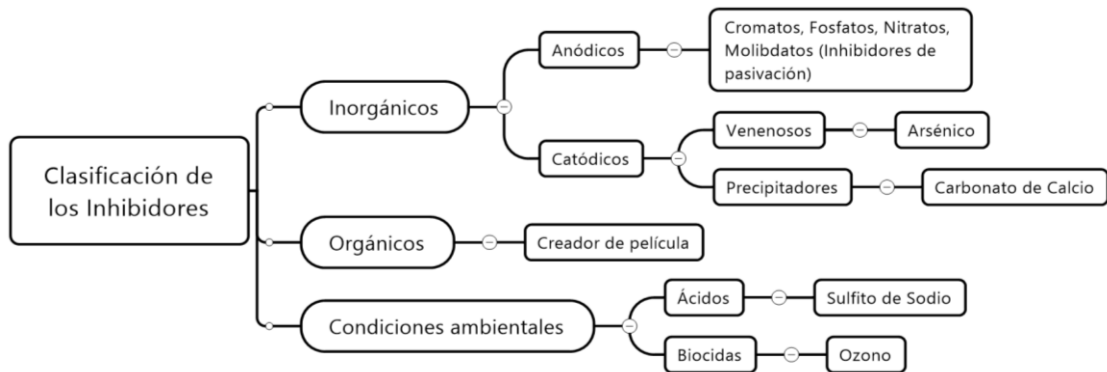
1.10.2.3. Recubrimientos protectores

Esta técnica es muy utilizada para controlar la corrosión. Los recubrimientos protectores pueden ser metálicos y en forma de pintura.

1.10.2.4. Inhibidores (tratamiento químico)

Los inhibidores de corrosión según Min (2008) son “químicos que se agregan a ambientes controlados para reducir la corrosividad de dichos ambientes” (p. 174). En la figura 9 se presenta la clasificación en tres grupos de los Inhibidores de Corrosión, estos a su vez se subdividen hasta nombrar los elementos o compuestos que integran un determinado grupo.

Figura 9. Clasificación de los inhibidores de corrosión



Fuente: Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control. Zaki (2006).

1.10.2.5. Protección catódica

La protección catódica se utiliza para proteger estructuras, maquinaria o componentes importantes de un sistema de corrosión.

Según (Craig, Lane, y Rose, 2006) el principio en el que se basa la protección catódica es que “la disolución de un metal (cátodo) se puede suprimir suministrándole electrones y, en efecto, controlando la corrosión”.

El inconveniente con este tipo de protección es su poca efectividad para sistemas que se encuentran al aire libre.

La protección catódica tiene dos principales clases que son:

- Protección Catódica Activa: también conocida como Protección de Corriente Impresa, esta protección utiliza una fuente externa de voltaje, conectando el borne negativo a la pieza que se quiere proteger y el borne positivo a un ánodo inerte.
- Protección Catódica Pasiva: En este tipo de protección únicamente se utiliza el acople del metal a proteger con un ánodo de sacrificio.

A continuación, se presenta la tabla VIII, que es una tabla comparativa entre la protección Catódica Pasiva y la Activa, puede notarse que la pasiva es más económica si se trabajan sistemas con pocos elementos de protección, mientras que la Activa es más económica al utilizarse sistemas grandes.

Tabla VIII. Protección Catódica Pasiva y Protección Catódica Activa

Protección Catódica Pasiva	Protección Catódica Activa
Simple	Compleja
Bajo o sin mantenimiento	Requiere mantenimiento programado
Trabaja mejor en electrolitos conductivos	Puede trabajar en electrolitos con baja conductividad

Continuación tabla VIII.

Bajos costos de instalación, instalaciones pequeñas	Posibilidad de ánodos remotos
Mayor inversión de capital para grandes sistemas	Baja inversión de capital para grandes sistemas
	Puede ser origen de los siguientes problemas: <ul style="list-style-type: none">● Corrosión por corrientes parásitas● Fragilidad por hidrógeno● Desunión del revestimiento● Corrosión catódica del aluminio

Fuente: Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials, Craig, Lane, y Rose, 2006, p. 241.

1.10.2.6. Protección anódica

La protección anódica involucra la pasivación del metal de la pieza o componente a proteger, (Craig, Lane, y Rose, 2006) comentan que “se forma una película pasiva en la superficie del metal con la aplicación de una corriente eléctrica. Una vez que se forma dicha película, actúa para proteger el metal, y es casi insoluble en el entorno en que se formó” (p. 243). La pasivación hace que los metales se vuelvan no reactivos y muy resistentes a la corrosión.

Este tipo de protección presenta el inconveniente de que no cualquier metal puede protegerse. A continuación, se exhibe la tabla IX donde se listan los

metales y las soluciones químicas con capacidad de asegurar la Protección Anódica.

Tabla IX. **Metales y soluciones capaces de ser protegidos anodicamente**

SOLUCIONES	METALES
Ácido sulfúrico	Aceros
Ácido fosfórico	Aceros inoxidables
Ácido Nítrico	Níquel
Soluciones de Nitrato	Aleaciones de níquel
Amoniaco acuoso	Cromo
Ácidos orgánicos	
Soluciones cáusticas	

Fuente: Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials, Craig, Lane, y Rose, 2006, p. 243.

1.11. Vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas son oscilaciones que sufre un cuerpo alrededor de una posición de reposo y tienen su origen en el exterior o el interior de los cuerpos (White, 2010).

1.11.1. Parámetros a monitorear

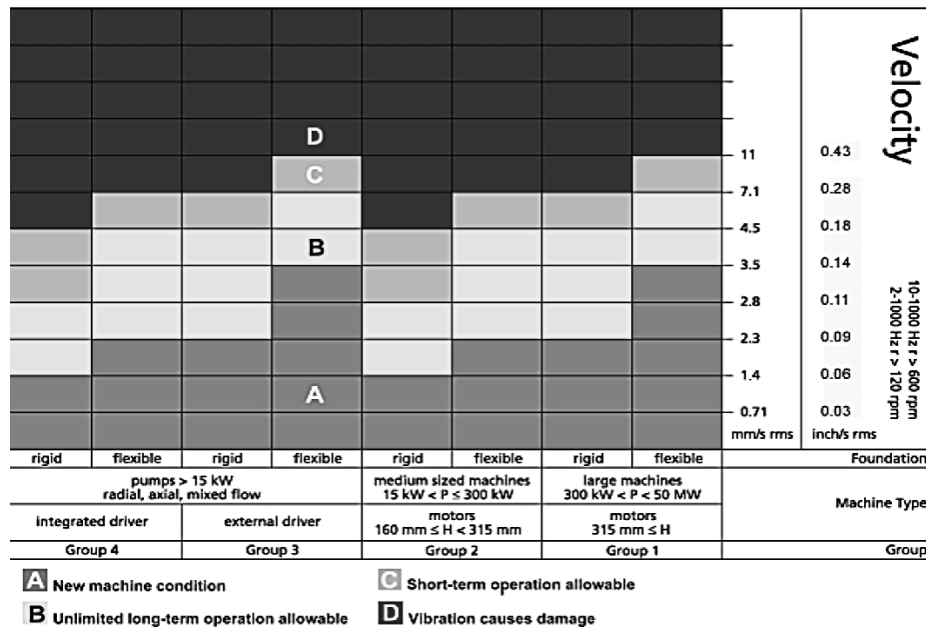
Las vibraciones están compuestas por diferentes componentes espectrales del movimiento propio de cada cuerpo y estos a su vez poseen características que los hacen susceptibles de diferentes formas, tal es el caso de “la velocidad global relacionada con el eje o velocidad total en mm/s y que representa las

características en el rango de frecuencias más bajo y que indica la condición general del equipo” (Grupo Adash, 2020). Además, se tiene a la “aceleración global en g, que representa las variaciones en el rango de frecuencias más alto e indica el estado del rodamiento“ (Grupo Adash, 2020).

1.11.2. Límites permisibles para vibraciones

Para considerar y formar el criterio de que un equipo se encuentra operando sin riesgo por presentar vibraciones durante su operación, se han establecido límites aceptables para los diferentes tipos de maquinarias que son objeto de análisis. En esta investigación se toma en consideración la norma ISO 10816-3 que corresponde a maquinaria industrial cuya potencia nominal se encuentra arriba de los 15 KW, esta norma se encuentra resumida en la figura 10.

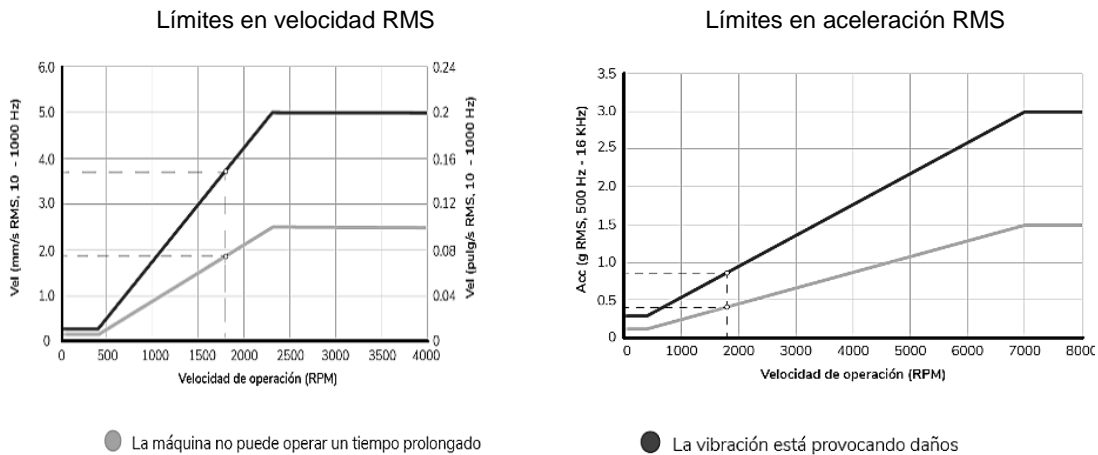
Figura 10. Límites de vibraciones permisibles según norma ISO 10816-3



Fuente: ISO 10816-3. Estándar de evaluación para el control de vibraciones Recuperado el 08 de 09 de 2020 de: <https://www.academia.edu/14698995>.

Además, de la norma ISO 10816-3, el fabricante de los equipos Adash ha determinado los límites para una máquina operando a una velocidad de 1800 rpm con el valor de 0.4g correspondiente a una velocidad de 1.85 mm/s y para el límite crítico 0.85g a una velocidad de 3.71 mm/s, como se aprecia en la figura 11. En ambos casos la línea inferior marca el punto de precaución en la operación y la línea superior limita el punto de daño al equipo.

Figura 11. Límites de vibraciones para velocidad y aceleración en RMS



Fuente: USER MANUAL A4400 VA4 Pro. California, Estados Unidos: Adash América.

Recuperado el 08 de 09 de 2020 de: <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-ii-manual.pdf>

2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Durante el desarrollo de la investigación se visitó en varias ocasiones y se midió en campo, para los análisis del grado de calidad de energía eléctrica que alimenta el motor del inducido 1 de la Planta Térmica de 62,4 MW, además se midió el conjunto de vibraciones mecánicas, a los diferentes puntos físicos de dicho motor según las distintas condiciones operativas.

La recopilación de información de las mediciones de parámetros eléctricos y de vibraciones mecánicas fue de corte longitudinal. En inspecciones previas realizadas por el departamento de mantenimiento eléctrico, se recopiló información sobre la calidad de energía eléctrica, de igual forma el departamento de mantenimiento predictivo realizó en varias ocasiones la medición de las vibraciones del motor juntamente con el ventilador inducido 1. Dicha información, recolectada por los departamentos de mantenimiento eléctrico y mantenimiento predictivo, se brindó para la investigación de manera transversal.

2.1. Visita de campo para reconocimiento

Para el estudio de las condiciones del motor que acciona el ventilador inducido 1, se inspeccionó en varias inspecciones por parte de los ingenieros y técnicos de los departamentos de mantenimiento eléctrico y mantenimiento predictivo.

La visita de reconocimiento por el departamento de mantenimiento eléctrico fue realizada el 12 de octubre del 2018, a las 14:30, en la planta de generación eléctrica de un ingenio azucarero ubicada en el departamento de Escuintla. Durante la inspección estuvo presente el electricista de turno y el ingeniero supervisor de mantenimiento eléctrico. La visita finalizó a las 15:20.

Durante la visita se recopiló información del tipo de instalación, el resguardo de los equipos y las conexiones de tierras físicas.

Para la visita se utilizó el formato Check list de condiciones operativas del motor. La información relevante recopilada es:

- El motor se encuentra expuesto a la intemperie.
- Tiene techo laminado para resguardo del motor.
- Tipo de motor, sellado o abierto.
- La caja de conexiones está sellada.
- El cableado para alimentar el motor es el adecuado.
- Cuenta con carbón de tierra.
- Voltaje de operación.
- Posee instalación de aterrizaje en el chasis del motor del ventilador inducido 1.

En la figura 12 se muestra el formato de check list utilizado para la inspección inicial.

Figura 12. Check list de condiciones operativas

CHECK LIST DE CONDICIONES OPERATIVAS EN MOTORES PLANTA GENERADORA 62.4MW

FECHA DE LA INSPECCIÓN _____

HORA _____

ENCARGADO _____

NOMBRE DEL EQUIPO _____

INFORMACION DE LA INSPECCION

TIPO DE AMBIENTE (EXPUESTO/CERRADO)

INTEMPERIE

CERRADO

TECHADO

SI NO

TIPO DE MOTOR

ABIERTO SELLADO

ESTADO DE CAJA DE CONEXIONES

TIENE TAPADERA

SI NO

LIMPIA

SI NO

SECA

SI NO

TIPO DE CABLEADO

UN SOLO CONDUCTOR POR FASE _____

VARIOS CONDUCTORES POR FASE _____

PUESTAS A TIERRA

CUENTA CON CABLEADO DE PUESTA A TIERRA

SI NO

CUENTA CON CARBÓN DE PUESTA A TIERRA EN EJE

SI NO

VOLTAJE DE OPERACIÓN

120 220

480 2.4 KV

4.16KV 13.8 KV

POTENCIA

KW HP

FIRMA ENCARGADO

FIRMA ELECTRICISTA

Fuente: elaboración propia.

La visita de reconocimiento del departamento de mantenimiento predictivo a solicitud del encargado de mantenimiento eléctrico, fue realizada el 16 de octubre del 2018, a las 14:58, en la planta de generación eléctrica de un ingenio azucarero ubicada en el departamento de Escuintla. Durante la inspección estuvo presente el electricista de turno, ingeniero asignado de mantenimiento predictivo, mecánico de mantenimiento predictivo y supervisor de mantenimiento eléctrico. La visita finalizó a las 16:20.

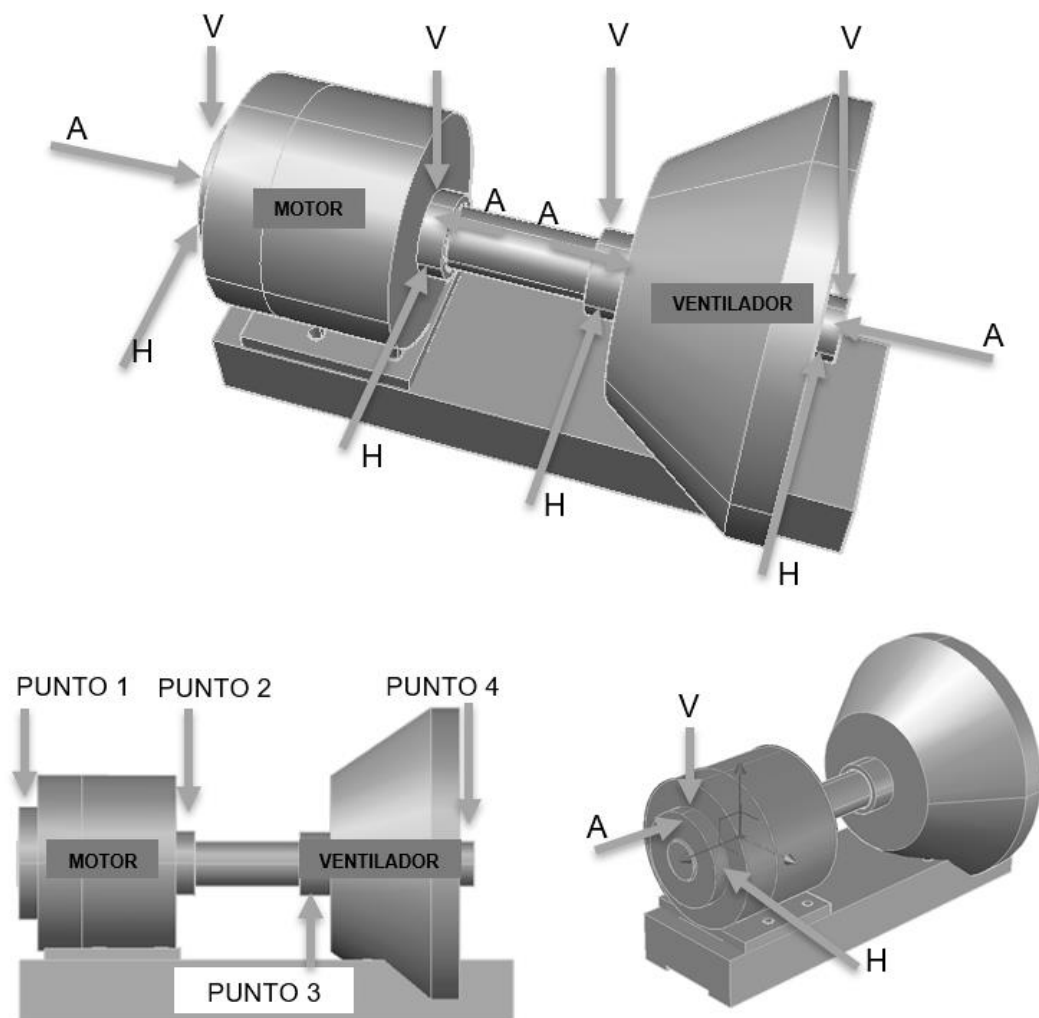
2.2. Visita de muestreo y medición de variables

Durante la operación del equipo se visitó en varias ocasiones el punto donde está instalado el motor que acciona el ventilador inducido 1, en las cuales el personal de mantenimiento eléctrico utilizando el medidor de calidad de energía AEMC 8336, programó las mediciones de los distintos parámetros de la corriente y voltaje que se ven afectados al alimentar un motor eléctrico con un variador de frecuencia por un periodo de 24 horas.

Por otro lado, durante las visitas del personal técnico del departamento de mantenimiento predictivo, se realizó el muestreo de vibraciones mecánicas en los motores y ventiladores inducidos 1 y 2 utilizando el equipo de la marca Adash modelo A4400 VA4 Pro; se tomó la medición en cuatro puntos distintos del conjunto motor-ventilador partiendo del lado no acoplado del motor, asignándole el nombre de punto #1 y finalizando en el lado libre del ventilador, designándolo como punto #4, a cada uno de los cuatro puntos le fueron marcadas tres posiciones angulares para la medición de las vibraciones mecánicas, siendo estas posiciones: vertical (V), horizontal (H) y axial (A).

En la figura 13 se detalla la distribución de dichos puntos a lo largo del conjunto motor-ventilador y las posiciones angulares asignadas para la toma de las mediciones.

Figura 13. **Distribución de puntos para medición de vibraciones**



Fuente: elaboración propia, realizado con AutoCAD 2020.

2.2.1. Presencia de corriente eléctrica en puestas a tierra

Para establecer la presencia de corrientes eléctricas en el cableado de puestas a tierra del motor se utilizó el detector de paso corriente eléctrica TKED-1 de la marca SKF que se incluye en la figura 14.

Figura 14. Localizador de paso de corriente eléctrica TKED 1



Fuente: Grupo SKF, 2014, p. 1.

Este equipo fue desarrollado por el fabricante SKF, especialmente para detectar el paso de corrientes eléctricas en los rodamientos de los motores eléctricos y tiene una sensibilidad aceptable a una distancia máxima de 300 milímetros del equipo que se quiere examinar.

Durante la visita al lugar donde se encuentra instalado el motor que acciona el ventilador inducido 1, se utilizó este instrumento y pudo notarse la presencia de circulación de corrientes eléctricas en los puntos cercanos que corresponden a los rodamientos delantero y trasero de dicho motor, esto se muestra en la figura 15.

Durante la inspección pudo notarse que el rodamiento del lado trasero del motor presentaba mayor circulación de corrientes, siendo este dato particular tomado en cuenta para continuar con la investigación.

Figura 15. **Detección de circulación de corrientes eléctricas en rodamientos**



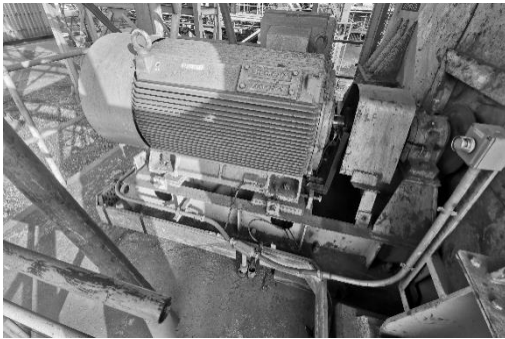
Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Con este instrumento solamente pudo establecerse la existencia de corrientes circulantes en los rodamientos, sin generarse suficiente información para realizar un análisis estadístico o modelar matemáticamente un comportamiento de dichas corrientes.

Al notar que la circulación de corrientes eléctricas en los cables de puestas a tierra del motor, era directamente proporcional a la velocidad que se ajustaba en el variador de frecuencia, se procedió a realizar mantenimiento preventivo a los equipos, a reforzar la red de tierras del motor e instalar carbones tipo escobillas al frente del motor, que hicieran contacto con el eje del motor que acciona el ventilador inducido 1, siendo la función de estos carbones mejorar el drenaje a tierra de las corrientes en modo común que circulan entre el estator y el eje del motor. En las figuras 16 y 17 se presentan imágenes de algunos de los

puntos de conexión donde se reforzó la puesta a tierra y donde se instaló el carbón en contacto con el eje del motor que acciona el ventilador inducido 1.

Figura 16. Refuerzo de tierras físicas en motor de ventilador inducido 1



Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Figura 17. Instalación de carbones de tierra en contacto con eje de motor



Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Posteriormente se hizo otra medición para establecer el grado de mejoría y la disminución de circulación de corrientes en los rodamientos, se obtuvo un conjunto de valores similares a los que se tenían sin el reforzamiento de las tierras físicas, estos valores se presentan en la tabla X. Se procedió a instalar el medidor de calidad de energía PowerPad III modelo 8336 de la marca AEMC a la entrada de la alimentación de voltaje del variador que acciona el motor inducido 1.

Tabla X. **Mediciones de circulación de corrientes en rodamientos**

RODAMIENTO DELANTERO		RODAMIENTO TRASERO		PUESTA A TIERRA DEL MOTOR	
ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS	ANTES	DESPUÉS
37	35	128	115	125	122
50	53	115	110	119	120
42	46	145	138	140	135
31	30	133	125	120	115

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Medición de calidad de energía

Para realizar la medición de calidad de energía, se instaló el juego de sensores de medición Rogowski propios del equipo PowerPad III modelo 8336 de la marca AEMC, alrededor del cableado que energiza el variador de frecuencia que alimenta el motor que acciona el ventilador inducido 1, cada uno de los tres sensores alrededor de cada fase de alimentación. Posteriormente se procedió a configurar el equipo para que registrara las mediciones cada minuto por un periodo de 12 horas.

La medición de la calidad de energía se efectuó en varias ocasiones, siendo estas:

Antes de presentarse una falla, la medición se realizó durante el monitoreo de rutina del departamento de mantenimiento eléctrico, dichos monitoreos se encuentran programados en las rutinas bimensuales de mantenimiento.

Otro factor por considerar para programar una inspección y medición de la calidad de energía era el escuchar ruido en dicho rodamiento, lo anterior se realizaba con el fin de monitorearlo para evitar una falla catastrófica y documentar la tendencia de la falla presente en el rodamiento.

Además, se realizaban mediciones poco tiempo después de realizado el cambio del rodamiento para verificar que se eliminará o disminuirá la circulación de corrientes en modo común a través del rodamiento. Una muestra de los datos medidos y grabados por el equipo AEMC se presentan en el anexo 2.

2.2.3. Medición de vibraciones mecánicas

Para realizar la medición de las vibraciones mecánicas del conjunto motor-ventilador, se utilizó el equipo portátil para medición de vibraciones modelo A4400 VA4 Pro de la marca Adash, el sensor utilizado en las mediciones fue un acelerómetro con una sensibilidad a la frecuencia de hasta 90 kHz. Ambos son mostrados en la figura 18.

Figura 18. Medidor de vibraciones Adash VA4 Pro y acelerómetro



Fuente: USER MANUAL A4400 VA4 Pro, Grupo Adash. Versión 2.73 – June 26, 2020. (p. 9).
Recuperado de: <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-ii-manual.pdf>

Este equipo es utilizado especialmente para la detección y medición de vibraciones mecánicas de los equipos, para esta investigación su uso tuvo lugar en el motor y en el ventilador inducido 1. Previamente el departamento de mantenimiento predictivo estableció en ambos equipos, motor y ventilador inducido 1, los puntos para la medición y monitoreo de dichas vibraciones en sus tres componentes, estos puntos se representan en la figura 13. En el anexo 3 se presenta una muestra de los valores obtenidos en una medición de rutina a los motores y ventiladores inducidos 1 y 2.

2.3. Calidad de energía en motores eléctricos

La calidad de energía eléctrica en motores eléctricos accionados por variador de frecuencia se puede determinar comparando los datos obtenidos en las distintas mediciones realizadas al cableado de alimentación del variador de frecuencia que energiza y controla el motor del ventilador inducido 1 contra los

límites determinados por diferentes normas, entre estas normas se destaca la IEEE-519, esta norma contiene límites establecidos para el nivel de distorsión de voltaje y corriente eléctrica permisibles, por tal razón se eligió para hacer dicha comparación.

2.4. Vibraciones mecánicas que experimenta el par motor-ventilador

El nivel de aceptabilidad en las vibraciones a que se encuentra sometido el conjunto motor-ventilador inducido 1 puede ser establecido siguiendo los criterios de la tabla de severidad de vibraciones de la norma ISO 10816-3 que aplica con maquinaria del tipo industrial con potencia por arriba de los 15 kW.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La efectividad de las técnicas preventivas para la detección de corrosión eléctrica, en rodamientos de bolas por circulación de corrientes en modo común, depende en gran medida de la calidad de los elementos que se utilicen para la corrección de las fallas eléctricas y mecánicas. En este capítulo, se presenta el análisis obtenido después de implementar diferentes recomendaciones planteadas como antecedentes en la investigación, que permiten disminuir la circulación de corrientes en modo común en rodamientos de bolas.

Después de elaborar los cálculos estadísticos y realizar comparaciones gráficas entre distintos periodos de operación de los equipos, se hace la comparación contra la norma IEEE 519 de los parámetros de origen eléctrico y contra la norma ISO 10816-3 para los parámetros obtenidos de la medición de vibraciones mecánicas. Pudo notarse que con el análisis de un tipo de variables es más perceptible el efecto de la circulación de corrientes en modo común.

3.1. Tendencia de variables operativas de motores eléctricos

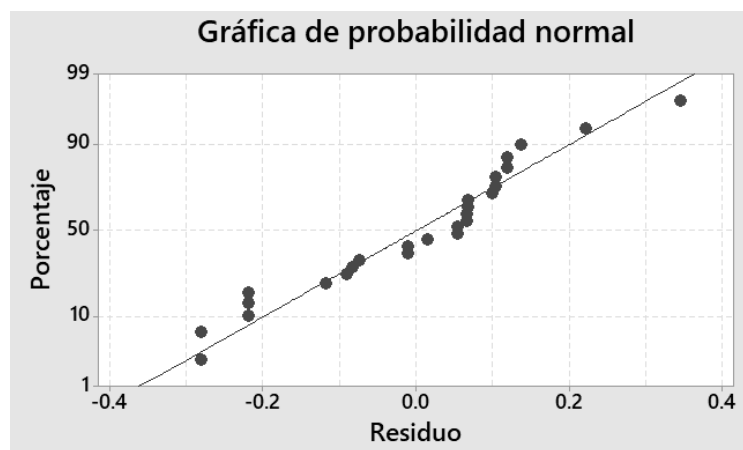
La determinación de las tendencias de las variables operativas de motores eléctricos empleadas para el análisis se hizo tomando en cuenta las variables de origen eléctrico y mecánico. Se realizó el muestreo, midiendo parámetros de la red eléctrica para descartar o confirmar que era a través de la energía eléctrica de alimentación que se afectaba negativamente el desempeño del motor que acciona el ventilador inducido 1. Por otro lado, se hizo el muestreo de vibraciones al conjunto motor-ventilador, tomando en cuenta las componentes de velocidad

para bajas frecuencias de rotación y de aceleraciones para las componentes de altas frecuencias de giro.

3.1.1. Variables de origen eléctrico

Al realizar el análisis estadístico de la variabilidad de los parámetros de origen eléctrico aplicando la prueba ANOVA (análisis de varianza) y compararlos contra los valores obtenidos en diferentes periodos de operación, pudo notarse que las mejoras a dichos parámetros al implementar distintas técnicas de prevención de circulación de corrientes en modo común, no reflejó un cambio apreciable en el comportamiento de los datos obtenidos. En la figura 19 se muestra la correlación entre los datos obtenidos en noviembre del 2018 y los datos de marzo del 2019, puede apreciarse que para ambos períodos la relación de las varianzas se mantuvo con la misma tendencia. Además, el R^2 que se calculó fue de 42.43 % y se determinó la ecuación: $Y= 200X + 50$ para la recta de la figura.

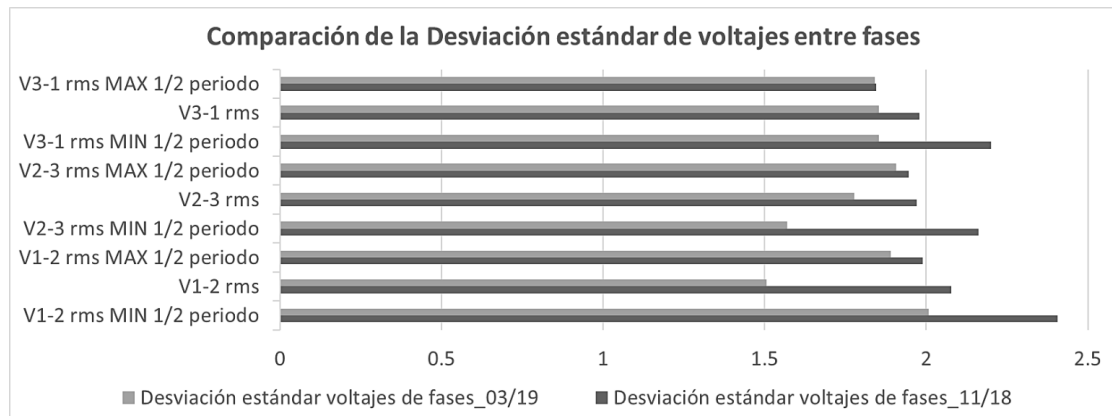
Figura 19. **Correlación entre voltajes**



Fuente: elaboración propia.

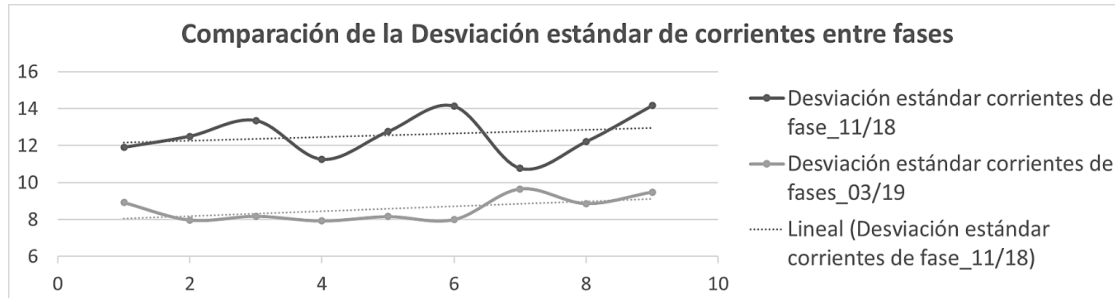
En la figura 20 se muestra una comparación gráfica del comportamiento de las desviaciones estándar de los voltajes. En la figura 21 la comparación gráfica del comportamiento de las corrientes eléctricas que fueron muestreadas. En ambas comparaciones, puede apreciarse que sus valores en la mayoría de los casos, varían proporcionalmente después de implementar como técnica de prevención de circulación de corrientes en modo común el cambio de cableado 1/0 AWG de uso regular, para puestas a tierra por otro cable especial para bajadas y puestas a tierra de pararrayos por su baja resistividad y alta concentración de cobre, alrededor del 99.9 %, con esta modificación al circuito de aterrizado en el motor, se busca disminuir el efecto corrosivo en el rodamiento.

Figura 20. Comportamiento de desviaciones estándar de voltajes



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Comportamiento de desviaciones estándar de corrientes**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 22 se muestra una medición a la red de tierras con el cable especial para bajadas y puesta a tierra de pararrayos, que muestra la baja resistividad que se obtiene con este tipo de cable, además en la figura 23 se incluye una imagen de un segmento de este cable.

Figura 22. **Medición de resistencia a tierra**



Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Figura 23. **Cable para bajadas de corriente para pararrayos**



Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

3.1.2. Variables de origen mecánico

Las variables mecánicas que se utilizaron, para el análisis y para establecer si se presentaba o no mejora operativa y preservación del rodamiento del lado libre del motor, que acciona el ventilador inducido 1 fueron las vibraciones mecánicas, estas mediciones, al igual que las de origen eléctrico, se tomaron en distintas etapas operativas del equipo. Para esta investigación, el muestreo se realizó con el equipo girando a una velocidad de 750 rpm, velocidad que representa el 80 % de la velocidad nominal de operación.

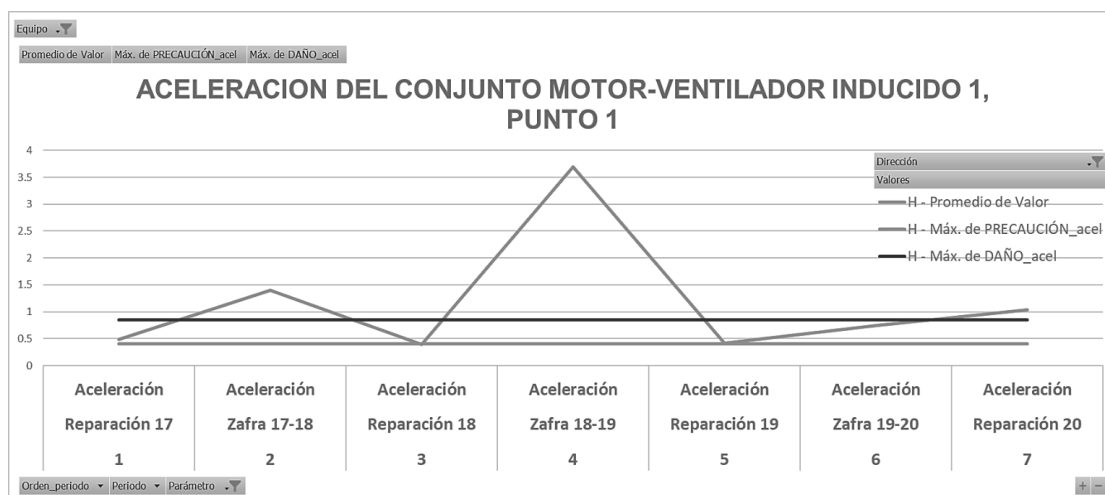
Como se mencionó en el apartado 2.2, para realizar un análisis de las vibraciones características del motor del ventilador inducido 1, las mediciones fueron tomadas en los cuatro puntos del conjunto motor-ventilador en sus tres respectivas posiciones angulares. En el anexo 3 se incluye una muestra aleatoria de los valores obtenidos al muestrear los dos pares motor-ventilador de los inducidos 1 y 2, para los siete periodos estudiados comprendidos desde mayo del 2017 a julio del 2020. Se realizó el muestreo de ambos conjuntos para realizar una comparación del estado operativo de ambos equipos.

En la figura 24 se muestra el comportamiento de las aceleraciones en g's (múltiplos de la aceleración de la gravedad) propias del lado libre del motor que

acciona el ventilador inducido 1 y en la figura 25 se presenta, a manera de comparación, el comportamiento de las aceleraciones para el lado libre del motor que acciona el ventilador inducido 2. Puede apreciarse que durante los periodos de zafra el motor del ventilador inducido 1 ha experimentado un aumento considerable por arriba del límite establecido como crítico por el fabricante del equipo utilizado para la medición de las vibraciones Adash VA4 Pro, mientras que los valores del motor que acciona el ventilador inducido 2 se mantiene por debajo de dicho valor crítico (línea roja en las figuras 24 y 25).

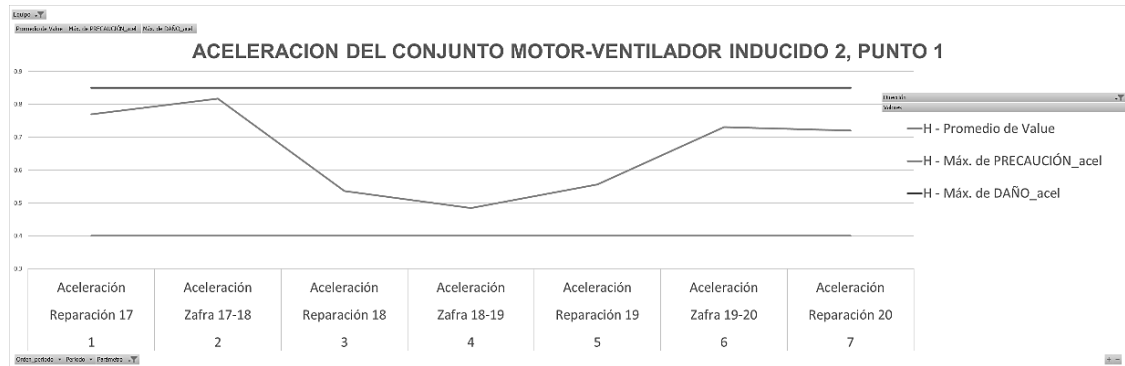
Observando la figura 24, puede notarse que para el periodo de zafra 19-20 la pendiente de la recta es menos pronunciada y que se mantiene debajo del valor crítico de 0.85g's, este periodo es posterior al cambio del rodamiento del lado no acoplado del motor que acciona el ventilador inducido 1 y debido a que se observa una tendencia a incrementar en estos valores, se programó una revisión preventiva a dicho motor durante el periodo de reparación 2020 que comprende de mayo a noviembre del 2020.

Figura 24. Comportamiento de la aceleración en el motor inducido 1



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Comportamiento de la aceleración en el motor inducido 2



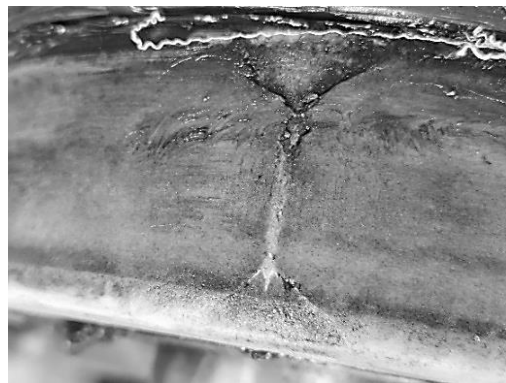
Fuente: elaboración propia.

En la figura 26 se muestra el estado de la superficie interna de la tapadera y la superficie externa del rodamiento, en la inspección realizada en agosto del 2020, ambas superficies se encontraron con indicios leves de circulación de corrientes en modo común.

Figura 26. Deterioro en rodamiento



Interior de tapadera

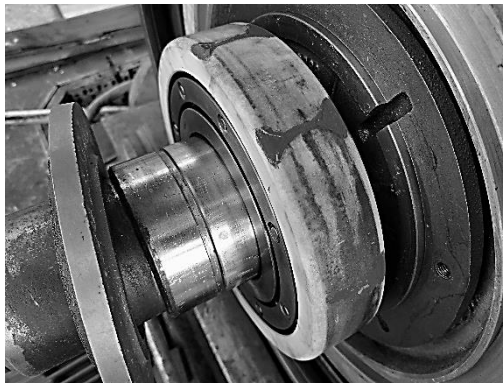


Superficie externa de rodamiento

Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Luego de establecer que solo esos daños se tenían en la tapadera y el rodamiento, se procedió a aplicar barniz aislador para corregir el problema, dejando pendiente hacer pruebas y mediciones para establecer su desempeño luego de la revisión. En la figura 27 se presenta el rodamiento montado en el eje del motor después de aplicar dicho barniz.

Figura 27. Reparación en aislamiento eléctrico de rodamiento



Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

3.2. Calidad de energía a la que se exponen los motores eléctricos

La calidad de energía es determinada por la distorsión armónica total que se inyecta al sistema, ya sea por parte de una carga o por un equipo de generación eléctrica. En el anexo 4 se incluye una muestra aleatoria de los datos medidos por el medidor de calidad de energía PowerPad III modelo 8336 de la marca AEMC. Comparando los datos obtenidos en la medición de dicho equipo para marzo del 2019 contra los datos de la tabla IV donde la norma IEEE 519-2014 clasifica el sistema de bajo voltaje y establece los límites de distorsión, puede notarse que los datos muestreados se mantienen por debajo del 10 % que

corresponde al límite para un sistema dedicado a la carga del convertidor en un variador de frecuencia.

3.3. Incidencia de falla en rodamientos de motores eléctricos

La incidencia de falla en los rodamientos del motor eléctrico controlado por variador de frecuencia que acciona el ventilador inducido 1, fue determinada exclusivamente para el rodamiento del lado libre, debido a que es el rodamiento que ha sido motivo de la mayoría de las intervenciones programadas al motor del ventilador inducido 1.

Para el análisis se utilizó el registro de tiempos de operación almacenados en el contador de horas del variador de frecuencia, se promedió el tiempo de operación para una zafra en 160 días y se consultó los tiempos empleados durante las paradas de mantenimientos programados, los que se registran en el sistema SIGES utilizado para la gestión de mantenimiento de la planta.

3.3.1. Tiempo medio entre paradas

El tiempo medio entre paradas también designado como TMEP, es la relación entre las horas totales de un periodo, para una zafra promedio de 160 días corresponde a 3840 horas, y el número total de paradas para ese periodo, esta relación se establece en la ecuación 1. Además, éste índice se calculó con el propósito de establecer el porcentaje del tiempo de zafra que se espera operar sin que ocurra una falla, lo que nos da una estimación de la cantidad de fallas que se podría esperar en el periodo establecido, puede determinarse con la ecuación 1.

$$\text{TMEP} = \frac{\text{Horas totales del periodo}}{\text{Número de paradas}} \quad [1]$$

Sustituyendo los valores establecidos:

$$\text{TMEP} = \frac{3840}{5} = 768 \text{ horas/parada}$$

El valor de 768 horas/parada de TMEP corresponde a un 20 % de la operación en toda la zafra libre de paradas por falla en el rodamiento del lado libre del motor del ventilador inducido 1.

3.3.2. Disponibilidad

Considerando el resultado del TMEP del 20 % esperado de operación para la ocurrencia de una falla que corresponde al rodamiento del lado libre del motor del ventilador inducido 1, se tiene que para un periodo completo de 160 días de zafra se esperaría la ocurrencia de al menos cinco fallas por esa misma causa.

Por otro lado, la disponibilidad del motor que acciona el ventilador inducido 1 puede calcularse relacionando el tiempo total en horas de una zafra promedio de 160 días y las horas paradas por mantenimiento como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{\text{Horas totales del periodo} - \text{Horas parada por Mtto.}}{\text{Horas totales del periodo}} \quad [2]$$

Sustituyendo las horas se tiene que la disponibilidad del motor del ventilador inducido 1 es de:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \frac{3840 - 103}{3840} = 97.32\%$$

En el cálculo anterior se puede notar que el equipo cuenta con un % alto de disponibilidad ya que el valor obtenido fue del 97.32 %.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Durante la investigación se realizó una serie de muestreos y análisis estadísticos de datos, para determinar la o las variables de origen eléctrico y/o mecánico, que mejor dieran a conocer el efecto negativo de la circulación de corrientes en modo común, sobre los rodamientos del motor eléctrico que acciona el ventilador inducido 1 de la caldera ISGEC con una capacidad de 1 200 kgf/cm² construida dentro de una planta de Generación Térmica ubicada en el departamento de Escuintla.

4.1. Técnicas de control de la corrosión para motores eléctricos

En el desarrollo de la investigación se implementó dos técnicas para controlar y disminuir la corrosión por picadura y erosión en los rodamientos, ocasionadas por la circulación de corrientes en modo común en un motor accionado por variador de frecuencia, dichas técnicas fueron:

- Mejora de instalaciones de tierras físicas en el par motor-ventilador inducido 1.
- Cambio de rodamiento del lado libre del motor que acciona el ventilador inducido 1.

La efectividad al momento de implementar cada una de las técnicas anteriores, fue determinada detectando y midiendo la existencia e intensidad de corriente eléctrica en el cableado de puesta a tierra del motor que acciona el ventilador inducido 1 y que es controlado a través de un variador de frecuencia.

Por otro lado, se monitoreó el comportamiento de las variables operativas de origen eléctrico y mecánico del conjunto motor-ventilador inducido 1, para determinar el impacto que tenía el implementar cada técnica o mejora a la instalación por separado.

En el caso de las variables eléctricas, solamente se realizó el muestreo a las entradas de alimentación del variador de frecuencia, que controla el motor que acciona el ventilador inducido 1, para determinar si las variaciones en la calidad de energía eléctrica era el factor asociado directamente a la presencia de corrientes circulantes en modo común.

Para el muestreo de las variables de tipo mecánico se realizó varias mediciones de vibraciones en los cuatro puntos de carga de los conjuntos motor-ventilador de los inducidos 1 y 2, siendo estos dos ventiladores el universo de ventiladores inducidos de la caldera ISGEC.

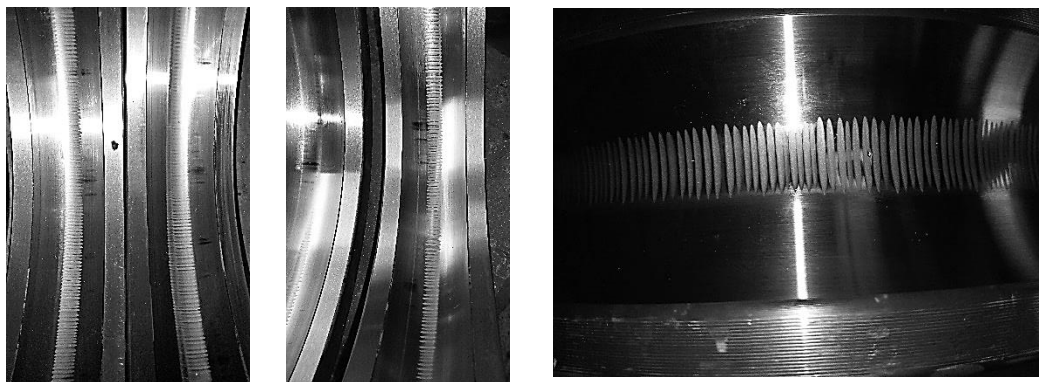
Posteriormente al monitoreo realizado, luego de implementar una técnica de las dos expuestas al inicio de este apartado, se realizaban muestreos de las variables eléctricas y mecánicas para determinar si, la mejora a las condiciones operativas provocaba una disminución en la circulación de corrientes en modo común en el cableado de puestas a tierra del motor que acciona el ventilador inducido 1.

Para el caso de mejora a las tierras físicas del par motor-ventilador inducido 1, no se evidenció mejoría en la incidencia de la falla, haciendo necesario implementar el cambio de rodamiento, este cambio de rodamiento se realizó dentro del programa de mantenimiento e instaló un rodamiento con características de uso general, luego de lo cual se observó y evidenció mejora operativa del motor que acciona el ventilador inducido 1.

Posterior al cambio del rodamiento del lado libre del motor, se continuó con el monitoreo de rutina y después de aproximadamente tres meses se evidenció en los muestreos de vibraciones la tendencia prematura a la falla de dicho rodamiento, haciendo necesaria una intervención programada al motor del ventilador inducido 1.

En dicha intervención se revisó minuciosamente el rodamiento instalado en el lado libre del motor para detectar cualquier tipo de falla y se encontró que presentaba las superficies internas, las que se encuentran en contacto directo con los elementos rodantes, con un estriado que hacía que el motor vibrara al momento de hacerlo girar, en la figura 28 se muestran las caras internas de la pista externa e interna del rodamiento instalado en el lado libre del motor del ventilador inducido 1.

Figura 28. **Efecto de la circulación de corrientes en modo común**



Interior de pista externa.

Interior de pista interna.

Fuente: Luis García, colección particular. Escuintla 2020.

Debido a la criticidad del equipo en el periodo de zafra se procedió al cambio del rodamiento y a ponerlo en servicio, y se continuó con la investigación de

soluciones a esta problemática. La repetencia de la falla puede apreciarse en el comportamiento de las aceleraciones obtenidas durante los distintos muestreos realizados al motor que acciona el ventilador inducido uno y que son presentados en la figura 24.

Luego de consultar los manuales del fabricante del variador marca ABB que controla el motor que acciona el ventilador inducido 1, se encontraron dos propuestas para resolver la circulación de corrientes en modo común, estas son:

- La primera propuesta consiste en instalar bobinas de choque a la salida del variador, para atrapar las componentes armónicas que son inyectadas al motor del ventilador inducido 1, se incluye una cotización de estas en el anexo 5.
- La segunda solución que propone el fabricante del variador es instalar un rodamiento aislado eléctricamente en el lado no acoplado del motor.

En esta investigación se tomó la segunda propuesta del fabricante del variador ABB como solución y fue implementada, teniéndose una operación del motor del ventilador inducido 1 más estable y prolongada, lo anterior puede observarse en la región derecha de la gráfica que se presenta en figura 24 que corresponde a la zafra 2019-2020. Considerando que la curva característica de las aceleraciones posee una tendencia a incrementar, se realizó la inspección y procedimiento expuestos en la sección 3.1.2.

4.2. Validez externa

En el objetivo general, que plantea la aplicación de técnicas no destructivas para la detectar la corrosión, se tiene el antecedente expuesto en el Folleto de

CENNELSA (2017), donde se utiliza una metodología de investigación aplicada a la operación de los equipos y expone distintas técnicas utilizadas para disminuir la circulación de corrientes, en modo común en los rodamientos de motores accionados por variador de frecuencia, establece entre sus resultados que un efecto adverso es la distorsión armónica que se inyecta al sistema eléctrico al que se encuentra conectado, datos que comparados con los resultados del análisis a las variables de tipo eléctricas, que se muestra en la figura 19, donde se presenta la correlación de las varianzas obtenidas del muestreo del voltaje de alimentación del variador para los periodos de noviembre del 2018 y marzo del 2019 y evidenció que no hubo una componente armónica múltiplo de la frecuencia fundamental que presentará desviación o distorsión que afectará el funcionamiento de los equipos.

Además, para el objetivo específico 2, pudo establecerse que no tiene relación con la investigación, debido a que en la comparación que se hizo con los límites para la distorsión total armónica establecidos para el voltaje por la norma IEEE 519-2014 y que se presentan en la tabla IV, se encuentran por debajo del límite de 10 % de distorsión, relacionando los resultados de la investigación y cumpliendo con lo expuesto por Ferracci (2004) donde determina que tanto el ente distribuidor como el consumidor comparten la responsabilidad de no distorsionar la energía eléctrica.

Según lo planteado en el objetivo específico 1 que busca establecer una tendencia de las variables operativas de motores eléctricos, se tiene el antecedente Procedimientos Para El Estudio Y Análisis De Perturbaciones Armónicas, División PFC, CIRCUTOR (2019) que emplea una metodología de investigación teórico-experimental utilizando la Matriz de identificación de los síntomas que pueden existir en los equipos propios de una instalación eléctrica al estar expuestos a distorsiones armónicas, incluida en el anexo 6, expone entre

sus resultados diferentes síntomas o fallas que pueden presentarse en los motores eléctricos y sus elementos.

Tomando en cuenta la evidencia encontrada en la inspección que se hizo al motor que acciona el ventilador inducido 1, en la que fue encontrado el rodamiento del lado libre con daño por chispa y erosión y que se presenta en la figura 28, puede concluirse que muestra relación con los síntomas expuestos en dicha matriz y que corresponden a la existencia de perturbaciones armónicas en la red que alimenta dicho motor.

En el objetivo específico 3, busca determinar la incidencia de falla en los rodamientos de los motores eléctricos al ser accionados con variador de frecuencia, se realizó varios muestreos de los parámetros eléctricos con el equipo AEMC 8336, únicamente a la entrada de la alimentación del variador que acciona el motor del ventilador inducido 1, limitando los muestreos de las variables de origen eléctrico al 50% del universo de ventiladores inducidos de la planta de generación térmica, con lo que puede concluir que el objetivo no puede reproducirse para otros equipos.

En el objetivo específico 4, busca determinar las técnicas de control de la corrosión que permitan el buen desempeño de los motores eléctricos y además ayuden a extender la vida útil de los rodamientos, según lo expuesto en el documento Corrientes de los cojinetes en sistemas de accionamiento de CA modernos y guía técnica N° 5 de ABB (2019) que utiliza una metodología teórico-experimental y que propone los tres enfoques para mitigar el impacto de la circulación de corrientes en modo común, estos son:

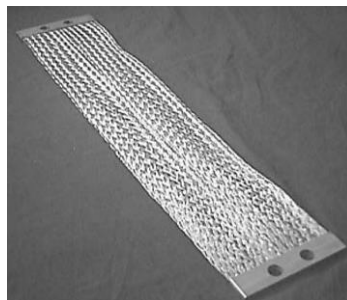
- Revisión del cableado para energizar
- Revisión del cableado para aterrizar los motores.

- Exploración con un medidor de campo magnético el cableado de puesta a tierra del motor.

Para la primera técnica propuesta, se determinó que el cableado que alimenta al motor que acciona el ventilador inducido 1 es del tipo AETNA, el cual cumple con las especificaciones y es utilizado para ese tipo de instalaciones. Además, pudo establecerse que no se obtenían los mismos resultados al implementar las otras dos opciones, es de considerar que entre los factores por los cuales no se obtuvo resultados similares a los expuestos en el documento Corrientes de los cojinetes en sistemas de accionamiento de CA modernos y guía técnica N° 5 de ABB (2019) se encuentran los siguientes factores:

- El tipo de cable utilizado para aterrizar los motores inicialmente era de uso normal para tierras físicas y se cambió por otro especial para drenajes de corrientes de pararrayos, en la figura 23 se presenta este cable. No pudo obtenerse mejora en el drenaje de las corrientes en modo común a tierra debido a que el cableado utilizado en el desarrollo del antecedente es de tipo faja y más robusto. En la figura 29 se muestra el cable utilizado por el fabricante de equipos ABB.

Figura 29. **Cable utilizado por ABB para puestas a tierra**



Fuente: Autor corporativo, ABB. Corrientes de los cojinetes en sistemas de accionamiento de CA modernos y guía técnica N° 5 de ABB, 2019, p. 17.

- Otro factor fue el grado de sensibilidad del elemento sensor utilizado para medir la existencia de corrientes eléctricas en el cableado de puestas a tierra del motor que acciona el ventilador inducido 1. El fabricante ABB menciona en el antecedente que no tiene a la venta el equipo de medición. En la figura 14 se presenta el detector de paso de corrientes TKED 1 de la marca SKF utilizado.

Para ambos casos, la evidencia queda documentada en la tabla X, donde se muestran las mediciones antes y después de hacer las mejoras al cableado de las tierras físicas sin mostrar mayores reducciones en sus valores.

4.3. Validez interna

En la metodología empleada para el muestreo de las vibraciones mecánicas, se tomaron en cuenta los dos motores y sus ventiladores inducidos 1 y 2, siendo estos el 100 % de los equipos de este tipo que se encuentran instalados en la planta. Al realizar el análisis estadístico de los datos muestreados aleatoriamente para cada uno de los equipos inducidos 1 y 2, y posteriormente compararlos entre sí, pudo notarse y concluirse que al realizar el cambio de rodamiento de uso común instalado en el lado libre del motor que acciona el ventilador inducido 1 por uno de tipo aislado eléctricamente, se corrigió la falla y ofreció una operación continua durante el periodo de zafra 2019-2020 comprendido del mes de noviembre del 2019 a mayo del 2020, por lo tanto el resultado puede ser reproducido en otros equipos con el mismo tipo de falla.

4.4. Divulgación

Con el propósito de dar a conocer conceptos útiles para la operación continua de los equipos y familiarizar al personal de la planta de generación térmica con la identificación de la existencia de corrientes en modo común y sus efectos sobre los equipos eléctricos y mecánicos, se elaboró el plan de capacitación que se presenta en el apéndice 1. En este plan se propone el desarrollo de temas desde conceptos básicos de electricidad, hasta la técnica preventiva V. O. S. O. y su importancia en el trabajo de los equipos de la planta.

Además, en el apéndice 2 se incluye la evaluación diagnóstica para determinar el grado de conocimiento de los temas expuestos que tienen los participantes antes y después de la capacitación.

CONCLUSIONES

1. Las tendencias de las variables de origen eléctrico y mecánico se tabularon y analizaron estadísticamente, se estableció que las variables operativas del tipo mecánico las representan de mejor forma después de aplicar las técnicas para prevenir y drenar las corrientes en modo común del conjunto motor-rodamiento.
2. La calidad de energía es determinada por el % de distorsión que tiene la tensión y la corriente eléctrica con que se alimenta el variador de frecuencia que acciona un motor eléctrico. En los análisis estadísticos que se realizaron a los datos obtenidos de diferentes muestreos, no se encontraron variaciones por arriba del 10 % que establece como aceptable la norma IEEE 519.
3. Se determinó que la incidencia de fallas en los rodamientos de motores accionados por variador de frecuencia puede estimarse utilizando las órdenes de trabajo generadas en un período de operación continua, denominado zafra, siendo el tiempo medio entre paradas del 20 % y la disponibilidad esperada del 97 %.
4. Se relacionaron las técnicas de control de la corrosión eléctrica con el control y monitoreo de vibraciones mecánicas y se determinó que la técnica que mejor desempeño demostró en el transcurso de la operación del motor que acciona el ventilador inducido 1 consistió en instalar un rodamiento recubierto con película aislante eléctrica en el extremo no acoplado del motor.

5. Para prevenir la circulación de corrientes en modo común en cableados de puesta a tierra, es necesario dar a conocer conceptos básicos de electricidad y la técnica de manejo e instalación de tierras físicas al personal de la planta de generación térmica, por lo que se desarrolló un plan para capacitar al personal técnico de mantenimiento eléctrico de la planta.

6. Se desarrolló una metodología del tipo experimental, aplicando técnicas preventivas basadas en el monitoreo de la existencia de circulación de corrientes eléctricas y la disminución de su intensidad en el cableado de puestas a tierra del conjunto motor-ventilador inducido 1.

RECOMENDACIONES

1. Para definir una tendencia aleatoria u orientada hacia algún tipo de comportamiento de las variables operativas que afectan el funcionamiento de los motores eléctricos accionados por variador de frecuencia, deben realizarse varios muestreos con información válida para así poder comparar el comportamiento del equipo expuesto a diferentes condiciones operativas.
2. Para tener una mejor representación del comportamiento de los parámetros en la calidad de energía, es de considerar instalar en el punto un medidor de energía que registre constantemente los parámetros y eventos que afecten la operación del conjunto variador-motor del ventilador inducido 1.
3. Se debe determinar la criticidad y posteriormente establecer la disponibilidad de los equipos de la planta de generación térmica, con el fin de calendarizar de mejor manera los mantenimientos preventivos y revisiones predictivas, priorizando los equipos según sea la criticidad obtenida del análisis situacional de los equipos.
4. Otra técnica que puede implementarse para prevenir y controlar la corrosión en rodamientos consiste en instalar bobinas de choque a la salida del variador de frecuencia con el propósito de atrapar las componentes armónicas y que son alimentadas hacia el motor eléctrico.
5. Debe generarse un plan de capacitación para el personal electricista de la planta de generación térmica que incluya los temas de: corriente, voltaje,

resistencia e impedancia, rodamientos y sus partes, corrientes parásitas, causas y efectos.

6. Es necesario establecer una rutina de inspección donde se determine la existencia de campo magnético en el cableado de puestas a tierra de los motores accionados por variador de frecuencia de la planta de generación térmica, y establecer valores permisibles y críticos con el propósito de evitar tempranamente daños en los rodamientos.

REFERENCIAS

1. 61642, N. e.-E. (2000). Norma española UNE-EN 61642. Desconocido, *Redes industriales de corriente alterna afectadas por armónicos, Empleo de filtros a instalar en paralelo* (pág. 7). Madrid, Génova, España: AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación). Recuperado el 25 de 07 de 2019
2. ABB. (22 de 06 de 2010). *Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas*. Cuadernos de aplicaciones técnicas, 20. Recuperado el 01 de 07 de 2019
3. ABB. (17 de 06 de 2013). *Actualidad 4|13 Newsletter de ABB Colombia* (p. 2). Recuperado el 12 de 09 de 2021 de: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/newsletters/actualidad-colombia/actualidad-413.pdf?sfvrsn=2>
4. ABB. (2016). *Standard_Manual_LV_Motors_ES_revG web.pdf. Motores de baja tensión Manual de instalación, funcionamiento, mantenimiento y seguridad* (p.12). Recuperado el 12 de 09 de 2021 de: https://library.e.abb.com/public/9ca5bc1a16274a7298f18bafcf72/Standard_Manual_LV_Motors_ES_revG%20web.pdf
5. ABB. (2019). *Corrientes de los cojinetes en sistemas de accionamiento de CA modernos. Guía técnica Nº 5, 7 Y 18.*

6. ABB (12 de 09 de 2021). *PRODUCT-DETAILS: Comm. Mode choke T60006-L*. Recuperado de: <https://new.abb.com/products/3AUA0000032859/3aua0000032859>
7. Centelsa. (2017). Cables Centelsa VFD (*Variable Frequency Drive – Cables para motores de velocidad variable*). Segundo boletín de cables, 25 y 38.
8. Circutor, Division PFC. (2019). *Procedimientos Para El Estudio Y Análisis De Perturbaciones Armónicas*. CIRCUTOR, 5.
9. Corporativo, A. (2005). *¡Esto es todo lo que necesita saber! Conocimiento básico para lo... Básico ¡Utilización segura de los cojinetes!* Tokio: N/A. Recuperado el 15 de 08 de 2019, de <http://www.nachi-fujikoshi.co.jp/>
10. Corporativo, A. (09 de 02 de 2011). L Araya Ingeniería. Recuperado el 02 de 10 de 2019, de *RESPUESTAS SOBRE VARIADORES DE FRECUENCIA (VFD)*: <http://arayaingenieria.blogspot.com/2011/02/respuestas-sobre-variadores-de.html>
11. Craig, B. D., Lane, R. A., y Rose, D. H. (2006). *Corrosion Prevention and Control: A Program Management Guide for Selecting Materials*. Defense Technical Information Center, ATTN. Rome, New York: Advanced Materials, Manufacturing, and Testing Information Analysis Center. Recuperado el 15 de Junio de 2020

12. Desconocido. (2019) *Hacer una bobina de Rogowski (3 / 5 paso)*. Recuperado el 17 de 08 de 2019 de: https://www.askix.com/hacer-una-bobina-de-rogowski_4.html
13. Desconocido. (2011) *Manual Técnico Motores Eléctricos*. Recuperado el 20 de 01 de 2020, de <https://autodidacta.info/electricidad/un-pequeno-manual-tecnico-sobre-los-motores-electricos/>
14. Ferracci, P. (2004). *La Calidad de la Energía Eléctrica*. Cuaderno Técnico nº 199, Schneider Electric, 4.
15. Flores, A. V. (2006). *MANUAL DE MOTORES ELÉCTRICOS*. En A. V. Flores, *MANUAL DE MOTORES ELÉCTRICOS* (pág. 70). N. E.: N. E. Recuperado el 23 de 01 de 2020, de <http://www.kimerius.com/app/download/5783169262/Manual+de+>
16. Grupo Adash. (2020). *USER MANUAL A4400 VA4 Pro*. California, Estados Unidos: Adash América. Recuperado el 08 de 09 de 2020, de <https://adash.com/documents/A4400/Adash-A4400-VA4-Pro-ii-manual.pdf>
17. Grupo SKF. (2019). *Instructions for use SKF TKED 1*. Houten, Netherlands: Grupo SKF. Recuperado el 15 de 02 de 2020, de https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d196800a0cba-mp5355_tcm_12-35605.pdf
18. Grupo WEG - Unidad Motores. (2016). *Motores Eléctricos Guía de Especificación*. Jaraguá, Sul, Brasil: Grupo WEG. Recuperado el 16 de 01 de 2020, de

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>

19. Harper, G. E. (2004). *El Libro Práctico de los Generadores, Transformadores y Motores Eléctricos*. México: Limusa.
20. IEEE. (1995). *IEEE Std 644-1994 Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
21. IEEE. (2014). *IEEE STD 519-2014 (Rev. IEEE Std. 519-1992) Práctica recomendada IEEE y Requisitos para el control armónico en Sistemas de energía eléctrica*. New York, NY: IEEE. Recuperado el 10 de Septiembre de 2020, de <https://es.scribd.com/document/399050108/IEEE-Std-519-2014-espanol-pdf>
22. ISO 10816-3. *Estándar de evaluación para el control de vibraciones* Recuperado el 08 de 09 de 2020 de de: <https://www.academia.edu/14698995>
23. Jiménez, H. V. (2008). Trabajo de Graduación. *Incidencias Electromecánicas En Motores Polifásicos De Inducción, Alimentados Por Variadores De Frecuencia*. Guatemala: N/A. Recuperado el 10 de julio de 2019.

24. Min, M. C. (2008). *Inspector Knowledge Series 03-0 An Introduction to Corrosion*. Pekín, China: Solutionsnalt. Recuperado el 03 de agosto de 2020.
25. Motores Eléctricos De Guatemala S.A. Miembro de ABB Drives Alliance (2018). Cotización: *REPUESTOS VARIADORES ACS 850*
26. Muetze, A. (2004). *Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors*. Universidad técnica de Darmstadt, Ingeniería eléctrica y tecnología de la información. Darmstadt, Alemania: N/A. Recuperado el 10 de agosto de 2019, de <https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/dissertationen/dissannette.pdf>
27. Pedefferri, P. (2018). *Corrosion Science and Engineering*. (L. Lazzari, M. P. Pedefferri, M. Ormellese, A. Brenna, S. Beretta, F. Bolzoni, y M. V. Diamanti, Edits.) Gewerbestrasse, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. Recuperado el 10 de Junio de 2020
28. PROCOBRE. (13 de 08 de 2000). *Calidad de la energía. Calidad de la red eléctrica* (5), 16. México D. F., México, México: N/A. Recuperado el 02 de 10 de 2019.
29. Quintero Sarmiento, D. R., Rosero García, J., y Mejía López, W. (2013). *Medición de Corrientes EDM sobre Rodamientos en el Conjunto Motor de Inducción y Variador de Frecuencia*. INGE CUC, 9(2), 84, 85, 86, 87.
30. Quintero, D. R., Mejia, W., y Rosero, J. A. (2013). *Good Practice for Electric Discharge Machining (EDM) Bearing Currents*

Measurement in the Induction Motor and Drives System. En D. R. Quintero, W. Mejia, y J. A. Rosero, Good Practice for Electric Discharge Machining (EDM) Bearing Currents Measurement in the Induction Motor and Drives System (págs. 1384, 1386). Bogotá, Colombia: N/A. Recuperado el 16 de 08 de 2019.

31. Ramírez, E. T. (2003). *Programa de ahorro de energía, distorsión armónica*. Puebla, Puebla, México: N/A.
32. Rici, L. (2008). *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. Piscataway, New York, USA: Centro de Servicio de la IEEE. Recuperado el 14 de 08 de 2020, de <https://es.scribd.com/doc/58301735/IEEE-519-1992-en-Espanol>
33. Salazar-Jiménez, J. A. (30 de abril de 2015). *Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica)*. Tecnología en Marcha, 28(3), 136. Recuperado el 06 de junio de 2020
34. Sánchez Cortés, M. A. (2009). *Calidad de la Energía Eléctrica*. Puebla, Puebla, México: N/A. Recuperado el 15 de 08 de 2019
35. Schweitzer, P. A. (2010). *Fundamentals of CORROSIÓN, Mechanisms, Causes, and Preventative Methods*. Florida, Florida: Taylor and Francis Group, LLC. Recuperado el 11 de julio de 2020
36. Smith, W. F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Cuarta ed.). (G. N. Cázares, Trad.) México, D.F.,

México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. DE C.V. Recuperado el 11 de julio de 2020.

37. Téllez Ramírez, E. (2003). *Programa de ahorro de energía, distorsión armónica*. México, Puebla, Pue. Automatización, Productividad Y Calidad S.A. de C.V. Recuperado el 14 de agosto de 2019.
38. The Timken Company. (2015). *Análisis de daños en los rodamientos Timken y Guía de referencia sobre lubricación*. Philadelphia: N/A.
39. Universidad de las Islas Baleares. (2003). *Prevención de Riesgos Laborales*. Recuperado el 11 de 09 de 2021 de: <https://www.uib.cat/depart/dqu/dquo/dquo2/MasterSL/ASIG/PDF.oid/112T%90C~1.PDF>
40. Vector Motor Control. (2021). *Filtros senoidales FLC*. Recuperado el 12 de 09 de 2021.
41. White, G. (2010). *Introducción al Análisis de Vibraciones* (1.^a ed., p. 16). Massachusetts: Azima DLI. Massachusetts: Azima DLI.
42. Zaki, A. (2006). *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control* (1 ed.). Oxford, Reino Unido: Elsevier. Recuperado el 14 de junio de 2020.

APÉNDICES

Apéndice 1. Plan para capacitación de personal de planta de generación térmica

Nombre del evento:

Circulación de corrientes parásitas, la aparición de corrientes en modo común y sus efectos en equipos mecánicos y eléctricos.

Duración del evento: 04 horas.

Encargado de la capacitación: Cristián García.

Tiempo para su desarrollo	Objetivo específico	Temas a desarrollar	Actividad	Evaluación
30 minutos	Conocer conceptos básicos de electricidad	Conceptos básicos de: <ul style="list-style-type: none"> • Corriente eléctrica • Voltaje • Resistencia e impedancia. • Ejemplos. 	Clase magistral, explicación de cómo se producen el voltaje y la corriente eléctrica	Evaluación diagnóstica al inicio del evento.
30 minutos	Conocer los rodamientos, partes y tipos de fallas	Conceptos de rodamientos y sus partes: <ul style="list-style-type: none"> • Partes de un rodamiento • Tipos de rodamientos más comunes utilizados en planta. 	Clase magistral, explicación de los tipos de rodamientos más comunes utilizados en planta, sus	

Continúa apéndice 1.

- Cuidados para su instalación
 - Tipos de fallas en rodamientos
- partes y tipos de fallas

1 hora	<p>Estudiar las puestas a tierra y comprender su importancia en las instalaciones de la planta de generación térmica.</p> <p>Establecer técnicas para el mantenimiento preventivo de las puestas a tierra</p>	<p>Puestas a tierra</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué es una puesta a tierra? • Elementos de una puesta a tierra • Elementos de un pararrayos • Medición de resistividad del suelo • Equipos y uso para la medición de resistividad de suelos 	<p>Clase magistral, exposición de elementos de una instalación de puestas a tierra y pararrayos</p>
1 hora	<p>Establecer criterios de aceptabilidad de un mantenimiento preventivo a un sistema de puestas a tierra.</p>	<p>Mantenimiento preventivo de puestas a tierra</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identificación de electrodos y/o configuración del sistema de tierras. • Revisión de las condiciones físicas de electrodos, registros y 	<p>Clase magistral, exposición y discusión de los criterios para realizar el mantenimiento preventivo de las puestas a tierra.</p>

conexiones electrodo –
cable.

Continúa apéndice 1.

- Limpieza del registro de tierra y reapriete de conexiones electrodo - cable.
- Identificación de fuentes generadoras de electricidad estática.
- Medición de la resistencia del electrodo de puesta a tierra (Termómetro).
- Medición de la continuidad de conexiones (electrodo-cable o cable-cable).
- Verificación de altura y estado físico del pararrayos, así como estado físico de mástil en su caso.
- Verificación del número de descargas atmosféricas en el contador (en su caso).
- Revisión del ángulo de protección del pararrayos.

45 minutos

Conocer las corrientes parásitas, sus

Corrientes parásitas

Clase magistral, exposición y discusión

causas y efectos	<ul style="list-style-type: none"> • Causas de la aparición de corrientes parásitas • Conceptos de variador de frecuencia
------------------	---

Continúa apéndice 1.

Corrientes en modo común

- Efectos en los equipos eléctricos y mecánicos.
- Detección de circulación de corrientes en modo común

15 minutos	Conocer la técnica preventiva V. O. S. O. sus usos y aplicaciones	Técnica V. O. S. O <ul style="list-style-type: none"> • Qué es la técnica V.O.S.O? Ver, Oír, Sentir y Oler • Conceptos y aplicación a la operación de: Ver, Oír, Sentir y Oler 	Clase magistral, exposición y discusión	Evaluación diagnóstica al final del evento.
-------------------	---	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Evaluación diagnóstica

Evaluación diagnóstica # 1

Evento: **Circulación de corrientes parásitas, la aparición de corrientes en modo común y sus efectos en equipos mecánicos y eléctricos.**

Fecha: Hora:

Nombre:

1. ¿Qué es voltaje?
2. ¿Qué es corriente eléctrica?
3. ¿Qué es resistencia eléctrica?
4. Nombre las partes de un rodamiento:
5. Mencione 2 tipos de fallas de rodamientos:
6. ¿Qué es una puesta a tierra?
7. Mencione 4 elementos que formen la instalación de un pararrayos:
8. ¿Qué es una corriente parásita?
9. Mencione 2 partes de un variador de frecuencia:
10. ¿Cómo puede detectarse la circulación de corrientes en modo común?
11. ¿Qué significan las siglas V. O. S. O.?

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Recomendaciones para selección de aislamiento de devanados

Rangos de tensión	$P_N < 100 \text{ kW}$	$P_N \geq 100 \text{ kW}$ o IEC315 \leq Tamaño de carcasa \leq IEC355	$P_N \geq 350 \text{ kW}$ o IEC400 \leq Tamaño de carcasa \leq IEC450
$U_N \leq 500 \text{ V}$	Motor estándar	Motor estándar + rodamiento de lado de acople aislado	Motor estándar + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común
$500 \text{ V} > U_N \leq 600 \text{ V}$	Motor estándar + filtro dU/dt (reactor) O bien Aislamiento reforzado	Motor estándar + filtro dU/dt (reactor) + rodamiento de lado de acople aislado O bien Aislamiento reforzado + rodamiento de lado de acople aislado	Motor estándar + filtro dU/dt (reactor) + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común O bien Aislamiento reforzado + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común
$500 \text{ V} > U_N \leq 600 \text{ V}$ (longitud de cable > 150 m)	Motor estándar	Motor estándar + rodamiento de lado de acople aislado	Motor estándar + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común
$600 \text{ V} > U_N \leq 690 \text{ V}$	Aislamiento reforzado + filtro dU/dt (reactor)	Aislamiento reforzado + filtro dU/dt (reactor) + rodamiento de lado de acople aislado	Aislamiento reforzado + filtro dU/dt (reactor) + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común
$600 \text{ V} > U_N \leq 690 \text{ V}$ (longitud de cable > 150 m)	Aislamiento reforzado	Aislamiento reforzado + rodamiento de lado de acople aislado	Aislamiento reforzado + rodamiento de lado de acople aislado + filtro de modo común

Fuente: Asea Brown Boveri 2016. (p.12). Recuperado de:

https://library.e.abb.com/public/9ca5bc1a16274a7298f18bafc0cfef72/Standard_Manual_LV_Motors_ES_revG%20web.pdf

Anexo 2. Registro de voltajes y corrientes del medidor de calidad de energía PowerPad III modelo 8336

Fecha:	Hora:	V1-2 rms MIN 1/2 periodo	V1-2 rms MAX 1/2 periodo	V2-3 rms MIN 1/2 periodo	V2-3 rms MAX 1/2 periodo	V3-1 rms MIN 1/2 periodo	V3-1 rms MAX 1/2 periodo	A1 rms MIN 1/2 periodo	A1 rms MAX 1/2 periodo	A2 rms MIN 1/2 periodo	A2 rms MAX 1/2 periodo
07/03/2019	15:17:00	462.1	470.5	462.2	467.1	461.4	466.8	208.5	226.7	208.5	225.4
07/03/2019	15:18:00	462	466.2	462.3	467.2	461.9	466.9	211.5	227.2	210	225.9
07/03/2019	15:19:00	462.1	466.2	462.9	467.3	462	467	211.5	227.6	209.5	226.3
07/03/2019	15:20:00	461.4	466.1	462.6	467.2	462	466.9	209.5	226.4	208.5	225.3
07/03/2019	15:21:00	459.4	465.1	460.3	466.4	459.9	465.9	210	225.4	207.5	224.6
07/03/2019	15:22:00	459.4	464.5	460.4	465.7	459.4	465.3	206	225.7	206	224.5
07/03/2019	15:23:00	459.9	464.4	460.2	465.6	459.4	465.1	207.5	226.4	207	225.2
07/03/2019	15:24:00	459.7	464.2	460.4	465.4	459.4	464.9	208	227.2	208.5	226.2
07/03/2019	15:25:00	458.6	464.3	459.8	465.5	458.9	465	212	227.5	208.5	226.5
07/03/2019	15:26:00	460.7	464.9	461.7	466.1	460.5	465.7	210	227.3	210.5	226.6
07/03/2019	15:27:00	460.4	465.1	461.8	466.3	461.4	465.9	209	227	209.5	226.2
07/03/2019	15:28:00	459.6	464.8	460.5	465.9	460	465.5	209.5	226.9	209	226.1
07/03/2019	15:29:00	459.4	463.8	459.8	465.1	459.3	464.6	209.5	226.1	209	224.8
07/03/2019	15:30:00	459.9	464.1	459.8	465.4	459.2	464.9	208	226.6	208.5	225.2
07/03/2019	15:31:00	458.7	464.2	460.3	465.5	459.9	465	211	227.5	209.5	226.3
07/03/2019	15:33:00	460.3	464.6	460.8	465.9	460.5	465.5	209	226.7	207.5	225.4

Fuente: Descargado del equipo PowerPad III modelo 8336 con Dataview® (2019)

Anexo 3. Registro de datos del medidor de vibraciones Adash VA4 Pro

Equipo	Punto	Dirección	Periodo	Fecha	Parámetro	Valor	Unidad	Estado
Inducido 2	3	A	Reparación 17	02/05/2017	Velocidad	0.64	mm/s	Ok
Inducido 1	1	H	Reparación 17	02/05/2017	Aceleración	1.11	g	Ok
Inducido 1	2	H	Reparación 17	02/05/2017	Aceleración	0.588	g	Ok
Inducido 1	4	H	Reparación 17	04/05/2017	Velocidad	0.315	mm/s	Ok
Inducido 1	2	V	Reparación 17	10/05/2017	Velocidad	0.554	mm/s	Ok
Inducido 1	4	H	Reparación 17	10/05/2017	Velocidad	0.294	mm/s	Ok
Inducido 1	4	H	Reparación 17	10/05/2017	Velocidad	0.294	mm/s	Ok
Inducido 2	1	A	Reparación 17	10/05/2017	Velocidad	0.193	mm/s	Ok
Inducido 2	3	H	Reparación 17	10/05/2017	Aceleración	0.394	g	Ok
Inducido 2	4	H	Reparación 17	10/05/2017	Aceleración	0.201	g	Ok
Inducido 1	3	A	Reparación 17	16/05/2017	Velocidad	0.675	mm/s	Ok
Inducido 2	2	V	Reparación 17	16/05/2017	Velocidad	0.502	mm/s	Ok
Inducido 1	1	H	Reparación 17	23/05/2017	Velocidad	0.218	mm/s	Ok
Inducido 1	1	H	Reparación 17	23/05/2017	Velocidad	0.218	mm/s	Ok
Inducido 1	3	V	Reparación 17	23/05/2017	Velocidad	0.247	mm/s	Ok
Inducido 2	1	H	Reparación 17	23/05/2017	Velocidad	0.319	mm/s	Ok
Inducido 1	3	H	Reparación 17	23/05/2017	Aceleración	0.374	g	Ok
Inducido 1	4	H	Reparación 17	23/05/2017	Aceleración	0.115	g	Ok
Inducido 2	2	V	Reparación 17	01/06/2017	Velocidad	0.616	mm/s	Ok
Inducido 2	3	H	Reparación 17	01/06/2017	Velocidad	1.24	mm/s	Ok
Inducido 1	3	V	Reparación 17	28/06/2017	Velocidad	2.21	mm/s	Ok
Inducido 1	4	H	Reparación 17	28/06/2017	Velocidad	0.807	mm/s	Ok
Inducido 2	2	H	Reparación 17	28/06/2017	Velocidad	0.841	mm/s	Ok
Inducido 2	3	A	Reparación 17	28/06/2017	Velocidad	0.664	mm/s	Ok
Inducido 1	1	H	Reparación 17	28/06/2017	Aceleración	0.827	g	Ok
Inducido 1	1	V	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	0.754	mm/s	Ok
Inducido 1	1	V	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	0.754	mm/s	Ok
Inducido 1	2	V	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	1.15	mm/s	Ok
Inducido 1	3	V	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	2.03	mm/s	Ok
Inducido 1	3	H	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	3.86	mm/s	W
Inducido 2	1	H	Reparación 17	21/07/2017	Velocidad	0.416	mm/s	Ok
Inducido 2	4	H	Zafra 17-18	23/03/2018	Velocidad	0.511	mm/s	Ok

Fuente: Descargado del equipo Adash VA4 con DDS Software (2017)

**Anexo 4. Registro de distorsión armónica de corrientes del medidor de
calidad de energía PowerPad III modelo 8336**

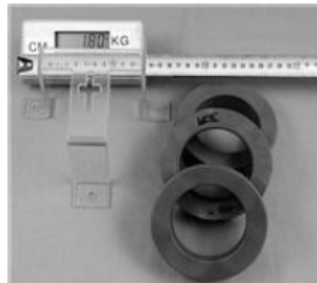
MUESTRA	A1 H0	A2 H0	A3 H0	A1 H1	A2 H1	A3 H1	A1 H2	A2 H2	A3 H2	A1 H3	A2 H3	A3 H3	A1 H4	A2 H4	A3 H4
1	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
2	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
3	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
4	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
6	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
10	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
11	---	---	---	100	100	100	0.4	0.5	0.5	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
12	---	---	---	100	100	100	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
13	---	---	---	100	100	100	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
14	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.5	0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1
15	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
17	---	---	---	100	100	100	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
18	---	---	---	100	100	100	0.5	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
19	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2
20	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2
22	---	---	---	100	100	100	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
23	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
25	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
26	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
27	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
28	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
29	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1
30	---	---	---	100	100	100	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2

Fuente: Descargado del equipo PowerPad III modelo 8336 con Dataview® (2019)

**Anexo 5. Cotización de bobina de choque para variador de frecuencia
que acciona el motor del ventilador inducido 1**

ITEM I: INDUCIDOS PRINCIPAL Y RESPALDO

**4 – KITS FILTRO DE MODO COMUN (INCLUYE 3 DONAS Y AISLADOR),
MODELO T60006-L2102-W468 3PCS WOUND CORE (ABB CODE
68249414)**



PRECIO UNITARIO CON IVA\$ 905.52

PRECIO TOTAL DE LAS 4 UNIDADES CON IVA\$ 3,622.08

FAVOR EMITIR ORDEN DE COMPRA A NOMBRE DE: MOTORES ELECTRICOS DE
GUATEMALA S.A.

TIEMPO DE ENTREGA: 3 A 4 SEMANAS

VALIDEZ DE LA OFERTA 15 DIAS

CREDITO: 30 DIAS

ATENTAMENTE,

ING. TOMAS XILOJ
(502) 5802 6074

Fuente: Motores Eléctricos De Guatemala S.A.
Miembro De ABB Drives Alliance (2018)

Anexo 6. Matriz para identificación previa de los síntomas que pueden existir en la instalación eléctrica

COMPONENTE / ELEMENTO	SÍNTOMAS	SI	NO	?
Conductor	Calentamiento de conductores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Disparo de protecciones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Conductor de neutro	Calentamiento de conductor de neutro	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Degradación del conductor	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Disparo de protecciones	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Condensadores	Calentamiento de condensadores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Envejecimiento prematuro de los condensadores (pérdida de capacidad)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Dstrucción de condensadores	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Transformadores	Sobrecalentamiento de devanados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Degradación de devanados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Disminución del rendimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Necesidad de sobredimensionar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Motores	Sobrecalentamiento de devanados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Degradación de devanados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Disminución del rendimiento	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Vibraciones en el eje	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Desgaste mecánico en rodamientos	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Excentricidad del eje	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Grupo electrógeno	Sobretensiones que destruyen los devanados	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Dificultad de sincronización y conmutación del grupo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Equipos de medida y control	Medida incorrecta de magnitudes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Interferencias en equipos sensibles	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fuente: Procedimientos Para El Estudio Y Análisis De Perturbaciones Armónicas, División PFC, CIRCUTOR (2019)

