



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA**

TÍTULO:

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y ALINEACIÓN EN MOTORES
ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS**

AUTOR:

AROCA DELHI ALEX ARMANDO

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL

TÍTULO:

INGENIERO EN ELÉCTRICO MECÁNICA

TUTOR:

ING. LUIS VALLEJO

GUAYAQUIL – ECUADOR

2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Aroca Delhi Alex Armando** como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniero en Eléctrico Mecánica**.

TUTOR

f. _____

ING. VALLEJO SAMANIEGO LUIS VICENTE, M.Sc.

DIRECTOR DE LA CARRERA

f. _____

ING. HERAS SÁNCHEZ MIGUEL ARMANDO, M.Sc.

Guayaquil, a los 30 días del mes de Agosto del año 2018



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Aroca Delhi Alex Armando

DECLARO QUE:

El Trabajo de Titulación, **Análisis de vibraciones y alineación en motores eléctricos asíncronos trifásicos** previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Eléctrico Mecánica**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 30 días del mes de Agosto del año 2018

EL AUTOR (A)

f. _____

AROCA DELHI ALEX ARMANDO



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **Aroca Delhi Alex Armando**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Análisis de vibraciones y alineación en motores eléctricos asíncronos trifásicos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 30 días del mes de Agosto del año 2018

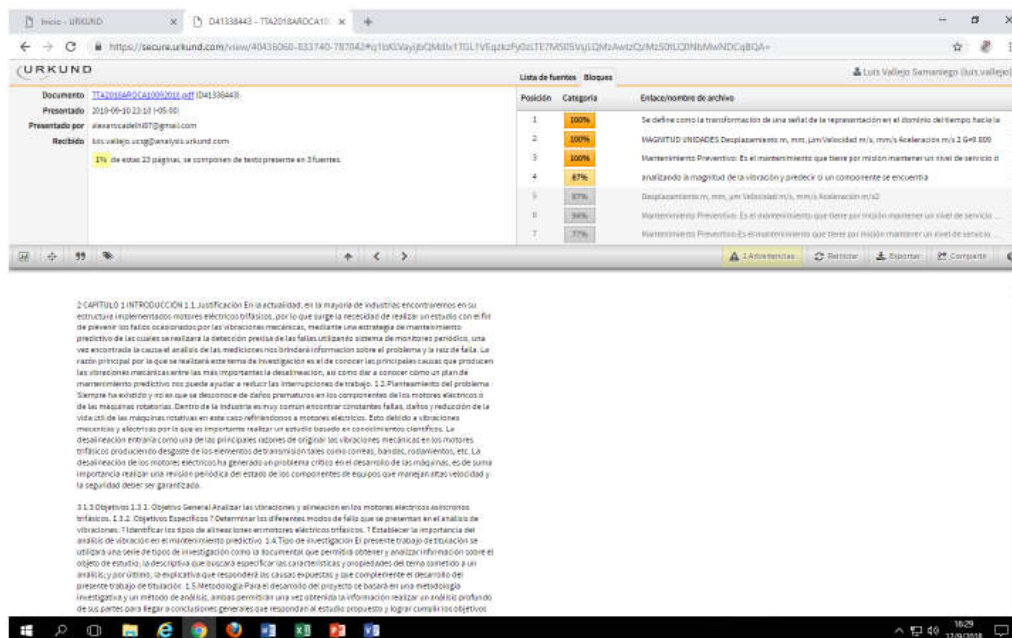
EL AUTOR:

f. _____

AROCA DELHI ALEX ARMANDO

REPORTE URKUND

Documento: Trabajo de Titulación
Título del Trabajo: "ANÁLISIS DE VIBRACIONES Y ALINEACIÓN EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS"
Carrera: Ingeniería en Eléctrico Mecánica
Estudiante: ALEX ARMANDO AROCA DELHI
Semestre: A-2018
Fecha: AGO/2018



The screenshot shows the URKUND report interface. At the top, there is a navigation bar with the URKUND logo and the user's name, Luis Vallejo Samaniego. Below this, the document details are displayed:

- Documento:** T201808040000011.pdf (041338443)
- Presentado por:** 2018-06-20 12:23:19 S-00
- Presentado por:** alexaroca@updelhi@gmail.com
- Recibido:** Luis Vallejo uscg@delhiya.arkund.com

A progress bar indicates that 4% of the document's pages have been compared with the sources.

Below the document details is a table titled "Lista de fuentes" (List of sources) with columns for "Posición", "Categoría", and "Entorno/nombre de archivo".

Posición	Categoría	Entorno/nombre de archivo
1	100%	Se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la MAGNITUD FRECUENCIAS Desplazamiento m, mm, Amplitud m/s, mm/s, Aceleración m/s ² G=1 800
2	100%	Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio o aumentando la magnitud de vibración predecir o un componente se encuentra
3	87%	Desplazamiento m, mm, Amplitud m/s, mm/s, Aceleración m/s ²
4	87%	Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio
5	34%	Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio
6	77%	Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio

Below the table, there is a section of text from the document, which is partially obscured by a watermark. The text discusses the justification of the study, the objectives, and the methodology used.

Conclusión: La revisión de coincidencias del resultado de la revisión, considera la desactivación de la información de texto de los formatos de presentación de trabajos de titulación en la UCSG. Se adjunta documento de Reporte URKUND de la Revisión Final en medio digital. Porcentaje de coincidencia final del 1%.

Atentamente,

Ing. Vallejo Samaniego Luis Vicente, M.Sc.
DOCENTE-TUTOR

AGRADECIMIENTO

Me van a faltar páginas para agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo merecen reconocimiento especial mis padres Gonzalo y Raquel que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Asimismo, agradezco infinitamente a mis Hermanos que con sus palabras me hacían sentir orgulloso de lo que soy y de lo que les puedo enseñar. Ojala algún día yo me convierta en su fuerza para que puedan seguir avanzando en su camino.

Quiero expresar mi gratitud a Dios por estar siempre presente, y llenarme de fortaleza para poder seguir adelante en mi vida y desarrollo profesional.

Mi profundo agradecimiento a todas las autoridades y personal que conforman la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, en especial a mi tutor Ing. Luis Vallejo Samaniego, M.Sc. y al Director de Carrera Ing. Armando Heras, quienes con sus conocimientos, experiencia y disponibilidad de tiempo han hecho posible la realización de mi trabajo de titulación.

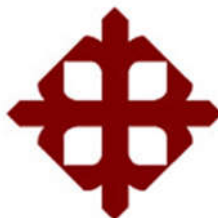
DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres Gonzalo y Raquel, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Es un orgullo y el privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos Ronny y Kelly por estar siempre presentes, por su compartir su tiempo y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICO MECÁNICA**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____

ING. ROMERO PAZ MANUEL DE JESUS, M.Sc.

DECANO

f. _____

ING. RAÚL MONTENEGRO TEJADA, M.Sc.

COORDINADOR DE ÁREA O DOCENTE DE LA CARRERA

f. _____

ING. HERAS SÁNCHEZ MIGUEL ARMANDO, M.Sc.

DIRECTOR DE CARRERA

ÍNDICE

RESUMEN	xvii
CAPÍTULO 1.....	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1. Justificación.....	2
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Tipo de investigación	3
1.5. Metodología.....	3
PARTE I MARCO TEÓRICO.....	4
CAPÍTULO 2.....	4
GENERALIDADES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS.....	4
2.1 Clasificación de los motores eléctricos.....	5
2.1.1. Características de los motores DC	6
2.1.2. Características de los motores AC	8
2.2 Motores asíncronos trifásicos	9
2.2.1 Principios de funcionamiento	10
2.3 Clasificación de los motores asíncronos trifásicos	12
2.3.1 Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla	13
2.3.2 Motor asíncrono con rotor devanado	13
CAPÍTULO 3.....	15
VIBRACIONES MECÁNICAS Y ALINEACIÓN LÁSER.....	15
3.1 Concepto de vibraciones	15
3.2 Movimiento periódico.....	16
3.2.1 Vibración libre	16

3.2.2 Movimiento armónico	17
3.2.3 Vibración torsional.....	18
3.2.4 Péndulo Simple	19
3.2.5 Amortiguación	20
3.3 Movimiento periódico forzado	21
3.3.1 Vibración armónica forzada no amortiguada	22
3.3.2 Vibración forzada causada por fuerzas de rotación	22
3.3.3 Fuerzas transmitidas.....	22
3.3.4 Fatiga de los materiales	23
3.4 Alineación láser	24
3.5 Análisis espectral	25
CAPÍTULO 4.....	27
MODOS DE FALLO EN MOTORES ASÍNCRONOS	27
4.1 Vibración producida por desbalances	29
4.2 Vibración debida a falta de alineamiento.....	30
4.3 Vibración debida a falta de excentricidad.....	32
4.4 Vibración debida a casquillos defectuosos.....	34
4.5 Vibración debida a partes flojas	34
4.6 Vibración debida a roturas de barras del rotor	35
CAPÍTULO 5.....	37
INSTRUMENTACIÓN DE DIAGNÓSTICO Y ALINEACIÓN LÁSER.....	37
5.1 Medidores de vibración.....	37
5.1.1 Definición de transductor y su clasificación	38
5.1.2 Transductor de proximidad.....	38
5.1.3 Transductor de velocidad	39
5.1.4 Transductor de aceleración.....	40
5.2 Equipos portátiles y de monitoreo en línea	41

5.2.1 Recolectores de datos portátiles.....	41
5.2.2 Sistema de monitoreo en línea.....	42
5.3 Alineadores láser.....	43
5.3.1 Alineación de ejes.....	44
5.3.2 Alineación de poleas.....	45
CAPÍTULO 6.....	47
PLANES DE MANTENIMIENTO.....	47
6.1 Mantenimiento preventivo.....	47
6.1.1 Introducción al mantenimiento preventivo.....	47
6.1.2 Ventajas del mantenimiento preventivo.....	48
6.2 Mantenimiento predictivo.....	48
6.2.1 Introducción del mantenimiento predictivo.....	49
6.2.2 Metodología.....	50
PARTE II APORTACIONES.....	51
CAPÍTULO 7.....	51
DIAGNÓSTICO DE FALLOS POR VIBRACIÓN.....	51
7.1 Fallos por vibraciones.....	51
7.2 Pruebas de vibraciones.....	57
7.3 Análisis de las pruebas.....	59
CAPÍTULO 8.....	61
DETERMINACIÓN DE FALLOS POR DESALINEACIÓN.....	61
8.1 Determinación de desalineamiento.....	61
8.2 Análisis de un motor desalineado.....	64
CAPÍTULO 9.....	66
IMPORTANCIA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO.....	66
CAPÍTULO 10.....	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70

10.1 Conclusiones.....	70
10.2 Recomendaciones	71
BIBLIOGRAFIA	72
ANEXOS	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Partes fundamentales del motor trifásico	5
Tabla 2.2: Clasificación de los motores eléctricos	6
Tabla 2.3: Rotación síncrona de acuerdo al número de polos y frecuencia	12
Tabla 3.1: Aplicaciones típicas para diferentes parámetros de medición.....	26
Tabla 4.1: Clasificación de máquinas según ISO 2372.....	27
Tabla 4.2: Tabla ISO 3945.....	28
Tabla 4.3: Frecuencias en CPM	36
Tabla 5.1. Unidades para cuantificar las vibraciones.....	37
Tabla 6.1: Tipos de mantenimiento predictivo.....	49
Tabla 7.1: Esquemas de normas ISO utilizado para medición.....	58
Tabla 7.2: Indicadores de medición.....	59
Tabla 7.3: Análisis de valores considerables de medición	60
Tabla 8.1: Pruebas de alineación en motor a 1720 rpm	65
Tabla 9.1: Cuadro comparativo de mantenimiento.....	68
Tabla 9.2: Cuadro de actividad de mantenimientos.....	68
Tabla 9.3: Etapas de un plan de mantenimiento	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Motor eléctrico trifásico	4
Figura 2.2: Partes principales de un motor eléctrico trifásico	5
Figura 2.3: Esquema de motor de excitación independiente	7
Figura 2.4: Esquema de motor en serie	7
Figura 2.5: Esquema de motor de excitación en paralelo.....	8
Figura 2.6: Esquema de motor de excitación compuesto	8
Figura 2.7: Desfase de bobinas en un motor de inducción.....	10
Figura 2.8:Partes principales de un motor eléctrico.....	11
Figura 2.9: Rotor de un motor de tipo jaula de ardilla	13
Figura 2.10: Esquema eléctrico del rotor	14
Figura 3.1: Movimiento periódico	16
Figura 3.2: Vibración libre	17
Figura 3.3: Descripción del movimiento armónico simple	18
Figura 3.4: Cuerpo rígido sujeto a un eje	19
Figura 3.5:Descripción del Péndulo simple.....	20
Figura 3.6: Grafico de baja y alta amortiguación.....	21
Figura 3.7: Sistema de amortiguación forzada	21
Figura 3.8: Proceso de fatiga de los materiales	24
Figura 4.1: Espectro por desbalance	29
Figura 4.2: Espectro de vibración en un motor tomada en orientación horizontal	30
Figura 4.3:Desalineamiento paralelo.....	30
Figura 4.4:Desalineamiento angular de ejes.....	31
Figura 4.5: Espectro de frecuencia en la falta de alineamiento	32
Figura 4.6: Espectro de frecuencias cuando ocurre excentricidad estática	33
Figura 4.7: Espectro de frecuencia por excentricidad dinámica	33
Figura 4.8: Espectro de vibraciones debido a remolinos de aceite	34

Figura 4.9: Espectro producido por holgura mecánica.....	35
Figura 5.1: Estructura general de un transductor	38
Figura 5.2: Composición de un transductor capacitivo	39
Figura 5.3: Componentes de un transductor sin contacto.....	39
Figura 5.4: Componentes del transductor de velocidad	40
Figura 5.5: Composición del transductor de aceleración	41
Figura 5.6: Colectores de datos.....	42
Figura 5.7: Esquema de adquisición de datos.....	43
Figura 5.8: Imagen termográfica de ejes desalineado	44
Figura 5.9: Alineador laser de ejes.....	45
Figura 5.10: Mediciones de desalineación con regla y cuerda	46
Figura 5.11: Tipo de desalineación y alineación correcta	46
Figura 7.1: balance dinámico de rotor.....	51
Figura 7.2: Espectro de desequilibrio dinámico	51
Figura 7.3: Espectro reflejado por holgura mecánica	52
Figura 7.4: Espectro producido por rozamiento del rotor	53
Figura 7.5: Componentes de un rodamiento.....	53
Figura 7.6: Espectro por vibración de pista exterior de rodamiento	53
Figura 7.7: Espectro por defecto en pista interior.....	54
Figura 7.8: Espectro por defecto de elementos rodantes	54
Figura 7.9: Espectro por defecto de la jaula de rodamientos.....	54
Figura 7.10: Espectro producido por excentricidad del estator.	55
Figura 7.11: Espectro producido por un rotor excéntrico.....	56
Figura 7.12: Espectro por ruptura de barra en el rotor	56
Figura 7.13: Espectro ocasionado por conector suelto.....	57
Figura 7.14: Espectro provocado por pata coja.	57
Figura 8.1: Espectro de desalineamiento angular.	61

Figura 8.2: Espectro por desalineamiento paralelo.....	62
Figura 8.3: Tipo de desalineamiento de polea y su espectro.	62
Figura 9.1: Tiempo de cambio de las condiciones de un motor	66
Figura 9.2: Grafica de salud de la máquina	67
Figura 9.3: Economía de mantenimiento preventivo vs predictivo	67

RESUMEN

El presente proyecto se basa en el análisis de las vibraciones que se presentan en los motores asíncronos trifásicos, el mismo que se utiliza como un método para la identificación y diagnóstico de los fallos en los componentes de los equipos. Este método involucra un parte fundamental del mantenimiento predictivo. Debido al movimiento rotacional del eje que caracterizan a las máquinas rotativas, se produce vibraciones en sus componentes. Estas vibraciones deben constar con una magnitud admisible y continua, pero a causa del deterioro de los componentes la fuerza de la vibración se incrementa con el tiempo lo que provocará el desgaste; en muchas ocasiones este puede ser prematuro por lo que los componentes de la máquina deberán ser reemplazados con el fin de adelantarnos y evitar un daño grave del equipo o una destrucción total generando el paro total o parcial de una línea de producción. Debido a que cada uno de los elementos del motor produce vibraciones con una determinada frecuencia, permite realizar una evaluación de las vibraciones en la maquinaria para establecer el elemento deficiente, analizando la fuerza de la vibración y predecir si un componente se encuentra próximo de someterse a un daño crítico. Este trabajo de titulación da a conocer las características de los elementos que forman parte de los motores asíncronos, motivos por lo que las vibraciones se originan, instrumentos que permiten realizar las mediciones de las vibraciones y por último, cómo implementar el análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo.

PALABRAS CLAVES: VIBRACIONES, ALINEACIÓN, PREDICTIVO, ENERGÍAS, EFICIENCIA, UTILIDAD, CPM, RMS

ABSTRACT

The present project is based on the analysis of the vibrations that occur in the three-phase asynchronous motors, the same one that is used as a method for the identification and diagnosis of the failures in the components of the equipment. This method involves a fundamental part of predictive maintenance. Due to the rotational movement of the shaft that characterizes the rotating machines, vibrations are produced in its components. These vibrations must have a permissible and continuous magnitude, but due to the deterioration of the components, the force of the vibration increases with time, which will cause the wear on many occasions this may be premature so the components of the machine should be replaced in order to advance and avoid serious damage to the equipment or total destruction generating the total or partial stoppage of a production line. Because each of the elements of the motor produces vibrations with a certain frequency, it allows an evaluation of the vibrations in the machinery to establish the deficient element, analyzing the strength of the vibration and predicting if a component is close to undergoing a critical damage. This work of certification discloses the characteristics of the elements that comprise of the asynchronous motors, reasons for which the vibrations originate, instruments that allow to realize the measurements of the vibrations and finally, how to implement the analysis of vibrations in the Predictive Maintenance.

KEY WORDS: VIBRATIONS, ALIGNMENT, PREDICTIVES, ENERGIES, EFFICIENCY, UTILITY, CPM, RMS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

En la actualidad, en la mayoría de industrias encontraremos en su estructura implementados motores eléctricos trifásicos, por lo que surge la necesidad de realizar un estudio con el fin de prevenir los fallos ocasionados por las vibraciones mecánicas, mediante una estrategia de mantenimiento predictivo de las cuales se realizará la detección precisa de las fallas utilizando sistema de monitoreo periódico, una vez encontrada la causa el análisis de las mediciones nos brindará información sobre el problema y la raíz de falla.

La razón principal por la que se realizará este tema de investigación es el de conocer las principales causas que producen las vibraciones mecánicas entre las más importantes la desalineación, así como dar a conocer cómo un plan de mantenimiento predictivo nos puede ayudar a reducir las interrupciones de trabajo.

1.2. Planteamiento del problema

Siempre ha existido y no es que se desconoce de daños prematuros en los componentes de los motores eléctricos o de las máquinas rotatorias. Dentro de la industria es muy común encontrar constantes fallas, daños y reducción de la vida útil de las máquinas rotativas en este caso refiriéndonos a motores eléctricos. Esto debido a vibraciones mecánicas y eléctricas por lo que es importante realizar un estudio basado en conocimientos científicos. La desalineación entraría como una de las principales razones de originar las vibraciones mecánicas en los motores trifásicos produciendo desgaste de los elementos de transmisión tales como correas, bandas, rodamientos, etc.

La desalineación de los motores eléctricos ha generado un problema crítico en el desarrollo de las máquinas, es de suma importancia realizar una revisión periódica del estado de los componentes de equipos que manejan altas velocidad y la seguridad deber ser garantizada.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar las vibraciones y alineación en los motores eléctricos asíncronos trifásicos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar los diferentes modos de fallo que se presentan en el análisis de vibraciones.
- Identificar los tipos de alineaciones en motores eléctricos trifásicos.
- Establecer la importancia del análisis de vibración en el mantenimiento predictivo.

1.4. Tipo de investigación

El presente trabajo de titulación se utilizará una serie de tipos de investigación como la documental que permitirá obtener y analizar información sobre el objeto de estudio; la descriptiva que buscará especificar las características y propiedades del tema sometido a un análisis; y por último, la explicativa que responderá las causas expuestas y que complementa el desarrollo del presente trabajo de titulación.

1.5. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se basará en una metodología investigativa y un método de análisis, ambas permitirán una vez obtenida la información realizar un análisis profundo de sus partes para llegar a conclusiones generales que respondan al estudio propuesto y lograr cumplir los objetivos establecidos previamente. Además de las técnicas, procedimientos y herramientas que se utilicen en el proceso de investigación para la realización del mismo y así obtener, a través de un proceso sistemático, organizado y objetivo, una respuesta efectiva a partir del análisis propuesto para este proyecto.

PARTE I MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS TRIFÁSICOS

Los motores eléctricos trifásicos son máquinas eléctricas rotativas, capaces de convertir el suministro de energía eléctrica en energía mecánica. Los campos magnéticos rotativos en el rotor son originados por la energía eléctrica suministrada lo que provoca que el arranque de estos motores no necesite circuito auxiliar, son más pequeños y livianos que uno monofásico de inducción de la misma potencia, debido a esto su fabricación representa un costo menor.(EcuRed, Motor eléctrico trifásico, 2018)

Dentro de la fabricación de los motores eléctricos trifásicos, encontraremos disponibles equipos de diferente potencia con capacidad de trabajar a diferentes niveles de voltajes y frecuencias (50 y 60 Hz) normalizadas.(EcuRed, Motor eléctrico trifásico, 2018)

En la figura 2.1 observamos un motor eléctrico trifásico.

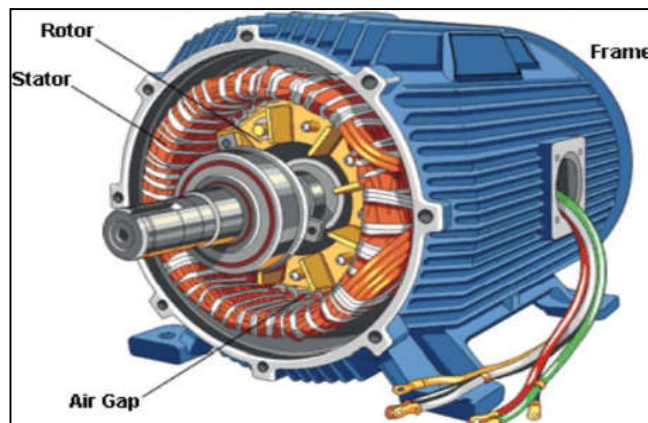


Figura 2.1: Motor eléctrico trifásico
Fuente:Keywords, 2018

Por su variedad de potencia y tamaño son muy usados en la industria no siendo así en el sistema residencial y doméstico debido fundamentalmente a que en este sector no llega la corriente trifásica. En la industria se emplean para accionar máquinas-herramienta, bombas, montacargas, ventiladores, extractores, elevadores, grúas eléctricas, etc.

Los motores eléctricos constan de tres partes fundamentales, estator, rotor y escudo. En la tabla 2.1 se observan las características de sus partes.

Tabla 2.1: Partes fundamentales del motor trifásico

Partes fundamentales del motor eléctrico trifásico	
Estator	Constituido por un enchapado de hierro al silicio de forma ranurada, generalmente es introducido a presión dentro de la carcasa.
Rotor	Es la parte móvil del motor, Está formado por el eje, el enchapado y unas barras de cobre o aluminio, unidos en los extremos con tornillos
Escudo	Se elabora de hierro colado, en el centro tiene cavidades donde se incrustan cojinetes sobre los cuales descansa el eje del rotor. Los escudos deben estar siempre bien ajustados con respecto al estator, porque de ello depende que el rotor gire libremente o que tenga arrastres o fricciones.

Fuente: El Autor.

A continuación, en la figura 2.2 podemos observar las partes constitutivas de un motor eléctrico trifásico.



Figura 2.2: Partes principales de un motor eléctrico trifásico

Fuente: Motor de alterna, 2018

2.1 Clasificación de los motores eléctricos

Los motores eléctricos son propulsores que no necesitan de una combustión interna para proporcionar la energía, sino que ésta viene a través de la fuerza que producen el estator y el rotor. Estos sistemas pueden funcionar, tanto a través de baterías, como conectados a una red eléctrica. (Ruta, 2018)

Dentro de los motores eléctricos podemos encontrar una clasificación principal que los distingue en tres tipologías:

Tabla 2.2: Clasificación de los motores eléctricos

Clasificación de los motores eléctricos		
Motor	Corriente de funcionamiento	Características
Universal	A/C - D/C	Ampliamente utilizados tanto a nivel profesional o industrial, como a nivel doméstico para dotar de potencia a diversos electrodomésticos cotidianos.
Corriente continua	D/C	Tienen un diseño bastante complicado y permiten modificar la velocidad simplemente ajustando la tensión. Son más caros de fabricar y sus aplicaciones todavía son limitadas.
Corriente alterna	A/C - D/C	Están diseñados para funcionar a velocidades fijas. Son sencillos, baratos y muy usados en el campo industrial.

Fuente: El Autor.

2.1.1. Características de los motores DC

Los motores de corriente continua necesitan unas escobillas para poder meter la corriente eléctrica en el rotor del motor y unas delgas para que siempre entre y salga en la misma dirección por las espiras. Los motores de cc usados en la industria tienen los imanes del estator bobinados para crear un electroimán y crear campos magnéticos mayores. Hay un tipo de motor de corriente continua que no lleva bobinas en el estator, son los llamados "motores de imanes permanentes", motores usados en juguetes y pequeños aparatos. El estator está formado simplemente por dos imanes.(Alejandro, 2018)

Los motores de corriente continua fueron el primer tipo de motor ampliamente utilizado y los costos iniciales de los sistemas (motores y accionamiento) tienden a ser típicamente menores que los sistemas de corriente alterna para unidades de pequeña potencia, pero con mayor potencia, los costos generales de mantenimiento aumentan dejando de ser rentable su uso.(Alejandro, 2018)

Este tipo de motores se siguen utilizando en pequeñas herramientas, electrodomésticos, en electrónica y en robótica, aunque se están quedando obsoletos en la actualidad y sobre todo para usos industriales debido a las ventajas de

los motores trifásicos y monofásicos de inducción de corriente alterna, sobre todo desde los avances tecnológicos en cuanto a regulación de velocidad. La velocidad de los motores de CC se puede controlar variando la tensión de alimentación y están disponibles en una amplia gama de voltajes, sin embargo, el tipo más popular es de 12 y 24 V.(Alejandro, 2018)

Precisamente esta es su mayor aplicación, ya que como motor solo se utilizan en casos muy concretos y para pequeñas potencias como en los servomotores.(Alejandro, 2018)

Los motores de corriente continua se clasifican según la forma de conexión de las bobinas inductoras e inducidas entre sí. Tenemos 4 tipos:

Motor de excitación independiente: El motor de excitación independiente es tal que el inductor y el inducido se alimentan de dos fuentes de energía independientes. No se suelen utilizar, salvo excepciones muy concretas, por el inconveniente de tener que utilizar una fuente de tensión externa. En la figura 2.3 podemos observar un motor de excitación independiente.(Alejandro, 2018)

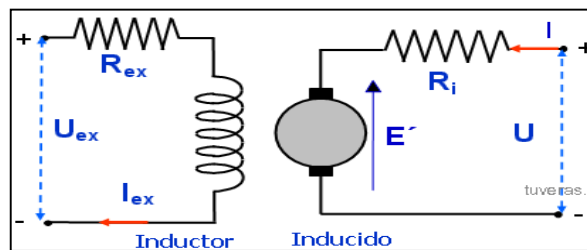


Figura 2.3: Esquema de motor de excitación independiente
Fuente: Alejandro, 2018

A continuación, observamos en la figura 2.4 el motor en serie en el que los devanados del inductor y del inducido se encuentran en serie.

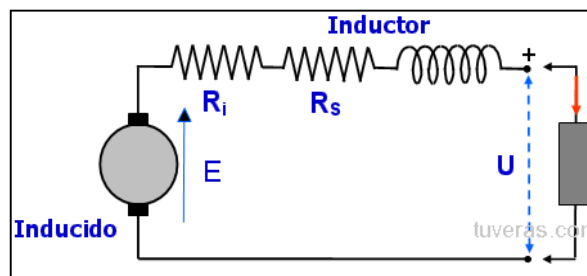


Figura 2.4: Esquema de motor en serie
Fuente: Alejandro, 2018

En el motor en derivación o motor Shunt se dispone los devanados del inductor e inducido en paralelo como se aprecia en la figura 2.5.

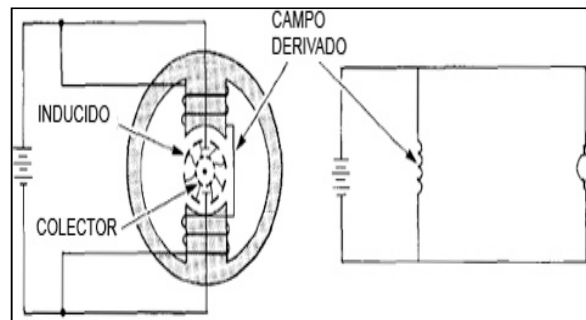


Figura 2.5: Esquema de motor de excitación en paralelo
Fuente: Alejandro, 2018

El motor de excitación compuesto como se muestra en la figura 2.6 consta de dos devanados inductores, uno está en serie con el devanado inducido y el otro en paralelo.

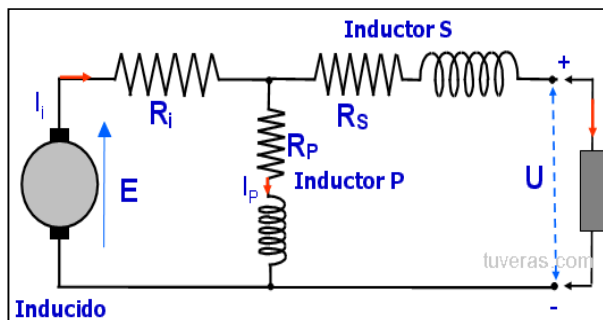


Figura 2.6: Esquema de motor de excitación compuesto
Fuente: Alejandro, 2018

2.1.2. Características de los motores AC

Se denomina motor de CA a aquellos motores eléctricos que funcionan con corriente alterna. Un motor es una máquina motriz, esto es, un aparato que convierte una forma determinada de energía en energía mecánica de rotación o par. Un motor eléctrico convierte la energía eléctrica en fuerzas de giro por medio de la acción mutua de los campos magnéticos.

En la actualidad, el motor de corriente alterna es el que más se utiliza para la mayor parte de las aplicaciones, debido fundamentalmente a que consiguen un buen rendimiento, bajo mantenimiento y sencillez, en su construcción, sobre todo en los motores asíncronos.(Alejandro, 2018)

Los motores de corriente alterna se clasifican por su rapidez de rotación, de acuerdo a la tipología de rotor y por el número de líneas de alimentación.(Voltimum, 2013)

De acuerdo a la rapidez de rotación podemos clasificarlos en asíncronos en la cual el motor puede hacer girar al rotor a diferentes velocidades y síncronos en el cual el rotor gira igualando la misma velocidad del campo electromagnético. Dentro de esta clasificación también los tenemos por el tipo de rotor que puedes ser motores de jaula de ardilla y anillos rozantes. Por su tipo de alimentación lo podemos clasificar en monofásicos, bifásicos y trifásicos.(Voltimum, 2013)

2.2 Motores asíncronos trifásicos

Los motores asíncronos trifásicos pueden incluirse entre las máquinas eléctricas más fiables que existen; desarrollan su función durante muchos años con intervenciones de mantenimiento muy reducidas y se adaptan a distintas prestaciones en función de las exigencias, cubriendo tanto aplicaciones de producción como de servicio. Estos se utilizan en los sectores industriales más variados, como por ejemplo las industrias alimentaria, química, metalúrgica, papelera, minera o las instalaciones de tratamiento de aguas.

Las aplicaciones incluyen máquinas con piezas móviles a velocidad fija o variable, como por ejemplo los sistemas de elevación, como ascensores o montacargas; de transporte, como las cintas transportadoras; los sistemas de ventilación y climatización, como las unidades de tratamiento del aire; sin olvidar el que es probablemente el uso más común: las bombas y los compresores.(Voltimum, 2013)

Los motores asíncrónicos o de inducción son un tipo de motores eléctricos de corriente alterna. El motor de inducción se compone por un rotor que se puede clasificar de dos formas: rotor de jaula de ardilla o rotor bobinado, y un estator, dentro del cual encontraremos las bobinas inductoras. Tal como se observa en la figura 2.7 a continuación las bobinas son trifásicas y se encuentran desfasadas 120°entre sí.

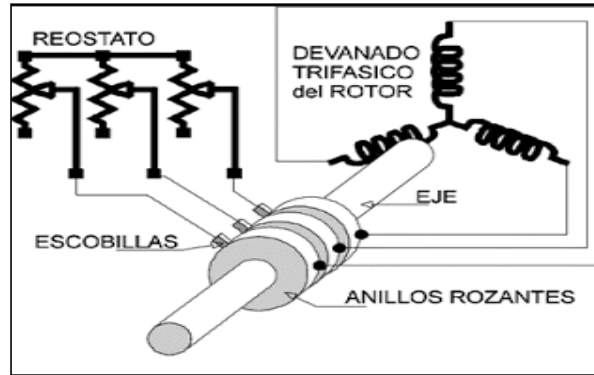


Figura 2.7: Desfase de bobinas en un motor de inducción
Fuente: ElectroPe82, 2018

Al paso de la corriente eléctrica por el bobinado del estator se induce un campo magnético rotativo que cubre al rotor, esto de acuerdo al Teorema de Ferraris. Este campo magnético rotativo va a inducir una diferencia de potencial en el rotor como lo explica la Ley de inducción de Faraday.(EcuRed, Motor asincrónico, 2018)

El paso de una corriente eléctrica por un conductor que se encuentra dentro de un campo magnético estará sometido a una fuerza que lo pondrá en circulación. Es aquí cuando el efecto motor también conocido como el efecto Laplace por el cual los conductores que tienen un flujo de electrones sobre ellos y se encuentran dentro de un campo magnético se produce un movimiento de ellos en el conductor. De igual manera se produce también el efecto generador, también conocido como efecto motor por el cual se produce una tensión en un conductor dentro de un campo electromagnético. El estator del motor genera un campo magnético causando una fuerza de inducción electromotriz, esta acción producida entre las corrientes del rotor y el campo electromagnético producen una fuerza electrodinámica en el rotor que resulta en el movimiento de este. Las pérdidas que existen entre estas fuerzas se conocen como deslizamiento.(INDAFACE, 2018)

2.2.1 Principios de funcionamiento

Los motores de inducción como todo motor, constan básicamente de dos partes principales como se muestra en la figura 2.8, una rotativa denominada rotor y una estable denominada estator en la cual mediante una serie de bobinados se producirá un campo magnético.

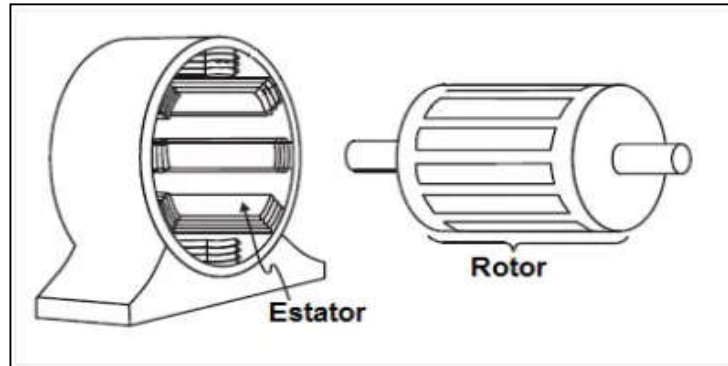


Figura 2.8:Partes principales de un motor eléctrico
Fuente: automatismo industrial, 2018

Cuando una corriente alterna trifásica es aplicada en todos los bobinados del estator, estas producen un campo magnético que gracias al diseño de los bobinados y el flujo de la corriente alterna producen movimiento en el rotor, la dirección de este campo varia y su velocidad dependerá de la frecuencia de la tensión aplicada y los bobinados.(ProfeToloka, 2014)

Como se sabe el campo magnético induce también corriente, en este caso en el rotor. Este inducción de campos hacia el rotor son los que provocan el movimiento en este, dejándolo girar por el campo magnético en el que se encuentra.(ProfeToloka, 2014)

Como se explicó, existen dos tipos de velocidades la de giro y la del campo giratorio. Estas dos no deben ser de la misma magnitud ya que si fuera así no existirá interacción entre ambas fuerzas. Debido a esto este motor se lo conoce como asíncrono, siendo superior la velocidad del campo giratorio a la velocidad del rotor.(ProfeToloka, 2014)

La velocidad síncrona N_s , que es la velocidad del campo magnético en el estator. Se halla multiplicando 60 por la frecuencia del nivel de tensión a que es alimentado sobre la cantidad de polos que existen en el estator. A continuación se presenta la fórmula matemática.

$$N_s = \frac{60 * f}{p}$$

Donde:

N_s = Velocidad síncrona (en r.p.m.)

f = frecuencia (en Hz)

p = Número de pares de polos del estator

Si está conectado a una tensión trifásica de 50 Hz, la velocidad síncrona será:

$$N_s = \frac{60 * 50}{3} = \frac{3000}{3} = 1000rpm$$

Y conectado a una red de 60 Hz:

$$N_s = \frac{60 * 60}{p} = \frac{3600}{3} = 1200rpm$$

En base a las ecuaciones anteriormente indicadas se comprueba que el motor no puede girar a cualquier velocidad, esta estará dentro de rangos dados por las características de construcción de los motores y la frecuencia del nivel de tensión que alimenta el motor.(ProfeToloka, 2014)

En la tabla 2.3 podemos observar algunos valores en rpm, los cuales son directamente proporcional al número de polos del motor y a la frecuencia de trabajo a la que sea sometido.

Tabla 2.3: Rotación síncrona de acuerdo al número de polos y frecuencia

# de polos	Rotación síncrona por minuto	
	60 Hertz	50 Hertz
2	3600rpm	3000rpm
4	1800rpm	1500rpm
6	1200rpm	1000rpm
8	900rpm	750rpm
10	720rpm	600rpm

Fuente: El Autor.

2.3 Clasificación de los motores asíncronos trifásicos

Los motores asíncronos trifásicos pueden ser clasificados por el tipo de bobinado que tiene el rotor:(Mejía, 2009)

- Rotor de tipo jaula de ardilla
- Rotor de tipo devanado

El estator de los motores de inducción con ambos tipos de bobinado tiene las mismas características. (Mejía, 2009)

2.3.1 Motor asíncrono con rotor jaula de ardilla

Los motores asíncronos con rotor tipo jaula de ardilla tienen un nivel de mantenimiento más bajo en comparación a los motores de rotor de tipo devanado. Estos rotores tienen fundido algún material con buenas características conductoras como el aluminio en sus ranuras y en los extremos del rotor unidos por anillos. Las barras en el rotor están dispuestas de manera inclinada con respecto al eje para de esta manera disminuir el ruido de este al girar. (Mejía, 2009)

Otros tipos de rotores son:

- Rotores de doble jaula
- Rotores de ranura normal
- Rotores de ranura profunda

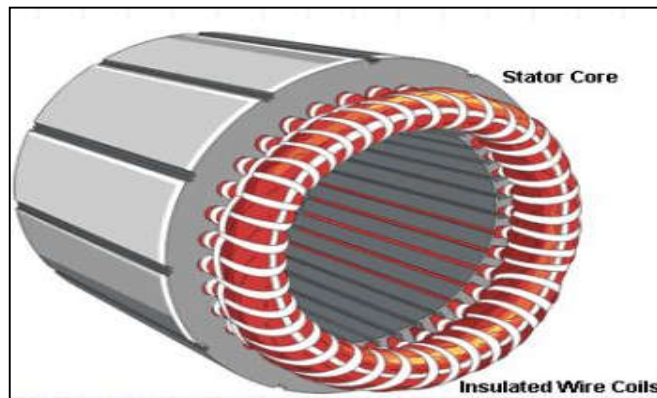


Figura 2.9: Rotor de un motor de tipo jaula de ardilla
Fuente: Mejía, 2008

2.3.2 Motor asíncrono con rotor devanado

Los motores asíncronos con rotor devanado también llamado de rotor bobinado tienen en sus ranuras los conductores, generalmente cobre o aluminio aislado entre la carcasa y la bobina. Este aislante suele ser barniz aplicado sobre el conductor y fibras de madera en las bobinas. (Mejía, 2009)

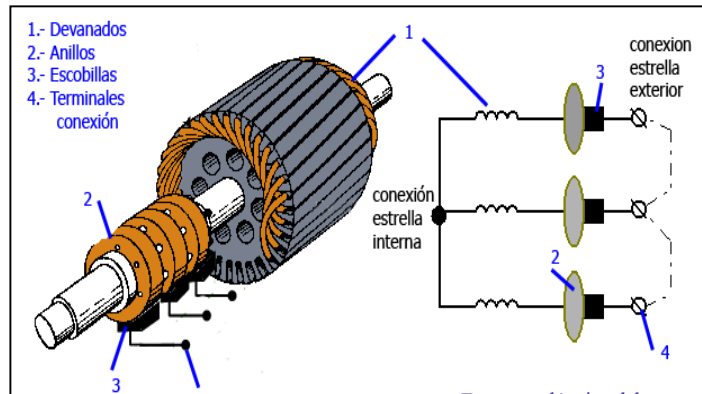


Figura 2.10: Esquema eléctrico del rotor
Fuente: Mejía, 2018

En estos motores existe facilidad para realizar mas tipo de conexiones ya que tiene una configuración parecida el estator y el rotor. Se conecta con escobillas de grafito. Debido a esto los mantenimientos de este tipo de motor son más costosos ya que estas piezas tienen un mayor desgaste.(Mejía, 2009)

CAPÍTULO 3

VIBRACIONES MECÁNICAS Y ALINEACIÓN LÁSER

3.1 Concepto de vibraciones

La vibración es una oscilación mecánica en torno a una posición de referencia. Es la variación, normalmente con el tiempo, de la magnitud de una cantidad con respecto a una referencia específica cuando dicha magnitud se hace alternativamente más grande y más pequeña que la referencia.

La vibración es el resultado de fuerzas dinámicas en las máquinas o estructuras que tienen partes en movimiento o sometidas a acciones variables. Las diferentes partes de la máquina vibrarán con distintas frecuencias y amplitudes. La vibración puede causar molestias y fatiga. A menudo es la última responsable de la "muerte" de la máquina. Además, muchas veces es un efecto molesto y destructivo de un proceso útil, aunque en otros casos es generada intencionadamente para desarrollar una tarea. (Concepto de vibraciones, 2018)

La vibración y el ruido, definido como sonidos no deseados, están estrechamente relacionados. El ruido es simplemente una parte de la energía de la vibración de una estructura que se transforma en variaciones de presión. La mayoría de los problemas de ruidos y vibraciones están relacionados con el fenómeno de la resonancia. Siempre va a existir algún nivel de ruido y de vibración en los procesos dinámicos.

Las medidas de los ruidos pueden ser comparadas con los estándares internacionales para determinar si están dentro de unos límites aceptables. En algunos casos las medidas de vibraciones pueden ser comparadas con las especificaciones del fabricante de la máquina. Muy a menudo un problema de vibración de la máquina puede indicar un fallo o un mal funcionamiento en la misma.

Normalmente tiene su origen en los efectos dinámicos de las tolerancias de fabricación, rozamientos, fuerzas desequilibradas en elementos en rotación, el contacto entre elementos que están rodando, balanceando o deslizando, etc. A menudo, pequeñas vibraciones insignificantes pueden excitar las frecuencias de

resonancia de otras partes de la estructura y pueden ser amplificadas a vibraciones mayores y pueden llegar a ser fuentes de ruidos. (Concepto de vibraciones, 2018)

Se dice que un cuerpo está vibrando cuando describe un movimiento oscilatorio en torno a una posición de equilibrio.

El número de veces que tiene lugar el movimiento cíclico completo en un segundo se conoce como frecuencia, y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia es igual a la inversa del período. Multiplicando la frecuencia por 2π , se obtiene la frecuencia angular, que es proporcional a la raíz cuadrada de la rigidez k dividida entre la masa m .

Un aumento de la masa en un sistema que se encuentra produce un aumento del período, es decir, una disminución de la frecuencia. La amplitud de la vibración es la característica que describe la intensidad de la misma. (Concepto de vibraciones, 2018)

3.2 Movimiento periódico

El movimiento periódico se fundamenta en el oscilamiento a intervalos de tiempo τ , y a intervalos iguales de tiempo, todas las variables del movimiento (velocidad, aceleración, etc.), toman el mismo valor. En la figura 3.1 podemos observar la gráfico del movimiento.

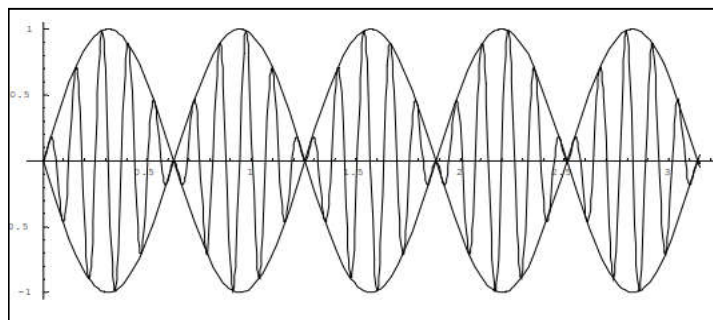


Figura 3.1: Movimiento periódico
Fuente: Da Soluciones, 2018

3.2.1 Vibración libre

Se conoce como vibración libre a la continua oscilación de cualquier estructura, tiempo después de se haya detenido la fuerza de excitación aplicada a este. Esta vibración será dada a la frecuencia del sistema de manera que reduzca su magnitud de manera gradual, esto es por causa de la amortiguación del sistema. Supongamos que

tenemos un sistema masa resorte suspendido verticalmente de un soporte rígido, como se muestra en la figura en la figura 3.2.

La deformación o elongación que sufre el resorte depende de la cantidad de masa que está unida al extremo libre del resorte; es decir, que la deformación del resorte dependerá de los pesos de las masas. De acuerdo a la Ley de Hooke, una fuerza restauradora F en sentido contrario a la deformación y proporcional a la cantidad de elongación x , la cual se expresa en la forma $F = kx$, donde k es una constante de proporcionalidad conocida como coeficiente de elasticidad del resorte y se refiere a la cantidad de fuerza que se necesita para que el resorte se deforme una cierta cantidad.

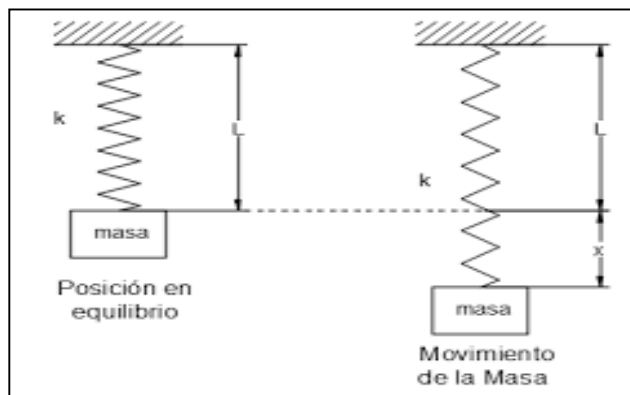


Figura 3.2: Vibración libre
Fuente: Tecnológico nacional de México, 2016

3.2.2 Movimiento armónico

Es un movimiento vibratorio con aceleración variable, producido por una fuerza que se origina cuando el cuerpo se separa de su posición de equilibrio. (DaSoluciones, 2018)

El movimiento armónico simple, se conoce como el tipo de vibración mas sencillo. La siguiente ecuación matemática describe este movimiento.(Mejía, 2009)

$$x(t) = A\cos\omega_0 t + B\sin\omega_0 t$$

Las constantes mostradas a continuación son necesarias para poder analizar este tipo de movimiento.

$$X = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \text{Cosa} = \frac{A}{c} \quad \text{y} \quad \text{Sen}\alpha = \frac{B}{c}$$

Sustituyendo obtenemos:

$$x(t) = X \text{Cos}(\omega_0 t - \alpha)$$

Esto se aprecia en la siguiente figura

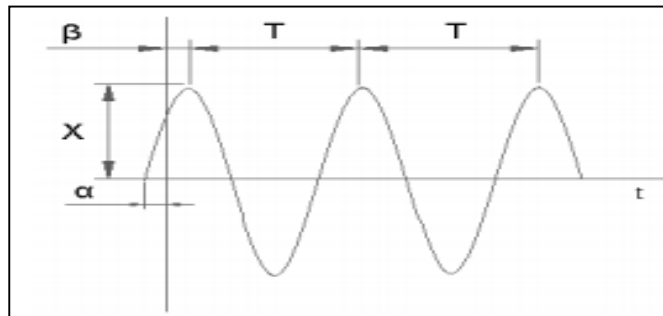


Figura 3.3: Descripción del movimiento armónico simple
Fuente: Da soluciones, 2018

En la gráfica se observa el periodo que es un ciclo completo, la frecuencia que es el numero de ciclos por cada segundo. Su unidad es el hercio (Hz). (Mejía, 2009)

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} \sqrt{\frac{m}{k}} f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde:

$T =$ es el período

$f_0 =$ es la frecuencia natural del sistema

3.2.3 Vibración torsional

El movimiento torsional aparece superpuesto sobre el movimiento rotativo continuo de las piezas que giran y son las oscilaciones periódicas entorno a la velocidad de giro el origen de la vibración torsional. Las vibraciones torsionales pueden ser las causantes de graves daños en los equipos.

Desafortunadamente, la vibración torsional no es detectada con medidas de vibración convencional, por lo que hay que recurrir a técnicas específicas. Esto hace que, este tipo de vibración, sea doblemente peligrosa. La vibración torsional puede llegar a causar el fallo catastrófico por la fatiga del material, pudiendo pasar desapercibida empleando la medida de vibración usual, sin rebelarse previamente como un problema de vibración excesiva o existir indicación alguna de anomalía en la máquina. (DaSoluciones, 2018)

La vibración torsional suele aparecer en trenes de engranajes, cigüeñales o sistemas de embragues. (DaSoluciones, 2018)

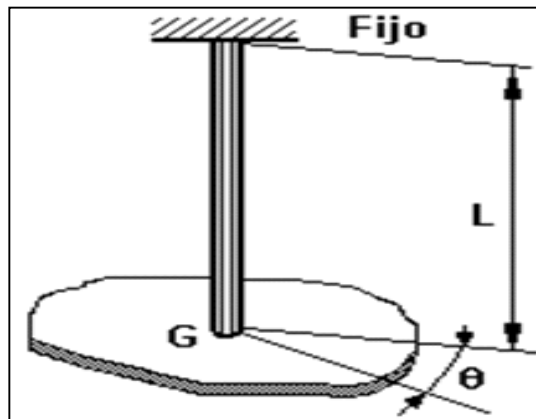


Figura 3.4: Cuerpo rígido sujeto a un eje
Fuente: Da soluciones, 2018

3.2.4 Péndulo Simple

La mayoría de las vibraciones que se presentan en aplicaciones de ingeniería se pueden representar mediante un movimiento armónico simple. Muchas otras, aunque de diferente tipo, se pueden representar de una manera aproximada mediante un movimiento armónico simple, siempre que su amplitud permanezca pequeña.

Considérese, por ejemplo, un péndulo simple, que consiste en una plomada de masa m que pende de una cuerda de longitud L , la cual puede oscilar en un plano vertical como se muestra en la figura. en un instante t , la cuerda forma un ángulo θ con la vertical. (Chin, Cuj, Canche, & Ek, 2010)

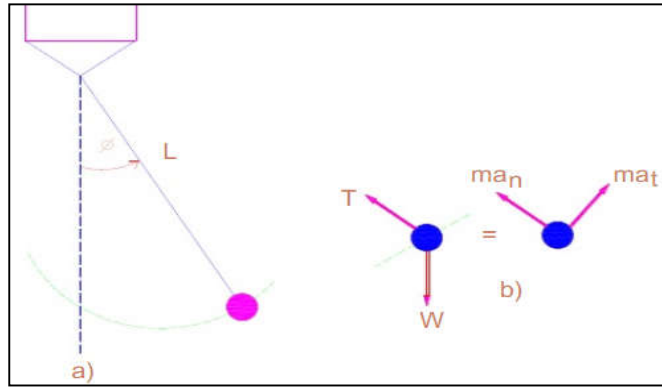


Figura 3.5: Descripción del Péndulo simple
Fuente: Scribd, 2010

Las fuerzas que actúan sobre la plomada son su peso W y la fuerza T ejercida por la cuerda. al transformar al vector ma en componente tangencial y normal, con ma_t hacia la derecha, es decir en la dirección correspondientes a valores crecientes de θ , y puesto que $a_t = l\alpha = l\theta''$ se puede escribir (Chin, Cuj, Canche, & Ek, 2010)

$$\sum F_t = ma_t: \quad -W \sin \theta = ml\theta''$$

Como $W=mg$ y dividiendo entre ml , se obtiene:

$$\theta'' + \frac{g}{l} \sin \theta = 0$$

En el caso de oscilaciones de pequeña amplitud, se puede reemplazar $\sin \theta$ con θ , expresando en radianes, y por tanto, (Chin, Cuj, Canche, & Ek, 2010)

$$\theta'' + \frac{g}{l} \theta = 0$$

3.2.5 Amortiguación

La amortiguación se da cuando la vibración disminuye, esto se da por la disipación de energía de manera de calor, fricción o sonora. La amortiguación viscosa se utiliza mas debido a que es proporcional la amortiguación y la velocidad. (Mejía, 2009)

En la figura 3.6 podemos observar la gráfica de un sistema de baja amortiguación contra uno de alta amortiguación.

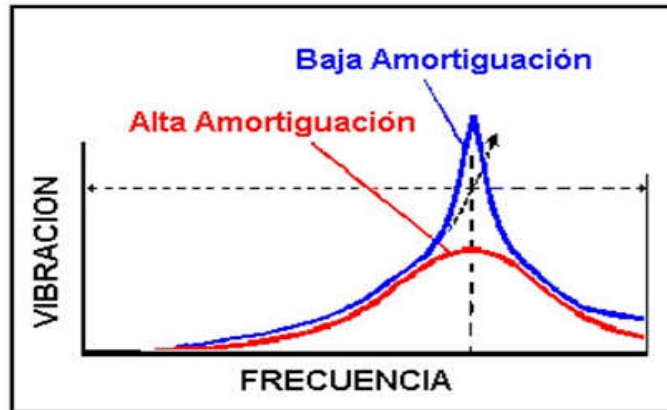


Figura 3.6: Grafico de baja y alta amortiguación
Fuente: Vibro Technology, 2018

3.3 Movimiento periódico forzado

La vibración forzada ocurre cuando una fuerza periódica $F \sin \omega t$ se aplica a la masa (m) de la estructura, donde ω es la velocidad angular (la frecuencia) de la fuerza y F es la magnitud de la fuerza. Cuando la estructura está en equilibrio estático, el peso de la masa (mg) es igual a la fuerza del muelle (Δk), tal como muestra la siguiente imagen. La fuerza del muelle se define como el producto de la constante de rigidez del muelle, k , y la elongación del muelle en reposo, Δ . (Molero, 2016)

En la figura 3.7 a continuación se observa un sistema de amortiguación forzado lo que produciría un movimiento periódico forzado.

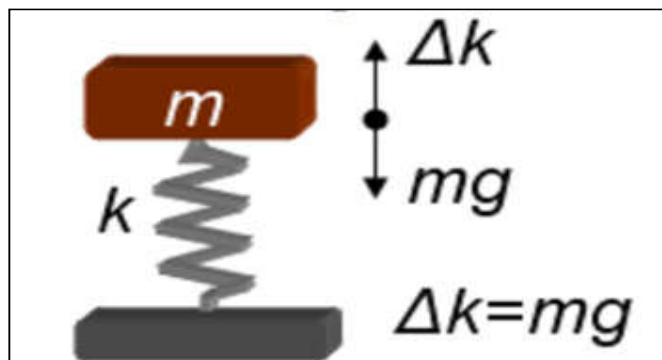


Figura 3.7: Sistema de amortiguación forzada
Fuente: Molero, 2018

En un problema de vibración forzada la estructura vibra con la frecuencia de la carga periódica aplicada a la estructura y la magnitud depende de la propia estructura, no de la carga aplicada. (Molero, 2016)

Cuando la frecuencia de la carga periódica es la misma que la frecuencia natural de la estructura, aparece el fenómeno de la resonancia. Esto puede causar problemas muy graves ya que la magnitud del movimiento sigue aumentando mientras se mantenga la fuerza, por lo tanto, puede llegar a destruir la estructura. (Molero, 2016)

3.3.1 Vibración armónica forzada no amortiguada

En el caso de una vibración forzada no amortiguada la masa oscila a la frecuencia de la fuerza alrededor del punto de equilibrio de forma indefinida ya que no hay disipación de energía. (Molero, 2016)

En este caso la fuerza resultante en la estructura es la suma de fuerzas inherentes al sistema más la fuerza periódica, siendo igual a la masa por la aceleración:

$$F\sin\omega t + mg - K(\Delta + x) = mx''$$

donde t es el tiempo, x el desplazamiento, y x'' la aceleración.

Recordemos que en el equilibrio las fuerzas de la estructura son $mg = k\Delta$, por tanto la ecuación de movimiento de un sistema de vibración forzada no amortiguada se puede escribir como:

$$mx'' + kx = F\sin\omega t$$

En este caso el término de la fuerza tiene un valor no nulo ya que la fuerza aplicada a la estructura tiene una magnitud distinta de cero. (Molero, 2016)

3.3.2 Vibración forzada causada por fuerzas de rotación

La vibración forzada se produce por el desequilibrio de las partes de rotación. Cuando el centro de gravedad de no está en equilibrio en un objeto y este tiene una excentricidad radial, este desequilibrio generara una fuerza centrífuga que provocara que el objeto empiece a vibrar.

3.3.3 Fuerzas transmitidas

La resonancia mecánica se da como respuesta cuando una fuerza se aplica a la frecuencia natural del sistema a un sistema mecánico. Esta frecuencia natural es la que

se produce cuando el sistema empieza a vibrar debido a un desvío o desalineación del eje y su movimiento se da con esta desalineación. Si en este caso se aplica una fuerza ajena al movimiento del sistema provocara amplitudes más amplias que podrían causar la destrucción del sistema. (Mejía, 2009)

Dicha fuerza que es aplicada al sistema podría ser transmitida al suelo por resortes, en el caso de que este haya sido alterado por lo que la fuerza transmitida es kx . Esta relación de transmisión es definida como una fracción de la máxima fuerza perturbadora que se transmite a la base o al suelo..(Mejía, 2009)

3.3.4 Fatiga de los materiales

La fatiga de los materiales se observa al someter las partes de metal a una tensión mecánica de manera repetitiva o cíclica, lo que causara que con el tiempo este tienda a fallar a las tensiones sometidas.

Cuando esto sucede se dice que el material falla y esto se representa por una fractura por fatiga, este tipo de fractura producidas por fatigas en el material es común en las piezas móviles del sistema.

Esta fractura se encuentra en partes donde la tensión mecánica es concentrada. Cuando esta fractura es producida, inicia como una fisura que se seguirá extendiendo por toda la pieza a causa de las tensiones cíclicas. Después de esto la fisura seguirá aumentando su tamaño hasta que esta ya no pueda soportar la rotación y la carga es ahí cuando se produce la fractura del material.

La concentración de tensiones por los agujeros o hendiduras en alguna sección del material son factores que alteraran la resistencia a la fatiga de este.(Mejía, 2009)

A continuación en la figura 3.8 se describe el proceso de fatiga de los materiales, el cual luego de estar sometido a cargas variables presenta deformaciones provocando un deterioro del material y a su vez grietas lo que convergerá en una ruptura.

Los materiales tienen una rugosidad que causaran la tensión mecánica en este, provocando así que se faciliten la existencia de grietas en el material a causa de fatiga; todo lo contrario sucede con los materiales que tienen una superficie no rugosa o lisa en donde su resistencia aumentara. Es por esto que la parte superficial del material

cumple una función importante en la resistencia a la fatiga, cualquier alteración producida en este será causa directa de un cambio en la resistencia a la fatiga. (Mejía, 2009)

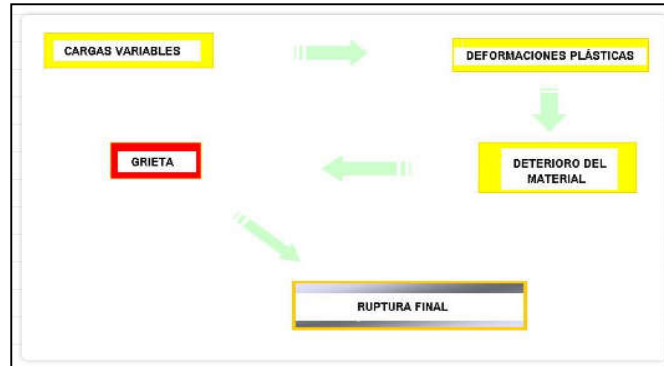


Figura 3.8: Proceso de fatiga de los materiales
Fuente: Mejía, 2009

Los materiales tienen una rugosidad que causaran la tensión mecánica en este, provocando así que se faciliten la existencia de grietas en el material a causa de fatiga; todo lo contrario sucede con los materiales que tienen una superficie no rugosa o lisa en donde su resistencia aumentara. Es por esto que la parte superficial del material cumple una función importante en la resistencia a la fatiga, cualquier alteración producida en este será causa directa de un cambio en la resistencia a la fatiga.

Al material le influye mucho el medio, en el caso de que el material se encuentre en un ambiente salino la fuerza cíclica provocara que las grietas se propaguen más rápidamente en el material aparte de corroerlo. Este tipo de ataque se lo conoce como fatigas por corrosión. (Mejía, 2009)

3.4 Alineación láser

El correcto alineamiento en las maquinarias de las industrias es de suma importancia para reducir drásticamente los costos de mantenimiento y al mismo tiempo para aumentar la vida útil de las maquinarias, cuyo funcionamiento depende de ejes giratorios suelen tener problemas de vibración y desgaste prematuro debido al incorrecto posicionamiento de ejes.

La adecuada alineación evitará la vibración. Así como, el giro inadecuado de los ejes y su efecto vibratorio sobre las máquinas rotativas producen efectos no deseados como excesivo ruido, deterioro de piezas asociadas y como consecuencia una baja

producción por la suspensión habitual por mantenimiento. Con el transcurso del tiempo ha surgido diferentes métodos que sirve para realizar una correcta alineación.

El sistema láser ofrece exactitud y rapidez. Dentro de las consecuencias que se generan por la falta o mala alineación tenemos torsión de ejes por mucho esfuerzo, sobrecalentamiento de bobinado lo cual provoca perdida del barniz y puede ocasionar que el motor se queme, desgaste prematuro de rodamientos y si este tiene acople también lo desgastara, así como al equipo acoplado.

3.5 Análisis espectral

El análisis de espectros se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia. Si el análisis se realiza por medio de un aparato electrónico y la señal eléctrica es directamente proporcional a la vibración se haya el dominio del tiempo. Cuando la señal se pasa a través de un filtro de barrido, la señal que se obtiene estará en el dominio de la frecuencia.

No es posible determinar el numero de las diversas señales de frecuencias que se presentan en las vibraciones con una simple inspección. Para esto utilizamos el análisis matemático de Fourier que convierte señales del dominio a la frecuencia.

El resultado de la FFT se presenta normalmente como un espectro de vibración como se observa en la figura 3.9, donde se muestra que la onda de vibraciones complejas pueden dividirse en tres componentes: amplitud, tiempo y frecuencia.

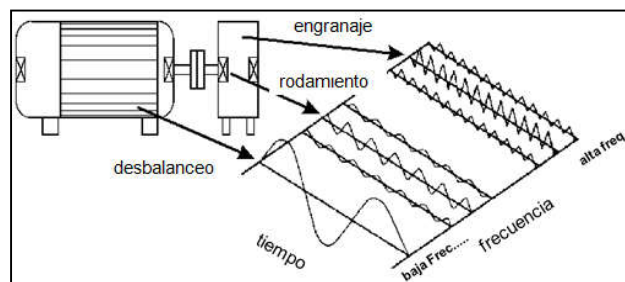


Figura 3.9: Espectro de vibraciones en el tiempo y frecuencia
Fuente: skf, 2015

Antes de realizar la adquisición de datos, ya sea para un análisis detallado o la intervención sistemática de mantenimiento predictivo, es necesario definir o especificar los parámetros espectrales de la FFT.

Estos parámetros incluyen:

1. Parámetros de medición: desplazamiento, velocidad o aceleración
2. Unidades y escala: métrica o imperial y en RMS, pico o pico a pico
3. Frecuencia máxima(Fmax): El máximo rango de frecuencias de vibración que se analizaran.
4. Unidades de frecuencia: Hz o CPM
5. Numero de promedios espectrales: cantidad de FFT que se toman y promedio de amplitudes para mejorar la precisión estadística, reduciendo al mínimo la influencia de azar y eventos transitorios.

En la tabla 3.1 observamos los diferentes tipos de aplicaciones para el desplazamiento, velocidad, aceleración y aceleración envolvente.

Tabla 3.1: Aplicaciones típicas para diferentes parámetros de medición

Vibración de parámetros de medición	Aplicaciones típicas	Fmax Típicos
Desplazamiento	Vibraciones relativas del eje en turbo maquinaria de alto valor	1000Hz
Velocidad	Vibración absoluta(carcasa) en bombas, ventiladores, motores, etc.	2000Hz
Aceleración	Vibración absoluta de alta frecuencia de reductores(frecuencia de engrane)	10000Hz
Aceleración envolvente	Procesamiento de vibración absoluta para la aceleración usando desmodulación paso de banda para diagnostico de rodamientos.	2000Hz

Fuente: El Autor.

CAPÍTULO 4

MODOS DE FALLO EN MOTORES ASÍNCRONOS

La causa de las vibraciones son algunos de los componentes de los motores eléctricos, teniendo cada uno de estos una frecuencia propia y para hallar este fallo nos basamos en el espectro de las frecuencias de las vibraciones basado en las frecuencias características de cada componente. (Mejía, 2009)

Estas frecuencias que se generan son de igual valor a la cantidad de veces en que esto sucede por la multiplicación de la velocidad de giro del motor. El análisis que se realiza de las vibraciones es de suma importancia cuando se desea obtener un diagnóstico de calidad, para esto se realiza es espectro de vibraciones al motor en funcionamiento normal, (Mejía, 2009)esto servirá para compararlos con análisis futuros y tenerlos de referencia, determinando el progreso de las vibraciones.

En la siguiente tabla se clasifican a las maquinas de acuerdo a la norma ISO 2372, esta norma clasifica en 5 diferentes clases separándolos de acuerdo a un rango de potencia.

Tabla 4.1: Clasificación de máquinas según ISO 2372

Clase I	Componentes individuales de motores y maquinas, íntegramente conectados con la maquina completa en sus condiciones normales de funcionamiento.(motores eléctricos de hasta 15Kw)
Clase II	Maquinas de tamaño medio, (típicamente motores eléctricos con una potencia de salida de 15 a 75Kw) sin cimentaciones especiales, motores montados rígidamente, o maquinas (hasta 300Kw) sobre cimientos especiales.
Clase III	Motores con grandes fuerzas motrices y maquinas con grandes masas giratorias, sobre cimentaciones firmes y pesadas que son relativamente rígidas en la dirección de la medición.
Clase IV	Motores con grandes fuerzas motrices y maquinas sin grandes masas giratorias, sobre cimentaciones que son relativamente amortiguados en la dirección de la medición de la vibración.(turbogeneradores)
Clase V	Maquinas y sistemas de transmisión mecánica con efectos de inercia no equilibrados (debido a movimientos alternativos), montados sobre cimentaciones que son relativamente rígidas en la dirección de la medición de la vibración.

Fuente: El Autor.

La frecuencia y magnitud de las vibraciones será proporcionado por el análisis de las vibraciones y para poder valorar la gravedad de estas vibraciones existen algunas normas.(Mejía, 2009)

La norma ISO 2372 “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 revoluciones por segundo”(Mejía, 2009) nos explica que de acuerdo a la potencia de la máquina se podría decir si la magnitud de la vibración se encuentra en un rango aceptable o no.(Mejía, 2009)

Esta norma se aplica a máquinas rotativas con los tipos de rotores, rígidos y flexibles dentro del rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz, aplicados en el nivel global de las vibraciones en velocidad-valor eficaz RMS.

La norma ISO 3945 “Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas; velocidades de operación entre 10 y 200 revoluciones por segundo” nos dice que las vibraciones en máquinas de mayor tamaño para velocidades de entre 600 y 1200 RPM, en esta aplicamos las CLASES III Y IV que son definidas en la tabla anterior. (Mejía, 2009)

La tabla mostrada a continuación muestra la severidad de las vibraciones según la norma ISO 3945. (Mejía, 2009)

Tabla 4.2: Tabla ISO 3945

Severidad de vibración RMS (mm/seg)	Tipo de soporte	
	Rígido	Flexible
0.46	Buena	Buena
0.71		
1.12		
1.8		
2.8	Satisfactoria	Satisfactoria
4.6		
7.1	No satisfactoria	No satisfactoria
11.2		
18.0	Inaceptable	Inaceptable
28.0		

Fuente: ISO, 1977.

La norma ISO 10816 “Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas”. Las normas encontradas aquí son más actuales que

las vistas anteriormente. El valor de la velocidad de vibración es utilizado para evaluar el estado de la máquina. (Mejía, 2009)

La norma ISO 7919 da la descripción de los requisitos que se deben tener para medir y evaluar los diversos tipos de vibraciones en la máquina.(Mejía, 2009)

La norma ISO 2373 “Vibración mecánica en cierta maquinaria eléctrica rotativa con alturas de eje entre 80 y 400mm-Medida y evaluación de la severidad de la vibración” esta norma se basa en norma 2372. (Mejía, 2009)

La norma ISO 2372 de los motores eléctricos que se aplica en los de CA trifásicos y con motores CC con alturas entre los rangos de 80 y 400 mm.(Mejía, 2009)

4.1 Vibración producida por desbalances

Esta es una de las causas más probables de que exista vibración en las máquinas, en casi todos los elementos es fácil encontrar un pico en el gráfico de amplitud frente a frecuencia, que denote un pequeño desequilibrio.(Ambid, 2016)

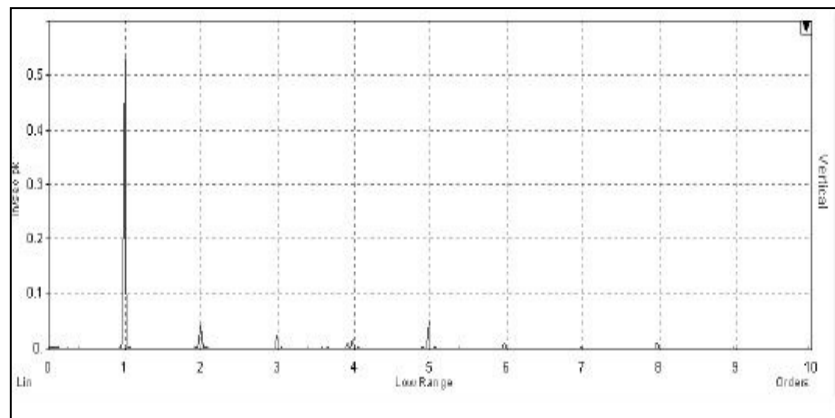


Figura 4.1: Espectro por desbalance
Fuente:Blogseas, 2018

Para conocer la cantidad de desequilibrio hay que encontrar la amplitud de vibración cuando la frecuencia sea igual a $1 \times \text{rpm}$. Esta amplitud será proporcional al nivel de desequilibrio.(RIVERA, 2018)

Normalmente, la amplitud de vibración es mayor en sentido radial (horizontal y vertical) en las máquinas de tipo eje horizontal, aunque en la grafica mostrada a continuación las formas sean similares en los tres sentidos. (RIVERA, 2018)

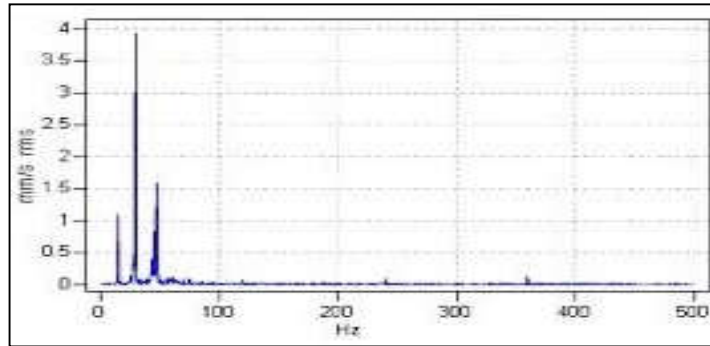


Figura 4.2: Espectro de vibración en un motor tomada en orientación horizontal
Fuente: Blogseas, 2018

Para analizar datos de vibraciones son tan importantes la experiencia y el conocimiento de la máquina como los datos tomados en ella. Cuando aparece un pico en frecuencia igual a $1 \times \text{rpm}$. (Ambid, 2016)

4.2 Vibración debida a falta de alineamiento

Esta condición está siempre presente en los grupos de máquinas. Generalmente, se supone que existe desalineación entre dos ejes conectados mediante un acoplamiento. El desalineamiento también puede existir entre los cojinetes de un eje sólido o entre cualquier otro par de puntos de la máquina. La representación de la desalineación en la señal de vibración dependerá del tipo de desalineación. (Pérez & Bermeo, 2013) Hay dos tipos principales de desalineación:

Desalineación paralela: tal y como se muestra en la figura 4.3, es un estado en el que los ejes geométricos de los ejes mecánicos son perfectamente paralelos, aunque no coincidentes. La desalineación paralela se cuantifica midiendo la distancia entre los ejes en cada plano de alineación. Se presenta entre dos ejes paralelos entre sí, pero que no están en el mismo plano. (Pérez & Bermeo, 2013)

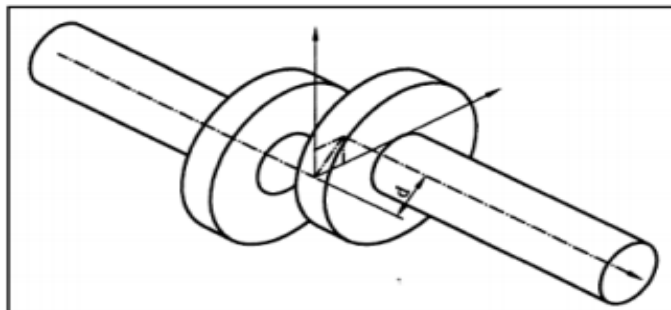


Figura 4.3: Desalineamiento paralelo
Fuente: Pérez & Bermeo, 2013

La desalineación angular: es una condición en la que los ejes geométricos no son paralelos, pero se cortan en el punto medio entre los platos del acoplamiento como muestra la figura 4.4. No existe, por tanto, desalineación paralela. La magnitud que define este tipo de desalineación es el ángulo que forman los ejes, que se mide en los dos planos de alineación. Se produce cuando los ejes no están paralelos entre sí. (Pérez & Bermeo, 2013)

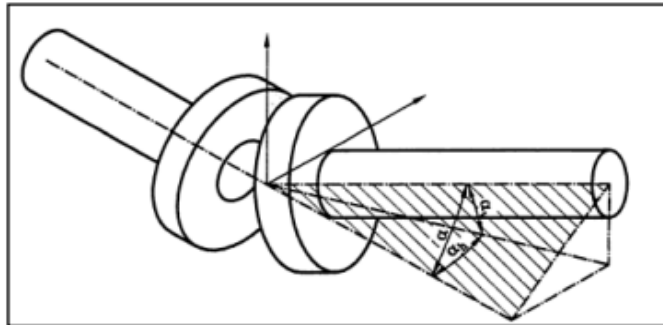


Figura 4.4: Desalineamiento angular de ejes
Fuente: Pérez & Bermeo, 2013

Alineación perfecta: Es una condición en la cual los dos ejes son perfectamente colineales y operan como un único eje sólido cuando están acoplados. La alineación perfecta se da solo cuando los ejes coinciden en las proyecciones de ambos planos (horizontal y vertical). Es un estado ideal que suele ser improbable en la práctica. El Estudio objetivo realista es, por lo contrario, aproximarse lo más posible a esta situación perfecta. (Pérez & Bermeo, 2013)

El desalineamiento se puede identificar por el tipo de este. Cuando este sea de tipo vertical encontraremos vibraciones radiales con frecuencias de 36 armónicas que son la velocidad de giro del motor por 2. (Mejía, 2009) Cuando el desalineamiento sea del tipo angular, encontraremos vibraciones de tipo axial con frecuencias armónicas que superaran la velocidad del motor por dos o tres veces. (Mejía, 2009)

En la siguiente tabla se demostrará el espectro de frecuencias cuando ocurre un desalineamiento. (Mejía, 2009)

En el caso de que las tres armónicas son significativas de manera horizontal, la probabilidad que el desalineamiento fuera de tipo vertical es muy alta. (Mejía, 2009)

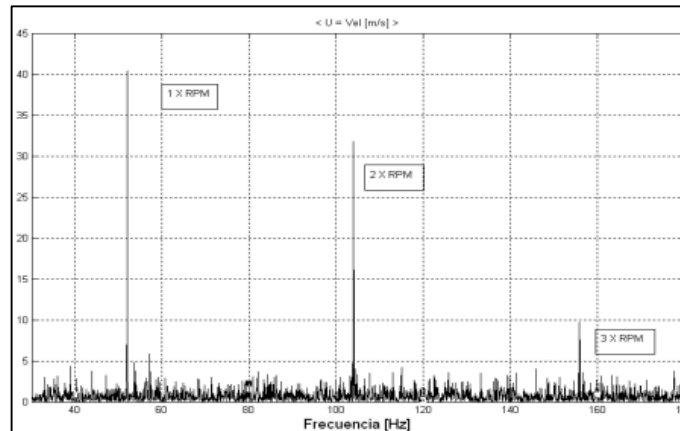


Figura 4.5: Espectro de frecuencia en la falta de alineamiento
Fuente: Mejía, 2009

En el caso de que las tres armónicas son significativas de manera horizontal, la probabilidad que el desalineamiento fuera de tipo vertical es muy alta. (Mejía, 2009)

En el caso de que las tres armónicas son significativas de manera vertical, con una medición de tipo vertical, las probabilidades son altas de que el desalineamiento sea de tipo horizontal. (Mejía, 2009)

Cuando las tres armónicas mostradas en la figura sean significativas y son medidas de manera axial, las probabilidades de que el desalineamiento sea de tipo angular son muy altas y cuando las tres armónicas que se vean en las tres direcciones de medición sean muy altas es probable que la máquina se encuentre en un estado muy severo. (Mejía, 2009)

4.3 Vibración debida a falta de excentricidad

Cuando en los motores eléctricos trifásicos asíncronos existe la presencia de excentricidad por cualquiera de los dos tipos en que se puedan presentar, los efectos causados serán los mismos siempre. Encontraremos armónicos de alta y baja frecuencia dentro del espectro de las corrientes del estator, se encontrara también fuerzas pulsatorias originadas por la electricidad que causaran vibraciones características e incrementales. Debido a este efecto que da la excentricidad en este tipo de motores, este análisis puede ser realizado con el espectro de las corrientes con la que el motor es alimentado y con el análisis de la las vibraciones. (Mejía, 2009)

La modificación del entrehierro en un motor asíncrono produce cambios en la fuerza magneto motriz, y se originaran fuerzas que pulsaran a frecuencias relacionadas con la velocidad de giro del rotor.(Mejía, 2009)

Cuando ocurre excentricidad estática la frecuencia es dos veces la frecuencia de la alimentación del rotor dada por $2x f$ línea, la aparición de algunas frecuencias entre 50 y 200 Hz, es común cuando esto es causado por que existió una modificación en el entrehierro por el desgaste ocurrido en los cojines. (Mejía, 2009)

Cuando ocurre excentricidad dinámica la frecuencia suele suceder alrededor de la frecuencia de giro por las bandas laterales, con una anchura “ $s \cdot f$ línea donde s es el deslizamiento. Entonces la frecuencia de vibración queda $f_v = 1 \cdot \text{RPM} \pm d$ donde línea $d = s \cdot f$ ”(Mejía, 2009)

En la siguiente figura podemos apreciar el espectro de frecuencias cuando una excentricidad ocurre en el motor eléctrico.(Mejía, 2009)

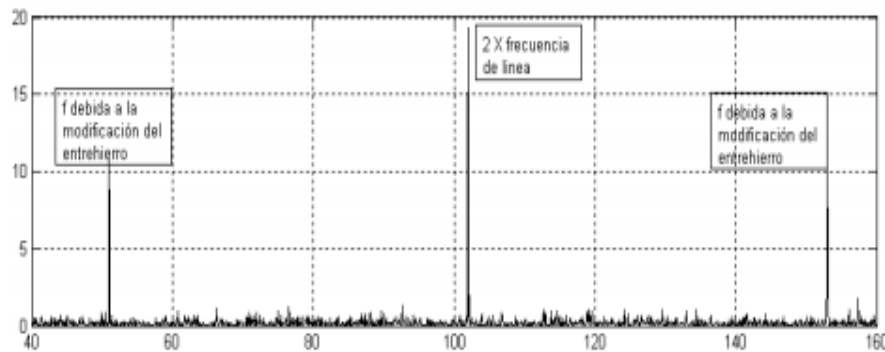


Figura 4.6: Espectro de frecuencias cuando ocurre excentricidad estática (f línea 50 Hz)
Fuente: Mejía, 2009

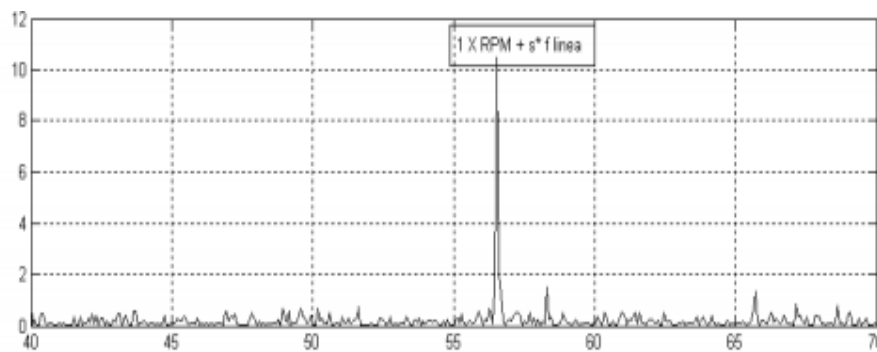


Figura 4.7: Espectro de frecuencia por excentricidad dinámica (f línea 50 Hz)
Fuente: Mejía, 2009

4.4 Vibración debida a casquillos defectuosos

Las vibraciones se presentan cuando ocurren anomalías en el aceite. Las ondas de choque producidos por los cojinetes de casquillos, son absorbidas en gran parte por el aceite, especialmente los de alta frecuencia. (Mejía, 2009)

Las frecuencias características cuando hay casquillos defectuosos pueden ser las siguientes: f_0 , frecuencia fundamental de la vibración, igual a la velocidad de giro del rotor, ocasionado por falta de excentricidad o incorrecto ajuste del cojinete. La frecuencia puede ser 0.4 a 0.6 veces la frecuencia fundamental, ocasionado cuando el eje no se desliza uniformemente sobre la película de aceite. También pueden ser por variaciones en la viscosidad y la temperatura. La figura 4.8 se da un ejemplo de este caso. (Mejía, 2009)

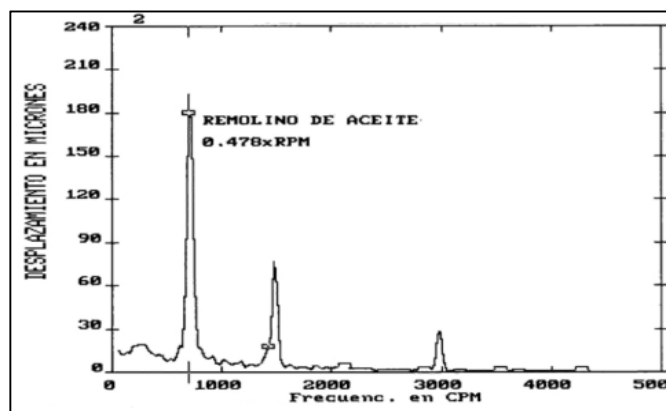


Figura 4.8: Espectro de vibraciones debido a remolinos de aceite
Fuente: Mejía, 2009

$f=2f_0$, este armónico aparece cuando el cojinete se encuentra incorrectamente ajustados. El aflojamiento de partes puede ser también una de las causas. (Mejía, 2009)

4.5 Vibración debida a partes flojas

Si al realizar las mediciones se observan niveles de vibración anormales, antes de realizar cualquier medición, se debe comprobar que los elementos de apoyo o unión están bien sujetos y no sufren holgura. Si este fallo existiera se producirían vibraciones sin que la máquina estuviera averiada. Si se tuviera sospecha de que los anclajes están en malas condiciones, se deberían realizar medidas, tanto axiales como radiales, en los puntos de unión o anclajes, ya que puede ser que no absorban bien las vibraciones existentes en la maquinaria. (Pérez & Bermeo, 2013)

Las holguras mecánicas pueden tener naturalezas muy distintas: falta de apriete entre distintos elementos mecánicos (aflojamiento de pernos, rotura de anclajes, etc.), aumento de tolerancias producidas por desgastes (holguras en cojinetes, rodamientos, engranajes, etc.), etc. Las holguras se manifiestan en las medidas de vibración siempre y cuando exista una fuente de excitación debida a un problema ajeno a las holguras, como puede ser un desequilibrio, una desalineación, etc., de forma que pequeñas fuerzas de excitación exterior pueden producir elevadas amplitudes de vibración, si hay holguras.(Pérez & Bermeo, 2013)

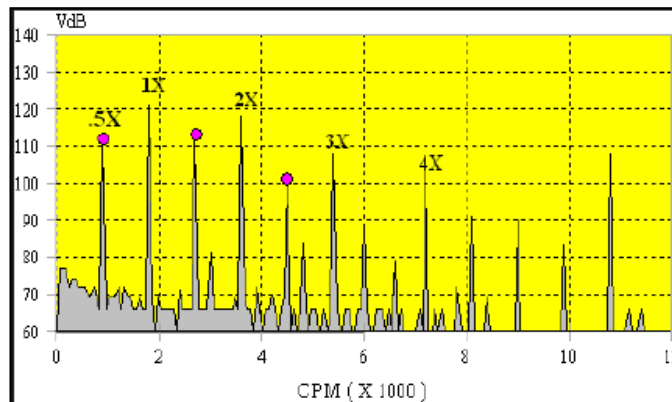


Figura 4.9: Espectro producido por holgura mecánica
Fuente:Azima, 2018

La holgura mecánica provoca la aparición de armónicos de 1x y en casos severos semi ordenes de 0. 5x están presentes. Muchas veces la causa de las semiordenes es el rechino del rodamiento en su cárter. A veces se ven ordenes de un tercio y un cuarto en ejemplos extremos de holgura.(AzimaDLI, 2018)

4.6 Vibración debida a roturas de barras del rotor

Los síntomas de barras rotas son similares a la excentricidad del rotor porque ambas están modulados por bandas vecinas a la frecuencia de paso de polos ($FP = \#p.s$). En la tabla 4.3, podemos ver las Frecuencias de Paso de Polos (F_p) para diversos tipos de motores de inducción que trabajan con una $FL = 60$ Hz. Una barra rota es una barra muerta en el rotor, causa desbalance eléctrico y genera vibraciones a 1RPM y sus armónicas, como este problema no interactúa con la frecuencia de la línea, no se producen vibraciones a FL ni en sus armónicas.(Vibraciones en motores de inducción, 2018)

Tabla 4.3: Frecuencias en CPM

Frecuencias en CPM				
Velocidad Sincrónica (Ns)	Velocidad real RPM	Frecuencia de deslizamiento S	Número de polos #p	Frecuencia paso de polos Fp=#p.s
3600	3580	20	2	40
1800	1770	30	4	120
1200	1175	25	6	150
900	880	20	8	160
720	705	15	10	150
600	580	20	12	240

Fuente:El Autor.

Los cortocircuitos de las láminas y la rotura de barras, desarrollan puntos calientes que distorsionan el rotor causando desbalance electromagnético el cual genera calor y este calor, causa distorsión térmica esta interacción llega a ser catastrófica cuando hay contacto entre el estator y el rotor.

Además, se confirma que una o más barras del rotor están rotas cuando hay vibraciones a la Frecuencia de Paso de las Barras (FPBR)= #barras del rotor x RPM y armónicas acompañadas por sidebands a 7200CPM; Se han hallado rotores que tenían cinco barras rotas y que generaban vibraciones elevadas a 2(FPBR). Cuando un motor genera amplitudes de vibración a la frecuencia de FPBR y armónicas iguales o superiores de 3.75 mm/seg, será necesario controlar la tendencia de las vibraciones antes de desmontar la unidad.(Vibraciones en motores de inducción, 2018)

CAPÍTULO 5

INSTRUMENTACIÓN DE DIAGNÓSTICO Y ALINEACIÓN LÁSER

En el análisis de vibraciones de los motores eléctricos trifásicos asíncronos para poder emitir un buen diagnóstico es de suma importancia conocer los dispositivos que utilizaremos para la medición de las variables a medir, que en este caso sería la señal de la vibración. Las vibraciones pueden ser observadas en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia y las unidades de medida que pueden utilizarse son la aceleración, velocidad o desplazamiento de las vibraciones. (Mejía, 2009)

De acuerdo a las normas ISO las unidades para cuantificar las vibraciones se observan en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Unidades para cuantificar las vibraciones

MAGNITUD	UNIDADES
Desplazamiento	m, mm, μm
Velocidad	m/s, mm/s
Aceleración	m/s^2 G= 9,809 m/s^2

Fuente: El autor.

Es importante considerar la magnitud a medir y el rango de frecuencias en las que operan los transductores (Mejía, 2009) al realizar la medición de la vibración. Los transductores de velocidad tienen un rango de frecuencia efectivo entre 10Hz y 2000Hz aproximado, mientras que el rango de frecuencias de los transductores de desplazamiento está entre 0 y 200Hz y los transductores de aceleración de alta sensibilidad operan dentro de un rango entre 0.2Hz y 500Hz en cambio los de más baja sensibilidad tienen un rango de frecuencias de 5Hz hasta 20,000Hz. (Mejía, 2009)

5.1 Medidores de vibración

En la medición de vibración tenemos muchos instrumentos dentro de los cuales analizaremos los transductores, estos son utilizados en muchas máquinas e instalaciones o para el desarrollo de productos. La medición aporta los parámetros de aceleración de vibración, velocidad de vibración y desviación de vibración.

5.1.1 Definición de transductor y su clasificación

Los transductores se pueden clasificar de acuerdo a la magnitud física a detectar para los cuales se utilizan transductores de velocidad, aceleración y desplazamiento en el análisis de vibraciones.

Un transductor puede ser definido como un aparato que es capaz de convertir una magnitud física en una señal eléctrica codificada, esta puede ser en forma analógica o digital. (Mejía, 2009)

En la figura que se muestra a continuación podemos distinguir la estructura general de los transductores, los elementos principales son los siguientes: Elemento sensor o captador, convierte las variaciones de una magnitud física a variaciones de magnitud eléctrica. Bloque de tratamiento de señal, que suele filtrar, amplificar, linealizar la señal, utilizando circuitos electrónicos. Etapa de salida, que consiste en amplificadores, interruptores, conversores de código, y en general todo lo necesario para poder adaptar la señal a las necesidades exteriores. (Mejía, 2009)

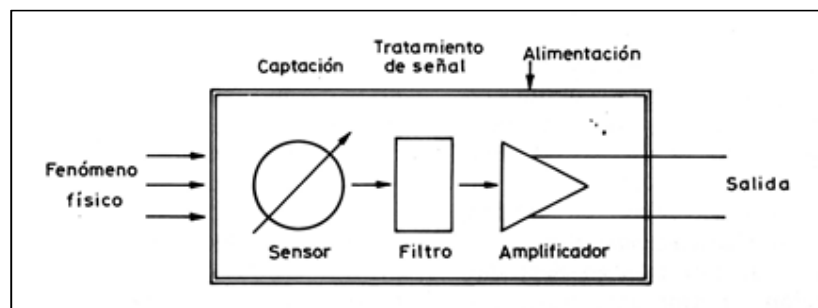


Figura 5.1: Estructura general de un transductor
Fuente: oposinet.cvexpres.com, 2018

5.1.2 Transductor de proximidad

Los transductores de proximidad o desplazamiento pueden ser clasificados en dos grupos que son: Transductores de desplazamiento sin contacto y transductores de desplazamiento con contacto.

Los transductores de desplazamiento sin contacto utilizan la proporcionalidad que existe entre la capacitancia y la distancia entre placas de un capacitor. El funcionamiento de este tipo de transductor consiste en que la superficie vibratoria es una placa y el transductor otra placa, y debido a la vibración la distancia entre estas

dos placas variará y podrá detectarse el cambio en la capacitancia, del cual se convertirá posteriormente en una señal eléctrica. La figura 5.2 muestra un transductor capacitivo. (Mejía, 2009)

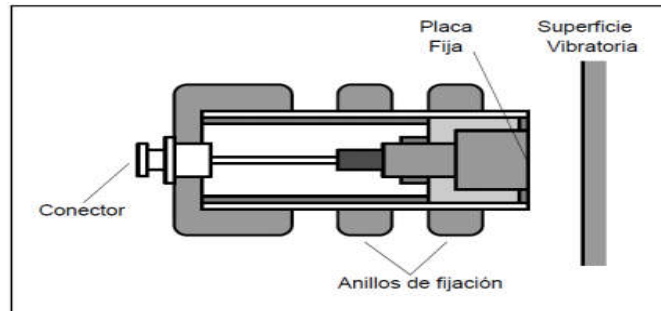


Figura 5.2: Composición de un transductor capacitivo
Fuente: Mejía, 2009

Los transductores de desplazamiento por contacto necesitan del contacto físico con la superficie que vibra. Su diseño se muestra en la figura 5.3.

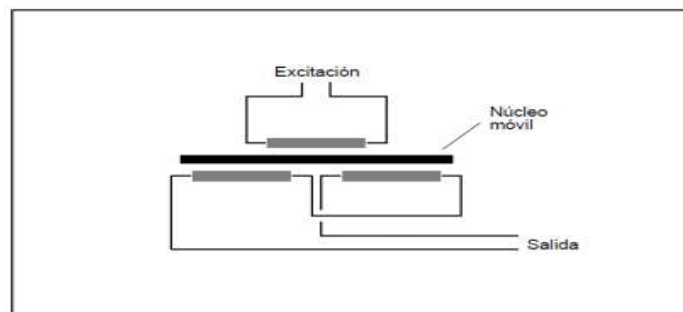


Figura 5.3: Componentes de un transductor sin contacto
Fuente: Mejía, 2009

El bobinado primario se energiza con una corriente alterna, de amplitud constante y frecuencia que varía de 1 a 10 KHz. Esto produce un campo magnético en el centro del transductor que induce una señal eléctrica en el enrollado secundario de acuerdo con la posición del núcleo. El núcleo móvil no hace contacto con otros componentes que puedan absorber energía mecánica, lo cual contribuye a una larga vida útil. (Mejía, 2009)

5.1.3 Transductor de velocidad

El transductor de velocidad es uno de los tipos más antiguos de transductor de vibración, y a pesar de poseer muchas desventajas, todavía se usa mucho. Es un

transductor sísmico que contiene o bien una bobina de alambre movable, en un campo magnético, o un imán movable dentro de una bobina de alambre.

El transductor de velocidad tiene partes móviles, y por eso, está sujeto a desgaste. Requiere una calibración frecuente y su respuesta depende de la temperatura y de la orientación del transductor. Su respuesta de frecuencia va desde alrededor de 15 Hz hasta 1500 Hz y su respuesta de fase puede ser errática especialmente a frecuencias bajas.

Un tipo más reciente de transductor de velocidad llamado "velómetro" consiste de un acelerómetro piezoeléctrico con un integrador que forma parte del sistema para convertir la señal en velocidad. Es mejor en todos los aspectos que el transductor de velocidad tradicional. (AzimaDLI, 2018)

A continuación, en la figura 5.4 se observan las partes de un transductor de velocidad y se aprecia el bobinado que se moverá entre los imanes permanentes cuando se coloca en la superficie vibrante.

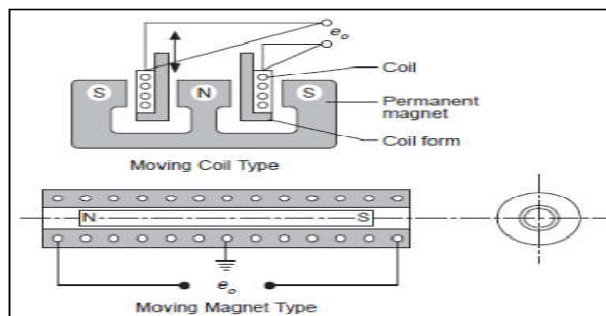


Figura 5.4: Componentes del transductor de velocidad
Fuente: Mejía, 2009

5.1.4 Transductor de aceleración

El acelerómetro debido a su pequeño tamaño, amplio rango de sensibilidad y su gran rango de frecuencias útiles es el transductor más empleado para la medida de vibraciones. Se caracterizan por producir una señal que es proporcional a la aceleración a la que se ven sometidos. Una característica principal a considerar es la sensibilidad, ya que está relacionada con el nivel mínimo de vibración que es capaz de captar. Para tener una elevada sensibilidad es necesario emplear un acelerómetro de un tamaño mayor, que también será más pesado. La sensibilidad no es un problema crítico en condiciones normales debido al uso de preamplificadores de la señal.

Un parámetro importante puede ser la masa de los acelerómetros en objetos o estructuras ligeras. Los niveles de frecuencia, así como la frecuencia medida puede ser alterada por el incremento de masa que supone el acelerómetro sobre la estructura. Como regla general se puede dar que la masa del acelerómetro no debe superar el 10% de la masa de la parte que se encuentra vibrando, sobre la cual se encuentra instalado el acelerómetro. El funcionamiento consiste en que un cristal piezoeléctrico produce cierta carga eléctrica al deformarse bajo la acción de cierta fuerza. (Bibing, 2018)

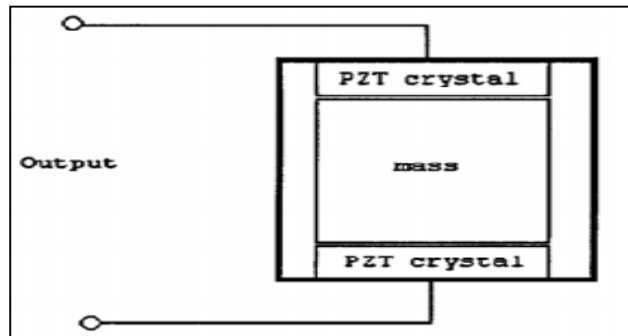


Figura 5.5: Composición del transductor de aceleración
Fuente: Mejía, 2009

En la figura 5.5 los cristales ubicados en los extremos del sensor entre los cuales se encuentra la masa que imprimara la fuerza sobre estos. Cuando al acelerómetro se le aplica un movimiento variante, la masa aplicará una fuerza a los cristales que dependerá de la aceleración de la vibración, ya que la masa es contante. Entonces la carga producida por el piezoeléctrico es proporcional a la aceleración de la vibración.

5.2 Equipos portátiles y de monitoreo en línea

En el estudio de las vibraciones se ha logrado un gran desarrollo debido a los avances en la microelectrónica, esto ha posibilitado fabricar equipos de tecnología digital que va desde el diseño y análisis de circuitos hasta equipos utilizados en el mantenimiento industrial. En la actualidad podemos encontrar gran variedad de equipos para el análisis de vibraciones en el campo, tanto portátiles como instrumentos de medición continua. (Mejía, 2009)

5.2.1 Recolectores de datos portátiles

En el análisis de las vibraciones se realizan mediciones con analizadores de espectros, analizadores de redes y analizadores digitales. Para poder determinar el tipo

de fallo en la máquina es muy común la descomposición de la señal en sus componentes frecuenciales, este tipo de análisis se le llama análisis de espectro o análisis en el dominio de la frecuencia. (Mejía, 2009)

El analizador de espectro es un instrumento utilizado para el estudio de señales en el dominio de la frecuencia, otorgando una representación gráfica de los componentes frecuenciales de la señal conocidos también como armónicos. Para el diagnóstico de las redes eléctricas se utilizan los analizadores de redes. (Mejía, 2009)



Figura 5.6: Colectores de datos
Fuente:Itetra sistemas y tecno-ID, 2018

El instrumento utilizado para el análisis de las vibraciones combina las características de los analizadores de espectro y los analizadores de frecuencia, cuyo nombre es analizador dinámico de señales. (Mejía, 2009)

5.2.2 Sistema de monitoreo en línea

En los sistemas de medición computarizados la forma en la que se ejecuta el filtrado de la señal no es analógica, es decir no se realiza con filtros, este proceso se lleva a cabo a través de algoritmos construidos en circuitos integrados, los cuales proporcionan una alta resolución en el análisis y una alta velocidad de cálculo el cual combina la implementación de un hardware de operación no exclusiva con un poderoso software, obteniendo como resultado un instrumento con posibilidad de ser modificado cuando así se requiera. (Mejía, 2009)

En la figura 5.7 se observa el diagrama de bloques del sistema de medición computarizado.



Figura 5.7: Esquema de adquisición de datos
Fuente:Mejía, 2009

La adquisición de datos consiste en realizar mediciones del fenómeno físico y transformándolos a señal eléctrica por medio de los transductores. El acondicionamiento está constituido básicamente por elementos conversores análogo a digital, para la adquisición de señales como las vibraciones. En el registro señales vibratorias se utilizan técnicas de procesamiento digital de señales, para ello se puede hacer uso de diferentes lenguajes de programación que permitan implementarlas de manera eficiente y confiable. (Mejía, 2009)

5.3 Alineadores láser

Los errores de alineamiento en las máquinas rotatorias provocan numerosos problemas, desde pérdidas de producción a tiempos de inactividad no planificados y aumento de los costos de mantenimiento. Todo ello puede evitarse en gran medida con un correcto proceso de alineando de las máquinas durante la instalación y siguiendo un programa de mantenimiento adecuado a lo largo del tiempo. El alineamiento por láser prolonga la vida útil de la máquina, protege la disponibilidad de las máquinas y puede aumentar la calidad de la producción y el rendimiento de la máquina, ya que los niveles de vibración se reducen al mínimo.

Las máquinas mal alineadas generan fuerzas elevadas de reacción en el acoplamiento, que provocan temperaturas elevadas y desgaste en los acoplamientos, las juntas y los rodamientos. Una temperatura elevada suele ser el primer indicador de un mal alineamiento de la máquina.

En la imagen 5.8 se puede observar los efectos de la temperatura elevada como consecuencia de un mal alineamiento de los ejes.

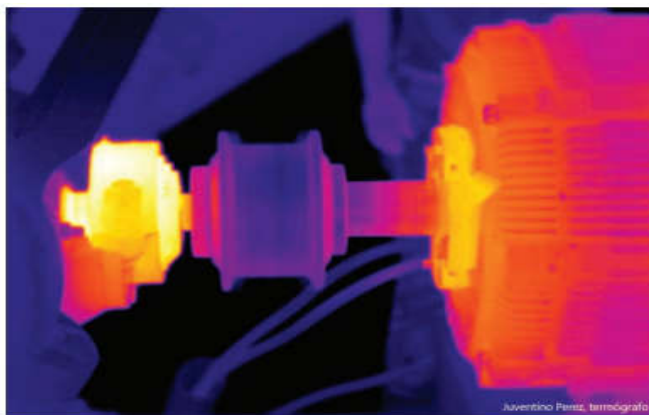


Figura 5.8: Imagen termográfica de ejes desalineado
Fuente:Fluke, 2018

5.3.1 Alineación de ejes

La alineación consiste en el correcto posicionamiento de los centros de rotación de dos o más ejes que están dispuestos en serie o en paralelo. Es decir que el movimiento centrado de cada uno depende del o de los otros, para el adecuado funcionamiento de la máquina.

Antes de la alineación láser se empleaban el sistema de regla o viga y el sistema de comparadores, a pesar de ser una buena técnica esta se ha vuelto obsoleta con la aparición de los alineadores láser.

El alineador láser es la mejor opción para la alineación de ejes debido a que logra una gran precisión, velocidad y automatización sin embargo el operador debe tener la experticia necesaria para su manejo, estos cuentan con una pantalla digital donde se observan los valores de medición. A través de un emisor de rayo láser, un prisma que recibe el rayo y un detector digital, el operador obtiene la información correcta para la alineación de los ejes. El detector electrónico permite el ingreso de las medidas de los ejes y detecta la inclinación de los mismos. En la pantalla puede verse la diferencia paralela y angular de los ejes, así como los valores de desplazamiento que deben aplicarse para conseguir la alineación correcta. (Demáquinasyherramientas, Alineador láser de ejes, 2018)

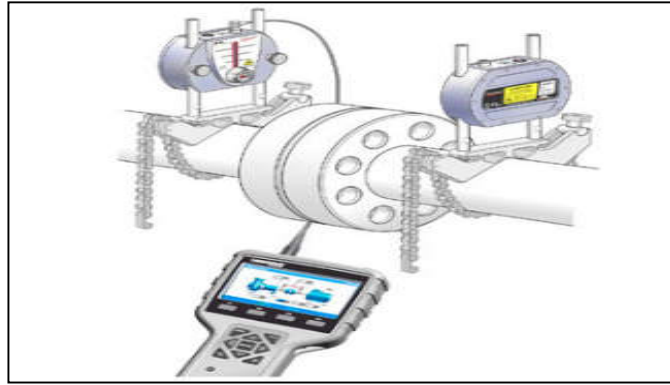


Figura 5.9: Alineador láser de ejes
Fuente: Panatec, 2018

5.3.2 Alineación de poleas

La desalineación de las poleas es una de las razones más comunes de las paradas inesperadas de la maquinaria de transmisión por correas. La desalineación de poleas puede incrementar el desgaste de éstas y de las correas, así como incrementar el ruido y la vibración, lo que puede provocar la parada inesperada de la máquina. Otro efecto secundario de una mayor vibración es el fallo prematuro de los rodamientos. (SKF, 2018)

Los métodos tradicionales de alineación que son los más utilizados, incluyen el uso de criterios visuales únicamente, o de criterios visuales en combinación con una regla/viga y/o un trozo de cuerda, el poco tiempo requerido para el ajuste es una ventaja aunque el uso de una regla/viga consume más tiempo que el uso de criterios visuales por sí solos pero su principal desventaja es la falta de precisión. La desalineación angular horizontal máxima según fabricantes de poleas es de $0,5^\circ$ o incluso $0,25^\circ$, lo cual es imposible de lograr utilizando solamente la vista humana.

El uso de un láser para alinear poleas constituye un método más rápido y preciso que los métodos tradicionales. Los alineadores de poleas pueden alinear las caras o las ranuras de las poleas.

En la figura 5.10 podemos observar (A)(B) medición de desalineaciones paralelas y angulares con una regla/viga y (C) un trozo de cuerda. En (D) una alineación correcta en que las ranuras de la polea están alineadas.

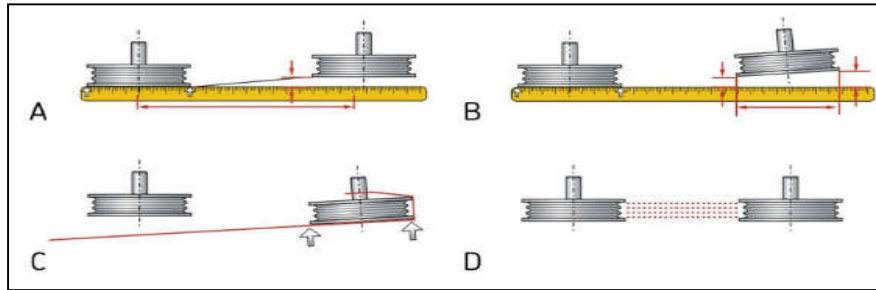


Figura 5.10: Mediciones de desalineación con regla y cuerda
Fuente:SKF, 2018

El resultado de una alineación precisa de poleas y correas da como resultado el incremento de la vida de rodamientos, aumentar el tiempo operativo, la eficacia y la productividad, reducir el desgaste de las poleas y las correas, reducir la fricción y, por lo tanto, el consumo energético, reducir el ruido y la vibración.

A continuación, en la figura 5.11 observamos: (A) desalineación del ángulo vertical, (B) desalineación del ángulo horizontal, (C) Desalineación paralela y (D) alineación ideal.

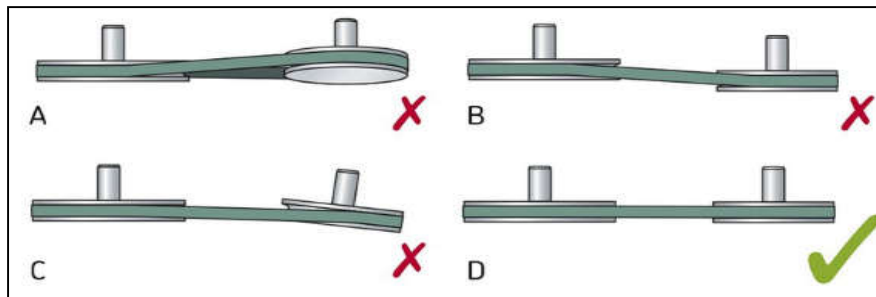


Figura 5.11: Tipo de desalineación y alineación correcta
Fuente:SKF, 2018

CAPÍTULO 6

PLANES DE MANTENIMIENTO

El objetivo de un plan de mantenimiento es que las máquinas eléctricas operen con el mayor tiempo posible, evitando así las paradas inesperadas de las máquinas que producen elevados costos en los repuestos y hasta en la sustitución de la máquina si fuese necesario. El tipo de mantenimiento a utilizar en las máquinas dependerá de la importancia que tiene ésta en la producción de algún producto, así también como el tiempo que se consigue una nueva máquina o los repuestos.(Mejía, 2009)

La fiabilidad y disponibilidad de una instalación dependen sin duda alguna del mantenimiento que se realice en ella. Si el mantenimiento es básicamente correctivo, atendiendo sobre todo los problemas cuando se presentan, es muy posible que a corto plazo esta política sea rentable. El mantenimiento de una instalación se asemeja a un gran depósito. (MANTENIMIENTO, 2018)

Si se realiza un buen mantenimiento preventivo, el depósito siempre estará lleno. Si no se hace nada desde un punto de vista preventivo, el depósito se va vaciando, y puede llegar un momento en el que el depósito, la reserva de mantenimiento, se haya agotado por completo, siendo más rentable adquirir un nuevo equipo o incluso construir una nueva planta que atender todas las reparaciones que van surgiendo.(MANTENIMIENTO, 2018)

6.1 Mantenimiento preventivo

Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno.

6.1.1 Introducción al mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo o programado, son las acciones que se planean y programan con el objetivo de ajustar, reparar o cambiar partes en equipos, antes de que ocurra una falla o daños mayores, eliminando o reduciendo al mínimo los gastos producto de imprevisiones y por supuesto, estableciendo controles para aumentar productividad.

El mantenimiento preventivo reduce la carga de trabajo de mantenimiento correctivo y la presión de su ejecución, haciéndose el trabajo en forma más eficiente y a un costo más bajo. Para lograr un programa eficiente de mantenimiento de planta, las funciones de mantenimiento deben integrarse con un buen sistema administrativo, trabajo de planeación y programación, adiestramiento, medición de trabajo, informes de control, buenos talleres y herramientas y una buena estructura de costos.(Jiménez & Vanegas, 2003)

6.1.2 Ventajas del mantenimiento preventivo

Un elemento importante para realizar un programa de mantenimiento preventivo, es hacer inspecciones planeadas y periódicas para descubrir y corregir las condiciones desfavorables; parte del programa depende de las inspecciones y sus obligaciones relacionadas de adaptación y reparación. Las inspecciones son costosas en mano de obra y en tiempo de parada de equipos, sin embargo, siempre será menor que si produce una falla. A continuación, se enumeran algunas de las ventajas que se obtienen al aplicar un buen programa de mantenimiento preventivo:

- Disminuye el tiempo de parada de equipos.
- Disminuye el pago de tiempo extra al personal.
- Menor número de reparación a gran escala.
- Menor número de repetitividad en las reparaciones.
- Disminuye los costos por reparación.
- Mejor control de existencias de repuestos en almacén.
- Mayor seguridad industrial de los trabajadores.
- Menor costo unitario de producción.

(Jiménez & Vanegas, 2003)

6.2 Mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo surgió como una alternativa de reducir los inconvenientes que se presentan en el mantenimiento correctivo, en modo de trabajo de este mantenimiento es realizando controles periódicos o continuos de variables de estado del sistema y su comparación con valores obtenidos en condiciones normales, ayudándonos a determinar el momento en que se debe producir la intervención del mantenimiento. (Mejía, 2009)

6.2.1 Introducción del mantenimiento predictivo

El mantenimiento predictivo puede ser considerado como parte de la técnica del mantenimiento preventivo, la diferencia está en que debido a la tecnología utilizada, por las máquinas cada vez más sofisticadas y automáticas e instrumentos de medición muy modernos, da la posibilidad de obtener datos de los diferentes parámetros que se presentan, en la operación del equipo, los datos así obtenidos, pueden ser procesados por computadoras y dar reportes o accionar alarmas e inclusive parar el equipo evitando daños mayores.(Jiménez & Vanegas, 2003)

A continuación se detalla las ventajas del mantenimiento predictivo.

- Se obtiene reducción de tiempo al momento de realizar el mantenimiento.
- lleva a cabo el mantenimiento sin alterar el normal funcionamiento de los equipos.
- Facilita el análisis de las averías.
- Permite el análisis estadístico del sistema.
- Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.

Dentro del campo del mantenimiento preventivo podemos mencionar los siguientes tipos como se muestra en la tabla 6.1:

Tabla 6.1: Tipos de mantenimiento predictivo

Análisis de vibraciones	El interés en este tipo de mantenimiento es la identificación de amplitudes predominales de las vibraciones para determinar las causas de la vibración, y la corrección del problema que estas representan.
Análisis por ultrasonido	Este método consiste en detectar las ondas de sonido de baja frecuencia producidas por los equipos que no son perceptibles al oído humano. Estas ondas son producidas por mecanismos rotantes, fugas de fluido, pérdida de vacío y arcos eléctricos.
Análisis de lubricantes	Es una técnica aplicable a transformadores y a equipos rotativos, suministra numerosa información que se puede utilizar para diagnosticar el desgaste interno del equipo y estado del lubricante.
Termografía infrarroja	La termografía infrarroja consiste en obtener una imagen a partir de radiación infrarroja invisible al ojo humano, emitida por objetos. Para este tipo de análisis se utiliza una cámara termográfica, que produce una imagen con colores que refleja la distribución de temperaturas.

Fuente: El autor.

6.2.2 Metodología

Para la toma y valoración periódica de las variables de estado de los equipos, es necesario el apoyo de medios físicos (hardware), medios de ordenación, organización y gestión (software) y medios humanos. Los medios físicos, consisten en dispositivos para la captura, registro, almacenamiento y manejo de los datos obtenidos. Los medios de ordenación y organización son los programas que nos permiten manejar los datos captados. Y los medios humanos, es el personal que es responsable del mantenimiento general, personal especialistas en el mantenimiento predictivo y personal de medida, que es la encargada de realizar las mediciones. (Mejía, 2009)

PARTE II APORTACIONES

CAPÍTULO 7

DIAGNÓSTICO DE FALLOS POR VIBRACIÓN

Lo motores eléctricos asíncronos presentan fallas por diferentes motivos, dentro de los cuales detallaremos los principales relacionados a este tipo de maquinarias. En cada uno de los fallos se presentan un espectro característico del problema que generan las vibraciones.

7.1 Fallos por vibraciones

- El desequilibrio dinámico es una de los casos más frecuentes de desbalanceo y se desarrolla en el rotor de los motores de inducción, el cual provoca que el eje principal de inercia de la pieza desbalanceada no sea paralelo al eje de rotación y no pasa por el centro de gravedad de la pieza. El balanceo se realiza colocando contrapesos en dos planos perpendiculares al eje de rotación y con posiciones angulares distintas como se observa en la figura 7.1.

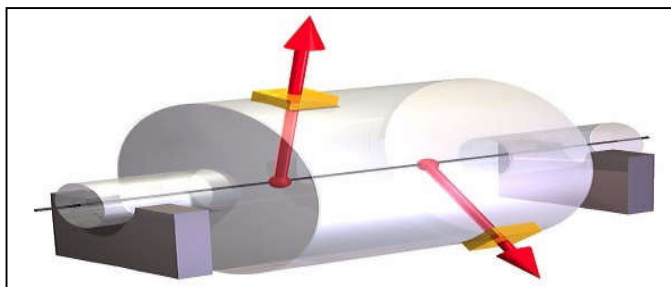


Figura 7.1: balance dinámico de rotor

Fuente: Balacan, 2018

A continuación, en la figura 7.2 observamos el espectro que se presenta al realizar las mediciones del análisis, donde 1X RPM domina el espectro.

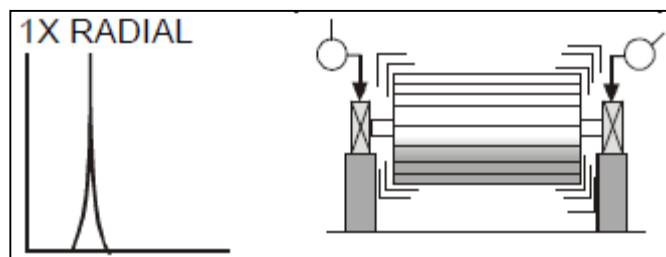


Figura 7.2: Espectro de desequilibrio dinámico

Fuente: kbateck, 2018

- La holgura o soltura mecánica se indica por medio de un espectro de vibración, la cual se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las partes originando muchos armónicos debido a la respuesta no lineal de las partes sueltas a las fuerzas dinámicas del rotor. Este problema de soltura se debe a que el aro exterior del rodamiento está flojo en su caja, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje, a un claro excesivo en cojinetes planos y rodamiento, etc.

Con frecuencia las mediciones de la soltura son inestables y puede variar entre lectura y lectura, sobre todo si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro. Este tipo de problema se lo puede solucionar realizando ajuste en partes sueltas, en el caso de desgaste de rodamientos se debe realizar un cambio y si el diámetro de la caja donde se asienta el rodamiento es muy grande este se debe corregir soldando y rectificando.

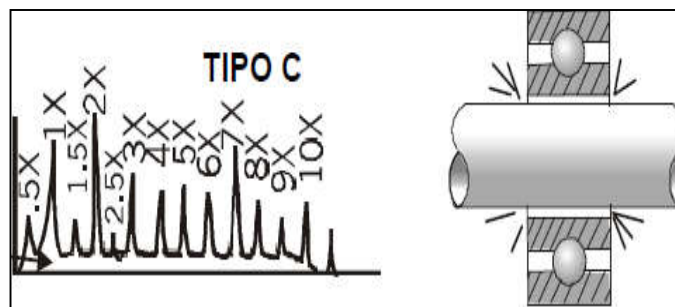


Figura 7.3: Espectro reflejado por holgura mecánica
Fuente: Scribd, 2018

En la figura 7.3 observamos el piso de ruido elevado que indica la holgura, además se debe tener en cuenta que la holgura con frecuencia provoca múltiples sub-armónicas a exactamente $\frac{1}{2}$ ó $\frac{1}{3}$ RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).

- El espectro producido por rozamiento del rotor es similar al de holgura mecánica, se manifiesta cuando las partes rotativas tocan los componentes estacionarios. El contacto puede ser a lo largo de toda la revolución o puede ser puntual.

Normalmente se producen una serie de frecuencias, las cuales por lo general excitan una o más resonancias. A menudo excitan sub-armónicas de 1X ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{n}$), dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor.

A continuación, en la figura 7.4 se observa el espectro producido por rozamiento del rotor del rotor.

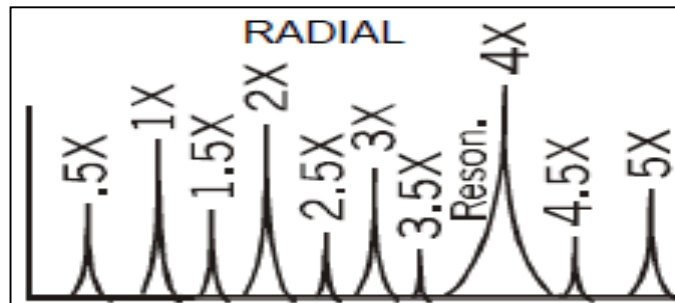


Figura 7.4: Espectro producido por rozamiento del rotor
Fuente: technicalassociates, 2018

- Los problemas ocasionados por rodamientos defectuosos se pueden presentar en 4 etapas de daño, en la figura 7.5 observamos los componentes de un rodamiento: pista interior o aro interno, jaula, elementos rodantes y pista exterior o aro externo.

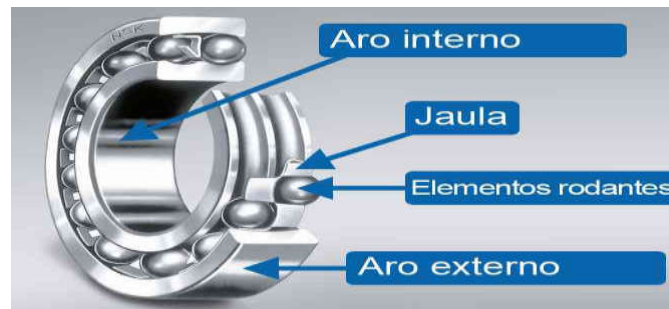


Figura 7.5: Componentes de un rodamiento
Fuente: Partesdel, 2018

Los espectros por defectos en la pista exterior se caracterizan por presentar picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior como se observa en la figura 7.6.

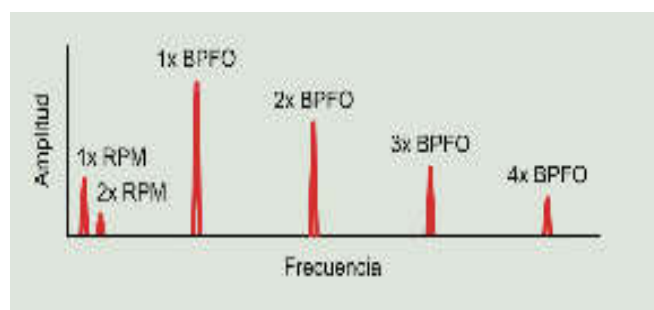


Figura 7.6: Espectro por vibración de pista exterior de rodamiento
Fuente: Power-MI, 2018

En la figura 7.7 se observa el espectro provocado por daño de la pista interior donde presentan varios picos armónicos de la frecuencia de deterioro (normalmente entre 8 y 10 armónicos de la BPFI) modulados por bandas laterales a 1x RPM.

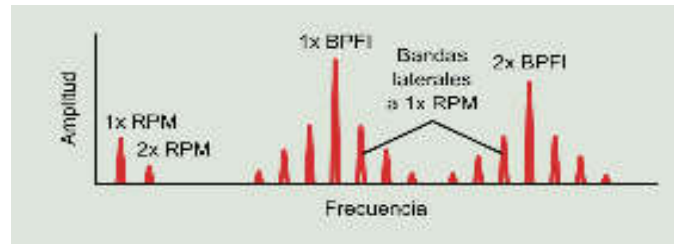


Figura 7.7: Espectro por defecto en pista interior
Fuente: Power-MI, 2018

El fallo en los elementos rodantes muestra en los espectros las frecuencias de deterioro de los elementos giratorio (BSF). El armónico de mayor amplitud en la mayoría de casos indica el número de bolas deterioradas, los defectos de pista suelen acompañar a estos. Lo podemos observar en la figura 7.8.

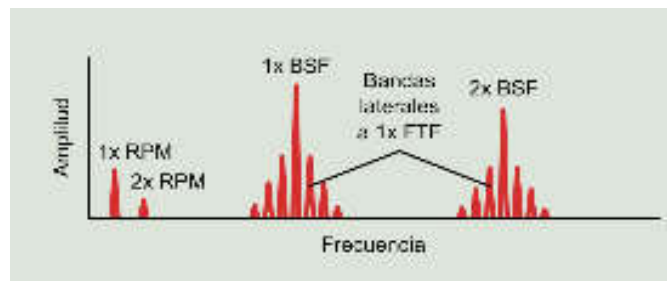


Figura 7.8: Espectro por defecto de elementos rodantes
Fuente: Power-MI, 2018

El defecto de jaula a menudo va acompañado por defectos de las pistas y la frecuencia de la jaula modula a una de estas frecuencias de deterioro de pista dando lugar a suma de frecuencias. El espectro de frecuencia de deterioro de jaula son los que se observan en la figura 7.9.

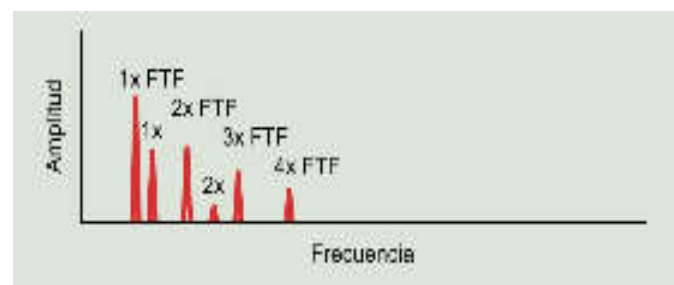


Figura 7.9: Espectro por defecto de la jaula de rodamientos
Fuente: Power-MI, 2018

Todos los problemas presentados en los rodamientos se analizan mediante una las fórmulas matemáticas que se detallan a continuación:

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPMBPFO = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPM$$

$$BSF = \frac{P_{db}}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 \cos\theta \right) \times RPMFTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPM$$

Donde:

- BPFI = Frecuencia de la Pista Interna
- BPFO = Frecuencia de la Pista Externa
- BSF = Frecuencia de Giro de Bola / Rodillo
- FTF = Frec. Fundamental de la Jaula.
- Nb = Número de Bolas o Rodillos
- Bd = Diámetro de Bola / Rodillo (pulg. o mm)
- Θ = Ángulo de Contacto (grados)

- Los problemas ocasionado por la excentricidad del estator ocasiona un entrehierro irregular estacionario entre el rotor y estator, el entrehierro en los motores de inducción no deben exceder más del 5%, estos problemas en el estator producen una alta vibración a 2X la frecuencia de la línea eléctrica.($2F_L$) tal como se muestra en la figura 7.10. Uno de los motivos por los que se puede dar un rotor excéntrico son las patas suaves o bases torcidas.

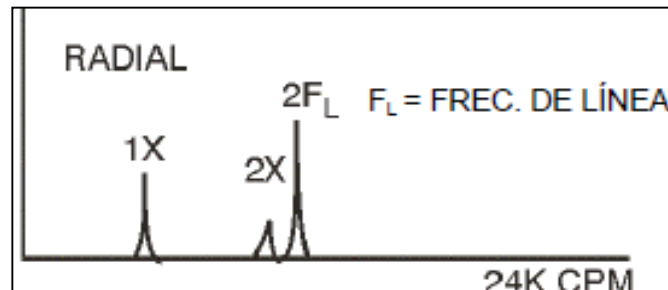


Figura 7.10: Espectro producido por excentricidad del estator.
Fuente: Edoc, 2018

Problemas de rotor excéntrico ocasiona entre el estator y rotor un entrehierro variable, esto genera una vibración pulsante. En lo general para separar $2F_L$ y la velocidad de giro más cercana es necesario un espectro de "zoom". Un entrehierro variable debido a flexiones mecánicas es el efecto de una pata suave o un deslizamiento.

Tal como se observa en la figura 7.11, el rotor excéntrico genera $2F_L$ rodeado por bandas laterales de frecuencias de paso de polos (F_p).

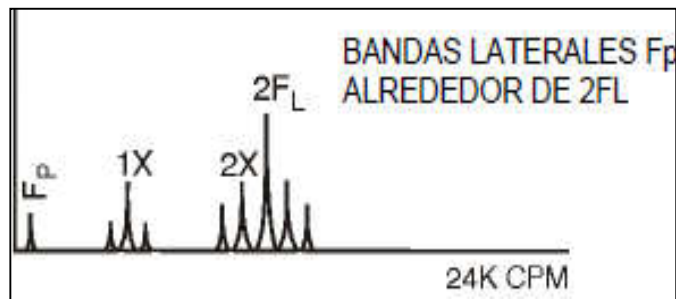


Figura 7.11: Espectro producido por un rotor excéntrico.
Fuente: Scribd, 2018

- La ruptura o agrietamiento de barras en el rotor o anillos de corto circuito, uniones en mal estado entre las barras del rotor y los anillos de cortocircuito o laminaciones en el rotor ocasionaran una alta vibración de velocidad de giro en 1X acompañado de bandas laterales de F_p . Adicional a este problema frecuentemente producirán bandas laterales F_p las cuales se presentarán alrededor de la segunda, tercera, cuarta y quinta armónica de velocidad de giro tal como lo podemos observar en la figura 7.12.

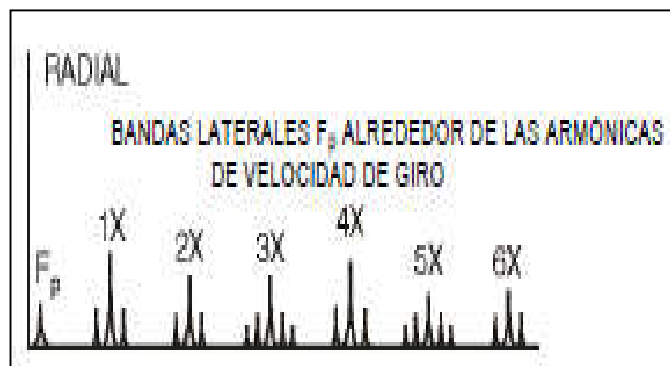


Figura 7.12: Espectro por ruptura de barra en el rotor
Fuente: Scribd, 2018

- Los problemas de por conectores flojos o pérdida de fase dan como consecuencia que el voltaje disminuya y la corriente aumento al punto en el que motor pueda quemarse. En el análisis de vibración esto genera una excesiva en la frecuencia de línea de $2X(2F_L)$, la misma que presentara bandas laterales alrededor de esta con un espacio de $1/3 F_L$.

El espectro producido por un cable roto o fase suelta se observa en la figura 7.13.

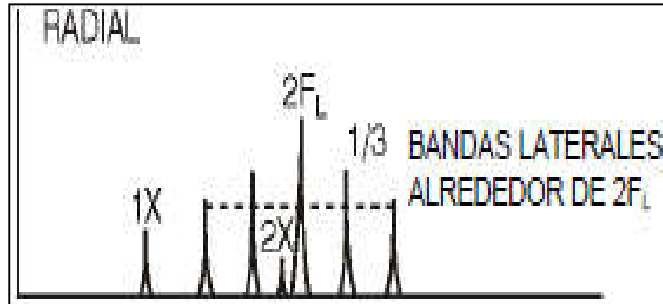


Figura 7.13: Espectro ocasionado por conector suelto
Fuente: Scribd, 2018

- La pata coja o pata suave es un fenómeno que se produce cuando la fundación sobre la cual se ha montado la maquinaria sufre deformación o cuando la base o estructura de la máquina se flexiona debido a que se afloja un perno de sujeción lo que causa que la base se levante más de .002 - .003 pulgadas aproximado.

Este problema no siempre causará un gran aumento de vibración en el equipo, sin embargo, puede darse el caso en que la pata coja o suave perjudique el entrehierro o alineación del motor.

En la figura 7.14 podemos observar que con frecuencia la pata suave o pata coja afecta a la vibración a $1X$ RPM, pero también puede verse afectada en la frecuencia de $2X$, $3X$.

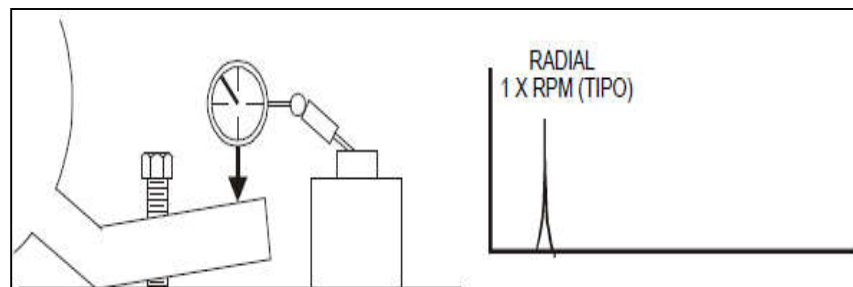


Figura 7.14: Espectro provocado por pata coja.
Fuente: Scribd. 2018

7.2 Pruebas de vibraciones

A continuación, observaremos el registro y análisis de vibraciones de un equipo rotatorio de un planta industrial.

Para cada equipo se presenta una tabla de datos con los niveles de vibración total, así como un dibujo esquemático con la ubicación de los puntos de la toma de registro,

el diagnóstico y las recomendaciones junto con el gráfico de espectro de frecuencias o de tendencias más representativos de la condición del equipo.

Los equipos fueron analizados según la norma ISO 10816-3 (motores mayor a 300KW), junto con la ISO 14694 para motores de potencias menores a 300KW.

En la tabla 7.1 a continuación se muestra un esquema de la norma:

Tabla 7.1: Esquemas de normas ISO utilizado para medición

Velocidad	in/s rms										
	mm/s rms										
10-1000 Hz r > 600 rpm											
2-1000 Hz r > 120 rpm											
0,43	11										
0,28	7,1										
0,18	4,5										
0,14	3,5										
0,11	2,8										
0,09	2,3										
0,06	1,4										
0,03	0,71										
			Base	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible
Tipo de máquina			Bombas > 15 kW flujo radial, axial o mixto				Tamaño medio 15 kW < P ≤ 300 kW		Grandes máquinas 300 kW < P < 50 MW		
			Motor integrado		Motor separado		Motores 160 mm ≤ H < 315 mm		Motores 315 mm ≤ H		
Grupo			Grupo 4		Grupo 3		Grupo 2		Grupo 1		
A			Máquina nueva o reacondicionada				C		La máquina no puede operar un tiempo prolongado		
B			La máquina puede operar indefinidamente				D		La vibración está provocando daños		

Fuente: ISO, 2014 .

En la figura 7.14 se observa el esquema de un motor acoplado a un ventilador por medio de un reductor.

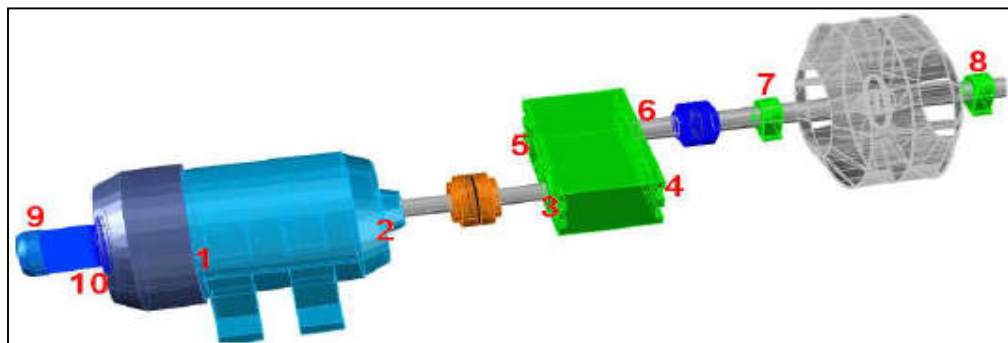


Figura 7.14: Esquema de motor acoplado a ventilador.

Fuente: Elaboración propia, 2018

En la tabla 7.2 se detalla las mediciones realizadas en dos diferentes fechas mostrando el estado de los componentes.

Tabla 7.2: Indicadores de medición

Location	06-09-17	12-10-17	Units	PRECAUCION	ALERTA	PELIGRO
Valores de vibración total						
PUNTO 1 - Horizontal	1.158	1.285	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 1 - Vertical	1.102	1.311	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 1 - Axial	1.101	1.122	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 2 - Horizontal	1.051	1.409	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 2 - Vertical	1.07	1.806	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 2 - Axial	1.09	1.123	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 3 - Horizontal	1.459	1.899	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 3 - Vertical	0.6861	0.6326	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 3 - Axial	8.3	1.908	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 4 - Horizontal	1.403	0.8592	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 4 - Vertical	1.123	1.286	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 4 - Axial	1.465	1.2	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 5 - Horizontal	1.72	1.25	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 5 - Vertical	0.5698	0.9885	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 5 - Axial	5.946	3.535	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 6 - Horizontal	0.9628	0.9868	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 6 - Vertical	0.915	0.7044	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 6 - Axial	1.929	2.452	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 7 - Horizontal	0.8552	0.9946	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 7 - Vertical	0.4407	0.532	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 7 - Axial	1.967	1.938	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 8 - Horizontal	1.396	1.45	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 8 - Vertical	0.2887	0.7489	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 8 - Axial	1.286	1.088	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 9 - Horizontal	7.519	8.273	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 9 - Vertical	6.528	6.425	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 9 - Axial	8.64	8.825	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 10 - Horizontal	3.765	3.773	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 10 - Vertical	3.025	3.261	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1
PUNTO 10 - Axial	5.378	5.406	mm/s RMS	2.3	4.5	7.1

Fuente: El autor.

7.3 Análisis de las pruebas

Luego de realizar mediciones de vibración en los diferentes puntos de un motor que transmite a un ventilador por medio de un reductor basado en normas ISO podemos diagnosticar la condición de los componentes del equipo.

El equipo muestra niveles de vibración total elevados en el ventilador de enfriamiento, señal de la presencia de desbalance y una leve soltura mecánica en la base. Adicionalmente, se presenta elevados valores de vibración a alta frecuencia en reductora y en el motor, señal de desgaste de los rodamientos en estas posiciones.

Se recomienda constatar el torque de ajuste de los pernos de sujeción y rigidez de la estructura de soporte del ventilador de enfriamiento. Revisar la lubricación en el motor principal y los puntos de la reductora, además de revisar el estado de los engranes. Si la vibración persiste realiza el cambio de los rodamientos.

En la tabla a continuación en la tabla 7.3 se muestran los valores a considerar en cuanto a variación en los niveles de vibración, en cada uno se puede observa el porcentaje de variación.

Tabla 7.3: Análisis de valores considerables de medición

Análisis de valores medidos				
Puntos tomados	V1 medido	V2 medido	%	Comentarios
Punto 3 Axial	8,3	1,908	-335%	Se cambia rodamiento de la caja reductora disminuyendo el valor de vibración
Punto 5 Axial	5,94	3,535	-68%	En la siguiente medición se observa menos vibración en este punto, esto a causa de los cambios en ciertos componentes
Punto 6 Axial	1.929	2.452	21%	Cambio de condición en uno de los rodamientos de la caja reductora
Punto 9 Horizontal	7,51	8,27	9%	Se detecta valores de vibración elevados en rodamientos del motor, lo que amerita cambio urgente
Punto 9 Vertical	6.528	6.425	-2%	
Punto 9 Axial	5.378	5.406	1%	
Punto 10 Horizontal	3.766	3.773	0,19%	Valores elevados de vibración en la cajera de la tapa izquierda del motor, aun es tolerable pero si no se corrige provocara graves daños
Punto 10 Vertical	3.025	3.261	7%	
Punto 10 Axial	5.378	5.406	1%	

Fuente: El autor.

CAPÍTULO 8

DETERMINACIÓN DE FALLOS POR DESALINEACIÓN

Los principales problemas de vibración que se genera en los motores asíncronos son a causa de una falta de alineación, la cual generara una serie de daños en los componentes del motor, provocando paradas intempestivas, aumento de costos de reparación y hasta puede ocasionar el daño completo del equipo.

Dentro del campo de la alineación encontraremos casos de desalineación de ejes paralelos, desalineación de ejes angulares y la desalineación de poleas.

8.1 Determinación de desalineamiento

- La vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento es lo que caracteriza la desalineación angular. Esta vibración axial será igual de alta en 1X como en 2X RPM. Sin embargo, es posible que 1X, 2X ó 3X dominen. Esto puede ser también síntomas de problema del acoplamiento.

La desalineación angular critica puede presentar mucho armónico de 1XRPM, estos armónicos múltiples no cuentan con un piso de ruido elevado en los espectros a diferencia de la holgura mecánica.

En la figura 8.1 observamos un motor totalmente desalineado angularmente junto con su espectro.

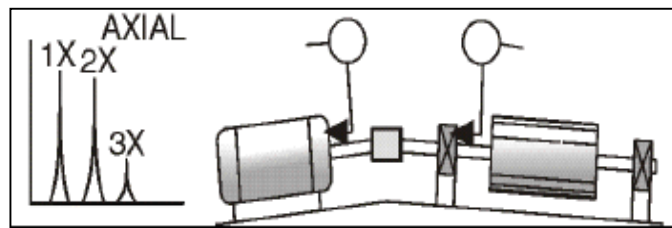


Figura 8.1: Espectro de desalineamiento angular.
Fuente: Motortico, 2018

- Las características de vibración de la desalineación paralela son parecidas a la desalineación angular, pero esta presenta una vibración radial alta, misma que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Muy a menudo 2X es mayor que 1X pero la altura relativa a 1X está dispuesta por el tipo de acoplamiento. Esto lo podemos observar en la figura 8.2.

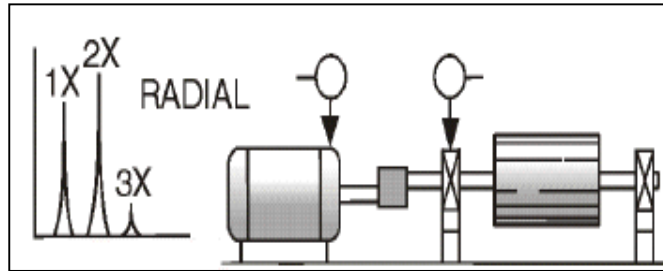


Figura 8.2: Espectro por desalineamiento paralelo
Fuente: Azimadli, 2018

Cuando la desalineación radial o axial es crítica pueden generar picos de amplitud altos en armónicos muchos más altos (4X-8X), hasta una serie de armónicos de alta frecuencia parecidos en apariencia a la holgura mecánica sin presentar piso de ruido elevado. El tipo de acoplamiento y el material frecuentemente tienen una gran influencia en el espectro total.

- El desalineamiento de poleas/bandas se caracteriza por un chillido el cual se incrementó con el aumento de las revoluciones provocando un desgaste prematuro en las bandas, poleas y rodamientos. Este desalineamiento produce una alta vibración en 1X RPM, en su mayoría en la dirección axial.

La proporción de amplitudes entre el equipo impulsor y el impulsado dependerá del lugar donde se tomen las lecturas, así como la masa y rigidez de la estructura.

En la figura 8.3 se observa el espectro de vibración producido por un desalineamiento de poleas, así como los tipos de desalineamiento de poleas.

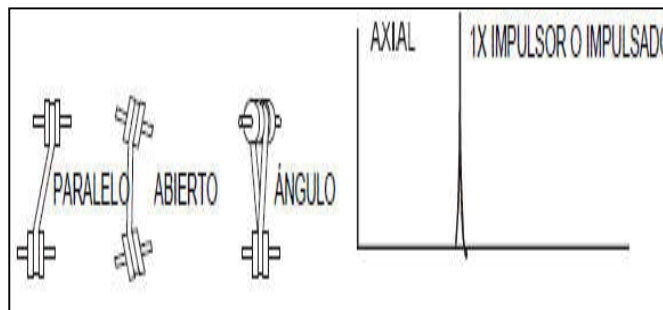


Figura 8.3: Tipo de desalineamiento de polea y su espectro.
Fuente: Azimadli, 2018

El proceso de mediciones por medio de alineadores láseres se realiza por medio de la instrumentación de recolección de datos.

En la figura 8.4 se observa las diferentes opciones que se muestran para realizar la alineación como paralela, angular o pata coja, esto se seleccionara de acuerdo a la observaciones realizadas por el experto en alineación.



Figura 8.4: Imagen principal de alineador Fixtulasar
Fuente: Fixtulasar, 2018

Una vez seleccionado el tipo de desalineamiento, el equipo solicitara diferentes tipos de medidas como la distancia entre los láseres, distancia entre acople a laser, distancia entre el laser y la pata del equipo más próxima, distancia entre ambas patas del equipo y tres diferentes posiciones de medidas a -90° , 0° y 90° .

En la figura 8.5 a continuación se observa la pantalla del equipo donde solicita el ingreso de las medidas:

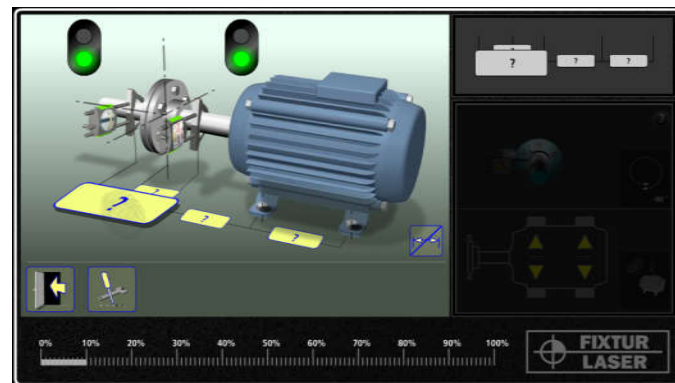


Figura 8.5: Pantalla para ingreso de medidas
Fuente: Fixtulasar, 2018

En base a estas medidas otorgadas por la persona encargada de realizar la alineación, el equipo calculará el nivel de desalineamiento que tendrá la máquina respecto al eje de referencia y así mismo dará las indicaciones para corregir el problema. En la figura 8.6 se observa la desalineación paralela en un 0.56mm.

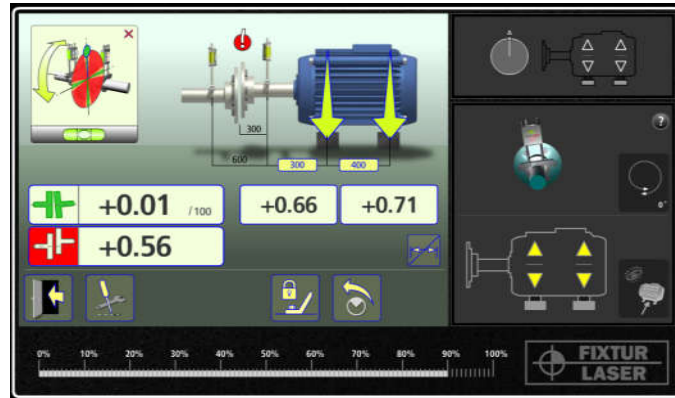


Figura 8.6: Pantalla de desalineamiento
Fuente: Fixtulas, 2018

En figura 8.7 a continuación se observa el resultado de la corrección del alineamiento:

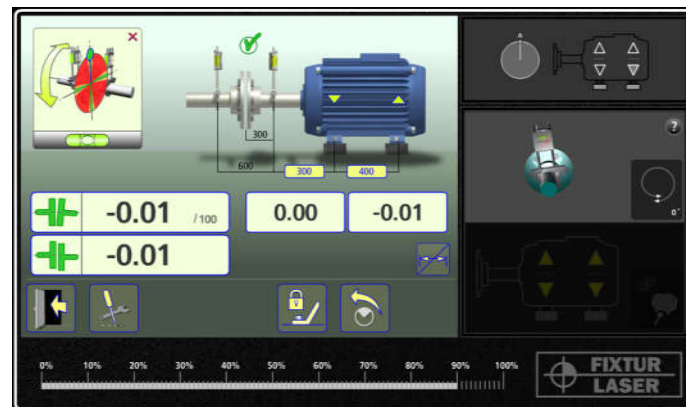










Figura 8.7: Pantalla final cuando el equipo está alineado
Fuente: Fixtulas, 2018

8.2 Análisis de un motor desalineado

Los valores del desalineamiento se obtienen mediante el instrumento recolector de información que emiten los láseres, el mismo instrumento es quien se encargara de proporcionar las medidas necesarias para que los equipos queden perfectamente alineados, la cual se realizara en la mayoría de los casos con lanas metálicas para poder llevar los ejes tanto del impulsor como del impulsado a un punto en que los ejes sean colineales.

En la tabla 8.1 observamos los resultados de una de las pruebas de alineación en un motor a 1720 rpm:

Tabla 8.1: Pruebas de alineación en motor a 1720 rpm

Resultados de las pruebas alineación del motor 1720 rpm							
Valores nominales para motores de (1000-2000)rpm (mm)		Valores medidos del motor desalineado (mm)		Valores medidos del motor alineado (mm)		Mejora (%)	
Angular	Paralelo	Angular	Paralelo	Angular	Paralelo	Angular	Paralelo
							
0,08	0,10	-0,08	-0,01	0,01	-0,08	7,00%	10,13%
0,08	0,10	-1,29	0,47	0,05	0,02	25,74%	23,29%
Total (%)						32,74%	33,41%

Fuente: El Autor.

Se Observa una considerable mejora en cuanto de niveles de alineación referente a la posición inicial de desalinemainto en la que se encontraba en equipo.

CAPÍTULO 9

IMPORTANCIA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO

El mantenimiento de los motores en una fábrica es un factor de vital importancia para estos y para la sostenibilidad de la empresa durante el tiempo.

El mantenimiento predictivo lo podemos definir como el conjunto de pruebas no destructivas que se llevan a cabo periódicamente sin la necesidad de desarmar los equipos. Algunas pruebas se las realiza con el equipo en servicio bajo carga nominal de trabajo y otras con el equipo detenido por un periodo máximo de 10 minutos.

Su principal objetivo es anticiparse al fallo funcional del equipo sin necesidad de un mantenimiento preventivo para determinar el estado de los componentes del equipo.

De las pruebas se obtienen datos como velocidad, nivel de vibración, temperatura, tiempo de respuesta, resistencia, nivel de aislamiento, viscosidad entre otros. Estas pruebas son comparadas con estándares internacionales.

A continuación, en la figura 9.1 se observa la curva de condición de un motor, en la cual el primer cambio es la condición de la máquina seguido por vibraciones, ruido, aumento de temperatura lo que provocará humo hasta llegar al punto de un paro de emergencia.

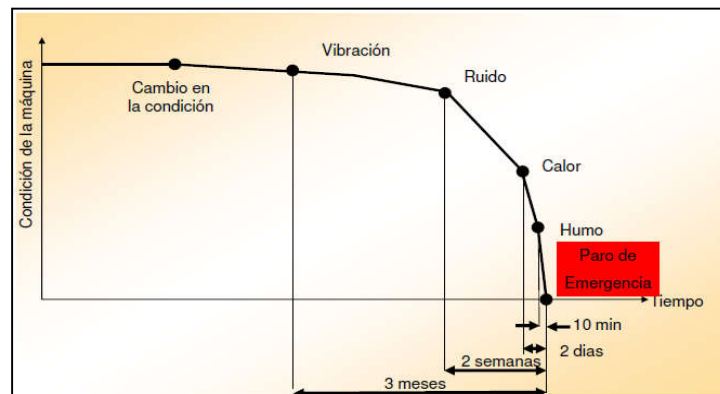


Figura 9.1: Tiempo de cambio de las condiciones de un motor
Fuente: Ionotaenergetica, 2018

El mantenimiento debe realizarse si y solo si es necesario, en la figura 9.2 observamos la gráfica de la salud de una máquina donde la zona de operación

aceptable está dentro de lo que comprende el mantenimiento preventivo y predictivo, si no se realizan este tipo de mantenimiento provocara un fallo grave al equipo.

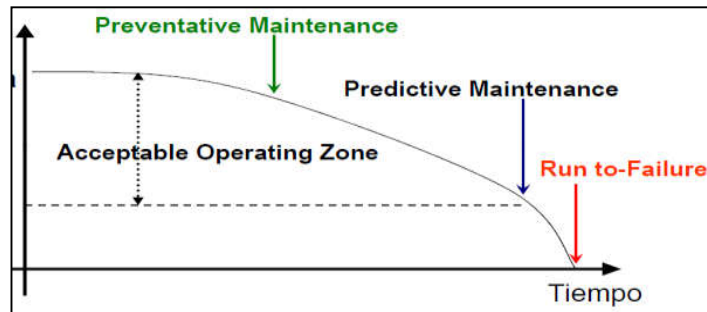


Figura 9.2: Gráfica de salud de la máquina
Fuente: Nationalinstrument, 2018

Sin embargo, aunque realicemos mantenimiento preventivo para evitar daños catastróficos que puedan provocar gastos excesivos de reparación o cambio del equipo, este tipo de mantenimiento sigue siendo costoso en comparación al mantenimiento basado en la condición, la economía entre estos dos tipos de mantenimiento lo podemos observar en la figura 9.3

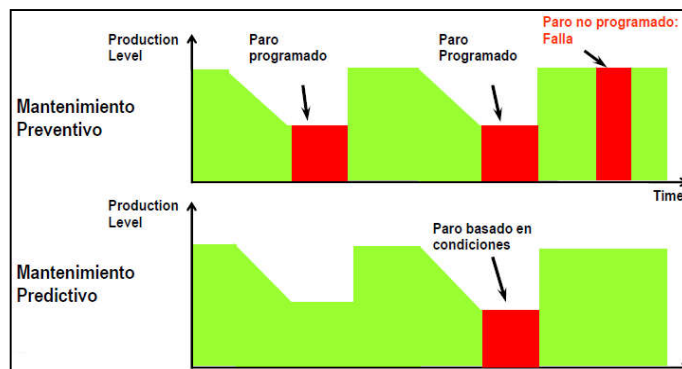


Figura 9.3: Economía de mantenimiento preventivo vs predictivo
Fuente: Nationalinstrument, 2018

El mantenimiento predictivo contempla 3 etapas:

- a) Detección
- b) Identificación
- c) Corrección

En conclusión, un programa de mantenimiento predictivo (PMP) consiste en detectar el principio de una falla futura y a la vez ofrece la herramienta para analizar la causa del problema que se podría estar desarrollando, lo cual permite determinar el momento ideal para corregir el problema detectado.

Dentro de un plan de mantenimiento es de suma importancia determinar los costos que estos generan, en la tabla 9.1 continuación se observa los costos que se generan dentro de cada uno de los tipos de mantenimiento que se producen dentro de las industria.

Tabla 9.1: Cuadro comparativo de mantenimiento

Plan de mantenimiento de un motor asincrono													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Costos
Mantenimeinto preventivo													
Motor 1													\$ 12.000,00
Motor 2													\$ 12.000,00
Motor 3													\$ 12.000,00
Total													\$ 36.000,00
Mantenimeinto correctivo													
Motor 1													\$ 20.000,00
Motor 2													\$ 20.000,00
Motor 3													\$ 20.000,00
Total													\$ 60.000,00
Mantenimeinto predictivo													
Motor 1													\$ 7.000,00
Motor 2													\$ 7.000,00
Motor 3													\$ 7.000,00
Total													\$ 21.000,00

Fuente: El Autor.

En la tabla9.2 a continuación observamos el procedimiento que se lleva a cabo en cada tipo de mantenimiento, dentro del cual no se tiene contemplado el correctivo porque este solo se lleva a cabo cuando ocurre el daño.

Tabla 9.2: Cuadro de actividad de mantenimientos

Mantenimiento preventivo													
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	
Mantenimeinto preventivo - Motor 1													
Cambio de rodamientos													
Lubiración de motor													
Ajuste de piezas													
Cambio de empaques													
Limpieza de bornes													
Mantenimeinto predictivo - Motor 1													
Toma de Diagnostico													
Análisis de Información													
Acciones correctivas													

Fuente : El Autor.

Tabla 9.3: Etapas de un plan de mantenimiento

Etapas de un plan de mantenimiento preventivo	
1. Fijar metas y objetivos	Incrementar Disponibilidad de los equipo en un 60%. - Reducir los fallos en un 70%. - Mejorar la utilización de la mano de obra en un 70%.
2. Establecer un presupuesto	Se realiza teniendo en cuenta la frecuencia recomendada por el fabricante, costes de mantenimientos, fechas de revisión, etc
3. Maquina y equipo a incluir	Realizar un inventario de los equipos existentes. Es importante tener una ficha detallada en el ERP por cada uno de los equipos/máquinas que puedan ser objeto de mantenimiento.
4. Revisar los mantenimientos previos realizados	Si se ha realizado algún mantenimiento sobre los equipos, es importante revisarlos antes de empezar a planificar, ya que nos ayudará saber qué sistemas, equipos, responsables y repuestos se han utilizado, y por supuesto, en qué fecha se hicieron.
5. Consultar los manuales de los equipos	Es necesario conocer las especificación y recomendaciones de los fabricantes, así como los plazos de garantía. En los manuales encontramos la información que tenemos que introducir en el ERP, como la fecha límite de revisión, el tiempo de vida útil esperado, las recomendaciones de tipos de aceites o lubricantes a emplear, y por supuesto, las medidas de seguridad.
6. Obligaciones legales	Hace referencia a las normas que se deben cumplir para realizar los tipos de mantenimiento en una industria
7. Designar a los responsables	En el ERP debe mantenerse el fichero maestro de todos los operarios que participan en el plan de mantenimiento. Los técnicos se pueden clasificar en base a grupos y especialidades, teniendo así técnicos concretos que podrán realizar distintas intervenciones dependiendo de que pertenezcan a un grupo o especialidad.
8. Escoger el tipo de mantenimiento a realizar y planificarlo	A la hora de planificar el mantenimiento preventivo, hay que tener en cuenta: La frecuencia de la realización de los trabajos, Si lo trabajos se realizan con máquina en marcha o parada, La posibilidad de realizar rutas de inspección para observar el correcto funcionamiento de la maquinaria y anticiparse así a posibles anomalías, Analizar los recursos necesarios y la duración de los trabajos.
9. Ejecutar las tareas del plan	Es el momento de realizar las intervenciones que se han definido en el punto anterior.
10. Revisión del Plan. Análisis e información.	Un plan de mantenimiento preventivo ha de ser un programa activo, ha de ser revisado constantemente y se ha de ajustar tras revisar la información que nos den los informes.

Fuente: El autor.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1 Conclusiones

Todas las maquinas de rotación generan una vibración debido al movimiento rotacional, por lo cual es necesario realiza el monitoreo de la intensidad o magnitud de las vibraciones para poder determinar la severidad de las mismas. Debido a que cada uno de los elementos del motor produce vibraciones con una determinada frecuencia, es posible realizar una evaluación de las vibraciones en la maquinaria para establecer el elemento deficiente, analizando la fuerza de la vibración y predecir si un componente se encuentra próximo de someterse a un daño crítico. Este proceso se denomina análisis espectral en el cual el instrumento convierte la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante el algoritmo FFT.

Los principales problemas y más comunes en los motores asíncronos son a causa de una desalineación provocando desgaste en rodamientos y en caso severos un daño del eje tanto del impulsor como del impulsado. La desalineación en la transmisión por poleas genera un degaste prematuro en las poleas y las bandas.

En análisis de vibraciones se caracteriza como una parte fundamental del mantenimiento predictivo, debido a que con este análisis es posible determinar el estado de los componentes y así poder planificar la parada de la máquina para poder brindarle su respectivo mantenimiento. El estudio económico demuestra que el análisis de vibraciones dentro del mantenimiento predictivo se justifica debido a que las pérdidas que normalmente se producen por daños en el equipo por consecuente llevando a cabo un mantenimiento correctivo o los gastos que generan un mantenimiento preventivo en los que se cambian piezas que muchas veces no son necesarias son mucho mayores que los que cuesta implementar un plan de mantenimiento predictivo.

10.2 Recomendaciones

Es de suma importancia elaborar una base de datos de los equipos en los que se hayan realizado mediciones para que en futuras mediciones tener una tabla de referencia y comparación, esto servirá para poder determinar el cambio en el tiempo de cada uno de los componentes de la máquina y elaborar cuadros estadísticos que indiquen los porcentajes de variación. Para poder realizar estas mediciones es necesario y recomendable que el personal técnico encargado de realizar el análisis de vibraciones y la recolección de mediciones debe estar altamente capacitados y poseer experticia para poder realizar un buen diagnóstico.

Para poder realizar la implementación del análisis de vibraciones dentro del mantenimiento predictivo, este debe previamente pasar por etapas de preparación inicial del sistema lo cual tomara unos meses, debido al alto costo que tiene la implementación de un análisis de vibraciones, este debe justificarse económicamente respecto a los gastos que tiene la línea de producción de una fábrica al no poseerlo.

Contar con un plan de mantenimiento es de vital importancia ya que de esto dependerá la sostenibilidad de una empresa durante el tiempo, es mantenimiento adecuado de las maquinarias ayudara a que los equipo puedan trabajar por un tiempo prolongado evitando paradas repentinas y pérdidas económicas sumamente elevadas.

Los transductores utilizados para la medición de las vibraciones presentan rangos de frecuencias diferentes, que pueden afectar en el diagnóstico de las vibraciones. Si tuviéramos el caso de tener que medir vibraciones con el transductor de proximidad y las vibraciones presentan frecuencias superiores a 10 KHz, el transductor no detectará estas vibraciones debido a que el rango de frecuencias del transductor de proximidad es de 1 a 10 KHz. Es por esto que se debe de tomar en cuenta el tipo de transductor que queremos utilizar para realizar las mediciones, esto dependerá del tipo de falla que queremos detectar, ya que cada componente de la máquina presenta un rango de frecuencias de vibraciones cuando existen fallas.

BIBLIOGRAFIA

<http://www.sites.google.com>

Ambid, R. (28 de Noviembre de 2016). *Blog Seas: desequilibrios en máquinas detectados en señales de vibraciones*. Obtenido de <http://www.seas.es>

AzimaDLI. (12 de julio de 2018). *Holgura de rodamiento*. Obtenido de <http://www.azimadli.com>

Bibing. (1 de Agosto de 2018). *Análisis modal operacional: teoría y práctica*. Obtenido de Cap. 3: Transductores de vibración y acondicionadores de señal: <http://www.bibing.us.es>

Chin, J., Cuj, S., Canche, J., & Ek, I. (7 de Junio de 2010). *Vibraciones mecánicas, amortiguadas y sin amortiguamiento*. Obtenido de <http://www.es.scribd.com>

Concepto de vibraciones. (15 de julio de 2018). Obtenido de <http://www.bibing.us.es>

Demáquinasyherramientas. (26 de Septiembre de 2011). *Alineador láser de ejes*. Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com>

Demáquinasyherramientas. (1 de agosto de 2018). *Alineador láser de ejes*. Obtenido de <http://www.demaquinasyherramientas.com>

EcuRed. (10 de Julio de 2018). *Motor asincrónico*. Obtenido de <http://www.ecured.cu>

EcuRed. (7 de Julio de 2018). *Motor eléctrico trifásico*. Obtenido de <http://www.ecured.cu>

INDAFACE. (27 de 07 de 2018).
<https://queuedogde.wordpress.com/2013/04/16/motor-asincrono-por-tesla/>.
Obtenido de <https://queuedogde.wordpress.com/2013/04/16/motor-asincrono-por-tesla/>: <https://queuedogde.wordpress.com/2013/04/16/motor-asincrono-por-tesla/>

Izquierdo, V. (10 de Julio de 2018). *Tipos de alineación*. Obtenido de <http://www.linkedin.com>

Jiménez, B., & Vanegas, R. (13 de Noviembre de 2003). *Mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo de los bancos de motores de inducción y síncronos del laboratorio de máquinas eléctricas de la C.U.T.B.* . Obtenido de <http://www.biblioteca.unitecnologica.edu.co>

MANTENIMIENTO, I. D. (28 de 07 de 2018).
<http://ingenieriadelmantenimiento.com>. Obtenido de <http://ingenieriadelmantenimiento.com>:

<http://ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/8-objetivos-de-mantenimiento/8-el-plan-de-mantenimiento>

Mejía, J. (2 de Octubre de 2009). *Biblioteca Universidad de San Carlos de Guatemala*. Obtenido de

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0158_ME.pdf:

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0158_ME.pdf

Molero, B. (22 de Enero de 2016). *Iberisa*. Obtenido de

<http://www.iberisa.wordpress.com>

Pérez, P., & Bermeo, V. (Mayo de 2013). *Universidad Politécnica de Madrid:*

Estudio de la vibración en baja frecuencia de motor eléctrico. Obtenido de

<http://www.oa.upm.es>

ProfeToloka. (23 de Octubre de 2014). *Funcionamiento del motor asíncrono*

trifásico. Obtenido de <http://www.profetoloka.com.ar>

Renovetec. (noviembre de 2013). *La elaboración del plan de mantenimiento*.

Obtenido de <http://www.renovetec.com>

RIVERA, N. R. (25 de 07 de 2018).

<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/10561/1/Tesis%20I.M.%20273%20-%20Poaquiza%20Rivera%20Nelson%20Rodrigo.pdf>. Obtenido de

<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/10561/1/Tesis%20I.M.%20273%20-%20Poaquiza%20Rivera%20Nelson%20Rodrigo.pdf>:

<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/123456789/10561/1/Tesis%20I.M.%20273%20-%20Poaquiza%20Rivera%20Nelson%20Rodrigo.pdf>

Ruta, 4. (7 de Julio de 2018). *Tipos de motores eléctricos*. Obtenido de

<http://www.blog.reparacion-vehiculos.es>

SKF. (1 de agosto de 2018). *Alineación de poleas*. Obtenido de <http://www.skf.com>

Tecsup. (Julio de 29 de 2018). *Alineamiento de maquinaria industrial*. Obtenido de

<http://www.tecsup.edu.pe>

Vibraciones en motores de inducción. (12 de julio de 2018). Obtenido de

<http://www.carec.com.pe>

Voltimum. (4 de Junio de 2013). *El motor sincrónico trifásico. Parte I*. Obtenido de

<http://www.voltimum.es>

ANEXOS

Anexo 7.1. Tabla de referencia para el diagnóstico de las vibraciones

C. DESEQUILIBRIO DINÁMICO

El Desequilibrio Dinámico es el más común y es una combinación de desequilibrio de estático y de par. 1X RPM domina el espectro, y realmente requiere una corrección de 2 planos. Aquí, la diferencia de fase radial entre los apoyos internos y externos puede abarcar un rango de 0° a 180°. Sin embargo, la diferencia en fase de los apoyos horizontales será similar a la diferencia entre las fases verticales (±30°). Así mismo, en caso de que predomine el desequilibrio, una diferencia de fase de 90° aprox. resultará entre las lecturas horizontal y vertical de cada apoyo (±40°).

ROZAMIENTOS DEL ROTOR

Un rozamiento del rotor produce un espectro similar al de la Holgura Mecánica cuando las partes rotativas tocan los componentes estacionarios. El contacto puede ser parcial o a lo largo de toda la revolución del eje. Normalmente se genera una serie de frecuencias, que por lo general excitan una o más resonancias. Con frecuencia excitan sub-armónicas de 1X (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ..., 1/n), dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor. El rozamiento puede excitar muchas altas frecuencias (similar al ruido de banda ancha cuando un gis se pasa por el pizarrón). Puede ser muy serio y de corta duración si se debe a un eje que toca el metal babbit del cojinete plano. En el caso de cojinetes planos el problema se puede convertir en severo cuando se presenta rozamiento en toda la periferia del cojinete y el rotor se encuentra vibrando a la frecuencia de fatiga de aceite.

HOLGURA MECÁNICA

La Holgura Mecánica se indica a través de un espectro de vibración de Tipo A, B o C. El **Tipo A** se debe a una holgura/fragilidad Estructural de las bases de la máquina, de la placa base o del cimiento; también se debe a un mortero deteriorado, a pernos de sujeción sueltos en la base; y a la distorsión del armazón o de la base (i.e. pata suave). El análisis de fase puede revelar una diferencia de fase de aprox. 90° a 180° entre las lecturas verticales en el perno, en la base de la máquina, en la placa base y en la base en sí. El **Tipo B** por lo general se debe a pernos de soporte flojos, a fracturas en la estructura del armazón o en el pedestal del rodamiento. El **Tipo C** normalmente se genera a causa de un ajuste inadecuado entre las partes componentes originando muchas armónicas debido a la respuesta no lineal de las partes sueltas a las fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la forma de onda y un piso de ruido mayor en el espectro. Con frecuencia el Tipo C se debe a que el aro exterior del rodamiento está flojo en su tapa, a un rodamiento suelto y que da vueltas en su eje, a un claro excesivo en cojinetes planos y rodamientos, o por un impulsor suelto en su eje, etc. Con frecuencia la Fase del Tipo C es inestable y puede variar entre lectura y lectura, sobre todo si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro. A menudo, la Holgura Mecánica es altamente direccional y puede provocar lecturas notablemente diferentes si se comparan los niveles en incrementos de 30° en dirección radial en toda la caja del rodamiento. Además, tenga en cuenta que la holgura con frecuencia provoca múltiples sub-armónicas a exactamente 1/3 RPM (.5X, 1.5X, 2.5X, etc.).

OBSERVE EL PISO DE RUIDO ELEVADO QUE INDICA LA HOLGURA

RODAMIENTOS (4 Etapas de daño)

4 ETAPAS DE DAÑO DEL RODAMIENTO

ETAPA 1: Las primeras indicaciones de problemas en los rodamientos aparecen en las frecuencias ultrasónicas que oscilan entre 250,000 - 350,000 Hz; luego, a medida que se incrementa el desgaste, cae a aproximadamente 20,000 - 60,000 Hz (1,200,000 - 3,600,000 CPM). Estas son frecuencias evaluadas por el filtro Spike Energy (gSE), por HFD(g) y por el Pulso de Choque (dB). Por ejemplo, la energía de Spike Energy puede aparecer por primera vez a aproximadamente .25 gSE en la Etapa 1 (el valor real depende de la ubicación de la lectura y de la velocidad de giro de la máquina). La adquisición de espectros envolventes de alta frecuencia confirma si el cojinete se encuentra o no en la Etapa 1 de Daño.

ETAPA 2: Los defectos ligeros del rodamiento comienzan a "excitar" las frecuencias naturales (f_n) de sus componentes, que generalmente ocurren en un rango de 30K - 120K CPM. Dichas frecuencias naturales también pueden ser resonancias de las estructuras de apoyo del rodamiento. Las frecuencias de bandas laterales aparecen arriba y abajo del pico de frecuencia natural al final de la Etapa 2. La energía Spike Energy crece (por ejemplo, de .25 a .50 gSE).

ETAPA 3: Aparecen armónicas y frecuencias de defectos del rodamiento. A medida que el desgaste progresa, aparecen más armónicas de frecuencias de defecto y el número de bandas laterales crecen, tanto alrededor de éstas y de las frecuencias naturales del componente del cojinete. La energía Spike Energy continúa incrementándose (por ejemplo, de .5 a más de 1 gSE). En esta etapa por lo general el desgaste es visible y se puede extender a toda la periferia del cojinete, sobre todo cuando varias bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de frecuencias de defecto del rodamiento. Los espectros demodulados de alta frecuencia y envolventes ayudan a confirmar la Etapa III. **¡Reemplace los rodamientos ahora! (independientemente de las amplitudes de frecuencia defectuosas del rodamiento en los espectros de vibración).**

ETAPA 4: Hacia el final, incluso se afecta la amplitud 1X RPM. Crece, y normalmente causa el crecimiento de muchas armónicas de 1X. Las frecuencias naturales discretas de rodamientos y de componentes comienzan a "desaparecer" y se reemplazan con "piso de ruido" de alta frecuencia, de banda ancha y aleatorio. Además, las amplitudes tanto del piso de ruido de alta frecuencia y de Spike Energy pueden en efecto disminuir, sin embargo, justo previo al paro catastrófico, la energía Spike Energy y HFD por lo general crecen a amplitudes excesivas.

PANORAMA DE AVERÍA DOMINANTE

ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D
Región de defecto en rodamientos	Región de freq. naturales de comp. de rod.	Región de defecto en rod.	COMPONENTE ENERGÍA DE PERNO (HFD)
ETAPA 1			
ETAPA 2			
ETAPA 3			
ETAPA 4			

FRECUENCIAS DE DEFECTO DEL COJINETE:

$$BPFI = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPM$$

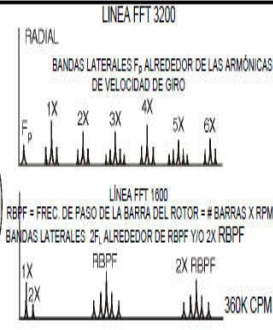
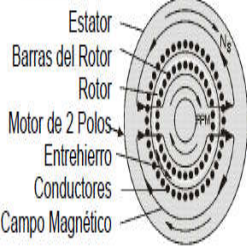
$$BPFO = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPM$$

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 (\cos\theta)^2 \right] \times RPM$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos\theta \right) \times RPM$$

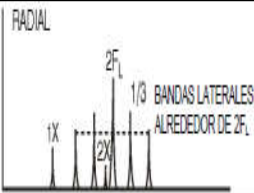
Donde:
 BPFI = Frecuencia de la Pista Interna
 BPFO = Frecuencia de la Pista Externa
 BSF = Frecuencia de Giro de Bola / Rodillo
 FTF = Frec. Fundamental de la Jaula.
 N_b = Número de Bolas o Rodillos
 B_d = Diámetro de Bola / Rodillo (pulg. o mm)
 θ = Ángulo de Contacto (grados)

C. PROBLEMAS EN EL ROTOR



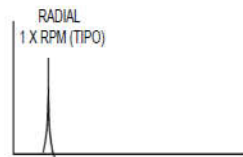
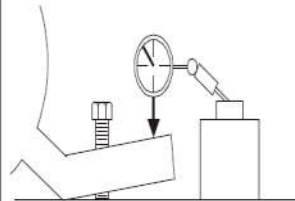
Las barras del rotor Rotas o agrietadas o anillos de corto circuito rotos o agrietados; uniones en mal estado entre las barras del rotor y los anillos de cortocircuito; o laminaciones del rotor en cortocircuito, producirán una alta vibración de velocidad de giro en 1X con bandas laterales de frecuencia del paso de polos (F_p). Además estos problemas a menudo generarán que las bandas laterales F_p estén alrededor de la segunda, tercera, cuarta y quinta armónica de velocidad de giro. Las barras del rotor abiertas o sueltas se indican mediante bandas laterales de frecuencia de línea 2X ($2F_1$) que rodean la frecuencia de paso de las barras del rotor (RBPF) y/o su armónica (RBPF = número de barras X RPM). A menudo causará niveles altos en 2X RBPF, con sólo una pequeña amplitud en 1X RBPF. La producción de chispas eléctricamente inducidas entre las barras sueltas del rotor y los anillos de sujeción mostrarán niveles altos en 2X RBPF (con bandas laterales $2F_1$); pero sin incremento o con un incremento muy pequeño en las amplitudes de 1X RBPF.

D. PROBLEMAS DE FASE (Conector suelto)



Los problemas de fase debido a conectores sueltos o rotos pueden causar una vibración excesiva en la frecuencia de línea de 2X ($2F_1$), la cual presentará bandas laterales alrededor de ésta, con un espaciado de 1/3 de la frecuencia de línea ($1/3 F_1$). Los niveles en $2F_1$ pueden exceder 1.0 pulg/seg. si no se corrigen. Éste es un problema en particular si el conector defectuoso sólo hace un contacto esporádico. Los conectores sueltos o partidos se deben reparar para prevenir un daño mayor.

PATA SUAVE, PATA RESORTE Y RESONANCIA RELACIONADA CON LA PATA



"Pata suave" es cuando la base o la estructura de una máquina se flexiona en gran medida cuando se alija un perno de sujeción y esto causa que la base se levante más de .002 - .003 pulgadas aproximadamente. Esto no siempre causa un gran incremento en la vibración. Sin embargo, puede suceder así en caso de que la pata suave afecte la alineación o el entrehierro del motor.

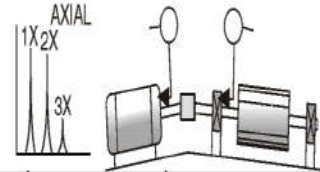
"Pata Resorte" puede causar una gran distorsión en la estructura y trae como resultado un incremento en la vibración, fuerza y tensión en la estructura, en la caja del rodamiento, etc. Esto ocurre cuando un perno de sujeción se aprieta en la pata resorte intentando así nivelar la base.

"Resonancia relacionada con la pata" puede causar incrementos drásticos en la amplitud de 5 a 15 veces o más, según se compara con la amplitud cuando se alija el perno (o la combinación de pernos). Al estar apretado, este perno puede cambiar de forma notoria la frecuencia natural de la pata o de la estructura de la máquina en sí.

La Pata Suave, la Pata resorte o la Resonancia Relacionada con la Pata, con frecuencia afecta la vibración a 1X RPM, pero también puede afectarla en la frecuencia de 2X, 3X, 2X F_1 en la frecuencia de paso de álabes, etc. (en particular la Resonancia Relacionada con la Pata).

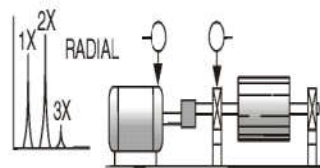
DESALINEACIÓN

A. DESALINEACIÓN ANGULAR



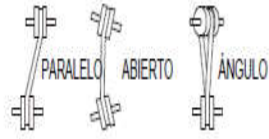
La Desalineación Angular se caracteriza por una vibración axial alta, 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Tendrá una vibración axial alta tanto en 1X como en 2X RPM. Sin embargo, no es inusual que 1X, 2X ó 3X dominen. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acoplamiento. Una desalineación angular severa puede presentar muchas armónicas de 1X RPM. A diferencia de la Holgura Mecánica del Tipo 3, estas armónicas múltiples no cuentan con un piso de ruido elevado en los espectros.

B. DESALINEACIÓN PARALELA



La Desalineación Paralela tiene características de vibración similares a la Desalineación Angular pero presenta una vibración radial alta que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acoplamiento. Frecuentemente 2X es mayor que 1X, pero su altura relativa a 1X la impone el tipo de acoplamiento. Cuando la Desalineación Angular o Radial es severa, pueden generar picos de amplitud altos en armónicas mucho más altas (4X - 8X), o incluso toda una serie de armónicas de alta frecuencia similares en apariencia a la holgura mecánica. El tipo de acoplamiento y el material con frecuencia influyen enormemente en el espectro total cuando la desalineación es severa. Generalmente no presenta piso de ruido elevado.

B. DESALINEAMIENTO DE BANDAS / POLEAS



El desalineamiento de las poleas produce una alta vibración en 1X RPM, sobre todo en la dirección axial. La proporción de amplitudes entre los equipos motriz y conducido dependerá del lugar donde se tomaron las lecturas, así como de la masa y rigidez de las estructuras. A menudo con el desalineamiento de las poleas, la vibración axial más alta en el motor estará en las RPM del abanico o viceversa. Se puede confirmar midiendo la fase con el filtro a las RPM de la polea con mayor nivel de vibración axial, y enseguida comparando las lecturas axiales en cada rotor.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **AROCA DELHI, ALEX ARMANDO**, con C.C: # 0924058787 autor del trabajo de titulación: **Análisis de vibraciones y alineación en motores eléctricos asíncronos trifásicos** previo a la obtención del título de **Ingeniero en Eléctrico - Mecánica** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **30 de Agosto de 2018**

f. _____

Nombre: **AROCA DELHI, ALEX ARMANDO**

C.C: **0924058787**



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA			
FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN			
TEMA Y SUBTEMA:	Análisis de vibraciones y alineación en motores eléctricos asíncronos trifásicos		
AUTOR(ES)	AROCA DELHI, ALEX ARMANDO		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	ING. VALLEJO SAMANIEGO, LUIS VICENTE, M.SC		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Eléctrico - Mecánica		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Eléctrico - Mecánica		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	30 de Agosto de 2018	No. DE PÁGINAS:	78
ÁREAS TEMÁTICAS:	Vibraciones, mantenimiento predictivo, alineación		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Resonancia, cpm, vibraciones, mantenimiento, motores, Frecuencia de paso.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>El presente proyecto se basa en el análisis de las vibraciones que se presentan en los motores asíncronos trifásicos, el mismo que se utiliza como un método para la identificación y diagnóstico de los fallos en los componentes de los equipos. Este método involucra un parte fundamental del mantenimiento predictivo. Debido al movimiento rotacional del eje que caracterizan a las máquinas rotativas, se produce vibraciones en sus componentes. Estas vibraciones deben constar con una magnitud admisible y continua, pero a causa del deterioro de los componentes la fuerza de la vibración se incrementa con el tiempo lo que provocará el desgaste; en muchas ocasiones este puede ser prematuro por lo que los componentes de la máquina deberán ser remplazados con el fin de adelantarnos y evitar un daño grave del equipo o una destrucción total generando el paro total o parcial de una línea de producción.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-981603644	E-mail: alexarocadelhi87@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::	Nombre: Philco Asqui, Luis Orlando		
	Teléfono: (04) 220933 ext. 2007		
	E-mail: luis.philco@cu.ucsg.edu.ec / ute@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			