



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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE
ULTRASONIDO EN EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO DE COJINETES DE
MOTORES ELÉCTRICOS EN EQUIPOS CRÍTICOS EN INGENIO EL PILAR**

Mynor Geovani Rodríguez Rodríguez

Asesorado por el M.A. Ing. Luis Fernando Guillén Fernández

Guatemala, abril de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE
ULTRASONIDO EN EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO DE COJINETES DE
MOTORES ELÉCTRICOS EN EQUIPOS CRÍTICOS EN INGENIO EL PILAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MYNOR GEOVANI RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

ASESORADO POR EL M.A. ING. LUIS FERNANDO GUILLÉN FERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

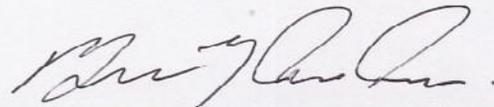
DECANO	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR	Ing. José Arturo Estrada Martínez
EXAMINADOR	Ing. Raymond Ludwin Taylor Cruz
EXAMINADOR	Ing. Héctor Belisario Santizo Obando
SECRETARIA	Inga. Gilda Marina Castellanos de Illescas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE
ULTRASONIDO EN EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO DE COJINETES DE
MOTORES ELÉCTRICOS EN EQUIPOS CRÍTICOS EN INGENIO EL PILAR**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha octubre de 2015.



Mynor Geovani Rodríguez Rodríguez



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142 / Ext. 86226



AGS-MIMPP-0004-2016

Guatemala, 29 de febrero de 2016.

Director:
Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Escuela de **Ingeniería Mecánica**
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Mynor Geovani Rodríguez Rodríguez** con carné número **90-12600**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Ingeniería en Mantenimiento**.

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

Sin otro particular, atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Mec. Luis Fernando Guillén
M.A. INGENIERÍA DE MANTENIMIENTO
COLEGIADO No. 6102
MA. Ing. Luis Fernando Guillén Fernández
Asesor (a)

Msc. Inga. Alba Maritza Guerrero Spinola
Coordinadora de Área
Gestión y Servicios

MSc. Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Director
Escuela de Estudios de Postgrado

ALBA MARITZA GUERRERO DE LOPEZ
INGENIERA INDUSTRIAL
COLEGIADA No. 4611

Cc: archivo
/ec



USAC

TRICENTENARIA

Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.086.2016

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ULTRASONIDO EN EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO DE COJINETES DE MOTORES ELÉCTRICOS EN EQUIPOS CRÍTICOS EN INGENIO EL PILAR** del estudiante **Mynor Geovani Rodríguez Rodríguez, carné No. 90-12600** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Roberto Guzmán Ortiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



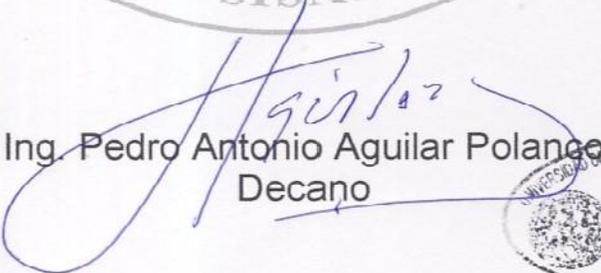
Guatemala, abril de 2016

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ULTRASONIDO EN EL CONTROL DEL MANTENIMIENTO DE COJINETES DE MOTORES ELÉCTRICOS EN EQUIPOS CRÍTICOS EN INGENIO EL PILAR**, Presentado por el estudiante universitario: **Mynor Geovani Rodríguez Rodríguez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por todas sus bendiciones.
Mis padres	Por su esfuerzo, amor y orientación.
Mis hijos	Mynor José y Vivian Irene Rodríguez Vásquez, por ser la inspiración para lograr cada uno de mis objetivos.
Mi hermano	Jorge Alfredo Rodríguez, que en paz descansa, siempre lo llevaré en mí.
Mis hermanos	Federico y Melvin Rodríguez, por todos los momentos alegres de nuestra vida.
Mi esposa	Claudia Vásquez, por esos momentos especiales que hemos compartido como familia.
Mi familia	Por su cariño y apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme la formación profesional y los conocimientos adquiridos a lo largo de mi vida.

**Catedráticos de la
Facultad de Ingeniería**

Por la labor tan importante que realizan.

	6.1.3.1.	Motor de inducción con rotor jaula de ardilla.....	13
	6.1.3.2.	Motor de inducción con rotor devanado	13
6.2.		Cojinetes	13
	6.2.1.	Clasificación de cojinetes	13
	6.2.1.1.	Cojinetes rígidos de bolas	14
	6.2.1.2.	Cojinetes de rodillos cilíndricos	14
	6.2.2.	Lubricación y mantenimiento de cojinetes.....	14
	6.2.2.1.	Inspección y limpieza de cojinetes	16
	6.2.2.2.	Montaje y desmontaje de cojinetes ...	16
	6.2.2.3.	Fallas en los rodamientos	17
6.3.		Ultrasonido	18
	6.3.1.	Monitoreo de vibraciones acústicas	18
	6.3.2.	Monitoreo de vibración acústico contra análisis de vibraciones	19
	6.3.3.	Medición de la tendencia del desgaste en cojinetes con ultrasonido.....	19
7.		ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	21
8.		MARCO METODOLÓGICO	23
9.		TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	25
10.		CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	27
11.		RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS.....	29

12. BIBLIOGRAFÍA	31
------------------------	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

TABLAS

I.	Cronograma de actividades	27
II.	Análisis económico.....	29

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Conexión en estrella de un motor eléctrico
DC	Corriente directa
°C	Grados Celsius

GLOSARIO

Caldera	Dispositivo diseñado para generar vapor mediante la utilización de la energía contenida en un combustible.
Campo magnético	Magnitud vectorial que representa la intensidad de la fuerza magnética.
Cojinete	Elemento que soporta y permite el movimiento giratorio al eje de una máquina o mecanismo.
Fricción	Fuerza de dos superficies en contacto que actúa para oponerse al movimiento deslizante entre ellas.
Generador eléctrico	Máquina que transforma energía mecánica en energía eléctrica.
Hertz	Unidad de frecuencia de un movimiento vibratorio, que es equivalente a un ciclo de oscilación por segundo.
ISO	Organización Internacional de Estandarización (International Organization for Standardization, por sus siglas en inglés).

Lubricación	Proceso en el que un fluido es introducido entre superficies en contacto, para reducir la fricción y mejorar las condiciones de deslizamiento.
Motor asíncrono	Máquina eléctrica, que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, en la que la velocidad de giro del rotor es siempre menor a la velocidad de giro del campo magnético del estator y la corriente del rotor es inducido desde el estator.
Motor eléctrico	Dispositivo que transforma energía eléctrica en energía mecánica de rotación.
Motor síncrono	Máquina eléctrica en la que la velocidad de giro del rotor, es igual a la velocidad de giro del campo magnético del estator.
Técnica de la envolvente	Técnica de modelación matemática utilizada para el análisis de vibraciones.
Torque	Capacidad de una fuerza de hacer girar un objeto.
Turbina de vapor	Máquina que transforma la energía térmica contenida en el vapor en energía mecánica.
Ultrasonido	Ondas de sonido, con frecuencias arriba del límite audible de los seres humanos o en exceso de los 20 000 ciclos por minuto.

Vibración	Oscilaciones de un cuerpo con respecto a un punto de referencia.
Vibración acústica	Energía generada por la fricción de componentes que se mueven.
Zafra	Período de cosecha y producción de un ingenio azucarero.

RESUMEN

La tecnología de ultrasonido en el mantenimiento predictivo es utilizada en la inspección de fugas de vapor o aire, inspecciones eléctricas, monitoreo de condición de cojinetes, inspecciones eléctricas, inspección de trampas de vapor, válvulas y bombas, lubricación acústica y otras.

El ultrasonido se define como ondas de sonido fuera del alcance del rango audible humano, arriba de 20 000 Hertz. Por definición el ultrasonido no es detectable por el oído humano, a no ser que se utilice un equipo capaz de traducir el ultrasonido en sonido audible.

Los cojinetes esten nuevos o usados, en mal o buen estado, producen ondas de ultrasonido por la fricción que existe entre las partes fijas y los elementos de rodadura. Un rodamiento en buen estado o con la lubricación adecuada, produce menos energía acústica que uno en mal estado o con lubricación deficiente.

El objetivo de esta investigación es establecer un programa de cambio de cojinetes, basado en el monitoreo de vibraciones acústicas en los motores de equipos críticos de la línea de producción de azúcar de ingenio El Pilar. Para ello se creará una base de datos de los motores, que están en la línea de producción, estableciendo un programa de cambio de acuerdo al incremento de energía acústica.

El estudio también establecerá, los períodos ideales de lubricación.

INTRODUCCIÓN

El programa de mantenimiento en los ingenios azucareros, se ha desarrollado de forma correctiva, para prevenir fallas que puedan ocurrir durante la zafra. El monitoreo de condición, durante la zafra, se enfoca principalmente en equipos como turbinas de vapor, generadores eléctricos, subestaciones eléctricas, ventiladores de calderas y centrifugas de azúcar.

El cambio programado de cojinetes en motores eléctricos, puede generar un alto costo de mantenimiento debido a la cantidad de motores, que son utilizados en la línea de producción. Mediante el monitoreo de condición se puede llegar a establecer un programa de mantenimiento, que permita reducir los costos, estableciendo mediante el análisis de vibraciones acústicas los períodos apropiados de lubricación y cambio de cojinetes al detectar una inminente falla.

Por la cantidad de motores eléctricos que operan en un ingenio azucarero, se plantea hacer el estudio de condición mediante la tecnología de ultrasonido, misma que permite hacer un análisis más rápido de las condiciones de operación de los cojinetes.

En el capítulo 1 se desarrollará una descripción de los motores eléctricos, para conocer los diferentes tipos que existen en un ingenio azucarero, siendo el objeto del estudio primario.

En el capítulo 2 se describen los cojinetes, clasificación, lubricación y mantenimiento, así como las fallas típicas que se pueden dar, al trabajar un cojinete en condiciones no adecuadas a su diseño.

En el capítulo 3 se describirá la tecnología del ultrasonido y su aplicación para monitorear la condición de cojinetes.

El capítulo 4 consistirá en establecer la técnica de toma de datos de los niveles de vibraciones acústicas, en los cojinetes de los motores eléctricos, mediante la tecnología de ultrasonido.

El capítulo 5 consistirá en el análisis y supervisión de las vibraciones acústicas de cada motor, medidas mediante la tecnología de ultrasonido.

1. ANTECEDENTES

La empresa Uesystems, en enero de 1973, analiza la condición de cojinetes mediante sistemas de ultrasonido, utilizando un analizador que puede alertar sobre fallas tempranas en cojinetes, detectar la falta o sobre lubricación. Uesystems hace el estudio mediante el incremento de decibeles a partir del punto de operación normal de los cojinetes.

Según Mejía, octubre del 2009, el análisis de vibraciones en motores eléctricos, es un método para diagnosticar fallas en los cojinetes, debido a que cada componente produce una frecuencia determinada. Mediante el análisis de estas frecuencias se puede predecir si un componente se encuentra a punto de sufrir una falla.

NSK Corporation, en enero de 2004, desarrolló patrones de las fallas encontradas en cojinetes, herramienta de control que determinaría las fallas encontradas durante el estudio de casos.

De acuerdo con Quiroga y otros, diciembre de 2012, la falla en rodamientos es uno de los problemas más comunes en maquinaria rotativa, y aproximadamente el 50 % de las fallas en motores eléctricos se debe a falla en rodamientos. Las investigaciones basan su estudio utilizando análisis de vibración, la técnica de la envolvente y el Cemstrum.

Pedrouzo y otros, septiembre de 2009, sus estudios se basan en utilizar equipos de ultrasonido en el control de la condición de rodamientos, los equipos de ultrasonido son sensibles a los sonidos que no están incluidos dentro del

rango auditivo humano. De acuerdo con su investigación la NASA ha demostrado que el monitoreo de rodamientos con ultrasonido ubica fallas potenciales de rodamientos, mucho antes de que se detecten con los métodos tradicionales de calor y vibración.

Sánchez, agosto de 2005, su estudio analiza directamente una falla en un motor eléctrico, y concluye que el mejor método para identificar los problemas en los rodamientos, en sus primeras etapas no es un incremento en la vibración a la frecuencia característica, sino a frecuencias mucho mayores, causadas por lubricación deficiente o por una falla inminente.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los ingenios azucareros en Guatemala, tienen un período de producción aproximado de seis meses y un período aproximado de seis meses de mantenimiento. El período de mantenimiento es dedicado principalmente a mantenimiento correctivo, haciendo reparaciones mayores y cambios en componentes de la maquinaria.

Los programas de mantenimiento, se enfocan principalmente en hacer reparaciones, para no tener fallas potenciales durante el período de producción. Por la naturaleza del trabajo efectuado, el equipo se desgasta y es necesario llevarlo a medidas que el proceso requiere.

En el caso de los motores eléctricos, en el área de producción de azúcar, el cambio de cojinetes se hace sin tener un monitoreo de condición y análisis de falla. Los cojinetes se cambian en los equipos críticos, independientemente de su condición, para evitar paradas imprevistas. El cambio se realiza a criterio del personal.

El costo de cojinetes en equipos de gran dimensión es elevado. Tomando en cuenta el alto costo, se plantea realizar el cambio por monitoreo de condición.

Cuando se presenta una falla en los cojinetes, se puede llegar a tener otro tipo de fallas dentro del motor, como barrido del rotor sobre el estator, daño de los devanados del estor o deflexión del eje. Fallas que pueden provocar un alto costo de reparación, o la total pérdida del motor.

Se plantea la siguiente interrogante:

¿Es factible utilizar la tecnología de ultrasonido para el control del mantenimiento de cojinetes en motores eléctricos?

Y se generan las siguientes preguntas específicas:

- ¿Es la tecnología de ultrasonido la mejor herramienta para monitoreo de condición de cojinetes?
- ¿Cuáles son los equipos críticos en la línea de producción de un ingenio azucarero?
- ¿Cómo mejorará el monitoreo de condición las fallas en los cojinetes de motores eléctricos?

3. JUSTIFICACIÓN

El Departamento de Mantenimiento eléctrico de ingenio El Pilar se basa en el cambio de cojinetes en los motores eléctricos por período de producción, sin importar su condición. Con el crecimiento de la industria azucarera en Guatemala, el equipo utilizado para satisfacer el incremento de producción, se ha aumentado considerablemente tanto en cantidad como en tamaño.

Con el incremento en tamaño y cantidad de los equipos, el costo de mantenimiento se ha elevado de igual manera.

A pesar de que los rodamientos se cambian en cada período de producción, las fallas siempre ocurren, provocando paros y reducción de la producción, fallas que provocan tanto costos directos como indirectos, que en algunos casos se reflejan en daños no reversibles en los motores eléctricos.

Con la implantación de un programa de cambio de cojinetes mediante el monitoreo de condición, se pretende crear un histórico de cada motor, con la finalidad de extender la vida útil de los cojinetes, y reducir las fallas de emergencia, según lo observado por Sánchez, agosto de 2005, que determinó que el mejor método para identificar los problemas en los rodamientos en sus primeras etapas, no es un incremento en la vibración a la frecuencia característica, sino a frecuencias mucho mayores, que son detectadas por los equipos de ultrasonido.

Por los antecedentes de fallas en ingenio El Pilar, el programa que resulta conveniente es el monitoreo de condición por ultrasonido, considerando que

puede detectar fallas desde una mala lubricación a una falla por contaminación o fatiga del rodamiento.

4. ALCANCE

El área industrial de un ingenio azucarero se encuentra dividida en área de Recepción de Caña o patio de caña, Molinos o extracción de jugo, área de Fábrica, la cual cuenta con los diferentes procesos de transformación del jugo de la caña en azúcar. Cuenta también con áreas de complementarias como son el área de Generación de Vapor o calderas, área de Generación de Energía Eléctrica y Bodega de Azúcar.

En ingenio El Pilar las áreas que cuentan con la mayor cantidad de motores eléctricos de grandes dimensiones son Fábrica y Calderas.

El área de Molinos, cuenta con motores que no son de grandes dimensiones pero que sí se consideran críticos, debido a que pueden parar el proceso de molienda de forma instantánea.

El estudio se basará en los motores de equipos críticos, en donde serán considerados los que pueden provocar un paro de la línea de producción, y los motores de gran dimensión, que aunque no paren la línea de producción de forma inmediata, su falla puede provocar un costo elevado.

La implementación del programa debe de incluir manuales de instalación de rodamientos, debido a que una mala instalación puede repercutir en una falla prematura del rodamiento, capacitación del personal y análisis de falla.

En la industria azucarera se usa mayormente motores trifásicos de inducción, con cojinetes rígidos de bolas de la series 60, 62, 63 y 64, o rodillos cilíndricos de la serie UN.

En la toma de vibraciones acústicas se utilizará el equipo SDT200 de la empresa SDT Corporation. Para la medición se creará una ruta de los motores a analizar, capacitando a los electricistas de turno para hacer las mediciones.

Las mediciones serán tomadas una vez por semana, durante la zafra, período de operación de los motores. Se analizarán los datos, determinando si pueden existir fallas durante la operación, y los datos servirán para hacer cambio durante la reparación. La zafra tiene una proyección de 150 días.

5. OBJETIVOS

General

Establecer un programa de mantenimiento de cojinetes, mediante el uso de la tecnología del ultrasonido, en los motores eléctricos de equipos críticos de ingenio El Pilar.

Específicos

1. Determinar las ventajas del uso de la tecnología de ultrasonido contra otras técnicas utilizadas para el monitoreo de condición de cojinetes.
2. Determinar los motores de los equipos críticos, estableciendo un historial de las fallas más frecuentes que se presenta en los cojinetes de los motores eléctricos de equipos críticos.
3. Elaborar un manual de uso del equipo de ultrasonido y seguimiento de condición de falla.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. El motor eléctrico

Los motores eléctricos pueden ser encontrados en aplicaciones domésticas, en automóviles y en diversos procesos industriales operando bombas, conductores, compresores de aire, ventiladores y muchos más. Un motor eléctrico es una máquina que transforma energía eléctrica en energía mecánica, la cual es aprovechada en las aplicaciones mencionadas.

6.1.1. Clasificación de los motores eléctricos

Los motores eléctricos pueden ser clasificados en motores de inducción o asíncronos, motores de corriente continua y motores síncronos.

6.1.1.1. Motores de corriente continua o DC

Los motores DC fueron los primeros dispositivos prácticos para convertir la potencia eléctrica en potencia mecánica. Debido a sus características de operación, desempeño flexible y alta eficiencia su uso es muy extendido en diferentes aplicaciones de la industria.

El torque en los motores DC es producido por el campo magnético creado por el campo del devanado o magneto y la corriente que fluye en la armadura del devanado.

6.1.1.2. Motores sincrónicos

El motor sincrónico es una máquina para convertir potencia eléctrica en potencia mecánica. Son utilizados principalmente en aplicaciones industriales donde se requiere alta potencia y velocidad constante.

6.1.2. Motores de inducción

El motor de inducción es el más utilizado, aproximadamente dos terceras partes de los motores utilizados en la industria pertenecen a este tipo.

En los motores de inducción el torque varía con el torque aplicado al rotor, y por lo tanto la cantidad de potencia que se transfiere. El motor de inducción requiere un deslizamiento para producir el torque debido a la fuerza magnética, o una diferencia entre la velocidad mecánica y la frecuencia de la corriente alterna. El campo magnético del rotor se produce debido a la corriente inducida en el rotor, la cual es dependiente de la fuente de alimentación de corriente alterna, porque recibe la inducción electromagnética de los devanados del estator, como resultado de la geometría interna del motor.

6.1.3. Clasificación de los motores de inducción

Los motores de inducción se pueden clasificar por la construcción de su rotor en motores de inducción con rotor de jaula de ardilla y motores de inducción con rotor devanado.

6.1.3.1. Motor de inducción con rotor jaula de ardilla

El rotor de un motor de inducción de jaula de ardilla está construido por una serie de barras conductoras, dispuestas en ranuras en la cara del rotor, cortocircuitadas en los extremos por anillos. Por sus diversas aplicaciones el motor de jaula de ardilla es el más utilizado dentro de la industria.

6.1.3.2. Motor de inducción con rotor devanado

El rotor del motor de inducción con rotor devanado, está construido por devanados trifásicos, que son devanados espejos de los devanados del estator. Las fases de los devanados del rotor normalmente tienen conexión en Y, y sobre el rotor hay dispuestos anillos rozantes en donde se conectan los extremos de los alambres del rotor. Los devanados del rotor están cortocircuitados por medio de escobillas instaladas en los anillos rozantes.

6.2. Cojinetes

Los cojinetes son elementos que se encuentran en máquinas rotativas, son soportes para los elementos giratorios, sostienen su peso y guían su rotación.

6.2.1. Clasificación de cojinetes

Los cojinetes se clasifican de la siguiente manera

- Cojinetes rígidos de bolas
- Cojinetes de bolas a rótula

- Cojinetes de bolas con contacto angular
- Cojinetes de rodillos cilíndricos
- Cojinetes de rodillos a rótula
- Cojinetes de rodillos cónicos
- Cojinetes axiales de bolas
- Cojinetes axiales de rodillos cilíndricos
- Cojinetes axiales de rodillos a rótula

6.2.1.1. Cojinetes rígidos de bolas

Los cojinetes rígidos de bolas son los más utilizados, adecuados para cargas radiales o una combinación de empuje y cargas radiales. Su diseño permite tolerancias de precisión y alta velocidad de funcionamiento.

Las dimensiones principales de los rodamientos rígidos de bolas están conforme a ISO/R 15 y cubre las series 618, 60, 62, 63 y 64.

6.2.1.2. Cojinetes de rodillos cilíndricos

Están constituidos por rodillos en forma de cilindros, lo que provee una línea modificada de contacto entre las pistas interior y exterior, mientras los rodillos son guiados por pestañas colocadas ya sea en la pista interior o la pista exterior.

6.2.2. Lubricación y mantenimiento de cojinetes

Los cojinetes tienen que estar lubricados, para evitar el contacto metálico entre los elementos rodantes, las pistas de rodaje y las jaulas, el lubricante también evita la corrosión y el desgaste.

Cuando se usa el mínimo de lubricante necesario para obtener una lubricación confiable, se obtiene la temperatura más favorable de operación en los cojinetes. Sin embargo, la cantidad utilizada depende de las condiciones de adicionales que se exijan, por ejemplo, taponamiento o enfriamiento.

Debido al uso el lubricante sufre una degradación de sus propiedades, y además, todos los lubricantes sufren contaminación por las condiciones de servicio y deben reponerse o cambiarse.

Los cojinetes se pueden lubricar con aceite o grasa, y en algunos casos especiales con un lubricante tipo sólido.

La selección del lubricante debe de considerar las condiciones de funcionamiento del cojinete, tales como velocidad y rango de temperaturas de trabajo.

En los cojinetes de bolas y rodillos se usa principalmente grasa, cuando trabajan en condiciones normales de velocidad, temperatura y carga. Entre las ventajas de utilizar grasa, se pueden mencionar la facilidad que tiene para ser retenida en el alojamiento de los cojinetes, especialmente cuando el eje no se encuentra en forma horizontal, además, que contribuye a evitar la entrada de humedad o contaminación por impurezas.

El intervalo de tiempo en el cual un cojinete lubricado con grasa trabaja satisfactoriamente sin que sea necesario relubricar, depende del tipo de cojinete, tamaño, velocidad y temperatura de funcionamiento y de la grasa utilizada.

Los fabricantes de cojinetes, han desarrollado tablas en las que se determina el intervalo de relubricación en condiciones normales de operación. De acuerdo al manual SKF 3200 Sp, la cantidad de grasa necesaria en una relubricación se obtiene de

$$G = 0,005 D B$$

En donde

G=cantidad de grasa, en gramos

D=diámetro exterior del rodamiento en milímetros

B=anchura del rodamiento, en milímetros (= H en rodamientos axiales)

6.2.2.1. Inspección y limpieza de cojinetes

Al igual que todas las piezas importantes de una máquina, los cojinetes deben ser inspeccionados y limpiados. Los intervalos de inspecciones se deben basar en las condiciones de operación.

Cuando los cojinetes operan a cargas elevadas, la frecuencia de las inspecciones debe aumentarse.

6.2.2.2. Montaje y desmontaje de cojinetes

Toda actividad de mantenimiento en los cojinetes de una máquina, debe ser realizada por personal con la competencia adecuada.

Es de vital importancia que los elementos rodantes, los anillos o jaulas de los cojinetes no reciban golpes fuertes directos durante el montaje, debido a que se pueden ocasionar daños.

Debido al ajuste que se debe dar entre el eje y el cojinete, es necesario calentar los cojinetes, la temperatura máxima de calentamiento está entre el rango de 80 a 125 °C, la cual depende del ajuste y del tamaño de los cojinetes.

El método más recomendable es por medio de un dispositivo de calentamiento por inducción eléctrica, este dispositivo produce un calentamiento uniforme y de forma controlada, para no exceder la temperatura recomendada, que pueda dañar la grasa o los componentes del cojinete.

Cuando los cojinetes se desmontan y se tienen que volver a usar, la fuerza de extracción no debe ser aplicada en los elementos rodantes.

6.2.2.3. Fallas en los rodamientos

Las causas de falla en los cojinetes, en su mayoría tienen como causas principales, la instalación inadecuada, la sobrecarga, lubricación inadecuada, aplicación inadecuada y contaminación externa.

Estas causas provocan las siguientes fallas

- Descamación
- Desgaste o descascarado ligero
- Ralladuras
- Adherencia por patinaje
- Fracturas
- Rajaduras y grietas
- Jaula dañada
- Abolladuras
- Formación de cráteres pequeños

- Deterioro y desgaste
- Corrosión por contacto (oxidación por mal ajuste)
- Deslizamiento circular
- Agarrotamiento
- Corrosión eléctrica
- Oxidación y corrosión
- Sobre calentamiento

6.3. Ultrasonido

El ultrasonido son ondas de sonido con frecuencias por arriba del rango audible por los humanos, o que superan los 20 000 Hertz. Lo cual significa que el ultrasonido es totalmente indetectable para el oído humano, a menos que se transforme en una forma que el oído humano lo pueda percibir. Comercialmente ya existen equipos capaces de transformar el ultrasonido en sonido audible por el oído humano, y uno de los usos más comunes es el mantenimiento predictivo industrial.

6.3.1. Monitoreo de vibraciones acústicas

Todos los cojinetes en operación, independiente de su condición de nuevo o usado, producen ondas de ultrasonido debido a la fricción que se genera entre los elementos rodantes y las pistas interior y exterior.

Un cojinete en buenas condiciones de operación, produce menor energía acústica que uno que presente alguna avería típica como ralladuras, lubricación inadecuada, daños en los elementos rodantes o en las pistas interior o exterior.

Del mismo modo en un cojinete con lubricación adecuada, se reduce la fricción y emite menor energía acústica que uno con lubricación deficiente o excesiva.

En la medida que el lubricante se va degradando por el uso, la emisión ultrasónica aumenta. Monitoreando estas emisiones ultrasónicas, se pueden determinar los intervalos apropiados de lubricación, y detectar cuando el cojinete entra en su primera etapa de falla.

6.3.2. Monitoreo de vibración acústico contra análisis de vibraciones

El monitoreo de vibración acústico en ningún momento sustituye el análisis de vibraciones, en el mejor de los casos es un completo de un programa de mantenimiento basado en análisis de vibraciones. La medición de vibraciones a baja frecuencia (velocidad y desplazamiento), indica el estado avanzado de falla en un cojinete, y proporciona información de la causa raíz, como desbalance, desalineación, flojedad estructural, entre otros.

6.3.3. Medición de la tendencia del desgaste en cojinetes con ultrasonido

Para el monitoreo acústico apropiado, se deben establecer rutas de medición similares a las utilizadas en un programa por análisis de vibraciones. Se deben de establecer las rutas por grupos de máquinas con una secuencia lógica, identificando el nombre de cada equipo, para almacenar los datos de una forma ordenada, para realizar el análisis de tendencias de los cojinetes respecto del tiempo.

7. ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

GLOSARIO

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN

ALCANCE

OBJETIVOS

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1. MOTOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO

1.1. Clasificación de los motores eléctricos trifásicos

1.1.1. Motor síncrono

1.1.2. Motor de DC

1.1.3. Motor asíncrono

1.2. Clasificación de los motores eléctricos asíncronos trifásicos

1.2.1. Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla

1.2.2. Motor asíncrono con rotor devanado

1.3. Componentes de los motores eléctricos asíncronos trifásicos

1.3.1. Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla

1.3.1.1. Estator

1.3.1.2. Rotor

1.3.1.3. Carcaza

1.3.2. Motor asíncrono con rotor devanado

1.3.2.1. Rotor

2. COJINETES

- 2.1. Partes de los cojinetes
- 2.2. Clasificación de los cojinetes
- 2.3. Cojinetes rígidos de bolas
- 2.4. Cojinetes de rodillos
- 2.5. Mantenimiento y lubricación de cojinetes
- 2.6. Fallas típicas en cojinetes rígidos de bolas
- 2.7. Fallas típicas en cojinetes de rodillos

3. ULTRASONIDO

- 3.1. Definición de ultrasonido
- 3.2. Monitoreo de vibraciones acústicas
- 3.3. Monitoreo de vibraciones acústicas contra análisis de vibraciones
- 3.4. Medición de la tendencia de desgaste de cojinetes con ultrasonido

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

8. MARCO METODOLÓGICO

El estudio será exploratorio debido a que no se cuenta con información de la condición de los rodamientos, en ingenio El Pilar no se cuenta con una base de datos formal de motores eléctricos ni de sus elementos rodantes. El estudio también será descriptivo para describir las fallas y generalizar las que sean similares. La medición de las vibraciones acústicas será directa en la línea de producción de azúcar. Se crearán rutas para obtener los datos, para crear una base de datos, para establecer los límites de cada motor analizado. Las mediciones se tomarán con el equipo STD 200 de SDT Ultrasound Solutions. La investigación se realizará en las siguientes fases.

- Fase 1: comprende la definición de los motores eléctricos de equipos críticos de la línea de producción de azúcar y sus elementos de rodamiento.
- Fase 2: se investigará y elaborará la ruta, codificaciones, y levantamiento de información de cada motor eléctrico que se analizará.
- Fase 3: se crearán formatos y listados para tomar los datos de los motores, de forma ordenada, acorde a los formatos validados de ingenieros en el ámbito.
- Fase 4: se realizará el análisis de datos y se establecerán los límites de control de las vibraciones acústicas de cada motor analizado, y se creará el modelo de mantenimiento basado en el equipo SDT200.

9. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

Los datos se recolectarán por personal del Departamento de Mantenimiento Eléctrico de ingenio El Pilar, llenando la orden de trabajo correspondiente, para crear el historial de cada motor.

Los datos serán obtenidos mediante el equipo STD 200 de STD Ultrasound Solutions, serán transferidos a los formatos avalados, y se ingresarán a la base de datos para su análisis.

Para iniciar el estudio no se cuenta con datos, los primeros datos obtenidos se utilizarán de base para comparar los obtenidos durante el período de zafra.

Los datos obtenidos se compararán con las vibraciones acústicas iniciales, SDT Ultrasound, establece que una desviación de 8 a 10 dB μ V sobre la línea base histórica indica una necesidad de lubricación o el inicio de una falla.

Mediante la base de datos elaborada, se llevará el récord de cada motor medido y al obtener una desviación de sus valores normales, se procederá a hacer un análisis de la falla antes de ocurra, comparando con las fallas típicas que presentan los cojinetes.

El seguimiento a la base de datos, se utilizará para determinar los cojinetes que se cambiarán durante la reparación.

10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla I. Cronograma de actividades

Tipo de fase	Actividades	nov-15		dic-15		ene-16		feb-16		mar-16		abr-16	
		Semana 1-2	Semana 2-3										
Fase I: definición de equipos críticos	Análisis de línea de producción	■											
	Definición de equipos críticos	■											
	Levantamiento de base de datos de motores		■										
Fase II: elaboración de rutas	Codificación de motores		■										
	Elaboración de ruta para toma de datos		■										
	Levantamiento de datos de los motores a ser analizados		■										
Fase III: toma de datos	Toma de datos			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Fase IV: análisis de datos	Análisis de datos y establecimiento de límites de control de vibraciones acústicas											■	■

Fuente: elaboración propia.

11. RECURSOS FÍSICOS Y FINANCIEROS

Para desarrollar la investigación se utilizarán los siguientes recursos que se presentan en la tabla II.

Tabla II. **Análisis económico**

Materiales, equipos e insumos	Descripción	Costo
Equipo de ultrasonido SDT 200	Equipo para toma de datos	US \$ 5 450,00
Software para equipo SDT200	Software para análisis de la toma de datos	Incluido en el precio del equipo
Técnico electricista	Personal para toma de datos durante 5 meses, se toma solo el tiempo que se empleará para tomar los datos	Q 3 700,00
Computadora personal	Equipo para el análisis de la toma de datos	Ya se cuenta con el equipo
Mano de obra	Personal para analizar fallas	Q 100,00 por día empleado

Fuente: elaboración propia.

12. BIBLIOGRAFÍA

1. MEIER, Alexandra. *Electric power systems*. USA: Wiley-Interscience publication, 2006. 309 p.
2. MEJÍA, Jorge. *Análisis de vibraciones en motores asíncronos trifásicos*. Trabajo de graduación, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 99 p.
3. NKS Corporation. *Diagnóstico rápido de falla en rodamientos*. EEUU: NSK Corporation, 2004. 35 p.
4. PREDROUZO, José; QUINTERO, Nelson. *La aplicación del ultrasonido como tecnología complementaria en un plan de mantenimiento predictivo*. Trabajo de graduación, Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, 2009. 43 p.
5. QUIROGA, Jabid E.; TRUJILLO, Gersón; QUINTERO, Sergio. *Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum*. [en línea]. <<http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v20n3/art09.pdf>>. [Consulta: julio de 2015].

6. RIENSTRA, Allan; HALL, James. *Aplicando el monitoreo de vibraciones acústicas al mantenimiento predictivo*. [en línea]. <www.sdtnorthamerica.com>. [Consulta: julio de 2015].
7. SÁNCHEZ, Carlos M. *Mantenimiento predictivo y proactivo*. [en línea]. <http://www.clubdemantenimiento.com/predictivo_proactivo/boletin_noticias_36.pdf>. [Consulta: julio de 2015].
8. WARNE, D. F. *Newes electrical power enginee's handbook*. 2nd ed. USA: Elsevier, 2005. 456 p.