



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

ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

Jorge Enrique Mejía Morales

Asesorado por el Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira

Guatemala, octubre de 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

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

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JORGE ENRIQUE MEJÍA MORALES

ASESORADO POR EL ING. FERNANDO ALFREDO MOSCOSO LIRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS
TRIFÁSICOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 26 de septiembre de 2007.



Jorge Enrique Mejía Morales

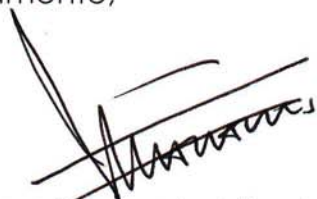
Guatemala, 10 de Junio de 2009.

Ingeniero
José Guillermo Bedoya Barrios
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica-Eléctrica
Facultado de Ingeniería.
USAC

Estimado Ingeniero:

Atentamente y por este medio le comunico que he revisado los temas técnicos del trabajo de graduación titulado "**Análisis de vibraciones en motores eléctricos asíncronos trifásicos**", elaborado por el estudiante Jorge Enrique Mejía Morales con número de carnet 2002-12865, por lo cual considero que el trabajo de graduación cumple con el alcance y los objetivos definidos para su desarrollo, sometiendo a su consideración la aprobación del mismo, siendo responsables del contenido el estudiante y el suscrito en calidad de asesor.

Atentamente,



Ingeniero Fernando Alfredo Moscoso Lira
Colegiado 6386
Asesor

Fernando Alfredo Moscoso Lira
Ingeniero Mecánico Electricista
Colegiado No. 6386



Ref. EIME 33.2009
Guatemala, 07 de septiembre 2009.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

**Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
“ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS
ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS”, del estudiante Jorge Enrique Mejía
Morales, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. José Guillermo Badoya Barrios
Coordinador Área de Potencia



JGBB/sro



REF. EIME 57. 2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Jorge Enrique Mejía Morales titulado: "ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS", procede a la autorización del mismo.


Ing. Mario Renato Escobedo Martínez



GUATEMALA, 7 DE SEPTIEMBRE 2,009.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS**, presentado por el estudiante universitario **Jorge Enrique Mejía Morales**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2009



/gdech

AGRADECIMIENTOS A:

Becas USAC-USAID, por la ayuda económica brindada a mi persona para poder continuar con mis estudios universitarios.

Las trabajadoras sociales de la sección socioeconómica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en especial a las licenciadas Cruz Haydee Quiroa de Guzmán y Zaida de Toledo, por todo su apoyo moral.

El ingeniero Fernando Moscoso, por su asesoría en mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. MOTORES ASÍNCRONO TRIFÁSICO	1
1.1. Principio de funcionamiento	2
1.2. Clasificación de motores asíncronos trifásicos	3
1.2.1. Motor asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla	3
1.2.2. Motor asíncrono con rotor devanado	4
1.3. Componentes	6
1.3.1. Motor asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla	6
1.3.1.1. Estator	6
1.3.1.2. Rotor	7
1.3.1.3. Carcasa	8
1.3.2. Motor asíncrono con rotor devanado	10
1.3.2.1. Rotor	10
2. ANÁLISIS DE SEÑALES	13
2.1. Análisis armónico	13
2.1.1. Series de Fourier	13
2.1.2. Transformada de Fourier	15

2.1.3.	Espectros de frecuencia.....	16
2.1.4.	Transformada rápida de Fourier (FFT).....	18
3.	DESCRIPCIÓN DE LAS VIBRACIONES	21
3.1.	Concepto de vibración.....	21
3.2.	Movimiento periódico.....	21
3.2.1.	Vibración libre.....	22
3.2.2.	Movimiento armónico	23
3.2.3.	Vibración torsional.....	24
3.2.4.	Péndulo simple.....	26
3.2.5.	Amortiguación.....	27
3.3.	Movimiento periódico forzado.....	27
3.3.1.	Vibración armónica forzada no amortiguada.....	27
3.3.2.	Vibración forzada causada por fuerzas de rotación.....	28
3.3.3.	Fuerzas transmitidas.....	29
3.3.4.	Fatiga de los materiales.....	29
4.	VIBRACIONES EN MOTORES ASÍNCRONOS	31
4.1.	Vibración producida por desbalances.....	31
4.2.	Vibración debida a la falta de alineamiento.....	34
4.3.	Vibración debida a falta de excentricidad	35
4.4.	Vibración debida a rodantes defectuosos.....	37
4.5.	Vibración debida a casquillos defectuosos.....	41
4.6.	Vibración debida a partes flojas.....	43
4.7.	Vibración debida a roturas de barras en el rotor.....	44
4.8.	Vibración debida a fallas electromagnéticas.....	45
4.8.1.	Desbalances en el campo magnético.....	50
4.8.1.1.	Corto circuito en el devanado del estator.....	51
4.8.1.2.	Corto circuito en el devanado del rotor.....	51

5.	ANÁLISIS DE VIBRACIONES	53
5.1.	Desbalances	57
5.2.	Falta de alineamiento	58
5.3.	Excentricidad	59
5.4.	Rodantes defectuosos	60
5.5.	Casquillos defectuosos	63
5.6.	Partes flojas	64
5.7.	Roturas de barras en el rotor	64
5.8.	Fallas electromagnéticas	67
5.9.	Evaluación de campo	68
6.	INSTRUMENTACIÓN	75
6.1.	Transductores	76
6.1.1.	Definición de transductor	76
6.1.2.	Definición de sensor	77
6.1.3.	Transductor de proximidad	77
6.1.4.	Transductor de velocidad	79
6.1.5.	Transductor de aceleración	80
6.2.	Instrumentos para visualizar y diagnosticar las vibraciones	82
6.2.1.	Recolectores de datos	82
6.2.2.	Sistemas de medición computarizados	84
7.	TIPOS DE MANTENIMIENTO	85
7.1.	Mantenimiento correctivo	85
7.1.1.	Introducción	85
7.1.2.	Metodología	86
7.2.	Mantenimiento predictivo	87
7.2.1.	Introducción	87
7.2.2.	Metodología	90

7.2.3. Planificación	92
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	97
BIBLIOGRAFÍA	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Devanado tipo jaula de ardilla	4
2	Rotor devanado o de anillos	6
3	Estator de un motor asíncrono trifásico	7
4	Comportamiento del par máximo	11
5	Transformada de Fourier de una función armónica	16
6	Función escalón unitario	16
7	Onda rectangular	17
8	Espectro de Frecuencias de la onda rectangular	17
9	Digitalización de una señal analógica	18
10	Movimiento periódico	21
11	Sistema masa resorte	22
12	Desplazamiento en función del tiempo	23
13	Cuerpo rígido sujeto a un eje	25
14	Péndulo simple	26
15	Sistema no amortiguado	28
16	Curva de falla por fatiga	30
17	Desbalance estático	32
18	Desbalance par	32
19	Desbalance dinámico	33
20	Desalineación de máquinas	34
21	Formas de excentricidad estática	36

22	Excentricidad dinámica	36
23	Construcción de cojinetes	38
24	Configuración de cojinetes	38
25	Cojinete de casquillos	42
26	Holguras en la base de las máquinas	43
27	Barras rotas en la proximidad del anillo	45
28	Posición de los devanados en el estator	46
29	Campo magnético giratorio de magnitud constante	48
30	Campo magnético giratorio de magnitud variable	49
31	Espectro de frecuencias del desbalance	57
32	Espectro de frecuencias en la falta de alineamiento	58
33	Espectro de frecuencias debido a la excentricidad	60
34	BSF modulada con bandas laterales a FTF	62
35	Espectro de vibraciones debido a remolinos de aceite	63
36	Líneas de flujo en una barra rota	64
37	Análisis espectral de corrientes	67
38	Espectro debido a fallas electromagnéticas	68
39	Analizador de vibraciones portátil	69
40	Medición vertical y horizontal de las vibraciones	69
41	Recolección de datos del motor de la bomba 1	70
42	Recolección de datos del motor de la bomba 2	71
43	Recolección de datos del motor de la bomba 3	72
44	Estructura de los transductores	77
45	Transductor de proximidad	78
46	Transductor capacitivo	79
47	Transductor de velocidad	80
48	Transductor de aceleración	81
49	Rango de frecuencias del acelerómetro	81
50	Diagrama de bloques simplificado de filtros paralelos	83

51	Diagrama de bloques de la adquisición de datos	84
----	--	----

TABLAS

I	Clases de aislamiento	5
II	Grado de protección. Primera cifra característica	9
III	Grado de protección. Segunda cifra característica	9
IV	Clasificación de las máquinas, según ISO 2372	54
V	Severidad de las vibraciones, según ISO 2372	55
VI	Tabla ISO 3945	55
VII	Severidad de vibraciones según ISO 2373	57
VIII	Duración del mantenimiento correctivo	73
IX	Inversión inicial para el análisis de vibraciones	74
X	Parámetros en el mantenimiento de máquinas eléctricas	91

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>f</i>	Frecuencia de la corriente
n	Revoluciones por minuto
P	Número de pares de polos del estator
°C	Grados centígrados
T	Período
ω	Frecuencia angular
k	Constante de proporcionalidad del resorte
m	Masa
J	Momento polar de inercia
G	Módulo de rigidez
g	Gravedad
s	Deslizamiento
mm	Milímetros
μm	Micrómetros
m/s	Metros por segundo
mm/s	Milímetros por segundo
kgf/cm	Kilogramos fuerza por centímetro
B	Densidad de campo magnético
HP	Caballos de fuerza
ISO	Organización internacional de estándares
UNE	Normas nacionales
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
RPM	Revoluciones por minuto
TDFD	Transformada de Fourier Discreta

FFT	Transformada rápida de Fourier
BSF	Frecuencia de giro de los rodillos en un cojinete
FTF	Frecuencia de rotación de la jaula en un cojinete
BPFO	Paso de la pista exterior de un cojinete

GLOSARIO

Aislante eléctrico De acuerdo con la teoría cuántica, solo son permitidos ciertos niveles discretos de energía en un átomo, entonces un electrón debe de absorber o emitir cantidades discretas de energía al pasar de un nivel a otro. En un aislante eléctrico, el electrón con mayor energía, ocupa el nivel más alto en la banda de valencia y una brecha existe entre la banda de valencia y la de conducción, entonces el electrón no puede recibir energía adicional en pequeñas cantidades, para poder saltar de la banda de valencia a la banda de conducción.

Armónicos En sistemas eléctricos de corriente alterna los armónicos son, frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo.

Conductor eléctrico Un conductor se caracteriza porque no existe la banda prohibida entre la banda de conducción y la banda de valencia. Estas dos bandas son contiguas o se superponen. Por este motivo los electrones requieren poca energía para pasar de la banda de valencia a la banda de conducción, Al aplicar un

campo eléctrico o aumentar la temperatura del conductor los electrones adquiere la suficiente energía para pasar a la banda de conducción.

Corriente Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material.

Corrientes parásitas Se forman en el núcleo de las máquinas eléctricas. Debido a que el núcleo es un material conductor y que se encuentran sometidos a un campo magnético variable, en él se inducirá una corriente eléctrica, que reaccionará contra la variación de flujo que las crea y por tanto reducen el valor efectivo de la inducción magnética.

Deslizamiento Es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor.

Dominios en metales Son regiones dentro del metal en las que todos los átomos se alinean con sus campos magnéticos apuntando en una misma dirección.

Espectro de frecuencia Es el gráfico que muestra cómo es la descomposición de una señal ondulatoria en el dominio de la frecuencia.

Filtros Es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal

eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

Frecuencia Es una medida para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo.

Frecuencia natural En un sistema masa-resorte, es la frecuencia a la que ésta oscilará libremente al ser perturbada.

Histéresis Cuando se aplica un campo magnético al núcleo de una máquina eléctrica, los dominios tienden a alinearse con el campo magnético aplicado. Cuando el campo magnético se suprime, los dominios no se ubican de nuevo al azar, esto porque los átomos necesitan de energía para recuperar su posición original. Una vez que se suprime el campo magnético inicial, se necesita de otra fuente de energía para cambiar la orientación de los dominios. Este hecho de cambiar la orientación de los dominios requiere de energía en todas las máquinas eléctricas, en cada ciclo de corriente altera aplicada al núcleo, produciendo pérdidas.

Holgura Es la diferencia que existe entre las dimensiones de dos piezas en el lugar donde se acoplan.

Inducción Electromagnética

Es el fenómeno que origina la producción de una fuerza electromotriz (Voltaje) en un medio o cuerpo, expuesto a un campo magnético variable. O también un cuerpo en movimiento en un campo magnético estático. Este fenómeno está regida por la ley de Faraday que dice: La magnitud del voltaje inducido es proporcional a la variación del flujo magnético.

Máquina eléctrica

Es un elemento que convierte la energía eléctrica en otra forma de energía o viceversa. Según el uso que se le dé, puede clasificarse en: generador o motor.

Motor asíncrono

Máquina eléctrica, que convierte la energía eléctrica en energía mecánica rotacional, en la que la velocidad de giro del rotor es siempre menor a la velocidad de giro del campo magnético del estator y la corriente del rotor es inducido desde el estator.

Motor síncrono

Máquina eléctrica, en la que la velocidad de giro del rotor es igual a la velocidad de giro del campo magnético del estator.

Norma

Puede definirse como una especificación técnica que ha sido desarrollada por una o varias compañías y que ha adquirido importancia, debido a las condiciones del mercado.

Período

Es la medida del tiempo en que dura una oscilación.

Rendimiento	El trabajo obtenido (trabajo útil) de su funcionamiento y el trabajo suministrado o consumido por la máquina o el proceso.
Vibración	Son oscilaciones de un cuerpo cualquiera con respecto a un punto de referencia.
Viscosidad	La viscosidad es una medida de la resistencia que ofrece una capa de aceite a desplazarse sobre la capa adyacente. A mayor viscosidad mayor resistencia a fluir
Voltaje	Es el trabajo por unidad de carga, realizado por el campo eléctrico, sobre una partícula cargada, para moverla de un lugar a otro.

RESUMEN

El análisis de vibraciones en motores asíncronos trifásicos, es un método para diagnosticar las fallas en los componentes en máquinas, y que forma parte del mantenimiento predictivo.

Todas las máquinas eléctricas vibran debido al movimiento rotacional de su eje y a la tolerancia que existe entre sus componentes. Estas vibraciones deben de estar con una magnitud aceptable y constante, pero debido al deterioro de estos componentes la magnitud de la vibración aumenta con el tiempo y los componentes de la máquina deben de ser reemplazados antes de que ocurra la destrucción total del componente y con ello el paro total o parcial de una línea de producción.

Debido a que cada componente de la máquina produce vibraciones con una determinada frecuencia, se puede hacer un diagnóstico de las vibraciones en la máquina para determinar el componente defectuoso, analizando la magnitud de la vibración y predecir si un componente se encuentra a punto de sufrir una falla catastrófica.

Este trabajo presenta las frecuencias características de cada componente de la máquina asíncrona, las causas que originan las vibraciones, así también como los instrumentos que podemos utilizar para poder hacer las mediciones de las vibraciones y cómo implementar el análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo.

OBJETIVOS

GENERAL:

Analizar las vibraciones que ocurren en un motor eléctrico asíncrono trifásico, estableciendo un procedimiento de diagnóstico del estado de sus componentes.

ESPECÍFICOS:

Mostrar y describir las causas de las vibraciones y las frecuencias características de cada componente de las máquinas eléctricas asíncronas triásicas, para determinar su estado operativo.

Describir los tipos y características de los transductores que se utilizan para medir las vibraciones.

Desarrollar propuestas para implementar el análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo.

INTRODUCCIÓN

El costo del paro de líneas de producción puede ser muy elevado, y la importancia que tienen los motores eléctricos en éstas es significativa. Es por esto que el mantenimiento predictivo en los motores eléctricos es el procedimiento que ha sustituido al mantenimiento correctivo.

En el mantenimiento predictivo donde entra el análisis de vibraciones en las máquinas eléctricas, se puede planificar con su ayuda el paro de la línea de producción sin que afecte el tiempo de entrega del producto.

Debido a la globalización, las empresas deben de cumplir con normas internacionales que los obliga a mejorar la calidad de sus productos y con ello el mantenimiento que le dan a las máquinas. Es por esto que este trabajo consiste en el análisis de las vibraciones en los motores eléctricos, el cual inicialmente contiene una breve descripción de los motores eléctricos y los tipos de vibraciones que existen. Luego se describen las causas y el procedimiento de diagnóstico de las vibraciones en los componentes de las máquinas eléctricas y su implementación en el mantenimiento predictivo.

1. MOTORES ASÍNCRONOS TRIFÁSICOS

Los motores eléctricos son máquinas que convierten la energía eléctrica en energía mecánica rotacional. Existen tres tipos de motores eléctricos: asíncrono o de inducción, síncrono y de corriente continua. Todas ellas también presentan la propiedad de ser reversibles funcionando como generadores de energía eléctrica. En los motores asíncronos trifásicos, el devanado del estator se alimenta con corriente alterna trifásica desde la red, y por inducción en el rotor.

El rendimiento de las máquinas eléctricas es muy alto, pero presenta pérdidas que lo hacen calentarse. Este suceso es muy importante ya que el aislamiento se deteriora con la temperatura, y con esto la duración de la vida útil de la máquina. Si mejoramos el sistema de enfriamiento de la máquina, podemos mejorar su rendimiento y con ello la potencia.

Las clases de servicio de una máquina eléctrica según NEMA son:

S1: Servicio continuo. Trabaja a carga constante. Temperatura de régimen permanente.

S2: Servicio temporal. Trabaja en un tiempo breve. No se llega a alcanzar una temperatura estable.

S3, S4 y S5: Servicio Intermitente. Serie continua de ciclos iguales de carga constante, seguidos de períodos de reposo, sin alcanzar una temperatura constante.

S6, S7 y S8: Servicios Ininterrumpidos. Similar al anterior pero sin períodos de reposo.

1.1. Principio de funcionamiento

Según la ley de Faraday, un campo magnético que varía con el tiempo produce una fuerza electromotriz. La fuerza electromotriz no es otra cosa que un voltaje procedente de conductores que se mueven en un campo magnético, o de un conductor entre un campo magnético variable. Esta ley es la que rige el funcionamiento de un motor de inducción. En el estator del motor de inducción, se aplica una corriente trifásica senoidal, el cual produce un campo magnético giratorio de velocidad de rotación que viene dada por

$$n_{SINC} = \frac{120f_e}{p}$$

Donde:

n_{SINC} Velocidad de rotación del campo magnético

f_e Frecuencia del sistema en Hz

p Numero de pares de polos de la máquina

El campo magnético giratorio del estator inducirá una corriente en el rotor que se encuentra en corto circuito a través de anillos en el caso del rotor jaula de ardilla o en una conexión especial en el caso del rotor devanado.

El campo magnético inducido en el rotor interactuará con el campo magnético del estator produciendo un par de giro en dirección del campo magnético del estator, debido al principio de acción y reacción. La principal característica de los motores de inducción, es que la velocidad angular del rotor siempre será menor a la velocidad del campo magnético del estator, debido a que si estas velocidades son iguales, ya no existiría inducción en el rotor y con ello tampoco el par de giro.

A la diferencia de velocidad que existe entre el campo magnético del estator y la velocidad mecánica del rotor se le llama deslizamiento.

La velocidad del campo magnético del rotor será igual a la velocidad del campo magnético del estator, debido a que la velocidad del campo magnético del rotor visto desde el estator es igual a la suma de la velocidad mecánica del rotor y la velocidad angular del campo del rotor visto desde el rotor.

1.2. Clasificación de motores asíncronos trifásicos

Los motores asíncronos trifásicos, se clasifican de acuerdo al tipo de embobinado que tienen en el rotor.

- Rotor jaula de ardilla
- Rotor bobinado

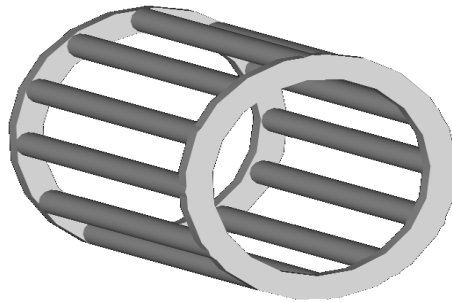
Las características del estator son las mismas en los motores de inducción de rotor de jaula de ardilla y las de rotor bobinado.

1.2.1. Motor asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla

Este tipo de motor eléctrico requiere de menos mantenimiento, comparado con el motor de rotor bobinado. En las ranuras del rotor se alojan barras de aluminio fundido u otro material conductor que se encuentran unidos en los extremos por anillos de cortocircuito. Estas barras que componen el bobinado del rotor se encuentran inclinadas con respecto al eje del rotor para disminuir el ruido.

Existen también rotores de doble jaula de ardilla, de ranuras normales, ranuras profundas y otros. En la figura 1 podemos observar los devanados de un motor tipo jaula de ardilla.

Figura 1 Devanado tipo jaula de ardilla



1.2.2. Motor asíncrono con rotor devanado

En el motor de inducción de rotor bobinado, las ranuras del rotor se utilizan para alojar el los conductores del bobinado. Estos conductores por lo general son de cobre o aluminio, los cuales encuentran aisladas entre sí, entre bobinas y la carcasa. Los aislantes utilizados para los conductores es barniz y para las bobinas se utiliza fibra de madera (Kraft, Crepé, y otros.)

Los materiales aislantes de uso común, han sido clasificados según la temperatura máxima que pueden soportar sin degradarse rápidamente. En la tabla I se muestran las diferentes clases de aislamiento de las máquinas eléctricas.

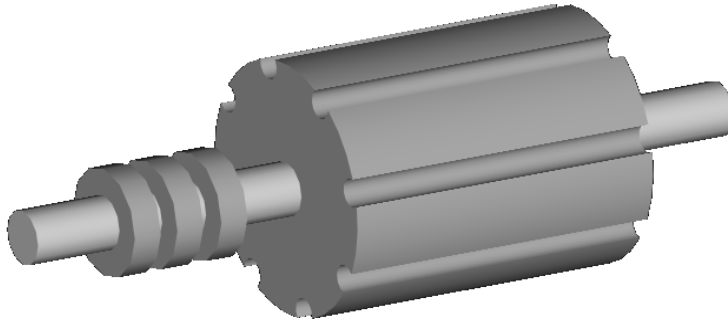
Tabla I. Clases de aislamiento

Aislamiento	Temperatura Máxima
Clase Y	90°C
Clase A	105°C
Clase E	120°C
Clase B	130°C
Clase F	155°C
Clase H	180°C
Clase C	>180°C

Si la temperatura a la que trabaja el motor, es mayor a la temperatura máxima del aislante, ésta tiende a deteriorarse rápidamente, el material se reseca y carboniza, esto lo hace quebradizo y disminuye con ello la resistencia mecánica del aislamiento, provocando falla por vibración.

En los motores con rotor devanado, es posible hacer conexiones especiales al devanado del rotor, debido a que consiste en un grupo de bobinas trifásicas similar al del estator. Conectados a anillos localizados en el mismo eje y que hacen contactos con escobillas de grafito, para poder hacer conexiones exteriores, como podemos observar en la figura 2. La conexión estrella es la más común. Y debido a la conexión exterior, este tipo de máquina requiere de mantenimiento constante y es más costoso comparado con el de rotor tipo jaula de ardilla.

Figura 2. Rotor devanado o de anillos



1.3. Componentes

Los principales componentes de un motor eléctrico asíncrono trifásico son: la carcasa, el estator y el rotor. El rotor es lo que diferencia un motor de jaula de ardilla con un motor de rotor tipo bobinado. El estator es el mismo para cada tipo de motor asíncrono trifásico.

También entre los componentes tenemos el ventilador, los cojinetes que dependiendo de la posición del motor así será el tipo de cojinete, y escudos frontales y traseros.

1.3.1. Motor asíncrono con rotor tipo jaula de ardilla

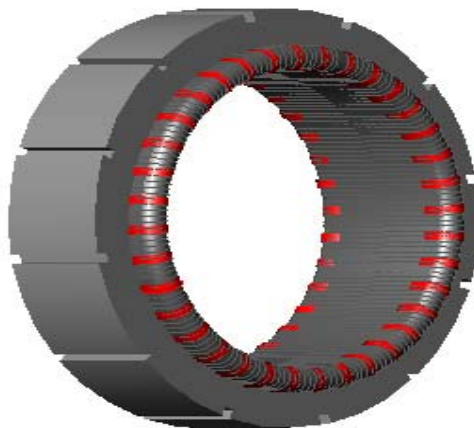
1.3.1.1. Estator

El estator está construido por un conjunto de chapas ferromagnéticas aisladas, para evitar pérdidas por corrientes parásitas. El estator tiene ranuras para alojar los conductores de los bobinados, que producen el campo magnético giratorio a través de una corriente trifásica.

Estas bobinas se encuentran separados cierto ángulo mecánico, dependiendo del número de par de polos del estator. Un par de polos es un conjunto de tres bobinas, cada uno conectado a una fase del sistema trifásico de corrientes, desfasado 120° eléctrico uno de otro. En la figura 3 tenemos es estator de un motor trifásico.

El estator del motor asíncrono trifásico con rotor devanado y con rotor tipo jaula de ardilla, tienen las mismas características constructivas.

Figura 3 Estator de un motor asíncrono trifásico



1.3.1.2. Rotor

Es la parte móvil del rotor. El bobinado del rotor consiste en un grupo de barras conductoras, que se alojan en la periferia del rotor, como se muestra en la figura 1. El bobinado del rotor, en el caso del rotor jaula de ardilla, se encuentra cortocircuitado a través de una barra conductora. Esto no permite que se hagan modificaciones en el rotor.

Según la NEMA, los motores asíncronos con potencias mayores a 1 HP con rotor tipo jaula de ardilla se clasifican en Clase A, Clase B, Clase C, Clase D, que son las más comunes.

- Clase A, tiene un par y corriente de arranque normal, bajo deslizamiento y la resistencia eléctrica del rotor es baja.
- Clase B, tiene un par de arranque normal, corriente de arranque y deslizamiento bajo y tiene aproximadamente el mismo par de arranque que la clase A.
- Clase C, tiene un par de arranque mayor al de Clase A y B e intensidad de arranque baja. El rotor tiene una resistencia eléctrica mayor al de la clase B y es de doble jaula.
- Clase D, tiene un par de arranque elevado; mucho deslizamiento. El rotor tiene una resistencia eléctrica grande.

1.3.1.3. Carcasa

La carcasa del motor está hecho de hierro colado (la mayoría de veces), y su principal función es:

- Fijar y sujetar las chapas del estator.
- Transmitir al suelo el par que se ejerce sobre la máquina.
- Disipar el calor, producido por las pérdidas en el motor.
- Sostiene las tapas donde se localizan los cojinetes y otros elementos auxiliares.
- Evita el contacto con los componentes del motor.

Debido a la función que tiene la carcasa en el motor, el grado de protección se designa con las letras IP, seguidas de dos cifras, las cuales, la primera cifra indica la protección contra la penetración de cuerpos extraños. La segunda cifra indica la protección contra la penetración del agua y existe una tercera cifra, pero en máquinas eléctricas no suele aparecer. La tabla II indica los grados de protección de la primera cifra. Y la tabla III indica los grados de protección de la segunda cifra.

Tabla II. Grado de protección. Primera cifra característica

Primera Cifra	Descripción
0	No protegido
1	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm.
2	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 12 mm.
3	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 2.5 mm.
4	Protegido contra cuerpos sólidos superiores a 1 mm.
5	Protegido contra el polvo
6	Totalmente protegido contra el polvo.

Tabla III. Grado de protección. Segunda cifra característica

Primera Cifra	Descripción
0	No protegido.
1	Protegido contra partículas verticales de gotas de agua.
2	Protegido contra las caídas de agua con una inclinación máxima de 15°.
3	Protegido contra el agua en forma de lluvia.
4	Protegido contra proyecciones de agua.
5	Protegido contra chorros de agua.
6	Protegido contra embates del mar
7	Protegido contra los efectos de la inmersión
8	Protegido contra la inmersión prolongada

Este código designado para la protección se indica en la placa de características del motor, así también la potencia de salida, voltaje, corriente, factor de potencia, velocidad, eficiencia nominal, código de arranque, que son los más importantes.

1.3.2. Motor asíncrono con rotor devanado.

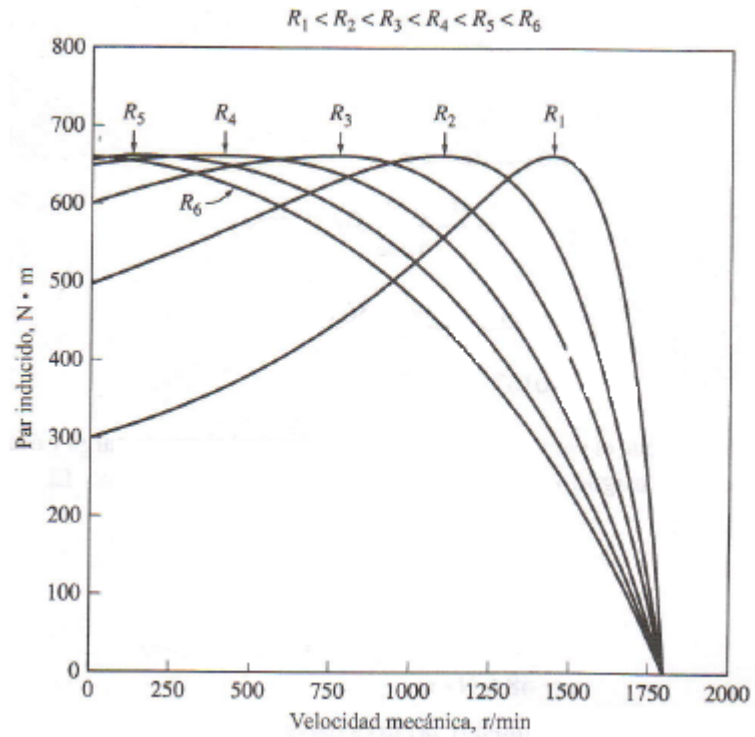
El estator es el mismo para el motor de rotor devanado y para el motor con rotor tipo jaula de ardilla. La carcasa debido a los anillos del rotor devanado es mas larga y cumple las mismas funciones que el del motor con rotor tipo jaula de ardilla.

1.3.2.1. Rotor

El rotor es un conjunto trifásico de bobinas similar al del estator y con el mismo número de polos, estos bobinados se encuentran conectados a tres anillos asilados, montados sobre el eje, en los que rozan escobillas de carbón, para que las terminales de los bobinados sean accesibles desde el exterior.

La razón para tener acceso a las conexiones del rotor, es para poder modificar la velocidad mecánica del rotor, el cual ocurre el par máximo del motor. Esto se logra modificando la resistencia del rotor desde el exterior, conectándole resistencias o bobinas. La figura 4 muestra el comportamiento del par máximo cuando se modifica la resistencia del rotor.

Figura 4. Comportamiento del par máximo



Como podemos observar, si la resistencia del rotor se hace más grande, el par máximo ocurre a velocidades mecánicas cercanas al reposo.

2. ANÁLISIS DE SEÑALES

Las vibraciones pueden ser observadas en dos dominios básicos, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Si el análisis es a través de un dispositivo electrónico y la señal eléctrica es proporcional a la vibración, se obtiene el dominio del tiempo. Para que la señal esté en el dominio de la frecuencia, se hace pasar la señal a través de un filtro de “barrido”.

2.1. Análisis armónico

Las vibraciones constan de muchas señales de diferentes frecuencias, es por ello que por simple inspección no es posible determinar el número de ellas. El análisis matemático que se utiliza para transformar señales en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia es el de Fourier.

2.1.1. Series de Fourier

Sea una función periódica $f(t)$ de período T , entonces $f(t) = f(t+T)$. La teoría matemática de las series de Fourier demuestra que ondas las señales que tengan un número finito de discontinuidades en T , en caso de ser discontinua, el valor medio en el período T , sea finito y que tenga un número finito de máximos positivos y negativos, pueden ser representadas a través de funciones armónicas.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \text{Cos}(n\omega_0 t) + b_n \text{Sen}(n\omega_0 t))$$

Donde los coeficientes de la serie de Fourier son:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

La serie de Fourier también se puede representar de la siguiente manera.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Esto indica que a_n y b_n puedan expresarse como:

$$a_n = A_n \cos(\theta_n)$$

$$b_n = A_n \sin(\theta_n)$$

Sustituyendo los resultados anteriores en la serie de Fourier y simplificando tenemos otra forma de expresar la serie de Fourier.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t - \theta)$$

Existe una tercera forma de expresar la serie de Fourier, llamada serie compleja de la serie de Fourier, el cual es necesario utilizar la ecuación de Euler que es:

$$\text{Cos}(\omega t) = \frac{1}{2}(e^{j\omega} + e^{-j\omega})$$

$$\text{Sen}(\omega t) = \frac{1}{2j}(e^{j\omega} - e^{-j\omega})$$

Haciendo $C_n = \frac{1}{2}(a_n + jb_n)$ y sustituyendo las ecuaciones de Euler en la serie original de Fourier, obtenemos la serie compleja de Fourier.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{j\omega t}$$

2.1.2. Transformada de Fourier

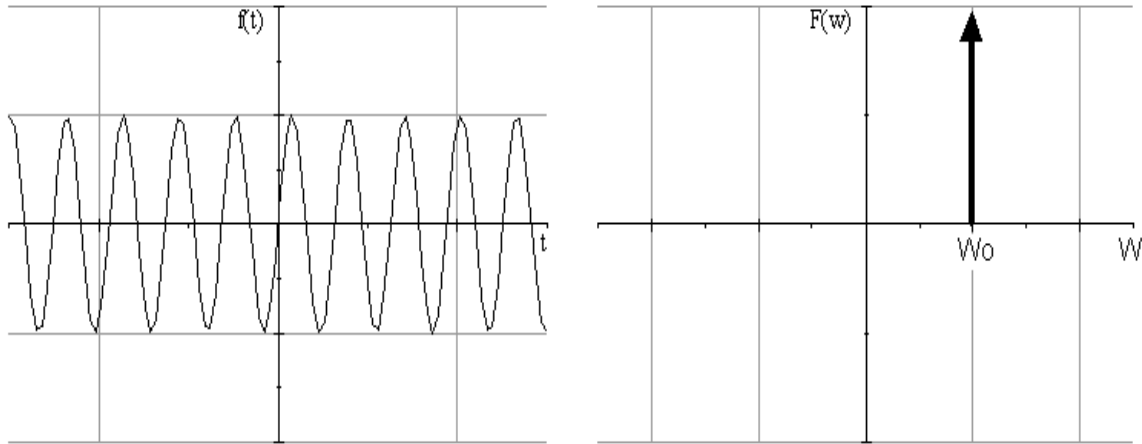
La serie de Fourier es un instrumento para el análisis de señales periódicas, y debido a la existencia de señales no periódicas, se desarrolló la integral de Fourier o Transformada de Fourier, que consiste en hacer que el período T de una función $f(t)$ tienda al infinito y con ello la frecuencia fundamental f_0 tienda a cero, debido a que $f_0 = 1/T$. Por lo que una función discreta tiende a tomar la forma de una función continua.

La transformada de Fourier es un método muy eficiente para determinar el espectro de frecuencias de una señal.

$$F(\omega) = \mathfrak{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

La figura 5 muestra el espectro de frecuencias de una función armónica, que se obtuvo con la ayuda de la transformada de Fourier.

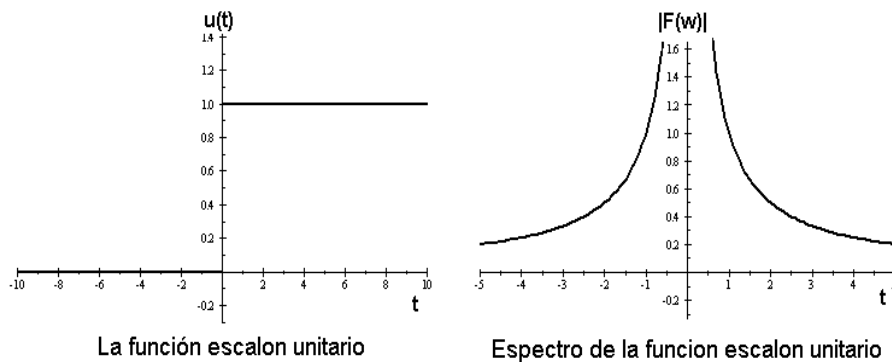
Figura 5. Transformada de Fourier de una función armónica



2.1.3. Espectros de frecuencia

Mediante la transformada de Fourier, convertimos la señal en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia de cualquier señal. La gráfica de la transformada de Fourier nos dará una idea del comportamiento de la señal en función de la frecuencia. Un ejemplo sería la de la señal de escalón unitario, como podemos ver en la figura 6.

Figura 6. Función escalón unitario



En la figura 7, se muestra una onda rectangular y en la figura 8, el espectro de frecuencias, de esta onda.

Figura 7. Onda rectangular

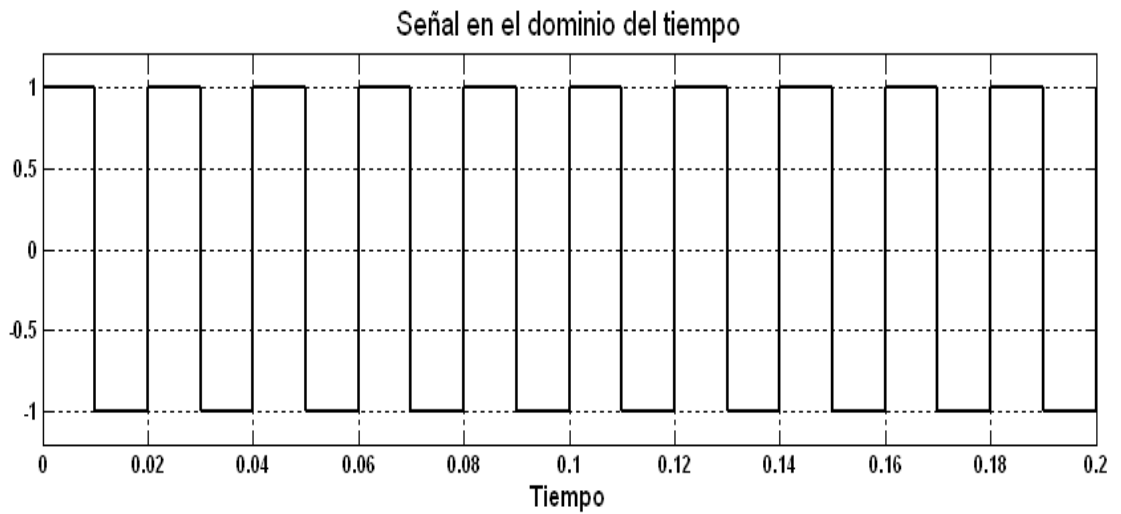
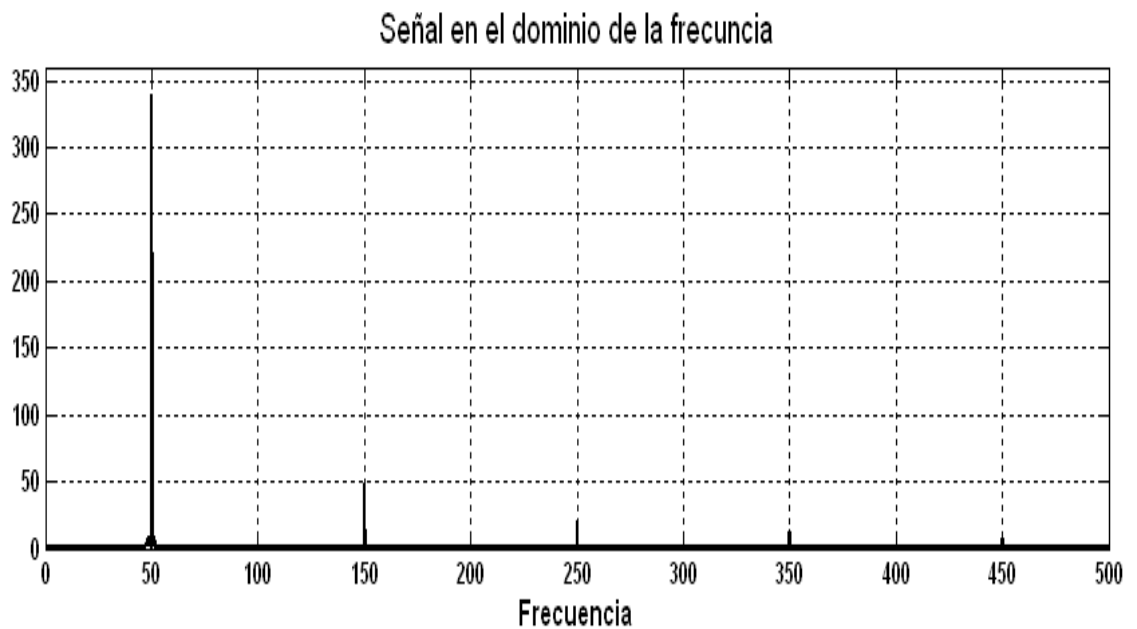


Figura 8. Espectro de frecuencias de la onda rectangular

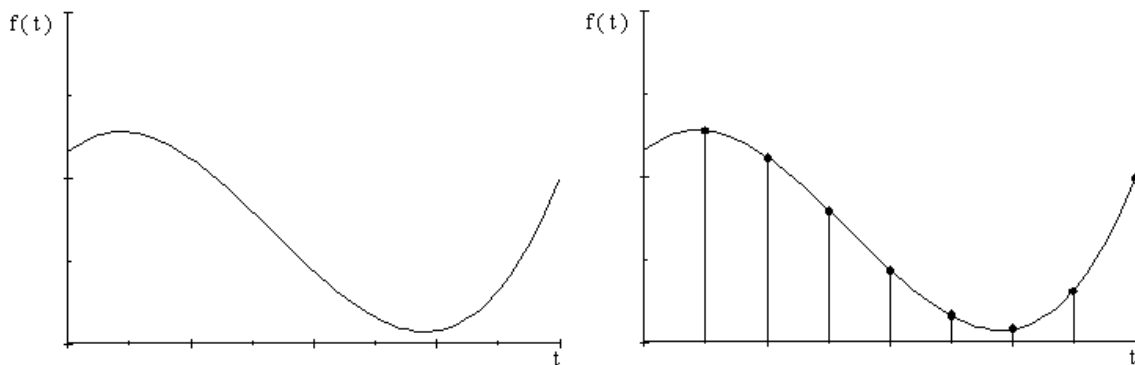


2.1.4. Transformada rápida de Fourier (FFT)

La transformada de Fourier en la práctica se calcula de modo analógico o de modo digital. En el modo analógico la señal es filtrada mediante filtros, el resultado es el componente armónico de la señal. Este cálculo necesita de filtros muy precisos, y es una operación muy lenta.

Actualmente la señal se analiza de modo digital, primero se filtra, luego se digitaliza en un convertidor analógico digital, como se observa en la figura 9.

Figura 9. Digitalización de una señal analógica



La digitalización de la señal tiene la ventaja de ser rápido y elimina fuentes de error.

Se llama Transformada de Fourier discreta (TDFD) a la que se obtiene digitalmente a partir de una señal discretizada.

La transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) es un algoritmo para evaluar de forma rápida la transformada de Fourier discreta y su inversa. Su rapidez en el cálculo es lo que lo hace muy importante en el análisis de señales.

Sean x_0, \dots, x_{n-1} números complejos. La transformada discreta de Fourier (TDFD) se define como

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-\frac{2\pi i}{n}jk} \quad j = 0, \dots, n-1$$

La evaluación de esa fórmula requiere (n^2) operaciones aritméticas. Mediante un algoritmo FFT se puede obtener el mismo resultado con sólo $(n \log n)$ operaciones.

La transformada de Fourier discreta inversa (TDFDI) se calcula, mediante:

$$x_k = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{\frac{2\pi i}{n}jk} \quad k = 0, \dots, n-1$$

Si definimos

$$e^{-\frac{2\pi i}{n}} = W$$

Entonces la transformada discreta de Fourier ampliada queda:

$$f_k = x_0 + x_1 W^k + x_2 W^{2k} + \dots + x_{n-1} W^{(n-1)k}$$

Si se desea obtener $x_0 + x_1 + x_2 + \dots + x_{n-1}$ entonces se necesita un total de n^2 de sumas complejas y n^2 de productos complejos. Esto conlleva un requerimiento computacional grande.

La transformada rápida de Fourier aprovecha la periodicidad y simetría del factor W , también llamado twiddle, para el cálculo de la transformada discreta de Fourier. La periodicidad implica $W^k = W^{k+n}$ y su simetría implica $W^k = -W^{k+n/2}$.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS VIBRACIONES

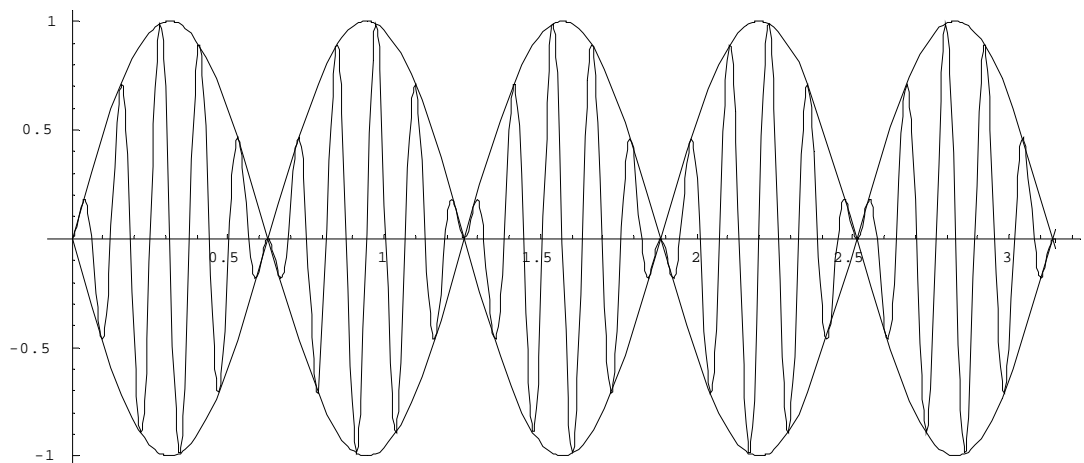
3.1. Concepto de vibración

Las vibraciones son oscilaciones y las oscilaciones son movimientos. Entonces podemos decir, que las vibraciones son oscilaciones de un cuerpo cualquiera con respecto a un punto de referencia.

3.2. Movimiento periódico

El movimiento periódico ocurre cuando en intervalos de tiempo regulares se repite el movimiento hecho por un cuerpo o sistema, como el la figura 10. El movimiento periódico puede ser debido a una vibración libre o una vibración forzada.

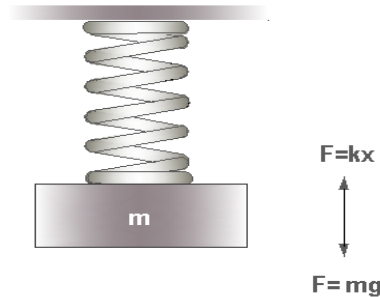
Figura 10. Movimiento periódico



3.2.1. Vibración libre

Consideremos un cuerpo de masa m sujeto a un extremo de un resorte, como podemos observar en la figura 11.

Figura 11. Sistema masa resorte



Según la ley de Hooke la fuerza que ejerce el resorte sobre el cuerpo es $F_R = -kx$, y la fuerza que ejerce el cuerpo sobre el resorte es $F = mg$, el cual es debido a la gravedad. Usando la ley de Newton obtenemos una ecuación diferencial de segundo orden.

$$\sum F = ma = m \frac{d^2 x}{dt^2} = mx''$$

$$mg - kx = mx''$$

$$mx'' + kx = 0$$

Resolviendo esta ecuación diferencial obtenemos una ecuación que describe el movimiento del cuerpo en función de la única coordenada x .

Si definimos $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ y reescribimos la ecuación diferencial como

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0$$

La solución de la ecuación diferencial es: $x(t) = A \cos \omega_0 t + B \sin \omega_0 t$

Donde:

ω Frecuencia del movimiento armónico.

A y B Constantes arbitrarias que dependen de las condiciones iniciales del movimiento.

k Módulo del resorte, sus unidades son kgf/cm.

3.2.2. Movimiento armónico

Esta es la forma más simple de vibración, se denomina frecuentemente como movimiento armónico simple. La ecuación que describe este movimiento es la que se dedujo con la vibración libre

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

Para poder analizar el movimiento, debemos definir las siguientes constantes

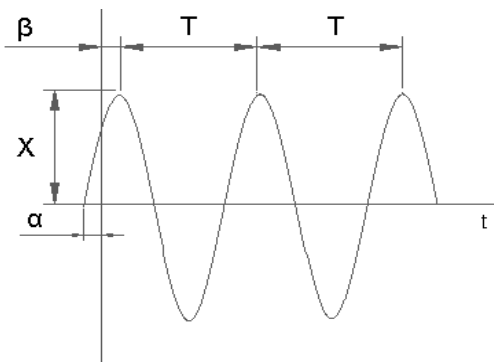
$$X = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \cos \alpha = \frac{A}{C} \quad \text{y} \quad \sin \alpha = \frac{B}{C}$$

Sustituyendo estas nuevas constantes a la ecuación que describe el movimiento obtenemos

$$x(t) = X \cos(\omega_0 t - \alpha)$$

Que se encuentra representado en figura 12.

Figura 12. Desplazamiento en función del tiempo



El período del movimiento es el tiempo el cual dura un ciclo de movimiento, el número de ciclos por segundo se denomina frecuencia y su unidad de medida es el Hertz (Hz).

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

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

Donde:

T es el período

f_0 es la frecuencia natural del sistema.

3.2.3. Vibración torsional

La vibración torsional se refiere a la vibración que sucede en un cuerpo rígido alrededor de un eje. Debido a la naturaleza del problema, el desplazamiento se mide en coordenadas angulares.

En la siguiente figura tenemos un disco de masa m sujeto a una barra de masa despreciable. Si la barra es elástica, cualquier movimiento angular del disco provocará un momento que se opondrá al movimiento, este momento es

$$M = \frac{JG\theta}{l}$$

Donde:

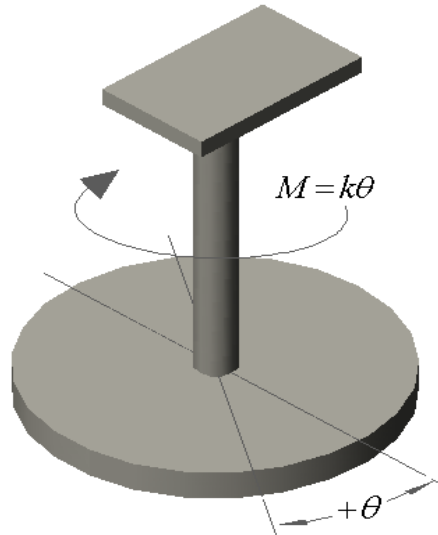
J es el momento polar de inercia de área del disco

G es el módulo de rigidez del material

l longitud de la flecha

θ ángulo desplazado

Figura 13. Cuerpo rígido sujeto a un eje



En la figura 13, observamos que el momento es proporcional al ángulo θ , y la constante de proporcionalidad la definimos como

$$K = \frac{M}{\theta} = \frac{JG}{l}$$

La constante de proporcionalidad (K), está dado en Nm/radian. Ahora utilizando las leyes de Newton, sumamos los momentos torsionales alrededor del eje para obtener una ecuación diferencial y así obtener la frecuencia natural del sistema.

$$\begin{aligned}\sum M_0 &= I_0 \theta'' \\ -K\theta &= I_0 \theta'' \\ \theta'' + \frac{K}{I_0} \theta &= 0\end{aligned}$$

Esta ecuación es similar a la ecuación diferencial del movimiento armónico, entonces deducimos que la frecuencia natural del sistema es

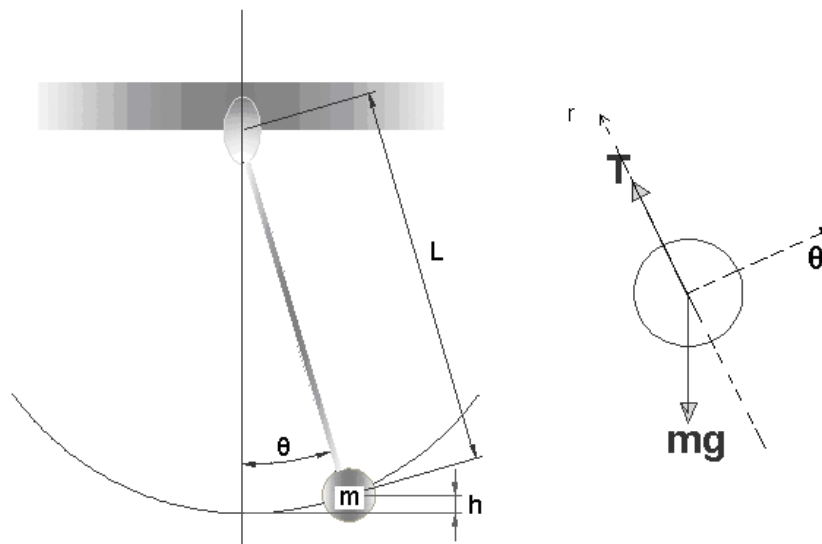
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{I_0}}$$

Una aplicación de la vibración torsional o péndulo torsional, está en un reloj mecánico.

3.2.4. Péndulo Simple

El péndulo simple es un sistema constituido por una masa suspendida verticalmente por un hilo de masa despreciable, como se observa en la figura 14. Cuando se desplaza la masa de la vertical, esta oscila alrededor de la articulación con movimiento periódico regular.

Figura 14. Péndulo simple



Si tomamos la suma de fuerzas en la dirección de θ tenemos:
$$\sum F_{\theta} = -mg \sin \theta = ma_{\theta} = ml\ddot{\theta}$$
 para pequeñas oscilaciones podemos sustituir al $\sin \theta$ por θ y obtenemos la ecuación diferencial de segundo orden $-mg\theta = ml\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} + \frac{g}{l}\theta = 0$, el cual es similar a la ecuación de la vibración libre.

Entonces por analogía podemos decir que la ecuación de la frecuencia de las vibraciones pequeñas es $f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$

3.2.5. Amortiguación

La amortiguación es el proceso en el cual la amplitud de la vibración disminuye continuamente. En la amortiguación la energía se disipa en forma de fricción, calor o en forma de sonido. La amortiguación viscosa es la mas utilizada, ya que la fuerza de de amortiguación es proporcional a la velocidad.

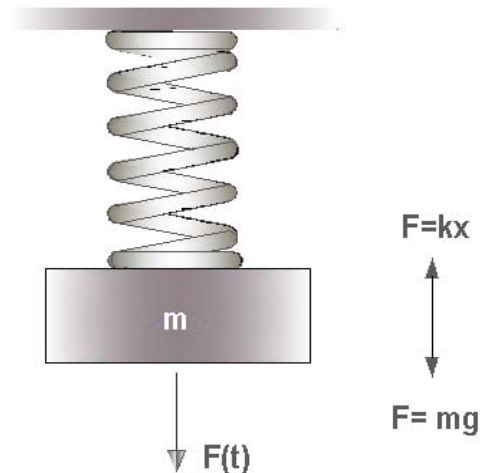
3.3. Movimiento periódico forzado

Cuando el movimiento de oscilación es debida a una fuerza externa del sistema, se dice que es una vibración forzada, y si existe una disipación de energía debido a la fricción, es una vibración forzada amortiguada.

3.3.1. Vibración armónica forzada no amortiguada

Si un sistema masa resorte se le aplica una fuerza $F(t) = F_1 \sin \omega t$. F_1 es la amplitud de la fuerza, y ω la frecuencia en radianes por segundo con la cual varia la fuerza. La figura 15, muestra el sistema.

Figura 15. Sistema no amortiguado



Haciendo sumatoria de fuerzas en el eje vertical, deducimos la ecuación diferencial de segundo orden $-kx + F(t) = m\ddot{x} \Rightarrow m\ddot{x} + kx = F_1 \sin \omega t$, simplificando

esta ecuación tenemos $\ddot{x} + \frac{k}{m}x = \frac{F_1}{m} \sin \omega t$.

Al resolver la ecuación diferencial del movimiento de la masa en función de la distancia tenemos $x = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t + \frac{F_1}{m(\omega_n^2 - \omega)} \sin \omega t$.

3.3.2. Vibración forzada causada por fuerzas de rotación

Una fuente de vibración forzada, es debido al desequilibrio de partes en rotación. Si el centro de gravedad de una masa m no equilibrada tiene una excentricidad radial, la fuerza centrífuga generada por la rotación producirá que esta vibre, este es el caso cuando el eje de un motor no esta balanceado.

3.3.3. Fuerzas transmitidas

La resonancia mecánica ocurre cuando un sistema mecánico vibra en respuesta a una fuerza aplicada con la frecuencia natural del sistema. La frecuencia natural es aquella a la que el sistema vibraría si lo desviáramos de su posición de equilibrio y lo dejáramos moverse libremente. Si se aplica una fuerza externa con esta frecuencia provocaría que la amplitud de la vibración aumente hasta alcanzar amplitudes peligrosas que puedan destruir el sistema. Esta fuerza que perturba el sistema puede ser transmitida al piso a través de resortes, solamente si el resorte se ha extendido o acortado, entonces la fuerza máxima transmitida es kx . La relación de transmisión se define como la fracción de la fuerza perturbadora máxima que realmente se transmite a la base del resorte o al piso.

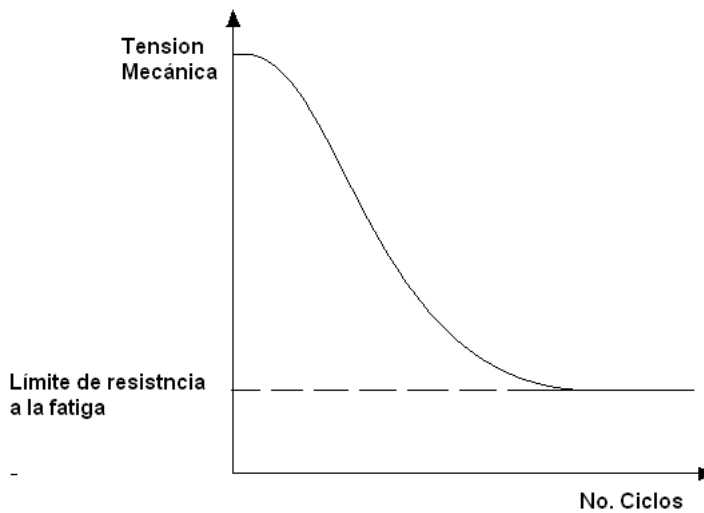
3.3.4. Fatiga de los materiales

En muchas ocasiones las piezas de metal son sometidas a tensiones mecánicas repetitivas o cíclicas. Esto provocará que el material falle a tensiones mecánicas menores que aquella que puede soportar la pieza bajo la aplicación de una tensión estática. Estas fallas en los materiales se denominan fracturas por fatiga. Es muy común la fractura por fatiga en las piezas móviles como los ejes de transmisión de movimiento.

Una fractura por fatiga se origina en lugares donde se concentra la tensión mecánica, como en una grieta. Una vez iniciada la fractura, ésta se extiende a través de la pieza debido a las tensiones mecánicas cíclicas, hasta que la sección que queda se vuelve tan pequeña que no puede soportar la carga y ocurre la fractura del material.

La figura 16 muestra la cantidad de ciclos que soporta el material a la aplicación de una tensión mecánica específica, además existe un límite que se llama límite de resistencia a la fatiga, el cual se define como el esfuerzo a la cual la falla por fatiga nunca se presenta.

Figura 16. Curva de falla por fatiga



Los factores que afectan la resistencia a la fatiga de un material son: la concentración de tensiones, debido a agujeros, hendiduras o cambios bruscos en la sección del material. La rugosidad del material, crean aumentadores de tensión mecánica que facilita la formación de grietas por fatiga. Las superficies lisas en el acabado del material, aumenta la resistencia a la fatiga. El estado superficial del material, debido a que las fracturas se inician en la superficie, cualquier cambio en la superficie afectará en la resistencia a la fatiga del material, como lo pueden hacer los tratamientos de endurecimiento del acero. El medio ambiente, si el material se encuentra en un ambiente corrosivo durante la tensión mecánica cíclica, el ataque químico acelera la velocidad de propagación de las grietas por fatiga. Este tipo de combinación de ataque corrosivo y tensiones cíclicas en un metal se conoce como fatiga por corrosión.

4. VIBRACIONES EN MOTORES ASÍNCRONOS

Para el análisis de las vibraciones en los motores eléctricos trifásicos, se debe tomar en cuenta que debido a las tolerancias que existen en los componentes de la máquina, siempre existirán vibraciones. Las razones por las que las vibraciones aumenten de magnitud, se debe a componentes defectuosos que se describen a continuación.

4.1. Vibración producida por desbalances

Los desbalances en el rotor de un motor eléctrico es una de las fuentes más comunes de vibraciones. El desbalance siempre se encuentra presente, y puede clasificarse de acuerdo a su origen como.

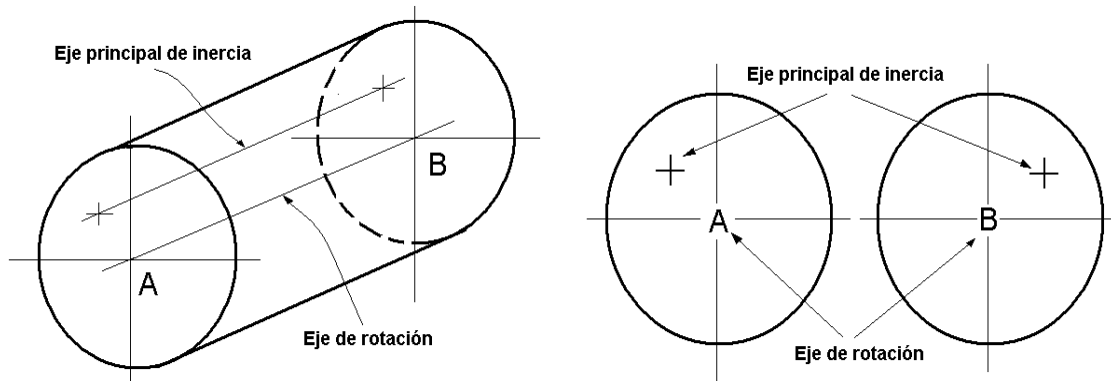
- Desbalance estático.
- Desbalance par.
- Desbalance dinámico.

El desbalance en el rotor de un motor asíncrono trifásico, ocasiona que aparezcan fuerzas centrífugas sobre el rotor. Estas fuerzas producirán vibraciones que se transmitirán a los cojinetes y chumaceras.

El desbalance estático se define como el eje longitudinal principal de inercia del rotor está desplazado paralelamente con respecto al eje de rotación.

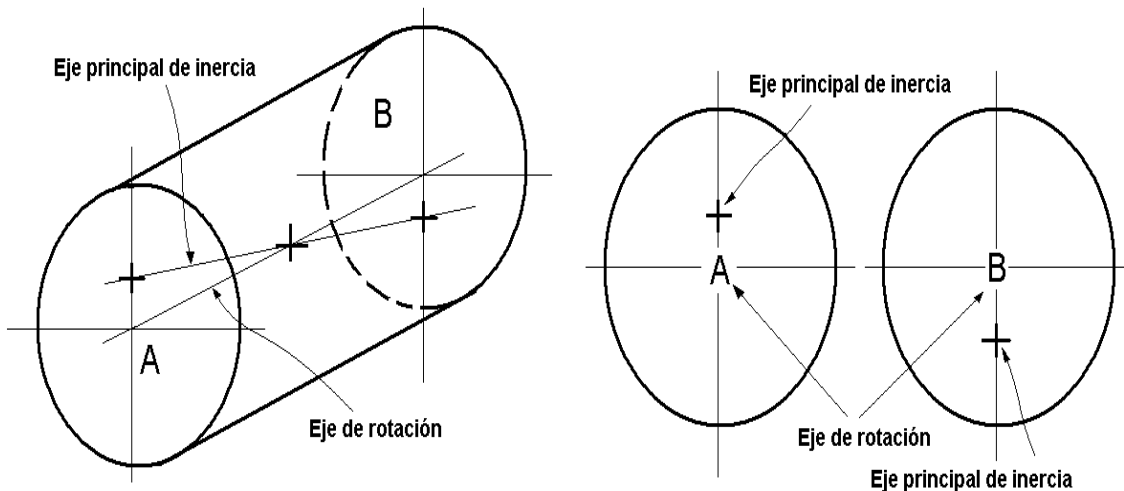
Cuando se colocan los extremos del rotor sobre dos piezas giratorias, ésta se desplazará hasta que la parte más pesada quede en la parte inferior. Este es el desbalance estático, ya que no es necesario hacer girar al rotor para que quede en equilibrio. El desbalance estático se muestra en la figura 17.

Figura 17. Desbalance estático



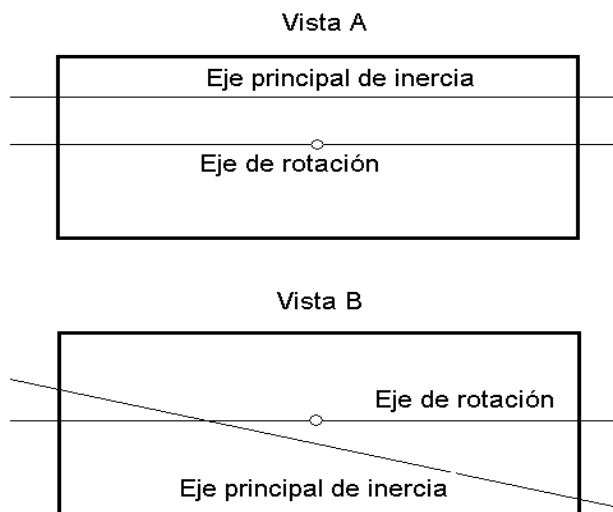
El desbalance par se define como el eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en el centro de masa del propio rotor. El desbalance par se muestra en la figura 18.

Figura 18. Desbalance par



El desbalance dinámico se define como el eje longitudinal principal de inercia del rotor no intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo a éste. Este tipo de desbalance se muestra en la figura 19.

Figura 19. Desbalance dinámico



Las causas de desbalance son varias entre las que podemos mencionar:

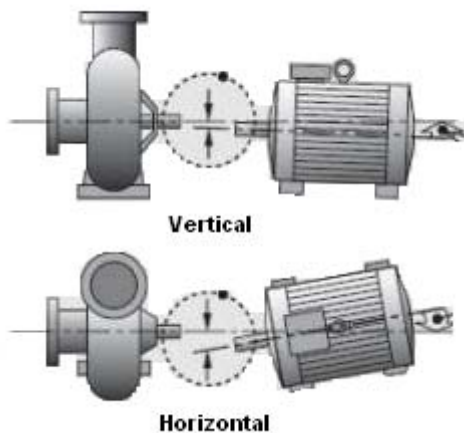
- Desgaste y erosiones por rozamiento.
- Corrosión.
- Deformaciones en el rotor.

También debido a variaciones de temperatura en el rotor se producen fuerzas que tienden a curvar el rotor, y con ello la aparición de desbalance.

4.2. Vibración debida a la falta de alineamiento

Debido a que los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica. Los motores eléctricos se suelen acoplar a otras máquinas que tienen un determinado funcionamiento, como una bomba de agua, una lavadora, etcétera. La principal fuente de vibración debida a la falta de alineamiento ocurre cuando el eje del motor eléctrico no está alineada con el eje de la máquina acoplada, aunque también suele suceder entre rodamientos o en un par de ruedas dentadas. Este acoplamiento se realiza a través de un elemento rígido o flexible. La falta de alineación puede ser vertical u horizontal. La figura 20 muestra la falta de alineamiento de dos máquinas.

Figura 20. Desalineación de máquinas



Algunas consecuencias a la falta de alineación son:

- Mayor consumo de energía
- Fallos en rodamientos
- Rotura de ejes
- Problemas en acoplamientos

- Incremento en la temperatura de carcasa
- Fugas de aceite u otros fluidos
- Daños o aflojamiento en tornillos de sujeción
- Incremento en la vibración axial y radial en la máquina

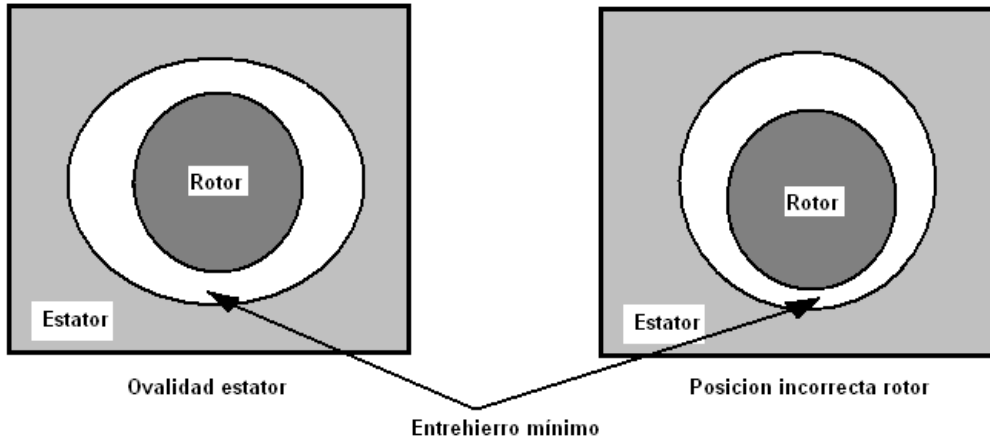
La correcta alineación ayudará a la disminución en costos de repuestos y pérdida de producción.

4.3. Vibración debida a falta de excentricidad

El espacio que existe entre el rotor y el estator (entrehierro) es muy reducido, algunos milímetros. Es por esto que el rotor debe de estar lo mas alineado posible, así también la redondez del eje y la excentricidad de sus posiciones relativas durante el giro. Si lo anterior no se cumpliera, puede producir deformación en el entrehierro. Los problemas de excentricidad pueden dividirse en dos grupos que son excentricidad estática y dinámica.

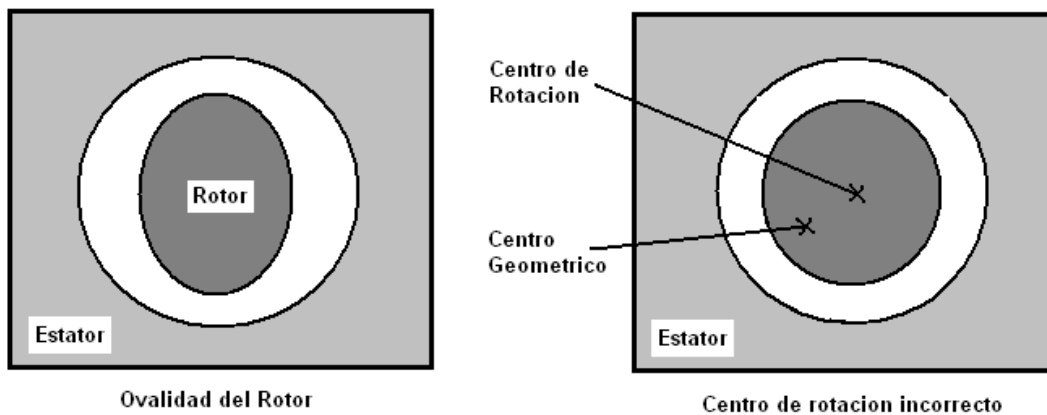
La excentricidad estática consiste en una deformación del entrehierro el cual solo aparece en una posición fija en el espacio. Esta excentricidad puede ser causada por la ovalidad del alojamiento estatórico, un incorrecto posicionamiento del rotor, causado por un mal apoyo en los cojinetes, malformación de los alojamientos, excesiva tolerancia y otros. La figura 21 se muestra las dos deformaciones posibles debido a la excentricidad estática.

Figura 21. Formas de excentricidad estática



En la excentricidad dinámica la deformación en el entrehierro mínimo no permanece en una posición fija en el espacio, sino gira junto con el rotor. Las razones de este tipo de excentricidad son similares al de la excentricidad estática; desgaste de los cojinetes, flexión del eje. En la figura 22 se muestra la excentricidad dinámica.

Figura 22. Excentricidad dinámica



4.4. Vibración debida a rodantes defectuosos

En todas las máquinas rotativas se utilizan cojinetes para apoyar los extremos del eje, y debido a que todas las vibraciones se transmiten directamente a los cojinetes y que estas están en continua fricción, es de suma importancia determinar su estado con un análisis de vibraciones.

Los cojinetes se pueden clasificar en dos grupos: de elementos rodantes (rodamientos) y de camisa (casquillos). Los cojinetes de rodamientos utilizan elementos rodantes para eliminar la fricción y los cojinetes de casquillos o de fricción están basados en el deslizamiento entre piezas. Los rodamientos pueden ser de bolas o de rodillos, los cuales se utilizan para altas velocidades.

Las principales características de los cojinetes de rodamientos son:

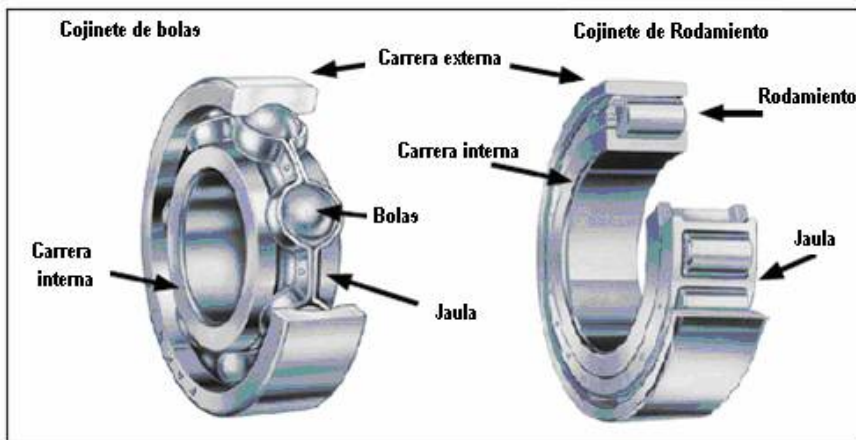
- Lubricación sencilla y sin mantenimiento
- Menor espacio axial
- Capacidad de absorber cargas axiales y radiales
- Pueden trabajar a temperaturas mayores a las de fricción

Las principales características de los cojines de casquillos son:

- Son mejores a altas velocidades
- Menor peso
- Instalación sencilla
- Menos ruidosos
- Mayor tolerancia a los choques

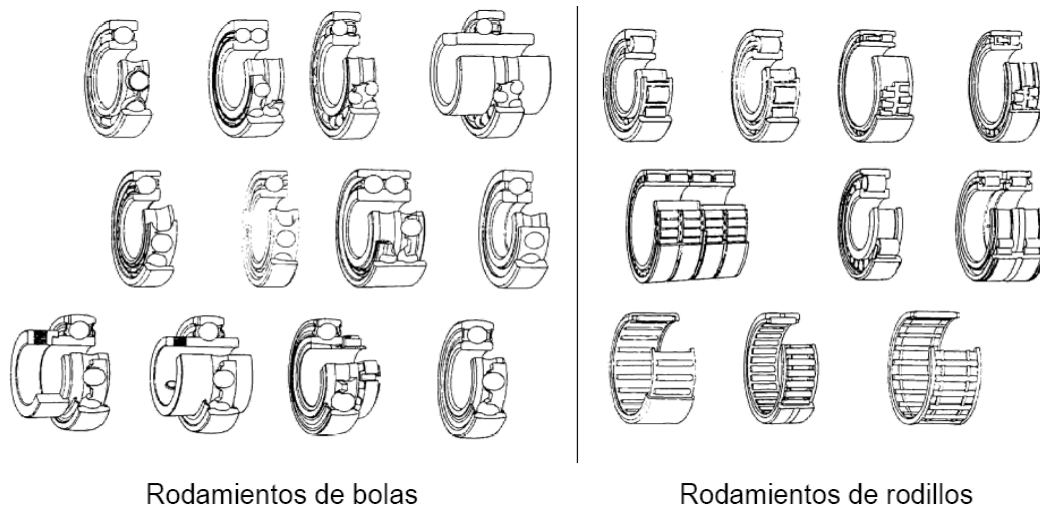
Las partes principales de un cojinete de rodillos son: Carrera externa, carrera interna, jaula y elementos de rodadura. La figura 23 muestra las partes de un cojinete.

Figura 23. Construcción del cojinete



El tipo de rodamientos que se utilice en el cojinete dependerá del tipo de esfuerzos a los que será aplicado y determinará el tipo de configuración de los elementos de rodadura. La figura 24 muestra las configuraciones posibles.

Figura 24. Configuraciones de cojinetes



Los cojinetes de rodamientos se clasifican como cojinetes de bolas o de rodillos, los cojinetes de rodillos se clasifican en cojinetes radiales y de empuje. Los cojinetes de bolas se subdividen en radiales, de empuje y de contacto angular.

Los cojinetes de bolas se muestran en la figura 23. Son usados en una gran variedad de aplicaciones. Son capaces de operar en altas e incluso muy altas velocidades y requieren poca atención o mantenimiento en servicio. Estas características, los hacen ser los más utilizados. En la misma figura 23 también se muestra el cojinete de rodillos cilíndricos, que son más rígidos que los de bolas y se utilizan para cargas pesadas y ejes de gran diámetro.

Los cojinetes de rodillos cónicos, la inclinación del eje de rodamiento permite que este tipo de cojinete tenga la capacidad de sostener cargas simultáneas axiales y radiales a velocidades moderadas.

Los cojinetes de rodillos cilíndricos de empuje, soportan pesadas cargas axiales, son insensibles a los choques y requieren poco espacio axial. Son rodamientos de una sola dirección y solamente pueden aceptar cargas axiales en una dirección. Su uso principal es en aplicaciones donde la capacidad de carga de los rodamientos de bolas de empuje es inadecuada.

Los cojinetes de bolas radiales de contacto angular son diseñados específicamente para soportar cargas de empuje moderadas en una dirección, combinadas con cargas radiales moderadas.

Los cojinetes de bolas radiales de autoalinamiento, son para cargas radiales moderadas y altas velocidades, donde se espera un desalineamiento o una deflexión de la flecha.

Los cojinetes de bolas de empuje son diseñados sólo para empuje o para empuje y baja fuerza radial combinados.

Los cojinetes de aguja se caracterizan por rodillos cilíndricos largos, que tiene una relación longitud/diámetro del orden de 4 o mayor, y se diseñan para aplicaciones que requieren espacio libre radial pequeño.

La vida útil de los cojinetes depende del estado en que se utilice, así también a la fatiga que sufre el material del que está hecho. Las vibraciones siempre existirán debido a la pequeña tolerancia y la fricción de sus componentes. Pero si por ejemplo un rodamiento sufre una grieta en su superficie, producirá el aumento en la amplitud de la vibración y la frecuencia a que sucede la vibración dependerá de la geometría y velocidad de rotación del eje. La mayor parte de fallas en los cojinetes de rodillos debe a las siguientes causas.

- Sobrecarga en el cojinete.
- Lubricación insuficiente o excesiva.
- Contaminación externa.
- Instalación incorrecta.
- Defectos de fábrica.
- Exposición a vibraciones cuando el cojinete está en reposo.
- Circulación de corriente eléctrica a través del cojinete.

Al inicio del fallo en el cojinete de rodillos, aparecen grietas en la superficie de los rodamientos y en las pistas, los cuales no son visibles al ojo humano. Estas grietas producirán vibraciones y calentamiento no percibibles. En este estado no es económico sustituir el cojinete que aún tiene una vida útil considerable.

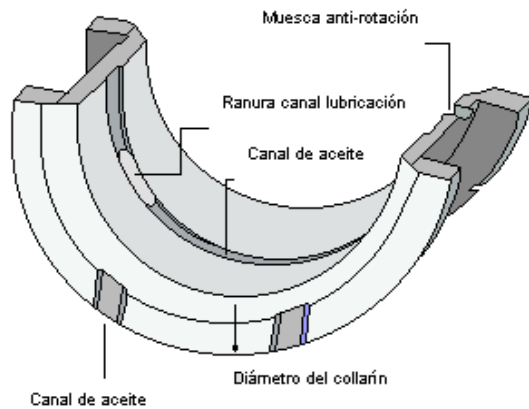
Luego de haberse iniciado el agrietamiento en el cojinete, empiezan a aparecer grietas que son visibles al ojo humano, produciéndose vibraciones de mayor magnitud, caracterizado por un ruido audible y calentamiento. En este punto se debe de cambiar al cojinete para evitar un estado catastrófico del cojinete. Si esto sucediera el ruido aumentaría su intensidad, así también la temperatura, produciendo que las grietas aumenten hasta destruir el cojinete.

Se puede detectar el calentamiento de los cojinetes, tocando las partes de la carcasa del motor donde se localizan los cojinetes, pero si esto no fuera posible debido a la seguridad del personal de mantenimiento, sería necesario tomar fotografías con una cámara infrarroja para poder determinar la temperatura donde se encuentran localizados los cojinetes.

4.5. Vibración debida a casquillos defectuosos

Los cojinetes de casquillos, también llamados de fricción, el desgaste debido a la fricción de sus componentes se evita con una película uniforme de lubricante. En funcionamiento normal, el eje del motor esta centrado en esta película de lubricante. Debido a la película de lubricante, los fallos que producen vibraciones en este tipo de cojinete son muy distintos a los cojinetes de rodillos y puede identificarse con el comportamiento anormal del lubricante, con un análisis de vibraciones. En la figura 25 tenemos la figura del cojinete de casquillos, en la que podemos observar que contiene canales exclusivos para la lubricación y una muesca que evitará que gire con el rotor.

Figura 25. Cojinete de casquillos



Las fuentes principales de vibraciones en este tipo de cojinete son debidas a: excentricidad de las partes rotativas, pandeo del eje, fallo en los ajustes, defectos en los cojinetes. Las vibraciones suelen ser producidas por oscilaciones autoexcitadas por la película de lubricante.

Es muy importante saber también que los cojinetes fallan debido a la presencia de partículas que provocan partes levantadas con el riesgo de interferir en el eje. Falta de lubricación debido a una fuga del lubricante produciendo la destrucción del cojinete. Errores de montaje como cojinetes invertidos tapando las entradas del lubricante. Errores en el mecanizado de los componentes. Sobrecarga que produce fatiga del material originando desprendimientos de trozos de material. Corrosión debió a aceite en mal estado dañando la superficie del cojinete. Y cavitación, cuando la presión del aceite disminuye localmente produciendo burbujas de vapor dañando la superficie del cojinete, esto se presenta en zonas donde el flujo de aceite es discontinua, como ranuras de taladro.

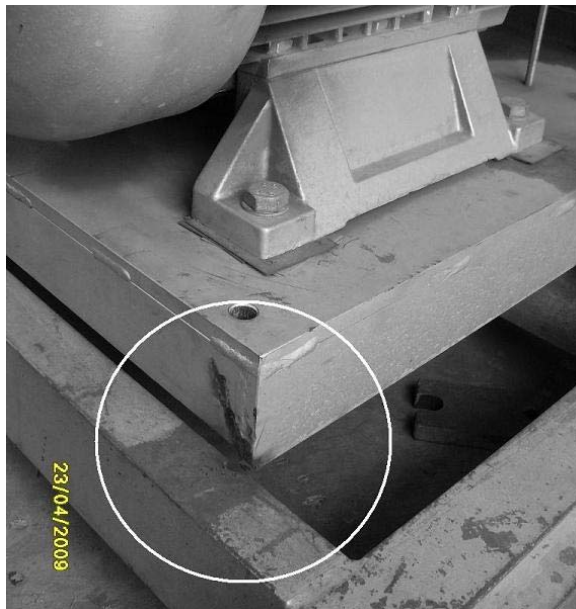
4.6. Vibración debida a partes flojas

La soltura mecánica es debido al deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que se han excedido en las tolerancias permitidas o simplemente se han aflojado debido a movimiento del motor. Pueden aparecer holguras en la base de la máquina y en los cojinetes afectando el alineamiento del eje.

Las holguras pueden crear señales de vibración. La vibración que caracteriza a la soltura de partes la produce las fuerzas de excitación generadas por problemas como el desbalance o falta de alineamiento.

En la figura 26 se muestran holguras en las bases de máquinas, así como algunas soluciones a estos problemas.

Figura 26. Holguras en la base de máquinas



4.7. Vibración debida a roturas de barras en el rotor

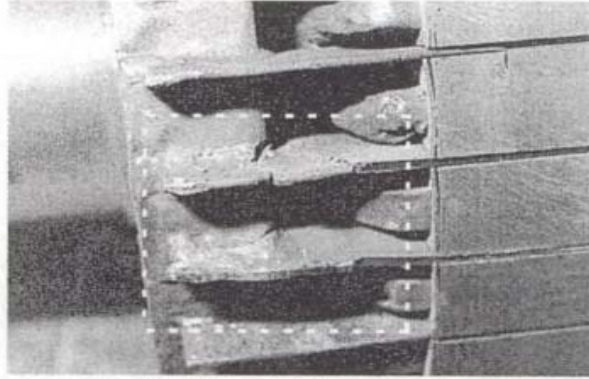
Como anteriormente se había visto, los motores asíncronos de rotor tipo jaula de ardilla, el rotor consiste en un conjunto de barras conductoras cortocircuitadas en sus extremos por anillos. El núcleo magnético del rotor está constituido por un conjunto de chapas magnéticas y aisladas entre si, el cual ocupa el espacio entre las barras.

La rotura en las barras sucede principalmente en la soldadura entre la barra y los anillos de corto circuito debido a que es donde se concentran los esfuerzos mecánicos, aunque éstas estén diseñadas para soportar el arranque y paro del motor, la falla ocurre debido a la fatiga del material.

Además, debido a los regímenes transitorios térmicos, el motor de jaula puede sufrir de movimientos diferenciales dentro del paquete magnético rotórico, lo que conduce a torsiones y agrietamiento de los anillos.

Cuando empieza el agrietamiento de la barra o anillo, el proceso es degenerativo, la parte defectuosa se calienta hasta romperse. Esta rotura provoca la aparición de arcos eléctricos, haciendo que las barras adyacentes soporten más corriente y por tanto la temperatura y esfuerzos mecánicos aumentan, con ello la aparición de nuevas grietas. La figura 27 muestra un rotor con las barras rotas.

Figura 27. Barras rotas en la proximidad del anillo

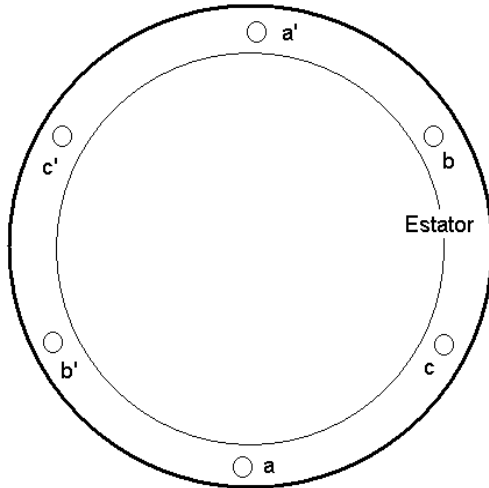


4.8. Vibración debida a fallas electromagnéticas

Este tipo de fallas ocurre solo cuando el campo magnético se ve alterado debido a un corto circuito entre una bobina y el núcleo, cuando una bobina o barra se rompe y también debido a una falla en la alimentación de corriente eléctrica del sistema, esto puede ocurrir cuando un conductor eléctrico se rompe o cuando una de las protecciones del motor se abre, como sucede con un fusible.

Para entender lo que sucede en el campo magnético en el estator, se aplicará una corriente triásica al estator de la figura 28.

28. Posición de los devanados en el estator



Supondremos que las corrientes de los tres devanados son las siguientes

$$I_{aa'}(t) = I_M \text{Sen} \omega t \text{ A}$$

$$I_{bb'}(t) = I_M \text{Sen}(\omega t - 120) \text{ A}$$

$$I_{cc'}(t) = I_M \text{Sen}(\omega t - 240) \text{ A}$$

La corriente del devanado aa' que sale de a' hacia a, de la figura 28, produce una intensidad de campo magnético

$$H_{aa'}(t) = H_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ \text{ A} * \text{Vuelta}/m$$

Así también como los otros dos devanados

$$H_{bb'}(t) = H_M \text{Sen}(\omega t - 120) \angle 120^\circ \text{ A} * \text{Vuelta}/m$$

$$H_{cc'}(t) = H_M \text{Sen}(\omega t - 240) \angle 240^\circ \text{ A} * \text{Vuelta}/m$$

La densidad del flujo magnético está dada por $B = \mu H$, donde μ es la permeabilidad del material, entonces tenemos:

$$B_{aa'}(t) = B_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ T$$

$$B_{bb'}(t) = B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \angle 120^\circ T$$

$$B_{cc'}(t) = B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \angle 240^\circ T$$

El campo magnético resultante es

$$B_{net}(t) = B_{aa'}(t) + B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t)$$

Al sustituir las ecuaciones de los campos magnéticos generados por cada devanado tenemos:

$$B_{net}(t) = B_M \text{Sen} \omega t \angle 0^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \angle 120^\circ + B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \angle 240^\circ$$

$$B_{net}(t) = B_M \text{Sen} \omega t \hat{x}$$

$$- [0.5 B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \hat{x} + \frac{\sqrt{3}}{2} B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \hat{y}]$$

$$- [0.5 B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \hat{x} - \frac{\sqrt{3}}{2} B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \hat{y}]$$

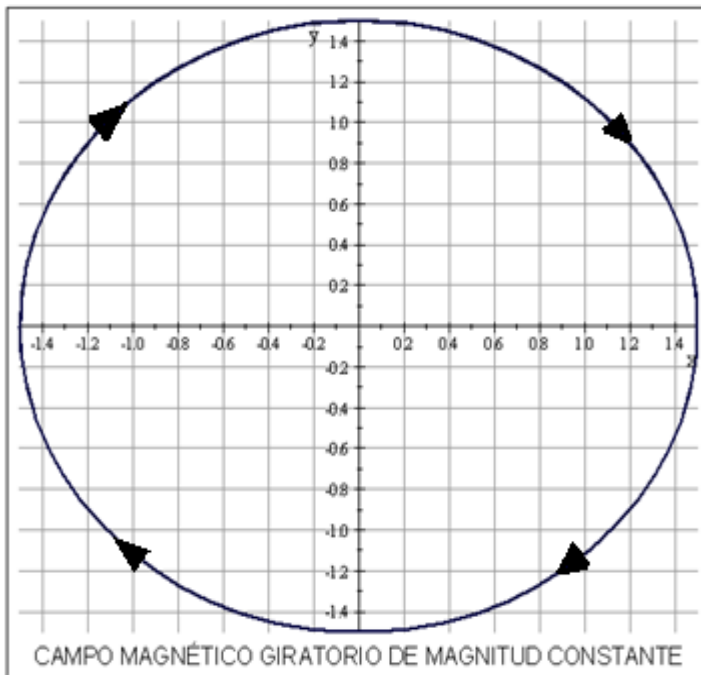
$$B_{net}(t) = \left[B_M \text{Sen} \omega t + \frac{1}{4} B_M \text{Sen} \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Cos} \omega t + \frac{1}{4} B_M \text{Sen} \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Cos} \omega t \right] \hat{x}$$

$$+ \left[-\frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Sen} \omega t - \frac{3}{4} B_M \text{Cos} \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Sen} \omega t - \frac{3}{4} B_M \text{Cos} \omega t \right] \hat{y}$$

$$\mathbf{B}_{net}(t) = (1.5 B_M \text{Sen} \omega t) \hat{x} - (1.5 B_M \text{Cos} \omega t) \hat{y}$$

En la figura 29 se representa el comportamiento del campo magnético giratorio, donde observamos que la magnitud es constante en toda su trayectoria.

Figura 29. Campo magnético giratorio de magnitud constante



Ahora, para la falla supondremos que $B_{aa'}(t) = 0$, debido a que la corriente del bobinado aa' es cero. El campo magnético resultante es:

$$B_{net}(t) = B_{bb'}(t) + B_{cc'}(t)$$

$$B_{net}(t) = -[0.5B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \hat{x} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_M \text{Sen}(\omega t - 120) \hat{y}]$$

$$- [0.5B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \hat{x} - \frac{\sqrt{3}}{2}B_M \text{Sen}(\omega t - 240) \hat{y}]$$

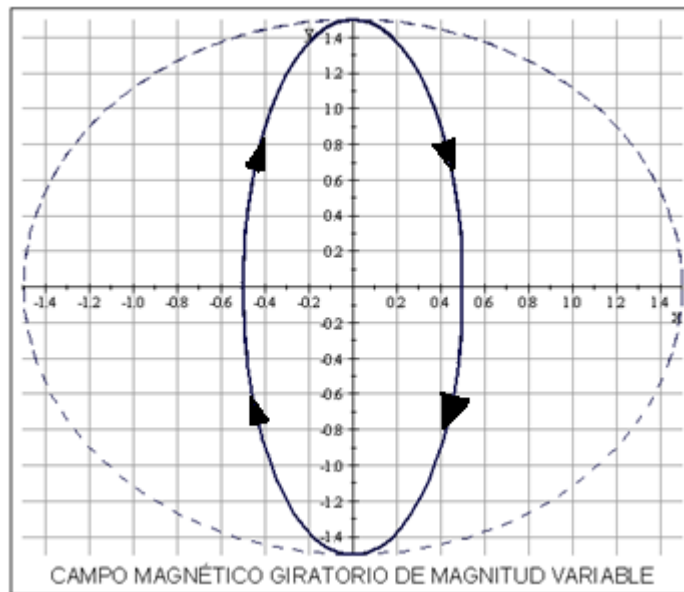
$$B_{net}(t) = \left[\frac{1}{4} B_M \text{Sen}\omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Cos}\omega t + \frac{1}{4} B_M \text{Sen}\omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Cos}\omega t \right] \hat{x}$$

$$+ \left[-\frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Sen}\omega t - \frac{3}{4} B_M \text{Cos}\omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} B_M \text{Sen}\omega t - \frac{3}{4} B_M \text{Cos}\omega t \right] \hat{y}$$

$$B_{net}(t) = (0.5 B_M \text{Sen}\omega t) \hat{x} - (1.5 B_M \text{Cos}\omega t) \hat{y}$$

En la figura 30, se representa el comportamiento del campo magnético giratorio, donde observamos que la magnitud no es constante en toda su trayectoria.

Figura 30. Campo magnético giratorio de magnitud variable



La magnitud campo magnético se ve afectado debido a la falta de una de las corrientes en el estator, y como el par producido en el motor depende del campo magnético giratorio, esto provocará vibraciones en el motor eléctrico.

$$\tau_{inducido} = k B_R \times B_S$$

Donde:

k es una constante que depende de las características del motor

B_R es la densidad de campo magnético del rotor.

B_s es la densidad de campo magnético del estator.

4.8.1. Desbalances en el campo magnético

Si un bobinado del estator llega a abrirse o a cortocircuitarse con el conjunto de chapas debido a una falla, el campo magnético giratorio se verá afectado, produciendo un desbalance en el par producido. Así también sucedería si una barra o bobina del rotor (dependiendo del tipo de motor) se rompiera.

En el tema anterior se demostró que la magnitud de la densidad de campo magnético en condiciones normales de funcionamiento es constante como lo indica la ecuación de la densidad de campo magnético neto

$$\mathbf{B}_{net}(t) = (1.5B_M \text{Sen}\omega t) \hat{x} - (1.5B_M \text{Cos}\omega t) \hat{y}$$

En condiciones de falla, como la falta de la densidad de campo magnético de un bobinado produce una densidad de campo magnético de magnitud variable provocando un desbalance en el campo magnético del estator, como lo indica la siguiente ecuación

$$\mathbf{B}_{net}(t) = (0.5B_M \text{Sen}\omega t) \hat{x} - (1.5B_M \text{Cos}\omega t) \hat{y}$$

4.8.1.1. Corto circuito en el devanado del estator

El bobinado del estator, que consiste en un determinado número de polos, puede presentarse espiras en corte, lo cual hace que disminuya la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento.

4.8.1.2. Corto circuito en el devanado del rotor

En un motor de inducción con rotor bobinado al ocurrir un corto circuito en el devanado del rotor, esto provocará que la corriente aumente y con ello la temperatura. Esto provocará deformaciones debido a la alta temperatura, pudiendo provocar que el rotor roce con el estator, esto hace que se originen fuerzas electromagnéticas desbalanceadas, aumentando aun más la temperatura y haciendo más severas las deformaciones en el rotor.

5. ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Debido a que las vibraciones son producidas por distintos componentes del motor eléctrico y cada una de éstas vibra a frecuencias características, las frecuencias características de cada componente se pueden utilizar para determinar el fallo en el motor con la ayuda del espectro de frecuencias de las vibraciones. Cada una de estas frecuencias generadas son iguales al número de veces del evento que está teniendo lugar, multiplicada por la velocidad de rotación del rotor.

Para dar un buen diagnóstico en el análisis de vibraciones, es muy importante tener un espectro de vibraciones, tomados cuando el motor se encuentre en condiciones normales de funcionamiento, para tenerlo como referencia y compararlos con los análisis futuros, determinando el progreso de las vibraciones.

El análisis de vibraciones nos dará la frecuencia y magnitud de las vibraciones, pero para poder determinar la severidad de las vibraciones se utilizan distintos tipos de normas.

ISO 2372 “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 revoluciones por segundo”, el cual especifica si la magnitud de la vibración se encuentra en un estado aceptable de acuerdo a la potencia de la máquina. Esta norma es aplicable a máquinas rotativas con rotores rígidos y a máquinas rotativas con rotores flexibles y los datos para su aplicación son el nivel global de vibraciones en velocidad-valor eficaz RMS, en un rango de frecuencias entre 10 y 1,000 Hz.

La norma ISO 2372 clasifica a las máquinas como se indica en la tabla IV.

Tabla IV. Clasificación de máquinas según, ISO 2372

CLASE I	Componentes individuales de motores y máquinas, íntegramente conectados con la máquina completa en sus condiciones normales de funcionamiento (motores eléctricos de hasta 15 Kw)
CLASE II	Máquinas de tamaño medio, (típicamente motores eléctricos con una potencia de salida de 15 a 75 Kw) sin cimentaciones especiales, motores montados rígidamente, o máquinas (hasta 300 Kw) sobre cimentaciones especiales.
CLASE III	Motores con grandes fuerzas motrices y máquinas 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 máquinas sin grandes masas giratorias sobre cimentaciones que son relativamente amortiguadores en la dirección de la medición de la vibración (turbogeneradores).
CLASE V	Máquinas 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.

Como se observa en la tabla V, la severidad de las vibraciones se clasifican en Normal, Admisible, Límite y No permisible de acuerdo a la clasificación de la máquina que se basa en el tipo y tamaño de la máquina, el tipo de servicio, el sistema de soporte de la máquina y el efecto de la vibración en la máquina sobre el entorno de la misma.

Tabla V. Severidad de vibraciones, según ISO 2372

45.00				No Permissible
28.00	No Permissible	No Permissible	No Permissible	Limite
18.00				
11.20	Limite	Limite	Limite	Admisible
7.10				
4.50	Admisible	Admisible	Admisible	
2.80				
1.80	Normal	Normal	Normal	Normal
1.12				
0.71	Normal	Normal	Normal	
0.45				
0.28				
0.18				
Vel. [mm/s]	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV

ISO 3945 “Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas; velocidades de operación entre 10 y 200 revoluciones por segundo”. Esta norma permite la severidad de las vibraciones en máquinas grandes para velocidades de operación entre 600 y 1200 RPM. Se aplica a la CLASE III Y IV definidas anteriormente. La tabla VI muestra la severidad de las vibraciones según la norma ISO 3945.

Tabla VI. 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		
28,0	Inaceptable	Inaceptable
71,0		

ISO 10816 “Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas”. Estas normas son mas recientes que las anteriores. El valor eficaz de la velocidad de vibración se usa para evaluar la condición de la máquina.

ISO 7919 Describe los requisitos generales para la medida y evaluación de la vibración de varios tipos de la máquina cuando las medidas de vibración son hecho al girar los árboles

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 es una adaptación de las normas ISO 2372 para motores eléctricos, y se aplica a motores eléctricos de corriente alterna trifásica y a motores de corriente continua con alturas de eje (distancia vertical entre la base del motor y la línea central el eje) entre 80 y 400 mm.

Las medidas se realizan con la máquina suspendida libre. El motor opera a la frecuencia nominal y a su velocidad nominal. Las medidas de la severidad de vibración deben de realizarse sin carga de operación y a la temperatura alcanzada por el motor después de un período suficiente de operación en situación de no carga. La tabla VII establece los límites de severidad de las vibraciones.

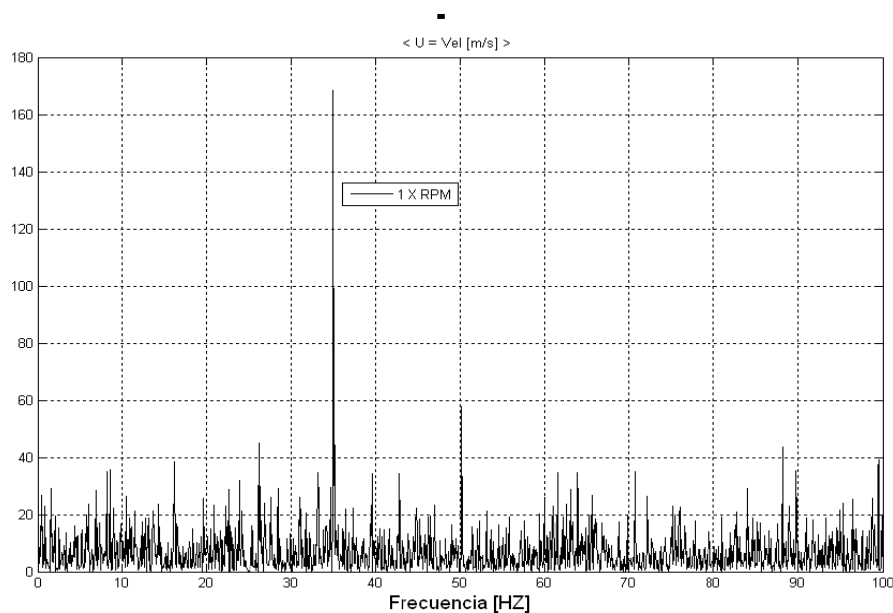
Tabla VII. Severidad de vibraciones según ISO 2373

GRADO DE CALIDAD	REGIMEN DE SERVICIO	VALOR MÁXIMO DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN RMS PARA EJES DE ALTURA H (mm)					
		$80 \leq H \leq 132$		$132 \leq H \leq 225$		$225 \leq H \leq 400$	
	rpm	mm/s	in/s	mm/s	in/s	mm/s	in/s
N Normal	600 to 3600	1.8	0.071	2.8	0.110	4.5	0.177
R Reducido	600 to 1800	0.71	0.028	1.12	0.044	1.8	0.071
	1800 to 3600	1.12	0.044	1.8	0.071	2.8	0.110
S Especial	600 to 1800	0.45	0.018	0.71	0.028	1.12	0.044
	1800 to 3600	0.71	0.028	1.12	0.044	1.8	0.071

5.1. Desbalances

La presencia de desbalance como único problema en el motor se identifica con el aumento de la amplitud de los armónicos con frecuencia igual a la del giro del rotor 1xRPM y se detecta en dirección radial debido a que el desequilibrio es producido por una fuerza en dirección radial (la medición se realiza en el cojinete de apoyo del rotor). La figura 31 nos muestra el espectro de frecuencias cuando ocurre desbalance.

Figura 31. Espectro de frecuencias del desbalance



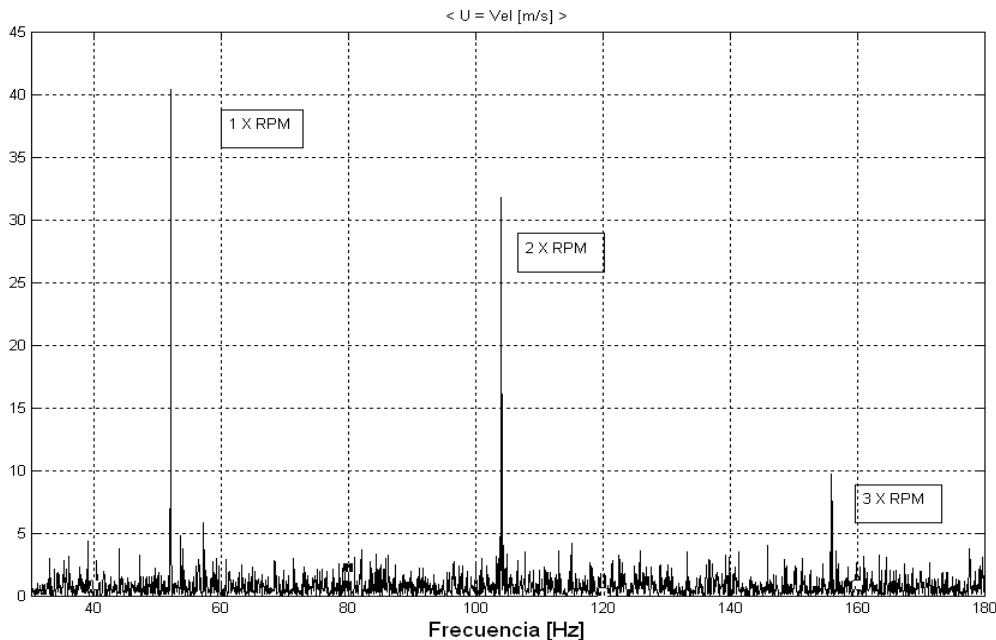
5.2. Falta de alineamiento

La falta de alineamiento se identifica dependiendo del tipo de desalineamiento.

Si la falta de alineamiento es vertical, se presentan vibraciones radiales a frecuencias armónicas que son dos veces la velocidad de giro del rotor $2xRPM$.

Si la falta de alineamiento es angular, producirá vibraciones axiales de frecuencias armónicas que duplica a la velocidad de giro del rotor $2xRPM$ o tres veces la velocidad de giro del rotor $3xRPM$. La figura 32 muestra el espectro de frecuencias cuando ocurre la falta de alineamiento.

Figura 32. Espectro de frecuencias en la falta de alineamiento



Si las tres armónicas presentes son significativas, medidos en dirección horizontal, entonces es muy probable que la falta de alineamiento sea vertical.

Si las tres armónicas presentes son significativas, medidos en dirección vertical, entonces es muy probable que la falta de alineamiento sea horizontal.

Si las tres armónicas presentes son significativas, medidos en dirección axial, entonces es muy probable que la falta de alineamiento sea angular.

Si las tres armónicas son significativas en las tres direcciones de medición, indica que la máquina se encuentra en un estado catastrófico.

5.3. Excentricidad

La presencia de excentricidad en los motores eléctricos asíncronos trifásicos, en cualquiera de los dos tipos posibles, los efectos producidos son los mismos; aparición de armónicos de alta y baja frecuencia en el espectro de las corrientes del estator, aparición de fuerzas pulsatorias de origen eléctrico que producirán vibraciones características y el incremento de las vibraciones.

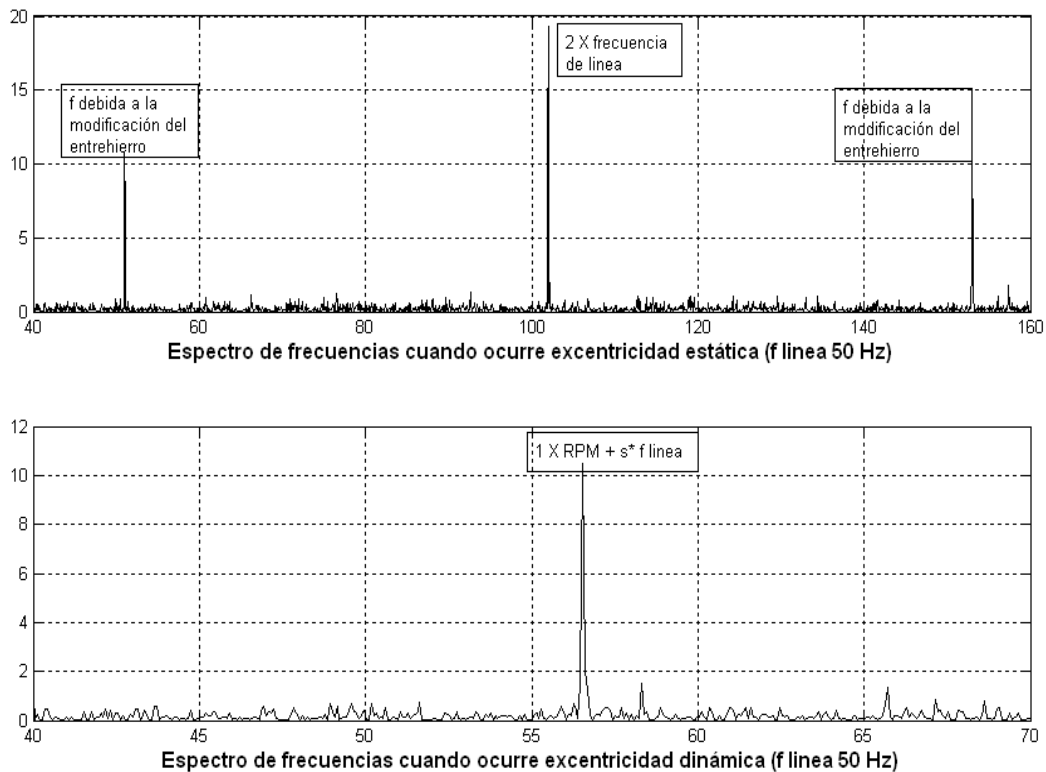
Debido al efecto que tiene la excentricidad en los motores eléctricos, el análisis se puede realizar con el espectro de las corrientes de alimentación y también con el análisis de vibraciones.

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

La frecuencia de la vibración cuando ocurre excentricidad estática es dos veces la frecuencia de la corriente de alimentación del rotor $2xf_{línea}$, también es frecuente la aparición de frecuencias de 50 y 200 Hz, causado por la modificación del entrehierro debida a desgaste de los cojinetes.

La frecuencia de vibración cuando ocurre excentricidad dinámica suele suceder en bandas laterales alrededor de la frecuencia de giro, de anchura $s \cdot f_{\text{linea}}$, donde s es el deslizamiento. Entonces la frecuencia de vibración queda $f_v = 1 \cdot \text{RPM} \pm d$ donde $d = s \cdot f_{\text{linea}}$. La figura 33 nos muestra el espectro de frecuencias cuando ocurre excentricidad en el motor eléctrico.

Figura 33. Espectro de frecuencias debido a la excentricidad



5.4. Rodantes defectuosos

Para poder dar un diagnostico de falla en rodantes defectuosos en cojinetes, se debe de tomar en cuenta los componentes de esta, como lo son los rodantes, carrera externa e interna y la jaula. Cada uno de estos componentes genera una vibración de frecuencia característica.

La frecuencia de giro de los rodillos (BSF), esta originado por la rotación de estas alrededor de su propio eje, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$BSF = \frac{1}{2} N \times \left(\frac{D}{d} \right) \times \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]$$

Cuando ocurre una falla en un rodillo, esta tiene contacto con la carrera externa e interna del cojinete en cada una de sus revoluciones, la frecuencia del defecto de la bola será dos veces BSF.

La frecuencia de rotación de la jaula o fundamental (FTF), se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$FTF = \frac{1}{2} N \times \left[1 - \frac{d}{D} \right]$$

Para determinar un defecto en la carrera externa, se calcula utilizando el paso en la pista exterior (BPFO):

$$BPFO = \frac{1}{2} Nn \times \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right) \right]$$

La frecuencia de defecto en la carrera interna o paso de la bola en la carrera interna se calcula como:

$$BPFO = \frac{1}{2} Nn \times \left[1 + \left(\frac{d}{D} \right) \right]$$

Donde los símbolos significan lo siguiente.

N: Velocidad del eje en revoluciones por segundo.

D: Diámetro medio del rodamiento en pulgadas.

d: Diámetro de las bolas o rodillos en pulgadas.

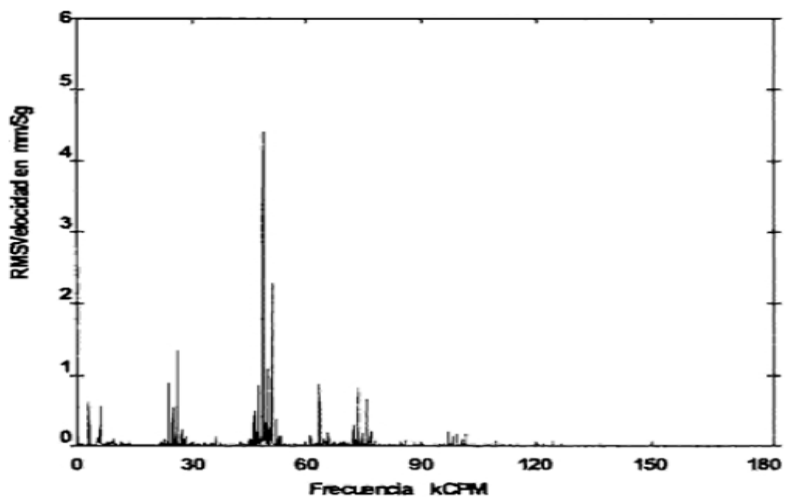
n: número de bolas o rodillos.

Las frecuencias de rotación y defecto, también pueden ser originadas por desequilibrio, desalineación y cargas anormales amplificando las frecuencias específicas del rodamiento, quien absorbe la carga. Una carga lateral excesiva en el eje, amplificara la BSF. La desalineación amplificara la FTF.

La frecuencia fundamental, ocurrirá aproximadamente al 40% de la velocidad de funcionamiento. Por tanto una banda estrecha entre el 30 y 40% de la velocidad de funcionamiento detectara cualquier cambio anormal en las condiciones de la caja.

La frecuencia de rotación de la bola (BSF) es siempre la más baja frecuencia y la frecuencia de paso de las bolas en la pista interior (BPFI) es siempre la frecuencia más alta. Una banda estrecha con límite inferior cerca del 10% por debajo de BSF y limite superior con 10% mas alto que FTF, mostrara estas frecuencias de defecto. En las figuras 34 se muestra el espectros de vibraciones cuando ocurren fallos en rodamientos. Con la técnica de registro de banda estrecha, se puede detectar cualquier condición anormal en rodamientos.

Figura 34. BSF modulada con bandas laterales a FTF



5.5. Casquillos defectuosos

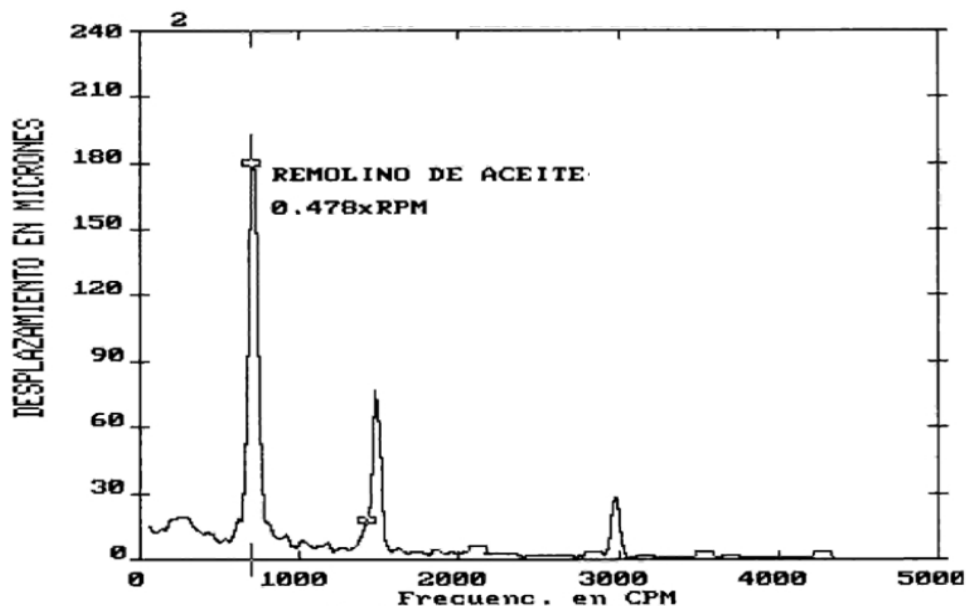
Las vibraciones se presentan cuando ocurren anomalías en el aceite. Las ondas de choque producidos por los cojinetes de casquillos, son absorbidas en gran parte por el aceite, especialmente los de alta frecuencia.

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 35 se da un ejemplo de este caso.

Figura 35. Espectro de vibraciones debido a remolinos de aceite



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

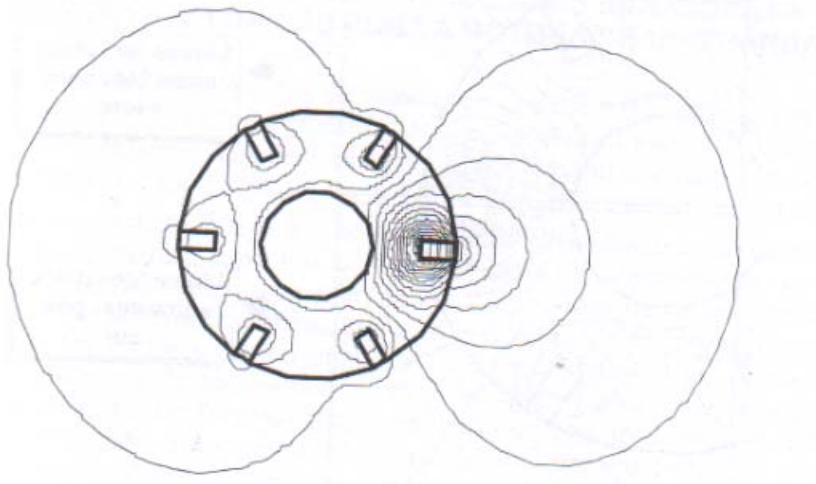
5.6. Partes flojas

Una falla debida a partes flojas en el motor, produce armónicas de frecuencia igual al 50% de la velocidad de rotación, y múltiplos de la frecuencia anterior como 50, 100, 150 por ciento.

5.7. Roturas de barras en el rotor

El análisis que se realiza para determinar si existen barras rotas en el rotor del motor eléctrico, no es a través de la medición de las vibraciones, sino con el análisis de la corriente de alimentación del motor eléctrico debido a los efectos en el campo magnético en la corriente de alimentación cuando existe una barra rota. La figura 36 muestra el comportamiento del campo magnético alrededor de una barra rota.

Figura 36. Líneas de flujo en una barra rota



El campo causado por la rotura de la barra presenta, un campo alternativo de eje fijo, y un par de polos localizados a ambos lados de la avería.

Debido a que los devanados de un motor no son ideales siempre existirán armónicos en la corriente de línea. Los armónicos producidos por la rotura de una barra, aparecerán superpuestas a los armónicos ya existentes en el motor.

Para determinar el efecto que tienen los armónicos, producidos por una barra rota, en el estator, y si se tiene en cuenta que analizamos un motor de dos polos, de eje fijo y de pulsación a la frecuencia de deslizamiento, obtenemos dos series de armónicos en sentidos inversos que giran respecto al rotor con velocidad eléctrica igual a la frecuencia de pulsación del campo.

La velocidad de giro del armónico fundamental respecto al rotor sería $N_S - N$ donde $N_S = f/P$ es la velocidad de sincronismo en revoluciones por segundo y N es la velocidad de giro del rotor. Entonces la velocidad del armónico fundamental sería $P*(N_S - N)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina.

La velocidad de giro de cualquier armónico de orden i sería la misma que el de la fundamental. Por tanto para calcular la velocidad geométrica de cualquier armónico respecto al rotor, sería dividir la velocidad eléctrica del armónico entre el número de pares de polos del armónico de orden i . Debido a que la rotura de una barra en el rotor de dos polos crea un campo de dos polos, en número de polos del armónico coincidirá con su orden.

La velocidad geométrica con respecto al rotor del armónico de orden i causado por la avería sería $P*(N_S - N)/i$.

Ahora la velocidad de giro de cualquier armónico con respecto al estator sería la velocidad definida en la ecuación anterior más la velocidad de giro del rotor:

$$\frac{P * (N_s - N)}{i} + N = \frac{PN_s}{i} + N \left(1 - \frac{P}{i} \right)$$

Entonces la velocidad eléctrica del armónico de orden i debido a una rotura en la barra del rotor, con respecto al estator sería:

$$P * N_s + N(1 - P)$$

Las frecuencias inducidas en el estator por este armónico de sentido directo serían:

$$f + N * (1 - P) = f + N_s * (1 - S) * (1 - P) = f \left[\frac{i}{P} * (1 - s) + s \right]$$

Las frecuencias inducidas en el estator por este armónico de sentido inverso serían:

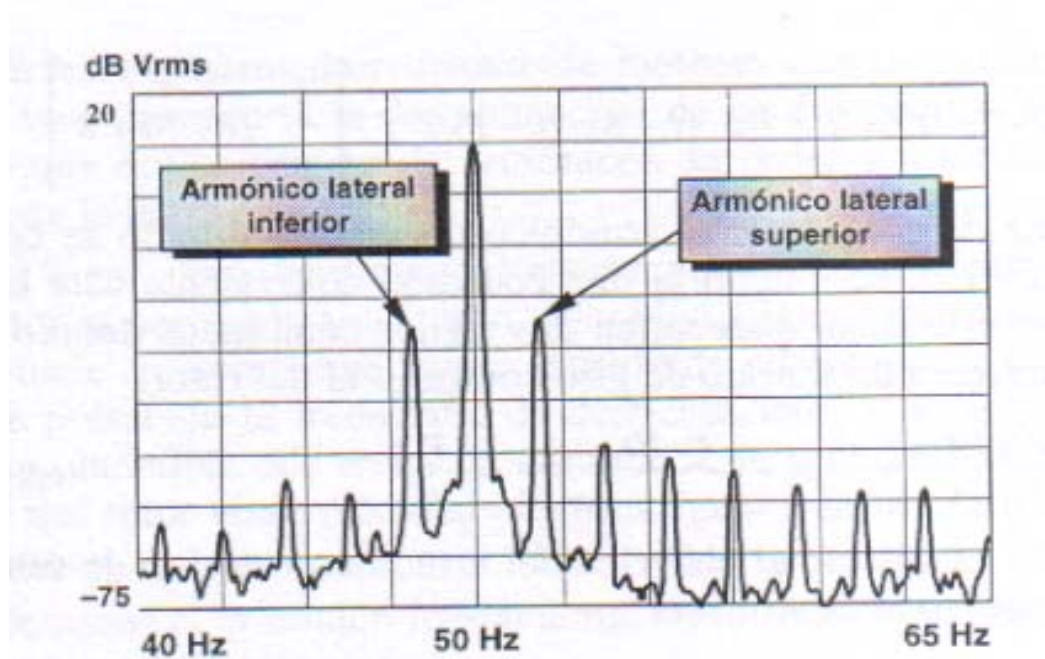
$$-f + N * (1 + P) = f + N_s * (1 - S) * (1 + P) = f \left[\frac{i}{P} * (1 - s) - s \right]$$

Hay que tener en cuenta que no todos los armónicos creados por la avería serán capaces de inducir fuerzas electromotrices y por tanto corrientes en el estator.

El método de diagnóstico consiste en realizar el seguimiento de dos armónicos situados en ambos lados del armónico fundamental, con separación de $-2sf$ y $+2sf$, siendo f la frecuencia de alimentación y s el deslizamiento.

En la figura 37 se muestra el espectro de corrientes de un rotor con varias barras rotas.

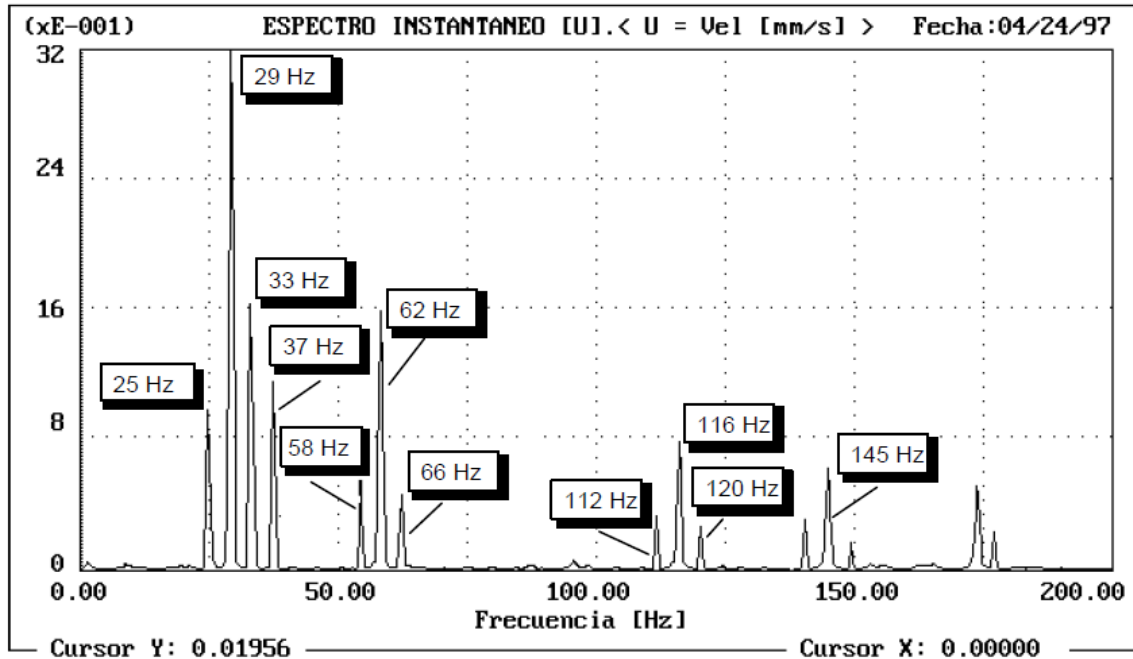
Figura 37. Análisis espectral de corrientes



5.8. Fallas electromagnéticas

Quando existe corto circuito en el devanado del estator, hace que disminuya la velocidad de rotación y se incremente la frecuencia de deslizamiento. La figura 38 muestra el espectro de vibraciones de un motor operando a 1740 RPM.

Figura 38. Espectro debido a fallas electromagnéticas



5.9. Evaluación de campo

Para la evaluación de campo se utilizó un analizador de vibraciones portátil marca Sendig 911, que utiliza un acelerómetro piezoeléctrico para medir las vibraciones. Este analizador portátil determina la aceleración, velocidad y desplazamiento de las vibraciones y da un diagnóstico del estado de la máquina basándose en las normas ISO 2372. La figura 39 muestra este instrumento.

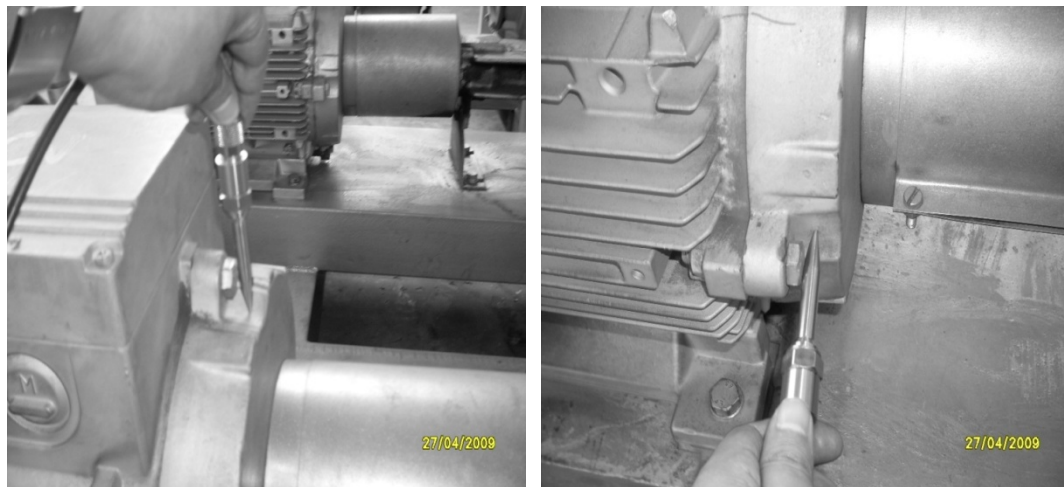
El análisis de vibraciones se realizó en los motores eléctricos asíncronos trifásicos acoplados a bombas de aceite, utilizados en una generadora de energía eléctrica.

Figura 39. Analizador de vibraciones portátil



Las mediciones se realizaron en tres motores asíncronos trifásicos, conectados a bombas de aceite. En la figura 40 apreciamos las mediciones realizadas en uno de los motores eléctricos, donde se realiza la medición vertical y horizontal de las vibraciones en un punto cercano a los cojinetes.

Figura 40. Medición vertical y horizontal de las vibraciones



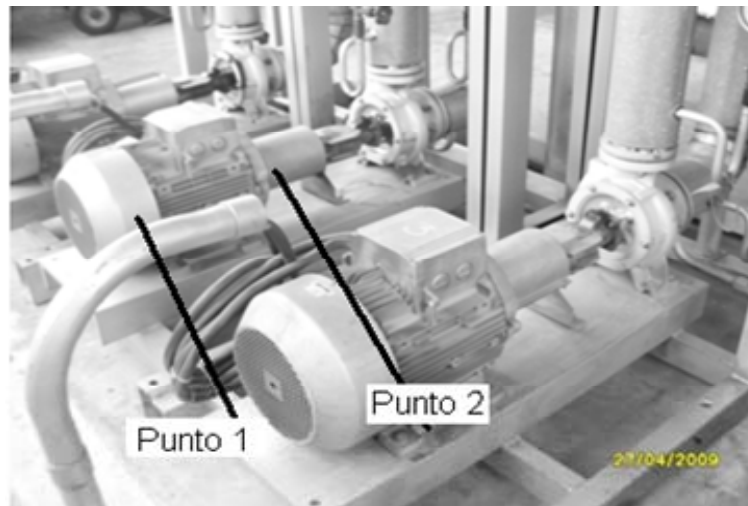
Los datos obtenidos en las mediciones y las conclusiones a que se llegaron con la ayuda de las normas ISO 2372 son las siguientes:

Figura 41. Recolección de datos del motor de la bomba 1

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

HOJA DE DATOS

FECHA: Abril de 2009
 MÁQUINA: Bomba de aceite
 KW: 13,6
 MARCA: SIEMENS



PUNTO	POSICIÓN	ACELERACION	VELICIDAD	DISTANCIA
		mm/s ²	mm/s	mm
1	HORIZONTAL	0,01	<u>0,04</u>	2,14
	VERTICAL	0,01	<u>0,03</u>	2,37
	AXIAL	2,44	<u>1,68</u>	15,6
2	HORIZONTAL	0,01	<u>0,05</u>	1,86
	VERTICAL	5,34	<u>1,82</u>	10,9
	AXIAL			

Observaciones:

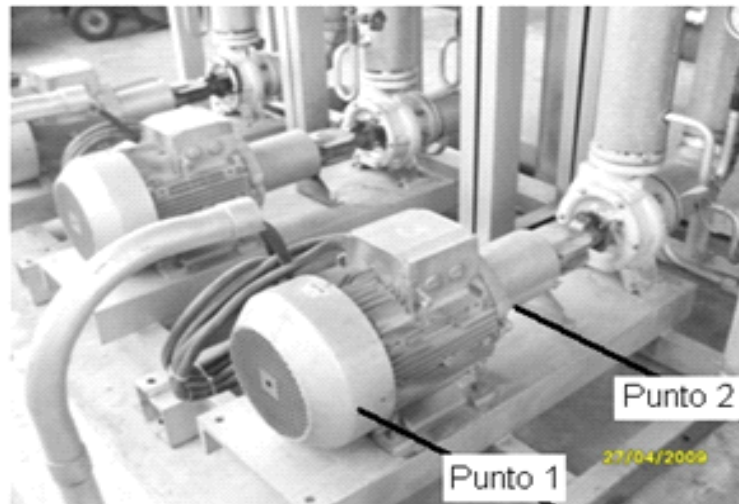
El motor se encuentra en condiciones normales de funcionamiento

Figura 42. Recolección de datos del motor de la bomba 2

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

HOJA DE DATOS

FECHA: Abril de 2009
 MÁQUINA: Bomba de aceite
 KW: 13,6
 MARCA: SIEMENS



PUNTO	POSICIÓN	ACELERACION	VELICIDAD	DISTANCIA
		mm/s ²	mm/s	mm
1	HORIZONTAL	2,73	<u>2,91</u>	32,3
	VERTICAL	2,45	<u>1,51</u>	22,1
	AXIAL	2,81	<u>2,16</u>	18,3
2	HORIZONTAL	2,2	<u>2,05</u>	25,07
	VERTICAL	1,96	<u>1,46</u>	14,4
	AXIAL			

Observaciones:

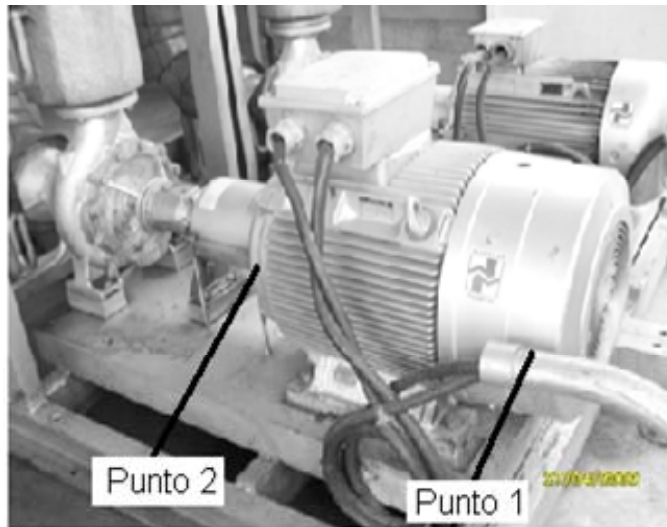
El motor se encuentra entre un estado admisible y límite. Puede existir un posible desbalance debido al ventilador o fallos en los cojinetes

Figura 43. Recolección de datos del motor de la bomba 3

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

HOJA DE DATOS

FECHA: Abril de 2009
 MÁQUINA: Bomba de aceite
 KW: 62
 MARCA: ALLVEILER



PUNTO	POSICIÓN	ACELERACION	VELICIDAD	DISTANCIA
		mm/s ²	mm/s	mm
1	HORIZONTAL	2,2	<u>2,05</u>	25,07
	VERTICAL	1,96	<u>1,46</u>	14,4
	AXIAL	11,06	<u>2,71</u>	15,09
2	HORIZONTAL	4,49	<u>3,98</u>	32,4
	VERTICAL	3,11	<u>2,38</u>	15
	AXIAL			

Observaciones:

El motor se encuentra en un estado límite. Es muy posible que la vida útil de los cojinetes esté casi por vencer.

Cada generador de energía eléctrica, tiene conectados dos bombas de aceite que se alternan para poderles dar mantenimiento, y evitar paros prolongados del generador si ocurriera una falla en la bomba que se encuentra funcionando. En el análisis económico que se describe a continuación, se supondrá que la máquina que se encuentra parada está en mantenimiento y la máquina que se encuentra funcionando falla por un problema que se pudo determinar con un análisis de vibraciones.

Si el caso descrito anteriormente sucediera, se tendría que parar un generador de capacidad de 10 MW de potencia. Esto provocaría pérdidas, que dependerá del tiempo en que se tarden los técnicos en reparar uno de los motores eléctricos. El costo promedio aproximado de la energía generada por este generador es de 7,250 Quetzales por hora.

Para darle mantenimiento correctivo a un motor eléctrico son necesarios como mínimo dos técnicos. El tiempo necesario para el mantenimiento dependerá del tipo de falla que ha ocurrido en el motor. En la tabla VIII muestra el tiempo aproximado para darle mantenimiento a la máquina, dependiendo del tipo de falla.

Tabla VIII. Duración del mantenimiento correctivo.

	Tiempo
Bobinado	1 Semana
Cojinetes	8 Horas
Desbalance	1 Semana
Pérdidas por paro de la máquina 7250 Q/hora	

En el caso de que la falla fuera por defectos en los cojinetes, se tendría una pérdida de 58,000 Quetzales, debido a las 8 horas que tardaría el mantenimiento correctivo del motor.

Estas pérdidas se evitarían si se hacen análisis de vibraciones a los motores eléctricos. Este análisis conlleva una inversión inicial aproximado como lo muestra la tabla IX.

Tabla IX. Inversión inicial para el análisis de vibraciones

	Costo Q	Tiempo
Instrumento de medición	7,000	1 Semana
Capacitación del personal	20,000	2 Semanas
Costo análisis de vibraciones	27,000	3 Semanas

El costo total aproximado de la inversión, para que el personal encargado del mantenimiento de los motores eléctricos, pueda realizar el análisis de vibraciones es de 27,000 Quetzales. Comparado con las pérdidas debido al mantenimiento correctivo, esta representa el 47% del costo por pérdidas en el mantenimiento correctivo. Esto indica que el análisis de vibraciones que se realice a los motores eléctricos se justifica económicamente, debido a que las pérdidas en el mantenimiento correctivo son mayores a la inversión económica necesaria para implantar el mantenimiento predictivo.

6. INSTRUMENTACIÓN

Para poder dar un buen diagnóstico en el análisis de vibraciones de los motores eléctricos asíncronos trifásicos, también es necesario 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 puede utilizarse la aceleración, velocidad o desplazamiento de las vibraciones. Algunas de las normas que suelen utilizarse para los instrumentos de medición son:

UNE 21 328 75 (1) “Características relativas a los transductores electromecánicos destinados a la medida de choques y vibraciones”.

UNE 21 328 75 (2) “Clases de captadores de vibraciones y elementos sensibles empleados en estos captadores”.

UNE 95 0140 86 “Vibraciones y choques, terminología”.

ISO 2954 “Vibraciones mecánicas en maquinaria rotativa y alternativa”. Requerimientos para los instrumentos de medida de la severidad de vibración”.

Al realizar la medición de la vibración se debe tomar en cuenta la magnitud a medir y el rango de frecuencias en las que operan los transductores. El rango de frecuencias efectivo de los transductores de velocidad está entre 10 Hz y 2,000 Hz aproximadamente. El rango de frecuencias de los transductores de desplazamiento está entre 0 y 200 Hz.

El rango de frecuencias de los transductores de aceleración de alta sensibilidad está entre 0.2 Hz y 500 Hz y los de más baja sensibilidad tienen un rango de frecuencias de 5Hz hasta 20,000 Hz.

Según las normas ISO las unidades para cuantificar las vibraciones son:

MAGNITUD	UNIDADES
Desplazamiento	m, mm, μm
Velocidad	m/s, mm/s
Aceleración	m/s^2 $G=9.809 \text{ m/s}^2$

6.1. Transductores

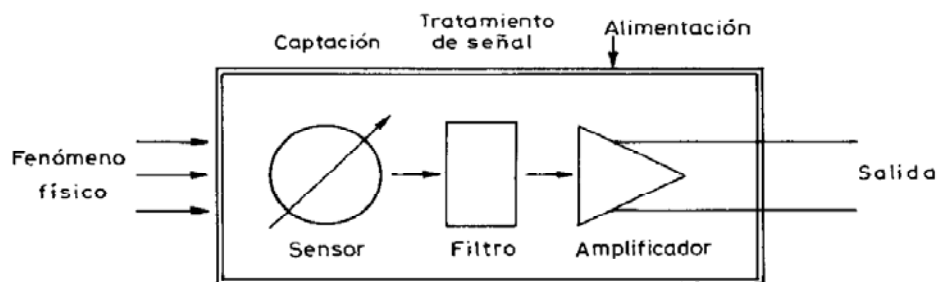
Existe gran variedad de transductores, éstas se pueden clasificar según la señal de salida: analógicos, digitales y todo o nada. Los utilizados para el análisis de vibraciones son los analógicos, que dan como salida una señal normalizada de tensión de 0 a 10 Volts o de corriente de 4-20 mA. También pueden clasificarse según la magnitud física a detectar, de los cuales se utilizan transductores de aceleración, velocidad y desplazamiento en el análisis de vibraciones.

6.1.1. Definición de transductor

Un transductor es un dispositivo capaz de convertir el valor de una magnitud física en una señal eléctrica codificada, ya sea en forma analógica o digital.

Los transductores por lo general tienen una estructura como se muestra en la figura 44, del cual podemos distinguir las siguientes partes: 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.

Figura 44. Estructura de los transductores



6.1.2. Definición de sensor

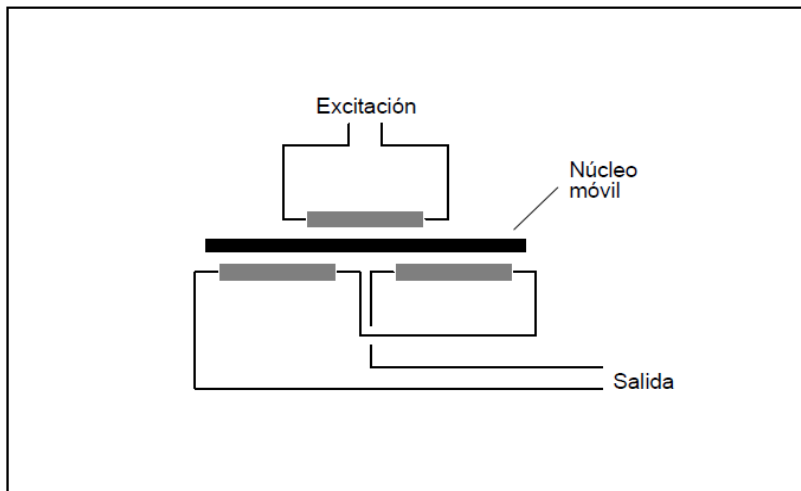
Es un dispositivo que convierte variaciones de una magnitud física en variaciones de una magnitud eléctrica o magnética. Un sensor se diferencia de un transductor en que el sensor está siempre en contacto con la variable a medir o a controlar.

6.1.3. Transductor de proximidad

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

Los transductores de desplazamiento por contacto necesitan del contacto físico con la superficie que vibra. Su diseño se muestra en la figura 45.

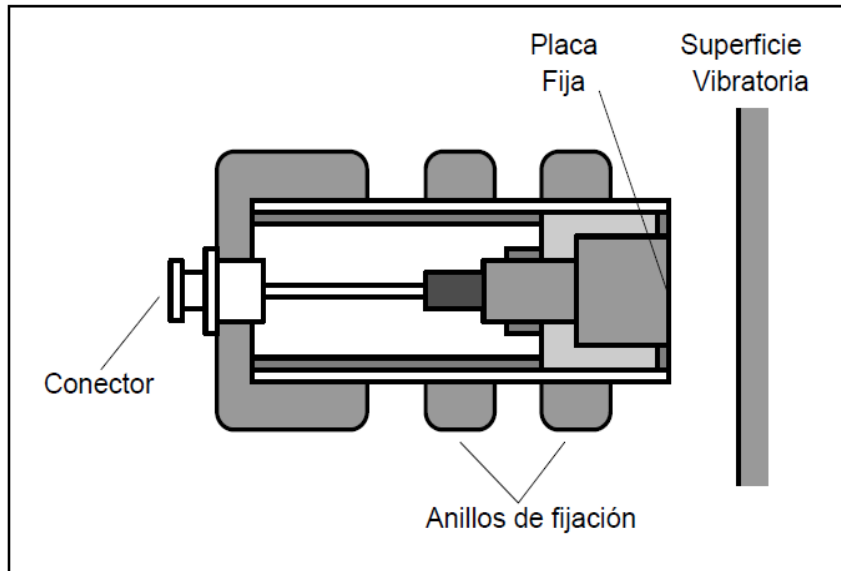
Figura 45. Transductor de proximidad



El bobinado primario se energiza con una corriente alterna, de amplitud constante y frecuencia que varía de 1 a 10 K Hz. 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.

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 46 muestra un transductor capacitivo.

Figura 46. Transductor capacitivo



6.1.4. Transductor de velocidad

Cuando una bobina corta las líneas del campo magnéticas alrededor de un imán, un voltaje es inducido en la bobina, y este voltaje es dependiente en la relación siguiente:

$$e_i \approx BLV$$

Donde:

e_i = Voltaje inducido

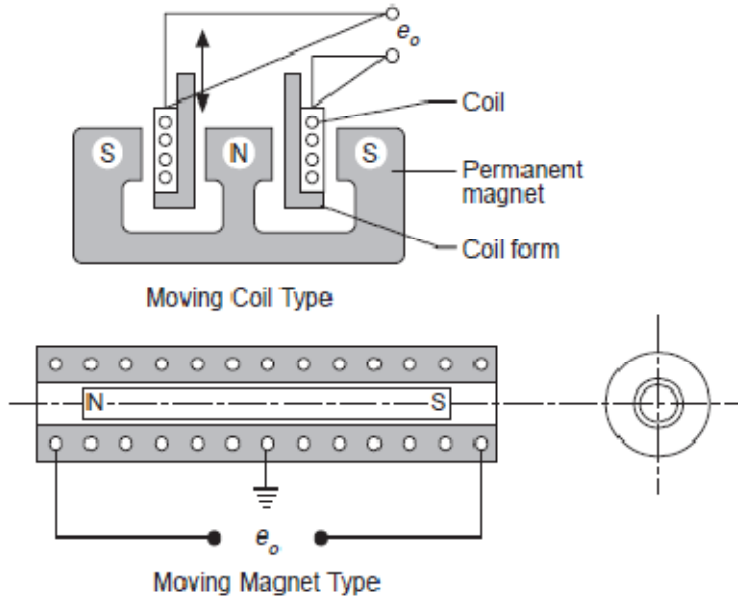
B = Densidad de campo magnético

L = Longitud de la bobina

V = velocidad del movimiento de la bobina

La sensibilidad de estos transductores se expresa en potencial eléctrico/velocidad. La figura 47 nos muestra las partes de un transductor de velocidad, donde podemos apreciar el bobinado que se moverá entre los imanes permanentes cuando se coloca en la superficie vibrante.

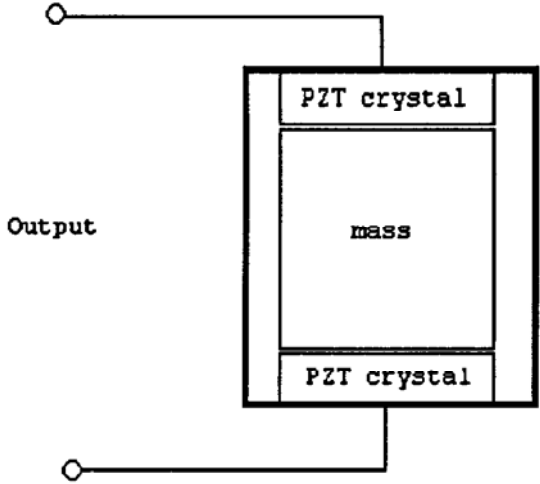
Figura 47. Transductor de velocidad



6.1.5. Transductor de aceleración

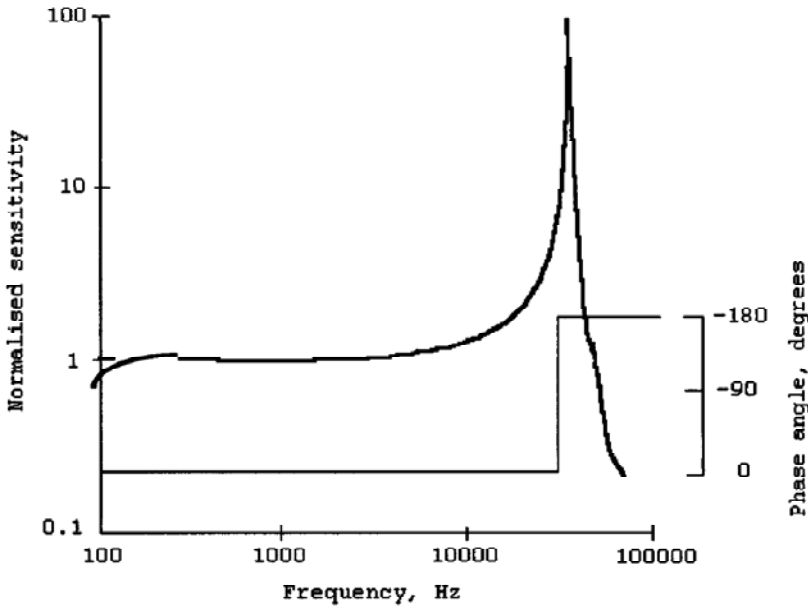
Los acelerómetros utilizados para la medición de vibraciones son los de tipo piezoeléctrico. Tienen un rendimiento elevado y tamaños comparativamente pequeños. El principio de funcionamiento consiste en que un cristal piezoeléctrico produce cierta carga eléctrica al deformarse bajo la acción de cierta fuerza. En la figura 48 apreciamos que la masa que imprimirá la fuerza a los cristales se encuentra en el centro de éstas. Cuando un movimiento variante se aplica al acelerómetro, la masa aplicará una fuerza a los cristales que dependerá de la aceleración de la vibración, ya que la masa es constante. Entonces la carga producida por el piezoeléctrico es proporcional a la aceleración de la vibración.

Figura 48. Transductor de aceleración



El límite inferior de frecuencia detectada por el transductor está limitada por las características del piezoeléctrico, mientras que el límite superior esta limitada por las condiciones mecánicas como se muestra en la figura 46.

Figura 49. Rango de frecuencias del acelerómetro



6.2. Instrumentos para visualizar y diagnosticar las vibraciones

Debido al avance en la microelectrónica, se ha podido fabricar equipos de tecnología digital que va desde el diseño y análisis de circuitos hasta equipos utilizados en el mantenimiento industrial. En el mercado podemos encontrar gran variedad de equipos para el análisis de vibraciones en el campo, tanto portátiles como instrumentos de medición continua.

6.2.1. Recolectores de datos

En el análisis de las vibraciones, es muy común la descomposición de la señal en sus componentes frecuenciales para poder determinar el tipo de fallo en la máquina, este tipo de análisis se le llama análisis de espectro o análisis en el dominio de la frecuencia. Estas mediciones se realizan con analizadores de espectros, analizadores de redes y analizadores digitales.

Los analizadores de espectro son instrumentos para el estudio de señales en el dominio de la frecuencia. Proporcionando una representación gráfica de los componentes frecuenciales de la señal conocidos también como armónicos.

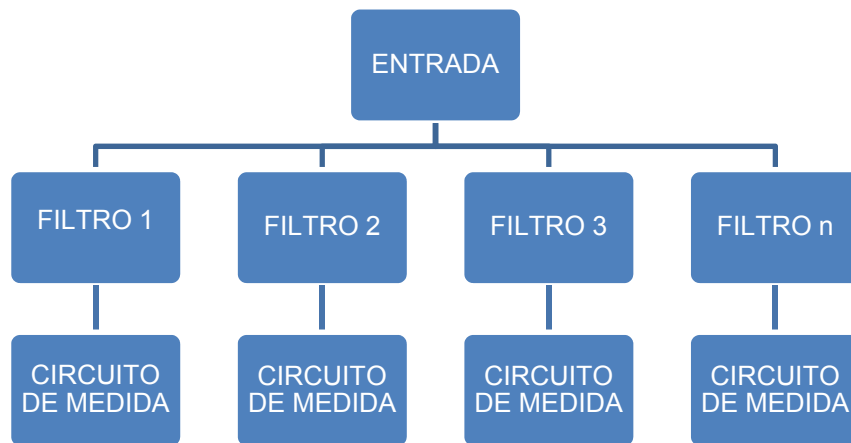
Los analizadores de redes son equipos para el diagnóstico de redes eléctricas.

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.

Los analizadores de espectro se pueden clasificar en: analizadores de tiempo real y analizadores de barrido.

El modelo del analizador de tiempo real consiste en filtros paralelos, que son filtros pasabanda conectados en cascada en la entrada del analizador y a los circuitos internos de medida. El esquema se muestra en la figura 50.

Figura 50. Diagrama de bloques simplificado de filtros paralelos



Los filtros pasabanda del esquema anterior se diseñan para que su frecuencia central permita un correcto solapamiento de las respuestas de cada filtro. Con esto se consigue que el analizador permita extraer un espectro con todos los armónicos de la señal de entrada. El número de filtros necesarios a utilizar depende del tipo de analizador, ya que con un gran número de filtros con un ancho de banda muy reducido y próximo nos dará una mayor resolución de la señal.

Un método para evitar utilizar un gran número de filtros en paralelo consiste en utilizar un único filtro. Este podrá modificar el valor de sus frecuencias de corte, manteniendo constante el ancho de banda. De esta forma, cada armónico de la señal de entrada será visible sólo cuando el filtro tenga sintonizada su frecuencia central en la misma frecuencia del armónico.

6.2.2. Sistemas de medición computarizados

En los sistemas de medición computarizados el filtrado de la señal no se ejecuta en forma analógica o sea, con filtros, sino que se realiza a través de algoritmos construidos en circuitos integrados, que 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.

En la figura 51 tenemos el diagrama de bloques del sistema de medición computarizado que consiste en una etapa de transductores que son los encargados de medir el fenómeno físico y transformarlo en una señal eléctrica. 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.

Figura 51. Diagrama de bloques de la adquisición de datos



7. TIPOS DE MANTENIMIENTO

El objetivo del 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.

7.1. Mantenimiento Correctivo

El mantenimiento más utilizado en la pequeña y mediana empresa es el mantenimiento correctivo, que se basa en la intervención en caso de avería, y en la interrupción súbita de la producción.

7.1.1. Introducción

En el mantenimiento correctivo se pueden distinguir dos variedades que son: el mantenimiento correctivo con eliminación de la avería, que consiste en reparaciones de emergencia, sustituyendo los componentes averiados de la máquina. El mantenimiento correctivo con eliminación de causas, que consiste en sustituir los componentes averiados y la eliminación de la causa que originó el fallo.

Entre las ventajas del mantenimiento correctivo tenemos:

- Maximización del aprovechamiento de la reserva de uso de equipos
- No es necesario una elevada capacidad de análisis ni infraestructura técnico o administrativo.

Entre las desventajas del mantenimiento correctivo tenemos:

- Interrupciones inesperadas en la producción que puede provocar daños y averías en la cadena de producción.
- Nivel bajo en la vida útil del equipo e instalaciones.
- Baja seguridad en la producción.
- Riesgo de fallo en componentes de difícil adquisición.
- Baja calidad en el mantenimiento.

Considerando las ventajas y desventajas del mantenimiento correctivo, deducimos que solo se aplica en casos en que el coste total de las paradas por actividades correctivas sea menor que el coste total por acciones preventivas.

7.1.2. Metodología

La metodología del mantenimiento correctivo consiste en sustituir las piezas defectuosas de una máquina cuando se presenta un paro repentino, teniendo un stock de repuestos de dimensiones considerables. No necesita de planificación, solo de técnicos que actúen en el momento del fallo.

7.2. Mantenimiento predictivo

La necesidad de remediar los inconvenientes en el mantenimiento correctivo, surgió el mantenimiento predictivo, que consiste en el seguimiento organizado con medición periódica o continua de variables de estado del sistema y su comparación con patrones preestablecidos, para determinar el instante en que se debe producir la intervención del mantenimiento.

7.2.1. Introducción

Los parámetros de control del funcionamiento de la máquina, el equipo de medición y otros dependerá del equipo de producción y de su función. La intensidad en la aplicación del mantenimiento predictivo, estará sujeto a la responsabilidad económica, dependientes de los costes de reparación y producción.

Entre los inconvenientes del mantenimiento predictivo podemos mencionar aquellos que intervienen en su aplicación.

- Necesidad de elegir la instrumentación de medida y diagnóstico, debido a la necesidad de no dejar fuera de servicio a la máquina.
- Inversión económica inicial elevada.
- Personal técnico calificado para el manejo del equipo y para realizar los diagnósticos.

Las ventajas del mantenimiento predictivo son:

- Optimización del tiempo para realizar el mantenimiento, maximización de la reserva de uso de piezas y equipos.
- La ejecución del mantenimiento se realiza sin alterar el normal funcionamiento de las instalaciones y equipos.
- Mejoramiento de las condiciones higiénicas y de seguridad en la planta.

Las limitaciones en la aplicación del mantenimiento predictivo son:

- No se aplica a sistemas en que existe un máximo de horas de funcionamiento de las instalaciones o máquinas.
- No se aplica en aquellos en que la detección de la avería no se justifica económicamente.

Entre los tipos de mantenimiento predictivo podemos mencionar los siguientes

Análisis de vibraciones. El interés en este tipo de mantenimiento es la identificación de amplitudes predominantes 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 utilizable para diagnosticar el desgaste interno del equipo y el estado del lubricante.

El estado del equipo se determina estableciendo el grado de contaminación del aceite debido a la presencia de partículas de desde desgaste o sustancias ajenas a este. El estado del aceite se determina comprobando la degradación que ha sufrido, es decir, la pérdida de capacidad de lubricar causada por una variación de sus propiedades físicas y químicas y sobre todo, las de sus aditivos.

La contaminación del aceite se puede determinar cuantificando en una muestra del lubricante, el contenido de partículas metálicas, agua, materias carbonosas y partículas insolubles. La degradación se puede evaluar midiendo la viscosidad, la acidez y la constante dieléctrica.

Termografía infrarroja. La termografía infrarroja consiste en obtener una imagen a partir de radiación infrarroja invisible al ojo humano, emitida por objetos, dependiendo de su temperatura superficial. Para este tipo de análisis se utiliza una cámara termográfica, que produce una imagen con colores que refleja la distribución de temperaturas.

La termografía permite detectar, sin contacto físico con el elemento bajo análisis, cualquier falla que se manifieste en un cambio de la temperatura, midiendo los niveles de radiación dentro del espectro infrarrojo. En general, un fallo electromecánico antes de producirse se manifiesta generando e intercambiando calor. Este calor se traduce habitualmente en una elevación de temperatura que puede ser súbita, pero, por lo general y dependiendo del objeto, la temperatura comienza a manifestar pequeñas variaciones.

La inspección termográfica en sistemas eléctricos tiene como objetivo detectar componentes defectuosos basándose en la elevación de la temperatura como consecuencia de un aumento anormal de su resistencia óhmica. Entre las causas que originan estos defectos, entre otras, pueden mencionarse: Conexiones con apriete insuficiente, conexiones afectadas por corrosión, suciedad en conexiones o en contactos, degradación de los materiales aislantes.

7.2.2. Metodología

Los parámetros a controlar y los métodos necesarios para el seguimiento y evaluación del estado de los motores eléctricos son muy amplios, debido a su enorme extensión en la industria. En la tabla X se presentan algunos parámetros que se pueden utilizar para el monitoreo de la máquina y las técnicas a emplear en cada caso.

Tabla X. Parámetros en el mantenimiento de máquinas eléctricas

Parámetro indicador	Técnicas y sistemas
Inspección visual	Valoración mediante endoscopios, televisión, etc.
Vibraciones	Análisis espectral, velocidad de vibración, curvas de tendencias.
Ruido	Análisis de espectros: Identificación de componentes
Desgastes anómalos	Concentraciones metálicas en el aceite de lubricante.
Estado de los rodamientos	Medida de impulsos de choque, vibraciones de alta frecuencia.
Del estado de alineamiento	Sistema laser de monitorización
Equilibrio de fases	Medidas de tensión y corriente
Consumos anómalos	Medida de corriente y potencia
Anomalías en la corriente de alimentación, excentricidad, desequilibrio, estado mecánico.	Técnicas de medida y análisis de componentes de frecuencia, en los espectros de corriente y vibración
Resistencia eléctrica del aislamiento	Medida de resistencia, índices de polarización
Presencia de fallos en el aislamiento	Medida del factor de pérdidas dieléctricas, análisis de descargas parciales.
Contaminación de los devanados	Corrientes de fuga

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.

7.2.3. Planificación

La puesta en marcha del mantenimiento predictivo pasa necesariamente por las siguientes etapas:

- **Preparación inicial del sistema de mantenimiento.** Análisis de la importancia de las máquinas, estudio de las características dinámicas de la máquina, análisis de sus características mecánicas, definición de sus características mecánicas, definición de los elementos críticos, historial de averías de cada máquina, determinación de los niveles de vibración, obtención de los espectros base, definición de frecuencia de chequeo, definición de alarmas, carga de datos en el programa y en la base de datos, formación de personal y otros.
- **Implementación.** Selección de puntos de medida, instalación de transductores y marcado definitivo de cada punto, chequeos o medidas de ensayo, valoración de niveles que indiquen comportamiento esperado, identificación de componentes frecuenciales, preparación de planes de medida en máquinas críticas, preparación de planes de medida en arranques de equipos.

- **Asentamiento.** El asentamiento se extiende a los meses siguientes a la implementación y comprende un período de mediciones. Durante este tiempo se realizará un seguimiento exhaustivo de los resultados. Los pasos son: Recopilación del historial de medidas periódicas rutinarias, discusión sobre la dispersión de los resultados, cambios o alteración de medida o parámetros de control, comparación de los resultados obtenidos en el diagnóstico, definición de directrices definitivas de trabajo.

Para la realización del mantenimiento predictivo, se debe de contar con recursos económicos y humanos, que no siempre puede estar disponible. Si este fuera el caso se optaría por realizar contrataciones exteriores a la empresa sería lo más adecuado. En esta situación la información que la empresa debe de recibir es la siguiente:

- Informes de estado de cada máquina.
- Informes particulares de los equipos que superan los niveles de alarma establecidos.
- Informes de las inspecciones realizadas a cada máquina.
- Gráficos de los estudios de tendencia de cada máquina.
- Informe del tiempo esperado hasta la activación de alguna alarma.
- Informe general del análisis del comportamiento de cada equipo.
- Informe sobre los regímenes adecuados de funcionamiento de cada máquina según sus condiciones de estado.
- Informes del estado físico-químico y del desgaste de los elementos que deben ser periódicamente sustituidos.

CONCLUSIONES

1. Todas las máquinas eléctricas rotativas vibran, y debe de monitorearse la magnitud de la vibración para poder predecir la severidad de éstas.
2. Cada componente de la máquina eléctrica vibra a determinadas frecuencias, al ocurrir una falla en los componentes, la magnitud de la vibración aumenta pudiendo detectarlos con el análisis espectral de vibraciones.
3. Los fallos en los motores de inducción, como la rotura de barras, son muy difíciles de detectar con el análisis de vibraciones, es por ello que en este tipo de fallas se utiliza el análisis espectral de corrientes del estator.
4. La transformada rápida de Fourier es un algoritmo para poder transformar una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia, aprovechando la periodicidad y simetría en el cálculo de la transformada discreta de Fourier, realizándolo en un menor tiempo y utilizando menos recursos computacionales necesarios para el cálculo.
5. El análisis de vibraciones forma parte del mantenimiento predictivo, ya que con el análisis determinamos el estado de los componentes y con esto podemos planificar la parada de la máquina para su respectivo mantenimiento.
6. En el análisis económico realizado, se demuestra que el mantenimiento predictivo con el análisis de vibraciones se justifica económicamente, debido a que las pérdidas debido al mantenimiento correctivo son mayores a la inversión necesaria si se realiza el análisis de vibraciones.

RECOMENDACIONES

1. 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.
2. Se debe de elaborar una base de datos de las máquinas analizadas para poder compararlos con mediciones futuras.
3. El personal técnico encargado de las mediciones y análisis de las vibraciones debe de estar altamente capacitado para poder dar un buen diagnóstico.
4. La aplicación del análisis de vibraciones debe de justificarse económicamente, debido al costo económico que tiene su implementación.
5. La implementación del análisis de vibraciones en el mantenimiento predictivo debe de pasar por las etapas de preparación inicial del sistema, implementación y asentamiento y hay que tomar en cuenta que este proceso tomará algunos meses.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fernández Cabanas, Manés. **Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas.** 3ª edición. España: Editorial Marcombo, 1998.
2. J. Chapman, Stephen. **Máquinas Eléctricas.** 3ª edición. Colombia: Editorial: McGraw-Hill, 2000.
3. Palomo Marín, Evelio. **La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias.** Cuba 1997.
4. Pintor Borobia, Jesús M^a. **Elementos de máquinas y vibraciones.** Universidad Pública de Navarra.