



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

**BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO  
PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**

**Carlos Amid Jonathan Rodas Aguayo**

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, enero de 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO  
PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**CARLOS AMID JONATHAN RODAS AGUAYO**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2014



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Julio César Molina Zaldaña
EXAMINADOR	Ing. Elvis José Álvarez Valdéz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de mayo de 2010.

**Carlos Amid Jonathan Rodas Aguayo**



Guatemala 18 de septiembre de 2013

Ingeniero.  
Julio Cesar Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director

Por medio de la presente me dirijo a usted en relación al trabajo de tesis presentado por el estudiante CARLOS AMID JONATHAN RODAS AGUAYO, titulado **BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**, para lo cual fui asignado como Asesor.

En mi opinión tengo la satisfacción de informarle que he concluido el estudio de dicha tesis y considero que el trabajo fue elaborado de forma satisfactoria, el cual contiene información importante para nuestro medio. En consecuencia me permito aprobar el presente trabajo para los efectos de graduación del autor.

Sin otro particular, me suscribo a usted como su seguro y atento servidor,

  
*Carlos Humberto Pérez Rodríguez*  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL  
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Colegiado 3071  
Asesor





El Coordinador del Área Complementaria, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado **BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**, del estudiante **Carlos Amid Jonathan Rodas Aguayo**, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser la del Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez.

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador de Área



Guatemala, septiembre de 2013.

/behdei.





El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria al Trabajo de Graduación titulado, **BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**, del estudiante **Carlos Amid Jonathan Rodas Aguayo**, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, enero de 2014.

JCCP/behdei





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **BALANCEO DINÁMICO Y SU APLICACIÓN CON EL MANTENIMIENTO PREVENTIVO EN LA INDUSTRIA GUATEMALTECA**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Amid Jonathan Rodas Aguayo**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Rea  
Decano



Guatemala, enero de 2014

/cc



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por ser mi ayudador, mi fortaleza y mí guía a través de todos estos años.
<b>Mis padres</b>	Robin Rodas y Aurora de Rodas. Gracias por su apoyo incondicional.
<b>Mi esposa</b>	Silvia Lara de Rodas. Tu apoyo es invaluable en mi vida.
<b>Mis hermanos</b>	Rebeca, Maribel, Benjamín y Elisa Rodas Aguayo.
<b>Compañeros de clase</b>	Alfredo Gutiérrez, Érica Revolorio, Fulvio Orosco, Lucrecia Calderón, Olga Nitmar, Gracias por cada momento compartido.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES DEL MANTENIMIENTO .....	1
1.1. Reseña histórica.....	1
1.2. Mantenimiento.....	3
1.3. Tipos de mantenimiento .....	4
1.3.1. Mantenimiento correctivo.....	4
1.3.2. Mantenimiento preventivo.....	6
1.3.3. Mantenimiento proactivo.....	8
1.3.4. Mantenimiento predictivo .....	8
1.4. Problemas comunes en la industria por falta de mantenimiento ....	9
1.5. Razones para realizar un correcto mantenimiento .....	10
2. BALANCE Y DESBALANCE .....	11
2.1. Términos generales.....	11
2.1.1. Centro de gravedad .....	11
2.1.2. Centro de masa .....	12
2.1.3. Eje geométrico.....	12
2.1.4. Eje de inercia principal.....	12
2.1.5. Rotor.....	13

2.1.6.	Rotor rígido.....	13
2.1.7.	Rotor flexible .....	14
2.1.8.	Rotor delgado.....	14
2.1.9.	Punto pesado .....	15
2.1.10.	Punto alto .....	15
2.1.11.	Punto liviano.....	15
2.1.12.	Velocidad de balance .....	15
2.1.13.	Masa desbalanceada .....	15
2.1.14.	Fuerza de desbalance resultante .....	16
2.1.15.	Momento resultante debido al desbalance .....	16
2.1.16.	Ángulo de fase .....	16
2.1.17.	Planos de medición .....	16
2.1.18.	Planos de corrección .....	16
2.1.19.	Balance .....	17
2.1.20.	Desbalance .....	17
2.1.21.	Vector de desbalance.....	17
2.1.22.	Cantidad de desbalance.....	17
2.1.23.	Tolerancia de desbalance .....	18
2.1.24.	Peso de prueba .....	18
2.1.25.	Ángulo de corrección.....	19
2.1.26.	Ángulo de desbalance .....	19
2.1.27.	Razón de reducción de desbalance ( RRD) .....	19
2.2.	Tipos de desbalance .....	20
2.2.1.	Desbalance estático .....	20
2.2.2.	Desbalance par o de momento .....	22
2.2.3.	Desbalance dinámico .....	23
2.3.	Combinaciones del desbalance dinámico .....	24
2.4.	Causas de desbalance.....	26
2.5.	Tipos de desbalance .....	27

2.5.1.	Desbalance estático .....	27
2.5.2.	Desbalance de acoplamiento .....	28
2.6.	Técnicas de balance.....	29
2.6.1.	Balance dinámico .....	29
2.6.2.	Balance en un plano .....	31
2.6.3.	Balance estático – copla (par) .....	33
3.	COMPONENTES .....	35
3.1.	Tipos de sensores para análisis de vibraciones y balance .....	35
3.1.1.	Sensor de aceleración .....	36
3.1.2.	Sensor de velocidad .....	38
3.1.3.	Sensor de desplazamiento .....	40
4.	BALANCE DINÁMICO Y ESTÁTICO .....	45
4.1.	Definición de balance.....	45
4.2.	Balance dinámico .....	45
4.3.	Balance estático .....	46
4.4.	Ejemplo de un balance .....	47
5.	SEGURIDAD INDUSTRIAL.....	53
5.1.	Normas de seguridad.....	53
5.2.	Equipos de protección .....	54
5.2.1.	Requisitos de un equipo de protección personal .....	55
5.2.2.	Clasificación de los equipos de protección personal (E.P.P.).....	56
5.2.2.1.	Protección a la cabeza.....	56
5.2.2.2.	Protección de ojos .....	57
5.2.2.3.	Protección a la cara .....	59
5.2.2.4.	Protección de los oídos.....	59

5.2.2.5.	Protección respiratoria.....	61
5.2.2.6.	Protección de manos y brazos .....	62
5.2.2.7.	Protección de pies y piernas.....	63
5.2.2.8.	Cinturones de seguridad para trabajo en altura .....	65
5.2.2.9.	Ropa de trabajo .....	65
5.2.2.10.	Ropa protectora.....	66
5.3.	Norma general de uso .....	67
6.	NORMAS UTILIZADAS PARA BALANCE .....	69
6.1.	Norma ISO 2372.....	69
6.2.	Norma ISO 1940.....	71
6.3.	Norma ISO 10816.....	76
	CONCLUSIONES.....	85
	RECOMENDACIONES .....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89
	APÉNDICE .....	91

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Representa el desbalance estático de un rotor producido por masa “m” sin compensar.....	21
2.	Representa el desbalance par o de momento.....	23
3.	Muestra de manera general como está distribuida la masa desbalanceada en un rotor que necesita ser balanceado dinámicamente.....	24
4.	Diferentes combinaciones en las que se puede presentar el desbalance.....	25
5.	Ejemplo de masa desbalanceada estáticamente.....	28
6.	Ejemplo de masa desbalanceada por el acoplamiento.....	28
7.	Ejemplo de masa desbalanceada en dos planos.....	29
8.	Desbalance par o de momento.....	31
9.	Representación gráfica del desbalance en un plano .....	32
10.	Combinación de desbalance estático copla (par).....	33
11.	Muestra un rotor en voladizo, indicando el par falso que se produce luego de realizar un balanceo estático .....	34
12.	Sensor de aceleración.....	36
13.	Acelerómetro portátil.....	36
14.	Sensor de aceleración visto por dentro.....	37
15.	Ejemplo de funcionamiento interno de un sensor de velocidad.....	39
16.	Sensor de desplazamiento.....	40
17.	Ejemplo de funcionamiento de un sensor de desplazamiento.....	41
18.	Sensores permanentes.....	41

19.	Diagrama de órbita.....	43
20.	Balance estático.....	47
21.	Diagrama de equipo a balancear.....	48
22.	Ventilador de tiro forzado.....	48
23.	Diferencia del nivel de vibración antes y después de realizado el balance.....	51
24.	Espectro de frecuencia antes de realizado el balance.....	52
25.	Espectro de frecuencia después de realizado el balance.....	52
26.	Distintos elementos de protección personal.....	55
27.	Ejemplo básico de un casco de seguridad.....	57
28.	Ejemplo de gafas de seguridad.....	58
29.	Ejemplo de caretas de seguridad.....	59
30.	Ejemplo de protectores de oído .....	60
31.	Ejemplo de orejeras.....	60
32.	Ejemplos de distintos tipos de mascarillas protectoras.....	61
33.	Ejemplos de guantes protectores.....	63
34.	Distintos tipos de calzado de seguridad industrial.....	64
35.	Ejemplos de arnés de seguridad para trabajos en altura.....	65
36.	Ejemplos de ropa protectora.....	66
37.	Tabla clasificadora de equipos y valores permisibles de vibración según la Norma ISO 2372.....	70
38.	Ejemplo de tabla para determinar el desbalance residual permitido de un rotor. Límites para grados de calidad del desbalance residual de acuerdo a ISO 1940.....	75
39.	Gráfica clasificadora de equipos según la norma ISO 10816-3.....	81

## TABLAS

I.	Mediciones de vibraciones.....	49
II.	Mediciones de vibraciones.....	50
III.	Condición del equipo antes y después de realizado el balance.....	51
IV.	Clasificación de equipo según la Norma ISO 2372.....	69
V.	Para grupo representativo de rotores acordada por ISO 1940.....	74



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
%	Aceleración
<b>HP</b>	Caballo de fuerza
<b>C.G</b>	Centro de gravedad
<b>CPM</b>	Ciclos por minuto
<b>CC</b>	Corriente continua
<b>CD</b>	Corriente directa
<b>db</b>	Decibeles
<b>U<sub>pr</sub></b>	Desbalance permisible
<b>EPP</b>	Equipos de protección personal
<b>e<sub>pr</sub></b>	Error permisible
<b>e</b>	Excentricidad
<b>F</b>	Fuerza
<b>G</b>	Grados de tolerancia
<b>gr</b>	Gramo
<b>gr-mm</b>	Gramo-Milímetro
<b>Kg</b>	Kilogramo
<b>Kw</b>	Kilowatt
<b>±</b>	Más menos
<b>m</b>	Masa
<b>μ</b>	Micra
<b>mm</b>	Milímetros
<b>mm/s</b>	Milímetros por segundo
<b>W</b>	Peso

<b>W<sub>pr</sub></b>	Peso de prueba (gr)
<b>W<sub>r</sub></b>	Peso del rotor (Kg)
<b>%</b>	Porcentaje
<b>R</b>	Radio
<b>R<sub>pp</sub></b>	Radio de peso de prueba (cm)
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto
<b><math>\omega</math></b>	Velocidad angular
<b>1X</b>	Velocidad de giro
<b>N</b>	Velocidad del rotor (RPM)

## GLOSARIO

<b>Decibel</b>	Intensidad del sonido.
<b>Diámetro</b>	Es el segmento de recta que pasa por el centro y une dos puntos opuestos de una circunferencia, una superficie esférica o una curva cerrada.
<b>Escalar</b>	Un escalar es un tipo de magnitud física que se expresa por un solo número y tiene el mismo valor para todos los observadores.
<b>HP</b>	Se define como la potencia necesaria para elevar verticalmente a la velocidad de 1 pie por minuto un peso de 33 000 libras.
<b>Hz</b>	El hercio, o hertz, es la unidad de frecuencia del Sistema Internacional de Unidades. Un hercio representa un ciclo por cada segundo, entendiendo ciclo como la repetición de un suceso.
<b>ICP</b>	Es un interruptor magneto térmico automático que instala la compañía suministradora de energía eléctrica al inicio de la instalación eléctrica de cada vivienda que controla la potencia consumida por el cliente en cada momento, de tal forma que, cuando dicha potencia consumida supera la potencia

contratada, entra en acción automáticamente cortando el suministro eléctrico y es necesario rearmarlo para reanudarlo.

**IGSS**

Instituto Guatemalteco de Seguridad Social.

**ISO**

Organización Internacional de Normalización.

**Pk-Pk**

Amplitud Pico a Pico (Pk-Pk), es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva. En el caso de una onda sinodal, el valor pico a pico es exactamente dos veces el valor pico, ya que la onda es simétrica.

**Radio**

El radio de una circunferencia es cualquier segmento que une el centro a cualquier punto de dicha circunferencia. La longitud del radio es la mitad de la del diámetro.

**RMS**

Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de onda. En el caso de una onda senoidal el valor RMS es igual a 0.707 del valor del pico, pero esto es solo válido en el caso de una onda senoidal.

**Sensor**

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación y transformarlas en variables eléctricas.

## RESUMEN

Es necesario comprender la importancia del balanceo dinámico en la industria guatemalteca. El mismo es necesario para poder alargar la vida útil de los equipos, disminuir los paros por emergencia y reducir el inventario de repuestos.

El balanceo dinámico dicho en pocas palabras, es la redistribución de la masa en los elementos rodantes de los equipos; ya sean ventiladores de calderas, rotores de motores eléctricos, rotores de turbinas de vapor, hidráulicas y de gas.

Es necesario tomar en cuenta que el balanceo es parte integral en el mantenimiento en la industria guatemalteca, sin embargo es de hacer notar que es necesario realizar el mismo cumpliendo las normas de seguridad y usar el equipo de protección personal para evitar daños no solo al equipo sino que aún más importante, a los usuarios finales de los mismos.

El uso correcto de los sensores proporcionará una medición exacta y la misma ayudará en la correcta selección del mantenimiento que se le proporcionará al equipo.

El uso correcto del equipo de protección personal y el cumplimiento de las normas de seguridad industrial ayudarán al colaborador a realizar el trabajo asignado de una forma segura, evitando de esta manera accidentes y lesiones que puedan afectar al operario y paros en la producción.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Realizar un estudio sobre la necesidad de la utilización de herramientas teóricas y prácticas en el mantenimiento tales como el balanceo dinámico y estático y el análisis de vibraciones.

### **Específicos**

1. Indicar cuáles son las herramientas más utilizadas en la realización del mantenimiento predictivo, tales como: análisis de vibraciones y balanceo tanto dinámico como estático.
2. Proveer un documento que facilite la realización del mantenimiento adecuado en la industria para agilizar y optimizar el proceso.
3. Brindar los fundamentos teóricos y prácticos adecuados aplicables en la industria moderna.



## INTRODUCCIÓN

La industria guatemalteca en la actualidad está creciendo de forma acelerada; el ritmo de trabajo y producción es tal que se necesita que los equipos funcionen apropiadamente, por lo tanto la realización de un correcto plan de mantenimiento preventivo puede ayudar al buen término de la producción y cumplimiento de la orden en su aceptación con el producto final.

El balanceo dinámico es una de las herramientas proporcionadas por la evolución del mantenimiento; el cual ayuda a elevar la vida útil de los equipos utilizados, ayuda a minimizar los paros por emergencia y a su vez permite trabajar con seguridad y con ello proporcionar productos finales de calidad y a un precio costo más bajo.

El balanceo dinámico reposiciona la masa y el centro de gravedad del rotor hasta llevarlos lo más cerca del centro de rotación y con ello disminuir en gran manera las vibraciones del equipo.

Los distintos sensores utilizados proporcionan la información necesaria para determinar las causas de la vibración en el equipo analizado. La interpretación correcta de esta información se convertirá en un mantenimiento adecuado y el mismo podrá evitar fallas mayores y paros por emergencia en la producción.



# 1. ANTECEDENTES DEL MANTENIMIENTO

La elección del mantenimiento correcto ayuda a aumentar la vida útil en los equipos, disminuye los paros por emergencia y disminuye los accidentes que puedan ocurrir en planta.

El mantenimiento es la realización de distintas acciones mecánicas y eléctricas, las cuales llevan tanto a la reparación de los equipos como al alargamiento de la vida útil de los mismos.

## 1.1. Reseña histórica

A finales del siglo XVIII y comienzo del XIX durante la revolución industrial con las primeras máquinas se iniciaron los trabajos de reparación y de igual manera los conceptos de competitividad, costos entre otros. De la misma manera comenzaron a tenerse en cuenta el término de falla y comenzaron a darse a cuenta que esto producía paros frecuentes e innecesarios en la línea de producción. Tal fue la necesidad de empezar a controlar estas fallas que hacia los años 20 ya empezaron a aparecer las primeras estadísticas sobre tasas de falla en motores y equipo de aviación.

Por lo cual se puede concluir que la historia del mantenimiento va de la mano con el desarrollo técnico-industrial, ya que con las primeras máquinas se empezó a tener la necesidad de las primeras reparaciones. La mayoría de las fallas que se presentaban en ese entonces eran el resultado del abuso o de los grandes esfuerzos a los que eran sometidos los equipos. En ese entonces el mantenimiento se hacía hasta cuando ya era imposible seguir usando el equipo.

Hasta 1914, el mantenimiento tenía importancia secundaria y era ejecutado por el mismo personal de operación y producción.

Con el advenimiento de la primera guerra mundial y de la implementación de una producción en serie, las fábricas pasaron a establecer programas mínimos de producción por lo cual empezaron a sentir la necesidad de crear un equipo con el que pudieran efectuar el mantenimiento de las máquinas de la línea de producción en el menor tiempo posible.

Así surgió un órgano subordinado a la operación cuyo objetivo básico era la ejecución del mantenimiento hoy conocido como “mantenimiento correctivo”, esta situación se mantuvo hasta la década de los años 50.

Fue hasta 1950 que un grupo de ingenieros japoneses iniciaron un nuevo concepto en mantenimiento que simplemente seguía las recomendaciones de los fabricantes de equipo acerca de los cuidados que se debían tener en la operación y mantenimiento de máquinas y sus dispositivos. Esta nueva forma o tendencia de mantenimiento se llamó mantenimiento preventivo.

A partir de 1966 con el fortalecimiento de las asociaciones nacionales de mantenimiento creadas a final del periodo anterior, y de la sofisticación de los instrumentos de protección y medición, la ingeniería de mantenimiento, pasa a desarrollar criterios de predicción de fallas, visualizando así la optimización de la actuación de los equipos de ejecución del mantenimiento.

Estos criterios fueron conocidos como mantenimiento predictivo los cuales fueron asociados a métodos de planeamiento y control de mantenimiento.

## **1.2. Mantenimiento**

La European Federation of National Maintenance Societies define mantenimiento como:

Todas las acciones que tienen como objetivo mantener o restaurar un equipo a un estado en el cual pueda llevar a cabo alguna función requerida. Estas acciones incluyen la combinación de las reglas técnicas y administrativas correspondientes.

La palabra mantenimiento se emplea para designar las técnicas utilizadas para asegurar el correcto y continuo uso de equipos, maquinaria, instalaciones y servicios.

Comprende todas aquellas actividades necesarias para mantener los equipos e instalaciones en una óptima condición o volverlos a la misma.

El mantenimiento constituye un sistema dentro de toda organización industrial cuya función consiste en ajustar, reparar, remplazar o modificar los componentes de una planta industrial para que la misma pueda operar satisfactoriamente en cantidad/calidad durante un periodo dado.

El mantenimiento, por su incidencia significativa sobre la producción y productividad de las empresas, constituye uno de los métodos idóneos para lograr y mantener mejoras en la eficiencia, calidad, reducción de costos y de pérdidas; optimizando así la competitividad de las empresas que lo implementan.

El mantenimiento se puede definir como el control constante de las instalaciones (en el caso de una planta) o de los componentes (en el caso de una máquina), así como el conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de un sistema en general.

Por lo tanto, las tareas de mantenimiento se aplican sobre las instalaciones fijas y móviles, sobre equipos y maquinarias, sobre edificios industriales, comerciales o de servicios específicos, sobre las mejoras introducidas al terreno y sobre cualquier otro tipo de bien productivo.

### **1.3. Tipos de mantenimiento**

El mantenimiento dentro de la industria ha sufrido una evolución importante empujada en gran parte por el desarrollo tecnológico de los equipos de control y medida. En este capítulo, se podrán ver los distintos tipos de mantenimiento y sus definiciones, utilizados actualmente en la industria, tales como:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento proactivo y
- Mantenimiento predictivo

#### **1.3.1. Mantenimiento correctivo**

Es la corrección de fallas a medida que éstas se presentan, ya sea por síntomas claros y avanzados, o por el paro repentino de máquinas, y/o servicios entre otros.

Comprende el que se lleva a cabo con el fin de corregir (reparar) una falla en el equipo, se clasifica en:

No planificado: es el mantenimiento de emergencia. Debe efectuarse con urgencia ya sea por una avería imprevista a reparar; lo más pronto posible o por una condición imprevista que haya que satisfacer (problemas de seguridad, de contaminación, de aplicación de normas legales, etc.).

Planificado: se sabe con antelación que es lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

El exclusivo implemento del mantenimiento correctivo origina cargas de trabajo extenuantes, que provocan actividades intensas y lapsos sin trabajo, además cuando las necesidades son con desesperada urgencia, obligan al pago de horas extras, no se controla la productividad, se interrumpe el servicio o la producción, y hay necesidad de comprar todos los repuestos de urgencia, lo que en algunas ocasiones puede provocar un incremento al precio de los mismos.

Estas son las consecuencias esperadas que se presentan cuando se sufre un accidente o avería inesperada al equipo utilizado en la industria.

Esta forma de aplicar el mantenimiento impide el diagnóstico exacto de las causas que provocan la falla, pues se ignora si falló por mal trato, por abandono, por desconocimiento de manejo, por tener que depender del reporte de una persona para proceder a la reparación o por desgaste natural, entre otros.

### **1.3.2. Mantenimiento preventivo**

Este mantenimiento también es denominado “mantenimiento planificado”, tiene lugar antes de que ocurra una falla o avería se efectúa bajo condiciones controladas sin la existencia de algún error en el sistema. Se realiza a razón de la experiencia y pericia del personal a cargo, los cuales son los encargados de determinar el momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento; el fabricante también puede estipular el momento adecuado a través de los manuales técnicos.

Consiste en programar revisiones de los equipos, apoyándose en el conocimiento de la máquina en base a la experiencia y la tendencia obtenida de las mismas.

Se confecciona un plan de mantenimiento para cada máquina, donde se realizan las acciones necesarias, engrasan, cambian correas, desmontaje, limpieza y otros.

Cubre mantenimiento programado que se realiza con el fin de prevenir la ocurrencia de fallas. Se conoce como Mantenimiento Preventivo Directo o Periódico –FTM- (Fixed Time Maintenance) por cuanto sus actividades están controladas por el tiempo. Se basa en la Confiabilidad de los Equipos (MTTF) sin considerar las peculiaridades de una instalación dada. Ejemplos: limpieza, lubricación, recambios programados.

Las desventajas que presenta este sistema son:

- Cambios innecesarios: al alcanzarse la vida útil de un elemento se procede a su cambio, encontrándose muchas veces que el elemento que se cambia permitiría ser utilizado durante un tiempo más prolongado. En otros casos,

ya con el equipo desmontado, se observa la necesidad de "aprovechar" para realizar el reemplazo de piezas menores en buen estado, cuyo coste es escaso frente al correspondiente desmontaje y montaje, con el fin de prolongar la vida del conjunto. Se está ante el caso de una anticipación del reemplazo o cambio prematuro.

- Problemas iniciales de operación: cuando se desmonta, se montan piezas nuevas, se monta y se efectúan las primeras pruebas de funcionamiento, pueden aparecer diferencias en la estabilidad, seguridad o regularidad del funcionamiento en el equipo.
- Coste en inventarios: el coste en inventarios sigue siendo alto aunque previsible, lo cual permite una mejor gestión.
- Mano de obra: se necesitará contar con mano de obra intensiva y especial para períodos cortos, a efectos de liberar el equipo para el servicio lo más rápidamente posible.
- Mantenimiento no efectuado: si por alguna razón, no se realiza un servicio de mantenimiento previsto, se alteran los períodos de intervención y se produce una degeneración del servicio.

Por lo tanto, la planificación para la aplicación de este sistema consiste en:

- Definir qué partes o elementos serán objeto de este mantenimiento.
- Establecer la vida útil de los mismos.

- Determinar los trabajos a realizar en cada caso.

### **1.3.3. Mantenimiento proactivo**

Al igual que el mantenimiento predictivo, se monitorea la falla y se anticipa a la misma, sin tener intervalos rígidos, con la salvedad que se corrige el diseño para evitar definitivamente que la falla se presente posteriormente.

Este mantenimiento tiene como fundamento los principios de solidaridad, colaboración, iniciativa propia, sensibilización, trabajo en equipo, de modo tal que todos los involucrados directa o indirectamente en la gestión del mantenimiento deben conocer la problemática del mantenimiento, es decir, que tanto técnicos, profesionales, ejecutivos, y directivos deben estar conscientes de las actividades que se llevan a cabo para desarrollar las labores de mantenimiento. Cada individuo desde su cargo o función dentro de la organización, actuará de acuerdo a este cargo, asumiendo un rol en las operaciones de mantenimiento, bajo la premisa de que se debe atender las prioridades del mantenimiento en forma oportuna y eficiente.

El mantenimiento proactivo implica contar con una planificación de operaciones, la cual debe estar incluida en el Plan Estratégico de la organización. Este mantenimiento a su vez debe brindar indicadores (informes) hacia la gerencia, respecto del progreso de las actividades, los logros, aciertos, y también errores.

### **1.3.4. Mantenimiento predictivo**

Este mantenimiento en relación con el mantenimiento preventivo, tiene la diferencia en que se detecta la falla, se monitorea la progresión de la misma,

estableciéndose las reparaciones necesarias en un tiempo menor al especificado en las rutas de mantenimiento preventivo, antes aún de que ocurra un paro total del equipo analizado.

Está basado en inspecciones, medidas y control del nivel de condición de los equipos. También conocido como Mantenimiento Preventivo Indirecto o Mantenimiento por Condición –CBM- (*Condition Based Maintenance*).

A diferencia del Mantenimiento Preventivo Directo, que asume que los equipos e instalaciones siguen cierta clase de comportamiento estadístico, el Mantenimiento Predictivo verifica muy de cerca la operación de cada máquina operando en su entorno real.

El Mantenimiento Predictivo permite decidir cuándo hacer el Preventivo.

#### **1.4. Problemas comunes en la industria por falta de mantenimiento**

Los problemas en la industria guatemalteca por falta de una rutina de mantenimiento son muy variados, incluyen desde goteras en las tuberías, pasando por fallas y paros parciales y totales en la planta de producción. Con respecto al tema de interés tratado, la falta de balance puede provocar en los equipos los problemas siguientes:

- Vibraciones periódicas del equipo
- Daños en rodamientos, bujes, chumaceras, etc.
- Vibraciones transmitidas a otros equipos
- Fatiga en soldaduras, uniones, etc.
- Daño a sistemas eléctricos y electrónicos
- Rozamiento de rotores en cuerpos de alojamiento

- Calentamiento
- Ruido
- Daños a cimentación de maquinaria o equipo
- Pérdida de precisión en maquinado de partes

Todo esto puede ocasionar, fallos en la maquinaria, paros por emergencia y depende del equipo dañado, perdidas fatales entre los colaboradores de la planta de producción.

### **1.5. Razones para realizar un correcto mantenimiento**

Las razones para realizar un correcto mantenimiento en realidad son innumerables, pues abarcan una gran gama, dependiendo de la naturaleza de la industria a la cual se esté enfocado.

Se puede aumentar la vida útil de los equipos al realizar un mantenimiento adecuado, como la correcta lubricación, revisión de los aprietes de las bases de sujeción del equipo, limpieza del equipo, su correcta alineación y el balance adecuado de las piezas rotativas en los equipos.

Además de alargar la vida útil de los equipos, se reducen los costos de producción, a la vez que se reduce al máximo las paradas por emergencia en la planta de producción, y aumentar la credibilidad con el cliente final.

El mantenimiento efectuado a tiempo y en forma correcta disminuye los accidentes tanto a la hora de realizar el mismo como en plena operación de los equipos. Por lo mismo se debe se consiente que el trabajo realizado debe de ser llevado a fin con excelencia para evitar daños tanto a los colaboradores como al equipo de la planta de producción.

## **2. BALANCE Y DESBALANCE**

El desbalance es el estado en el cual se encuentran los equipos rotativos como los motores eléctricos y ventiladores, el cual produce alta vibración, exceso de ruido y aumento en la temperatura de los cojinetes. El balance es la acción de corregir el desbalance, acercando el centro de masa al centro de rotación.

### **2.1. Términos generales**

Los términos empleados de forma correcta ayudan al encargado de realizar el análisis de vibraciones y posterior balanceo dinámico a los equipos rotativos a realizar un trabajo eficiente y que aumente la vida útil a los mismos.

#### **2.1.1. Centro de gravedad**

El centro de gravedad (c.g.) es el punto de aplicación de la resultante de todas las fuerzas de gravedad que actúan sobre las distintas porciones de materiales de un cuerpo, de tal forma que el momento respecto a cualquier punto de esta resultante aplicada en el centro de gravedad es el mismo que el producido por los pesos de todas las masas materiales que constituyen dicho cuerpo.

En otras palabras, el centro de gravedad de un cuerpo es el punto respecto al cual las fuerzas que la gravedad ejerce sobre los diferentes puntos materiales que constituyen el cuerpo, producen un momento resultante nulo.

El centro de gravedad de un cuerpo no corresponde necesariamente a un punto material del cuerpo. Así, el centro de gravedad de una esfera hueca está situado en el centro de la esfera que, obviamente, no pertenece al cuerpo.

### **2.1.2. Centro de masa**

El centro de masa es el punto en un cuerpo donde si todas las masa estuvieran concentradas en un punto, el cuerpo actuaría igual para cualquier dirección o aceleración lineal. Si un vector de fuerza pasa a través de este punto el cuerpo se moverá en línea recta, sin rotación. La segunda ley de Newton del movimiento describe este movimiento como  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ . Donde la suma de fuerzas  $\mathbf{F}$ , actuando sobre un cuerpo es igual a su masa  $m$ , por su aceleración.

### **2.1.3. Eje geométrico**

El eje geométrico se refiere también como eje del eje o eje dirigido de rotación. Este eje de rotación es determinado ya sea por la superficie sustentadora rotatoria, la cual existe en la pieza de trabajo, o por la superficie de montaje. Una adecuada superficie de montaje establece el centro de rotación en el plano del centro de masa (el punto en el cual el centro de masa está localizado).

### **2.1.4. Eje de inercia principal**

Cuando una parte no tiene forma de disco y tiene longitud a través del eje de rotación, esta gira sobre el espacio libre sobre una línea. Esta línea es llamada “eje principal de inercia”, el centro de masa es un punto sobre esta

línea. Requiere energía para distribuir una parte y causa que bambolee o gire sobre otro eje de inercia.

Ejemplos de esto sería lanzar correctamente un balón de fútbol o una bala disparada desde un rifle. Cuando el eje de inercia principal coincide con el eje de rotación, la parte girará sin fuerzas de desbalance, en este caso la estática como el desbalance de acoplamiento son igual a cero.

En suma, un estado de balance es una condición física que existe cuando hay una distribución de masa total uniforme. El balanceo estático existe cuando el centro de masa esta sobre el eje de rotación. Mientras que, el balanceo estático y de acoplamiento existen cuando el eje principal de inercia coincide con el eje de rotación.

### **2.1.5. Rotor**

Es un cuerpo capaz de rotar en torno a un punto determinado, generalmente está provisto de un eje, el que se sostiene por medio de descansos.

### **2.1.6. Rotor rígido**

Son los rotores que normalmente giran a velocidades por debajo de la primera velocidad crítica. Por lo general este tipo de rotores gira en el orden del 80% de la velocidad crítica.

Normalmente el 99% de los rotores industriales son rígidos, en especial los de motores eléctricos, bombas, entre otros que giren a 500, 1000, 1500 RPM. Pero son peligrosamente frías los ventiladores pues su estructura

caracterizada por su esbeltez y liviandad les da una relación ancho-diámetro y volumen-peso, sugerentemente alta.

Por lo tanto los rotores rígidos son más fáciles de balancear, ya que el punto pesado coincide con el sentido de la vibración más alta.

### **2.1.7. Rotor flexible**

Son aquellos cuya velocidad de giro está por sobre la primera frecuencia resonante crítica, lo cual significa que:

- En partidas y paradas se pasa necesariamente por una velocidad crítica, la que debe ser reconocida para evitar permanecer en este rango.
- Al pasar por la velocidad crítica se produce un cambio en la manera de vibrar y forma de la flecha del eje del rotor. Por ende la fase de la frecuencia fundamental cambia en 180°.
- Por lo tanto el punto de balanceo ya no coincide con el sentido de mayor vibración. En general muchos rotores de ventiladores, y turbo-maquinaria son flexibles si giran a más de 1000-1200 rpm los primeros y 1500 rpm las segundas.

### **2.1.8. Rotor delgado**

Es aquel rotor cuyo diámetro es mucho mayor en relación a su largo (discos). En general se considera un rotor delgado cuando el largo no supera en un tercio al diámetro.

### **2.1.9. Punto pesado**

Es el punto imaginario resultante de la suma vectorial de las diferencias de discontinuidades del rotor en el plano de medición y es definido como el punto de balanceo del rotor.

### **2.1.10. Punto alto**

Es el punto que posee la mayor distancia al centro de rotación (en un rotor). El punto alto es la respuesta del rotor al desbalanceo.

El punto alto coincide con el punto pesado en los rotores rígidos.

### **2.1.11. Punto liviano**

Es el punto que se encuentra diametralmente opuesto al punto pesado que produce el desbalance.

### **2.1.12. Velocidad de balance**

Es la velocidad a la cual se realiza el balanceo del rotor. La que debe semejarse a la velocidad de trabajo.

### **2.1.13. Masa desbalanceada**

Es aquella que se considera localizada en un radio y ángulo determinado, perteneciente a uno o más planos perpendiculares al eje de rotación del rotor, de modo que el producto de ésta por su aceleración centrífuga entrega como resultado la fuerza de desbalance del sistema.

#### **2.1.14. Fuerza de desbalance resultante**

Es la sumatoria vectorial de las fuerzas centrífugas del sistema, producto de todas las masas desbalanceadas pertenecientes al rotor.

#### **2.1.15. Momento resultante debido al desbalance**

Es el momento debido a la fuerza resultante del sistema, en relación a un punto de referencia en un plano que contenga el centro de gravedad y el eje de giro del rotor.

#### **2.1.16. Ángulo de fase**

Es el ángulo medido por el sensor de vibración, desde el instante en que una marca pasa por el sensor, hasta que el punto alto pasa también, y se mide en sentido contrario al de rotación.

#### **2.1.17. Planos de medición**

Es un plano perpendicular al eje de giro del rotor, donde se realiza la medición de las vibraciones.

#### **2.1.18. Planos de corrección**

Es el plano perpendicular al eje de giro, donde se realizan las correcciones correspondientes al balance (donde se adicionan o elimina masa para lograr el balance).

### **2.1.19. Balance**

Es un procedimiento para el análisis de la distribución de masa de un rotor, el cual indica cuando es necesario realizar una redistribución de masa para evitar que la fuerza de las vibraciones sobrepase niveles recomendados para cierta velocidad de operación, sobrepasando los límites de vibración recomendados.

### **2.1.20. Desbalance**

Es una condición que existe en un rotor cuando, producto de las fuerzas de inercia no compensadas se produce una manera anormal del modo de vibrar.

Cabe destacar que toda pieza rotatoria debe ser diseñada con un desbalance propio (desbalance residual), el que debe permitir al equipo trabajar dentro de ciertos estándares de vibración, según lo recomienda la normativa vigente.

### **2.1.21. Vector de desbalance**

Es un vector cuya magnitud es la cantidad de desbalance y su dirección es el ángulo donde está ubicada la masa que produce el desbalance, medido respecto a las coordenadas de un plano de medición determinado.

### **2.1.22. Cantidad de desbalance**

Es una medida cuantitativa del desbalanceo de un rotor (referida a cualquier plano de medición) sin considerar la posición angular. Es obtenida del

producto de la masa desbalanceada por la distancia de su centro de gravedad al centro de rotación. Se expresa en unidades de masa por distancia, generalmente gr-mm.

### **2.1.23. Tolerancia de desbalance**

Es un criterio que permite un desbalance máximo en el plano de medición.

Este grado de precisión de balance está establecido y comprende desde el G 0,4 mm/s hasta G 630 mm/s. según las recomendaciones de la norma ISO 1940.

### **2.1.24. Peso de prueba**

El peso de prueba tiene por objeto, modificar la condición de desbalance existente y poder medir la respuesta del rotor bajo efectos de una fuerza centrífuga de magnitud y dirección conocida. La respuesta que entregue el rotor será empleada para corregir la medición inicial y calcular adecuadamente el vector de corrección del desbalance.

Las fórmulas para el cálculo de la masa de prueba provienen de ecuaciones desarrolladas para el balanceo de rotores de turbinas donde el rotor pasa a través de velocidades críticas y que consideran que éste no debe producir una fuerza equivalente dinámica al 10% del peso estático del rotor.

Lo anterior queda traducido en la siguiente expresión:

$$W_{pr} = 9.09 \times (1000^2) \frac{W_r}{N^2 r}$$

Donde:

**$W_{pr}$**  = peso de prueba en gramos.

**$W_r$**  = peso del rotor en kg.

**$N$**  = velocidad del rotor en rpm.

**$R$**  = radio del peso de pruebas en cm.

Para la mayoría de los equipos que trabajan entre 1200 y 3600 rpm esta fórmula es usualmente simplificada a:

$$W_{pr} = 30 \frac{W_r}{R}$$

#### **2.1.25. Ángulo de corrección**

Con respecto al sistema radial de coordenadas fijas en el rotor, es el ángulo en que la masa del rotor debe ser ajustada o corregida.

#### **2.1.26. Ángulo de desbalance**

Dado un sistema de coordenadas polares fijo en un plano perpendicular al eje de rotación y girando con el rotor, el ángulo de desbalance se define como el ángulo polar en el cual una masa desbalanceada es localizada.

#### **2.1.27. Razón de reducción de desbalance (RRD)**

Es la razón entre la cantidad de desbalance que se reduce en una sola carrera de balance y el desbalance inicial.

$$R.R.D. = 1 - \frac{\text{Cantidad de desbalanceamiento residual}}{\text{Cantidad de desbalanceamiento inicial}}$$

## 2.2. Tipos de desbalance

Los tipos de desbalance se definen, dependiendo de la cantidad de planos en los cuales yacen las fuerzas no balanceadas.

Por lo general se suele clasificar los desbalances en estático y dinámico, pero técnicamente existen cuatro tipos definidos según la norma ISO 2372, los que dependen del desplazamiento que sufre el eje principal de inercia respecto del eje de giro del rotor.

A continuación se definen los cuatro tipos de desbalance considerados en la norma ISO 10816.

### 2.2.1. Desbalance estático

El eje principal de inercia está desplazado del eje axial de rotación en forma paralela. Esto hace que el centro de gravedad no coincida con el eje de rotación.

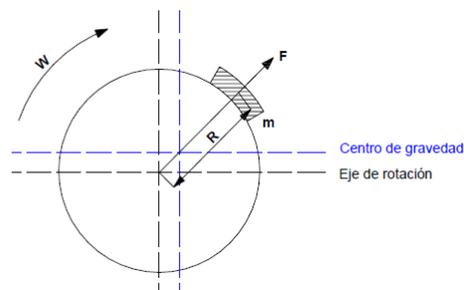
Su nombre (estático) se debe a que se determina estáticamente (girando manualmente), ya que el peso de desbalance o punto pesado apunta en la dirección de la fuerza de gravedad.

La vibración que produce el desbalance estático, es reconocible por tres causas:

- La vibración está caracterizada por una fuerte componente  $1 \cdot \text{RPM}$  en sentido radial, en cada uno de los cojinetes terminales.
- Los componentes  $1 \cdot \text{RPM}$  crecen fuertemente al incrementarse la velocidad de rotación (al cuadrado de la variación de las RPM y directamente proporcional al crecimiento del grado de desbalance).
- Los componentes  $1 \cdot \text{RPM}$  están en fase, en ambos cojinetes

En general, este tipo de desbalance es fácilmente reconocible y corregible, colocando pesos en el lado opuesto al punto pesado o sacando peso al lado pesado, ya que se busca restituir la coincidencia de ambos ejes.

Figura 1. **Representa el desbalance estático de un rotor producido por una masa “m” sin compensar**



Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.

p. 50.

Un caso particular de balance estático en que se elimina peso son las grandes hélices de empuje de los buques, las que se balancean estáticamente, debido a que la velocidad de funcionamiento es baja, no alcanzando la primera velocidad crítica, y por su condición de rotor delgado (gran diámetro con respecto al largo).

### 2.2.2. Desbalance par o de momento

En este tipo de desbalance se produce cuando la línea de los centros de masa es oblicua respecto al eje de simetría axial, intersecándolo en el punto central y permaneciendo en un plano de simetría axial del rotor. Los desbalances son simétricos y opuestos  $180^\circ$ , además los momentos respecto al centro de gravedad son iguales y contrarios.

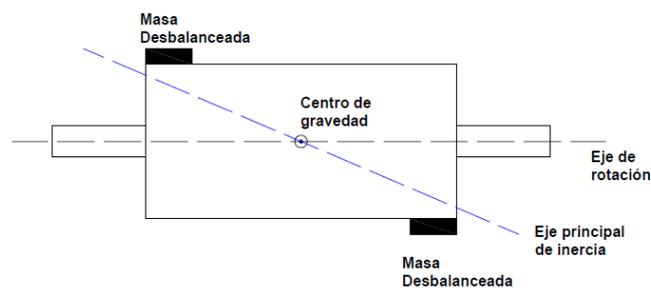
Este tipo de desbalance es casi teórico y puede darse en rotores diseñados para vibrar, por cuanto sus puntos pesados están dispuestos en sentidos opuestos, en planos extremos del rotor. No es fácil de reconocer por simple giro manual como el desbalanceo estático, ya que puede llevar a la falsa presunción, de que el rotor está perfectamente balanceado, pues estáticamente no muestra puntos pesados.

La vibración que produce este desbalance es reconocible por:

- La vibración presenta una fuerte componente  $1 \cdot \text{RPM}$  en el sentido radial, pero además aparece en sentido axial en cada cojinete extremo.
- Los componentes  $1 \cdot \text{RPM}$ , tanto radiales como axiales crecen fuertemente con el cuadrado de las RPM y directamente con la variación de la magnitud del desequilibrio.
- Los componentes  $1 \cdot \text{RPM}$ , están desfasados en  $180^\circ$  en ambos cojinetes extremos.

Este tipo de desbalance una vez reconocido es fácilmente resuelto adicionando o eliminando pesos diametralmente, cada uno en el plano contrario.

Figura 2. **Representa el desbalance par o de momento**



Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.  
p. 51.

### 2.2.3. Desbalance dinámico

En este caso existe un eje principal de inercia que no corta al eje de rotación.

Esta es la forma más general de desbalance, y consiste en una combinación de desbalance estático y par en cualquier posición angular.

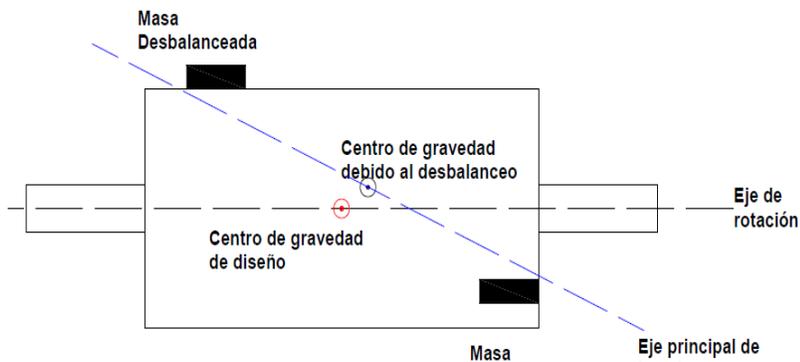
La vibración que origina este desbalanceo no es tan característica como la de los casos anteriores:

- Fuertes componentes 1\*RPM radiales y axiales, pero aparecen otros armónicos.

- Alza fuerte de la vibración general con un aumento de la velocidad de giro
- Los componentes  $1^*RPM$  no están en fase, pero tampoco desfasadas en un ángulo preciso. Sin embargo el desfase permanece al variar la velocidad.

En el caso de rotores anchos (largos) con respecto a su diámetro, lo más común es balancearlos dinámicamente.

Figura 3. **Muestra de manera general como está distribuida la masa desbalanceada en un rotor que necesita ser balanceado dinámicamente**



Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.  
p. 53.

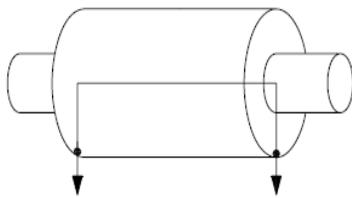
Dentro del desbalance dinámico se pueden encontrar distintos casos, que se pueden descomponer en componentes estáticas y de momento, lo que es una herramienta útil para decidir el método más adecuado de balanceo.

### 2.3. Combinaciones del desbalance dinámico

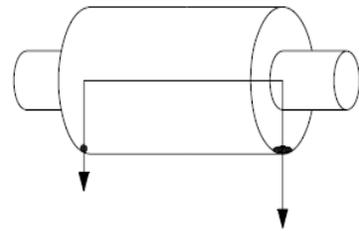
Como fue mencionado anteriormente el desbalance es producto de diversas causas producidas en distintos e infinitos planos.

A continuación se muestran algunas situaciones de desbalance dinámico y cómo se puede descomponer:

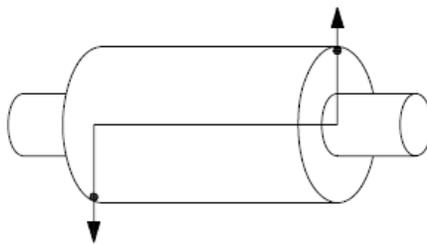
Figura 4. **Diferentes combinaciones en las que se puede presentar el desbalance**



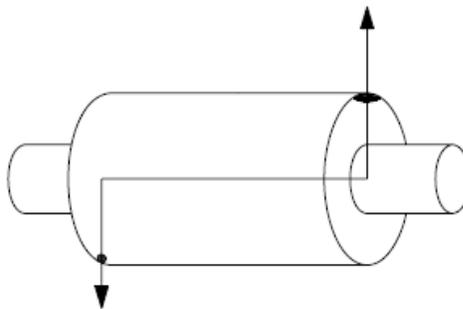
Desbalance de igual magnitud y en fase  
(Diferencia de fase  $0^\circ$ ).



Desbalance de distintas magnitudes  
y en fase

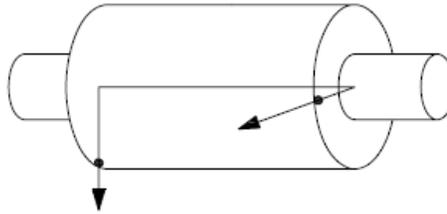


Desbalance de iguales magnitudes,  
fuera de fase en  $180^\circ$

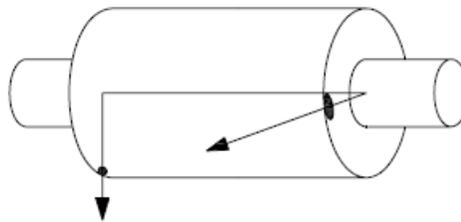


Desbalance de distintas magnitudes, fuera de fase en  $180^\circ$ .

Continuación de la figura 4.



Desbalance de iguales magnitudes,  
fuera de fase (distinta de  $180^\circ$ )



Desbalance de distintas magnitudes y fase distinta de  $180^\circ$ .

Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.  
p. 53 y 54.

## 2.4. Causas de desbalance

Las causas de desbalance en los equipos son varias, se enumeran las mismas a continuación:

- Falta de simetría en las partes rotativas del equipo, debidas a la fundición, forjado y maquinado.

- Falta de homogeneidad causada por soldaduras aplicadas debido al desgaste.
- Variaciones en la estructura cristalina y química del material, causadas por el vaciado o tratamiento térmico.
- Eje torcido o flexionado
- Excentricidad del anillo interior de los baleros que soportan las piezas giratorias.

## **2.5. Tipos de desbalance**

Los tipos de desbalance se definen, dependiendo de la cantidad de planos en los cuales yacen las fuerzas no balanceadas.

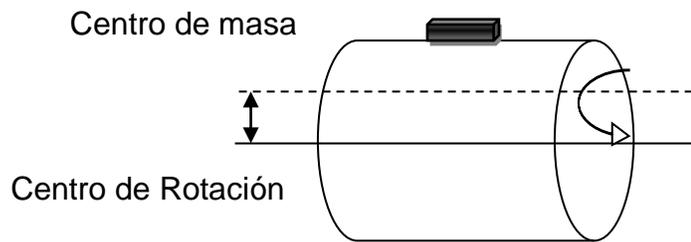
Por lo general se suele clasificar los desbalances en estático y dinámico, pero técnicamente existen cuatro tipos definidos según la norma ISO 2372, los que dependen del desplazamiento que sufre el eje principal de inercia respecto del eje de giro del rotor.

### **2.5.1. Desbalance estático**

Es una condición que existe cuando el centro de masa no está sobre el eje de rotación, puede ser también explicada cuando el eje principal de inercia es paralelo al eje de rotación. El desbalance estático por sí mismo es típicamente medido y corregido sobre partes en forma de disco muy estrechas. Para corregir el desbalance estático se requiere solo una corrección. La cantidad de desbalance es el producto del peso por el radio. Este tipo de desbalance es un

vector, y por eso, debe ser corregido con un peso conocido en un ángulo particular. Fuerza de desbalance es otro nombre para el desbalance estático.

Figura 5. **Ejemplo de masa desbalanceada estáticamente**

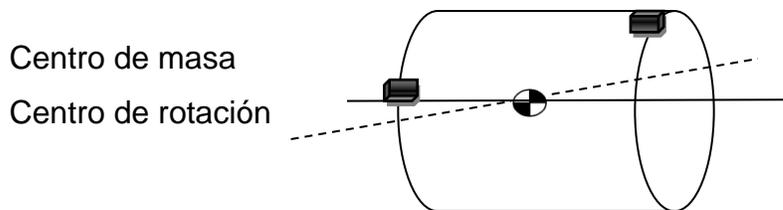


Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

### 2.5.2. Desbalance de acoplamiento

Es una condición específica que existe cuando el eje principal de inercia no es paralelo con el eje de rotación. Para corregir el desbalance por acoplamiento, 2 pesos iguales deben ser agregados a la pieza de trabajo en ángulo de separación de 180 grados en 2 planos de corrección, la distancia entre estos 2 planos es llamada "brazo de acoplamiento". El desbalance de acoplamiento es un vector que describe la corrección.

Figura 6. **Ejemplo de masa desbalanceada por acoplamiento**

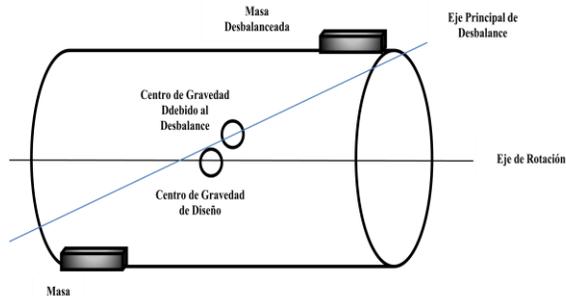


Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

### 2.5.3. Desbalance en dos planos

Es también definido como el desbalance dinámico. Es una suma vectorial de fuerza y desbalance de acoplamiento. Para corregir dos planos de desbalance se requieren dos pesos de corrección no relacionados en dos diferentes planos en dos ángulos no relacionados.

Figura 7. Ejemplo de masa desbalanceada en dos planos



Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

## 2.6. Técnicas de balance

Las técnicas de balance empleadas en la industria guatemalteca son aplicadas según el tipo de desbalance encontrado. La selección y utilización correcta de la técnica de balance ayudará a resolver el problema de desbalance de una forma rápida y eficiente.

### 2.6.1. Balance dinámico

También llamado balance en 2 planos. El balance en dos planos resulta un poco más complicado que el balance en un plano y en algunas ocasiones no entrega los resultados esperados en forma inmediata. Esto depende de la respuesta a las fuerzas de cada rotor en particular.

Cuando las masas no balanceadas yacen en más de un plano, la resultante del desbalance es una fuerza y un momento. A esta condición se le conoce como desbalance dinámico y solo puede ser corregida con una prueba dinámica (máquina capaz de proporcionar tanto el peso de la masa correctora, como su posición en cada plano), la que corresponde a hacer girar el rotor a una velocidad similar a la de trabajo, con el fin de simular esta condición. En general se considera realizar un balance dinámico en dos planos a rotores cuyo largo es mayor que la mitad de su diámetro.

El balance en dos planos tiene mejores resultados cuando la rigidez relativa de los descansos es débil en comparación con el rotor. Esto es el rotor es rígido y los descansos son flexibles pero no resonantes. Cuando esta relación cambia, también cambian los resultados del balance.

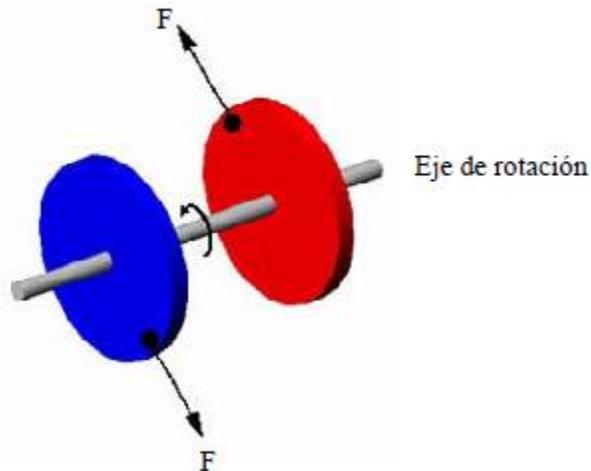
Como regla general el balance en dos planos debe efectuarse cuando se tienen las siguientes condiciones, producto de la medición de vibraciones:

- El rotor es rígido
- Los descansos son flexibles pero no resonantes
- Solo dos rodamientos soportan la carga radial
- Existe gran cantidad de desbalance par

Es prácticamente imposible determinar el realizar un balance en uno o dos planos antes de realizar la medición de vibraciones del sistema.

El efecto del desbalance dinámico en un rotor se puede representa por la figura siguiente:

Figura 8. **Desbalance par o de momento**



Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.  
p. 58.

Si las dos masas desbalanceadas son idénticas y opuestas (desfasadas en  $180^\circ$ ), el rotor estará balanceado estáticamente respecto del eje de rotación, sin embargo cuando el rotor gira, cada disco generará una fuerza centrífuga, produciéndose así un momento capaz de desplazar el eje de sus apoyos.

### 2.6.2. Balance en un plano

El balance en un plano consiste en agregar o quitar un peso de corrección en un solo plano para lograr corregir el desbalance. Este método es aplicable en rotores delgados y rotores de mayor longitud que presenten desbalance estático.

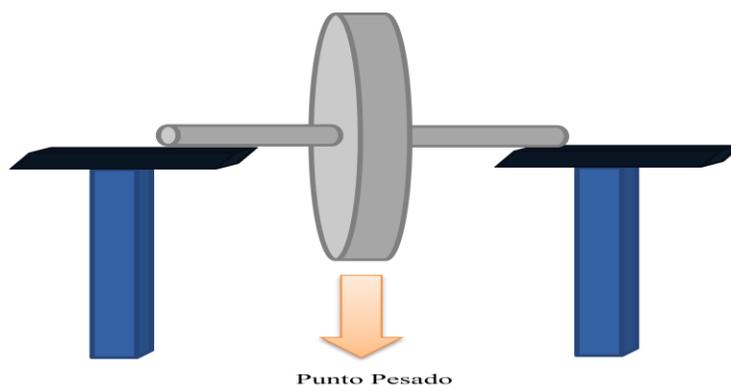
Para realizar el balance en un plano deben revisarse los puntos siguientes:

- El rotor es rígido
- Las amplitudes en cada rodamiento son semejantes
- El ángulo de fase de ambos rodamientos está en la misma dirección, (se acepta por igual dirección una diferencia de fase de no más de  $\pm 30^\circ$ ).

El método más utilizado para la realización de este balance, es una prueba estática, en la que el conjunto eje rotor descansa sobre dos bases perfectamente alineadas que permitan rotar libremente al conjunto eje-rotor.

El rotor rodará libremente hasta que la posición del punto pesado quede lo más cerca del centro de la tierra. Una vez encontrada esta posición, bastará colocar el peso de corrección a  $180^\circ$  de dicho punto y/o eliminar la masa que provoca el desbalance, puliendo en la zona del punto pesado.

Figura 9. **Representación gráfica del desbalance en 1 plano**



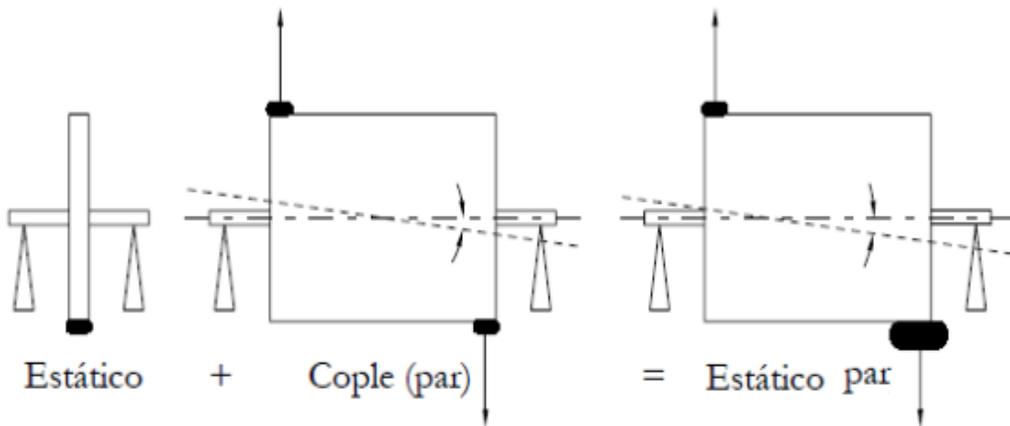
Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

### 2.6.3. Balance estático – copla (par)

Es una situación particular del desbalance estático. Es una combinación de balance estático y par, encontrándose ambos desbalances en el plano longitudinal. En este desbalance el eje principal de inercia interseca al eje de rotación en un punto que no coincide con el centro de gravedad.

Esta es una situación muy común en rotores en voladizo.

Figura 10. **Combinación de desbalance estático copla (par)**



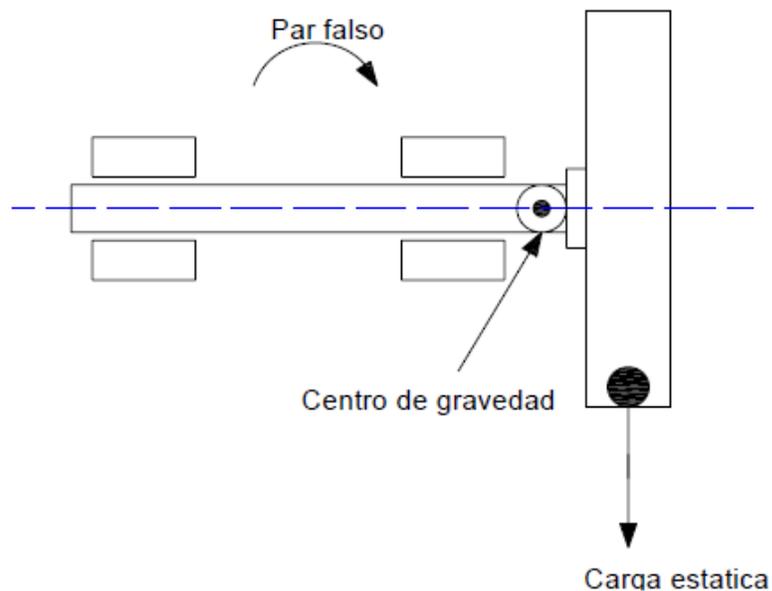
Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Muchas técnicas de balance de rotores en voladizo apuntan a corregir solamente el balance en un plano, dando en muchas ocasiones buenos resultados, pero los óptimos se obtendrán balanceando en dos planos pero separando las componentes estáticas de las par.

Por ejemplo si se tiene un rotor en voladizo (ventiladores, hélices, etc.) que ha sido balanceado en un banco y montado sobre su eje, el desbalance residual, especialmente la componente estática, creará una situación de

desbalance estático – copla (par) o par falso. Este par falso se sumará a la componente de par residual, haciendo que el balance dinámico de un rotor en voladizo se haga muy complicado.

Figura 11. **Muestra un rotor en voladizo, indicando el par falso que se produce luego de realizar un balance estático**



Fuente: MORENO BARRA, Luis Antonio. Balanceo dinámico de sistemas rotativos.

p. 52.

Las técnicas de balance descritas ayudan a resolver problemas de vibración en los equipos rotativos utilizados en la industria guatemalteca. Su uso de forma efectiva contribuye a disminuir los costos por mantenimiento correctivo y aumenta la vida útil de los equipos.

### **3. COMPONENTES**

Los sensores para medir las vibraciones mecánicas son elementos importantes al momento de realizar estos análisis, pues permiten a los ingenieros realizar los análisis de forma precisa y en tiempo real.

Hay tres tipos de sensores que se estudiarán en este capítulo; y se describen a continuación:

- Sensor de velocidad
- Sensor de aceleración
- Sensor de desplazamiento

#### **3.1. Tipos de sensores para análisis de vibraciones y balance**

El sensor es el primer eslabón en la cadena de medición y debería reproducir exactamente las características de la magnitud que se desea medir. Un transductor es un dispositivo electrónico que sensa una magnitud física como vibración y la convierte en una señal eléctrica (voltaje) proporcional a la magnitud medida.

Típicamente hay cuatro tipos de sensores o transductores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto
- Sensor de velocidad o velocímetro
- Sensor de aceleración o acelerómetro

### 3.1.1. Sensor de aceleración

Los acelerómetros son los sensores más utilizados en análisis de vibraciones en maquinaria. Todos los colectores portátiles están provistos de un acelerómetro, aunque la mayoría de los analistas de vibraciones integran la señal y trabajan en unidades de velocidad. Los sistemas de monitorizado permanente también usan acelerómetros excepto cuando se hace necesario utilizar una sonda de proximidad.

Figura 12. **Sensor de aceleración**



Fuente: Empresa Elliott Turbocharger Guatemala. S. A.

Hay diferentes tipos de acelerómetros, el más común es el piezoeléctrico con un amplificador interno. Los acelerómetros piezoeléctricos se montan externamente, generalmente sobre el alojamiento de los apoyos.

Figura 13. **Acelerómetro portátil**



Fuente: Empresa Elliott Turbocharger Guatemala. S. A.

## Funcionamiento

El material piezoeléctrico (cristal) está situado bajo una masa sísmica. Cuando el sensor vibra el cristal se comprime y descomprime debido a la presión ejercida por la vibración y la masa sísmica.

Figura 14. **Sensor de aceleración visto por dentro**



Fuente: WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones.  
p. 55.

La carga de salida es proporcional a la fuerza y por lo tanto a la aceleración. Esa carga de salida requiere de un amplificador para convertirla en un voltaje de salida al colector.

Mientras que hace 10 años lo común era utilizar un amplificador externo, actualmente el amplificador está dentro del sensor y es alimentado por el colector. Este conjunto es conocido por las siglas ICP (*Integrated Circuit Piezoelectric*).

La señal se polariza produciendo una corriente continua que alimenta al amplificador, no es necesaria una instalación eléctrica aparte. Por lo tanto, el colector de datos necesita disponer de una conexión de corriente continua para trabajar con este tipo de acelerómetros.

De todos modos, la mayoría de colectores disponen de una tensión de polarización con el fin de determinar si el sensor tiene algún fallo interno, o si hay un error de cable.

La existencia del amplificador supone una limitación en las respuestas de baja frecuencia. La característica de baja frecuencia del amplificador es generalmente a 1 Hz para la mayoría de las unidades ICP disponibles. Hay algunos acelerómetros especialmente diseñados para trabajar a 0.1 Hz en el caso en que sea necesario recoger datos a muy baja frecuencia.

### **3.1.2. Sensor de velocidad**

Mientras que a menudo se analizan datos en unidades de velocidad, no se usan sensores de velocidad en sí mismos. Estos todavía se usan en la industria y a continuación se verá lo relativo a su diseño, pros y contras.

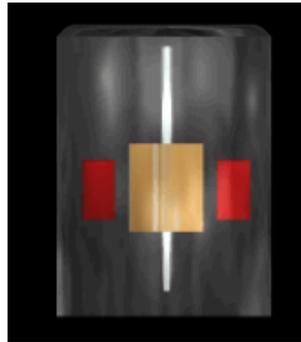
El sensor de velocidad electrodinámico es básicamente un imán suspendido, montado entre un muelle y un amortiguador. Una bobina abraza al imán. Cuando la carcasa del sensor vibra, el imán se mantiene estacionario debido a la inercia.

Por lo tanto, hay movimiento en el imán junto a la bobina, la cual genera una señal eléctrica proporcional a la velocidad de la masa suspendida.

El diseño puede también presentar una bobina pegada a la masa, rodeada por el imán.

El resultado es el mismo; la electricidad es generada cuando hay movimiento relativo entre el imán y la bobina.

Figura 15. **Ejemplo de funcionamiento interno de un sensor de velocidad**



Fuente: WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones.  
p. 54.

#### Ventajas:

- No necesita energía del exterior, el propio sistema genera electricidad
- La señal de salida es potente
- Fácil de usar. No tiene problemas debido al montaje
- Trabaja a alta temperatura

#### Desventajas:

- No es adecuado para medidas de baja frecuencia
- No es adecuado para medidas de alta frecuencia
- Hay cambios de sensibilidad debido a la temperatura
- Debido a que tiene partes internas móviles, el desgaste puede acortar su tiempo de vida.
- Los sensores son bastante grandes
- No es muy preciso debido a la señal de ruido que presenta

Aplicaciones:

Aunque son muy populares, no son por lo general los sensores más utilizados. Se utilizan en la medición de vibraciones de chumaceras, cojinetes en motores eléctricos, turbo cargadores en motores de combustión interna de generadores y todo tipo de elementos rodantes en la industria.

Unidades:

Las unidades utilizadas son mm/s, RMS.

### **3.1.3. Sensor de desplazamiento**

Los sensores desplazamiento miden el movimiento relativo entre la punta del sensor y el eje. Por eso el sensor no va en el exterior de la máquina, sino más bien taladrado dentro del apoyo. Por lo tanto estos sensores estarán perfectamente montados.

Figura 16. **Sensor de desplazamiento**

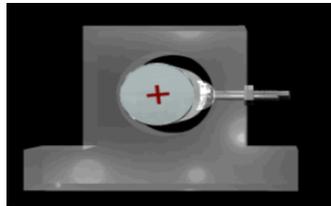


Fuente: Elliott Turbocharger Guatemala. S. A.

Los sensores desplazamiento son usados típicamente en monitorizado continuo en máquinas de con apoyos superficies planas tales como turbinas, bombas y grandes ventiladores. Sin embargo, es posible conectar un colector a la salida para realizar espectros normales y análisis de tendencias.

Estos sensores se llaman sondas Eddy Current, y también son conocidas como sondas de proximidad. Todas trabajan basándose en el mismo principio.

Figura 17. **Ejemplo de funcionamiento de un sensor de desplazamiento**



Fuente: WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones.  
p. 54.

Hay tres componentes: un acondicionador, una sonda y un cable entre ellos. Suministra un voltaje al acondicionador que produce una señal RF. Esta señal es transmitida desde el cable de la sonda.

Figura 18. **Sensores permanentes**



Fuente: Elliott Turbocharger Guatemala. S. A.

Una espiral dentro del extremo del sensor actúa como antena y genera una señal de alta frecuencia dentro de su área de instalación (formándose un campo magnético). Cualquier material conductor en contacto con el campo

absorbe la energía de la señal. Las sondas de proximidad están fijadas sobre la superficie del eje, de ahí viene su nombre.

La absorción del campo provoca que disminuya el espacio entre la punta de la sonda y el hueco. Por lo tanto la distancia al eje cambia dinámicamente, y por eso se produce la señal de salida. El acondicionador actúa entonces como demodulador y detector, y tiene dos salidas. La salida dinámica produce la sonda de onda, de la cual se obtiene el espectro y el valor global.

Hay también un voltaje (corriente continua) proporcional a la distancia del hueco. La señal del hueco se usa en sistemas de monitorizado para determinar la distancia relativa entre el eje y el apoyo.

Por lo general, se toma una lectura del área de instalación cuando el eje está en reposo, y entonces cuando la máquina (una turbina, por ejemplo) está en régimen nominal de funcionamiento, se monitoriza el voltaje en el mismo. De esta información se detectan fricciones en el eje, y se produce un diagrama de órbitas.

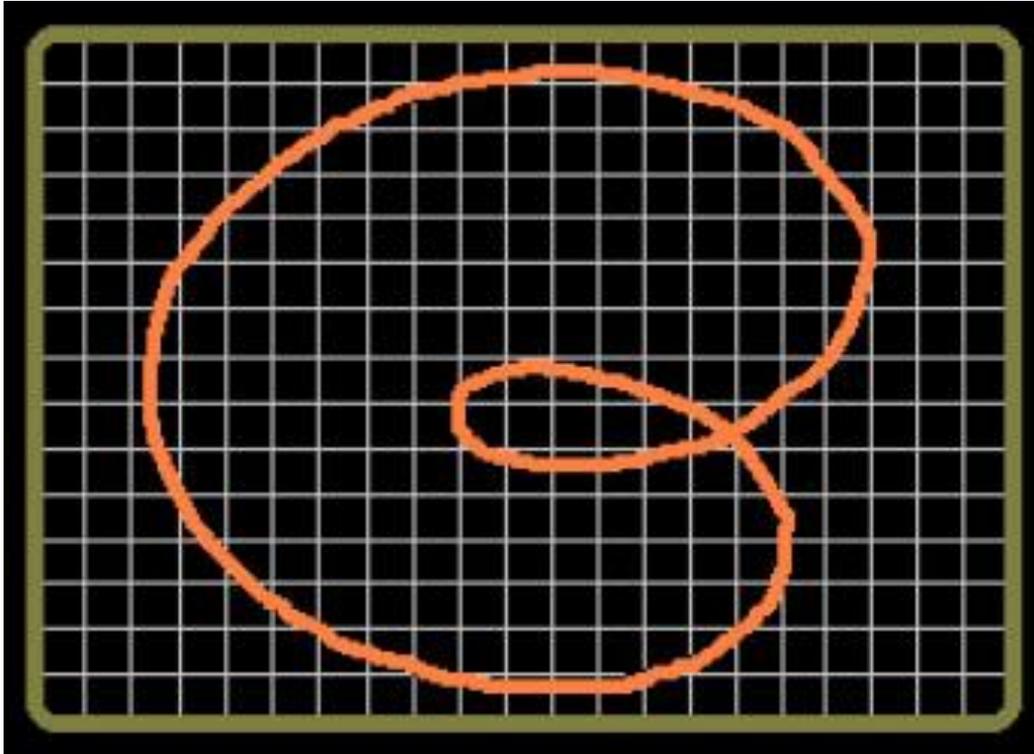
En la mayoría de las turbinas las sondas de proximidad son instaladas formando 90° con la máquina. Esto permite al analista ver exactamente como el eje se mueve respecto al apoyo.

Los diagramas de órbita son comúnmente usados para visualizar este movimiento. Un ojo bien entrenado puede detectar desalineación, desequilibrio y otra serie de problemas mecánicos en los equipos.

De esta forma se pueden detectar grietas en el eje, así como los cambios dinámicos de este. Existe un avanzado paquete de software que puede

controlar todo el movimiento dinámico del eje examinando las señales de las sondas de proximidad y los acelerómetros montados, en caso de haberlos.

Figura 19. **Diagrama de órbita**



Fuente: elaboración propia. Paint.

Ventajas:

- Respuestas de baja frecuencia (hasta 0 Hz)
- Mide el desplazamiento relativo entre el eje y el apoyo
- Son fiables, si han sido bien montados

#### Desventajas:

- Son caros y difíciles de instalar
- No se pueden usar para medidas de alta frecuencia
- Su calibración (se determina con el cociente entre el voltaje de salida y el desplazamiento real) depende del material del eje (diferentes materiales absorben diferentes grados de energía).
- El desgaste del eje y los defectos en su superficie producen señales falsas

#### Aplicaciones:

- Generalmente son usadas para máquinas de baja velocidad, por debajo de 600 CPM (10 Hz).
- Son útiles como referencia de fase (una señal de referencia proporcional a la velocidad de la máquina) para equilibrado dinámico y análisis.
- Usados para el equilibrado dinámico debido al filtrado a 1X RPM

#### Unidades:

Las unidades son mm. o micras Pk-Pk.

## **4. BALANCE DINÁMICO Y ESTÁTICO**

El balance dinámico y estático es parte importante del mantenimiento en la industria guatemalteca. El poder llevarlos a buen término ayudará y facilitará las operaciones de mantenimiento general en los equipos de la planta de producción.

### **4.1. Definición de balance**

El balance de rotores, ventiladores y partes rotativas de equipos en la industria, es llevar al equilibrio el centro de masa con el centro de rotación, es decir, llevar al mismo plano rotacional el centro de masa con el centro de rotación por medio de la adición o sustracción de material (pesos de corrección).

### **4.2. Balance dinámico**

El desbalance dinámico es el tipo más común encontrado en los rotores con problemas de desbalance, en donde el eje de inercia del rotor jamás será paralelo al eje de giro, y pueden o no interceptarse. En esencia, el desbalance dinámico es una combinación del desbalance estático y de par.

Para corregir este tipo de desbalance se requiere la ubicación de pesos de balance en dos planos que sean perpendiculares al eje de giro. Las características que permiten identificarlo en el diagnóstico son:

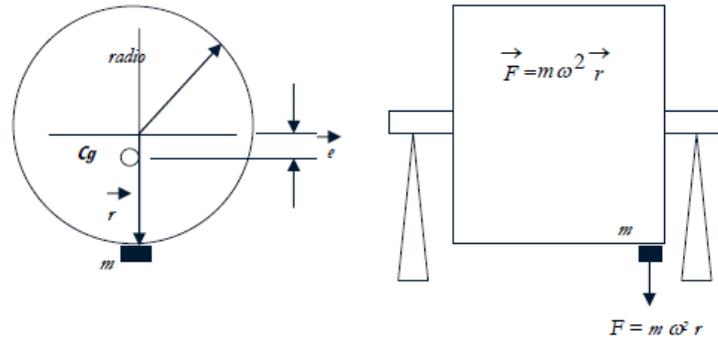
- Siempre se generará un pico dominante a 1X (velocidad de giro) en los espectros de frecuencias tomados en dirección radial, pero la amplitud será diferente entre los dos apoyos.
- Al igual que los dos casos anteriores, la fase será estable
- La diferencia entre las lecturas de fase horizontal de los dos apoyos será entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .
- La diferencia de fase vertical entre apoyos debe ser similar a la horizontal (por ejemplo, si existiera  $125^\circ$  de diferencia en la fase horizontal, el valor de la fase vertical debe ser aproximadamente  $125^\circ \pm 30^\circ$ ).
- Adicionalmente habrá una diferencia de fase aproximada de  $90^\circ \pm 40^\circ$  entre las lecturas horizontal y vertical del mismo apoyo.

### 4.3. Balance estático

Es el caso más simple de desbalance, ocurre en un rotor uniforme de masa "**M**" montado en una flecha (rotor), cuando coincide su eje de rotación con su eje de simetría geométrica.

Si una masa pequeña "**m**" se fija al rotor a una distancia "**r**" a partir del eje de rotación, entonces el rotor estará desbalanceado. La fuerza centrífuga generada por la masa "**m**" cuando el disco rota a una velocidad de " **$\omega$** ", está dada por:

Figura 20. **Balance estático**



Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

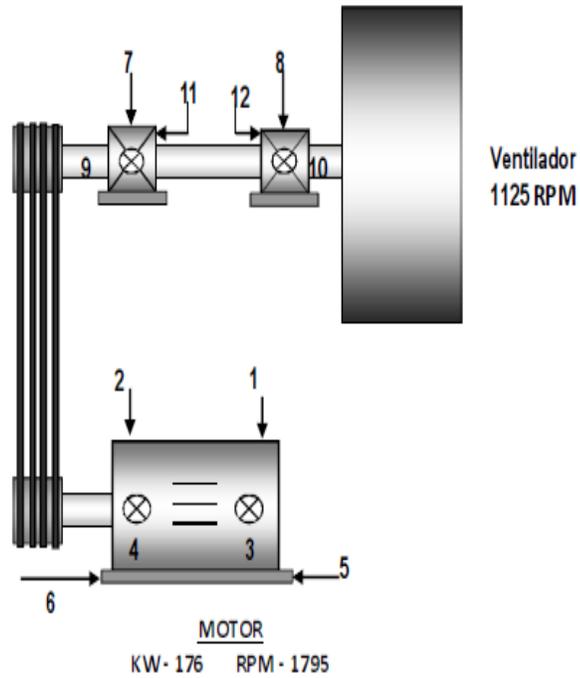
Donde:

- $F$  es la fuerza equivalente a la fuerza generada por una excentricidad  $e$ , del centro de gravedad del rotor con respecto a su eje de rotación,
- $M$  es la masa del rotor (kg),
- “ $e$ ” es la excentricidad del rotor (m, metros),
- $Cg$  es el centro de gravedad del rotor.

#### 4.4. Ejemplo de un balance

Se realizará un balance en campo (en su lugar de operación, no será desmontado), a un ventilador acoplado a un motor eléctrico por medio de poleas y fajas.

Figura 21. **Diagrama de equipo a balancear**



Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Figura 22. **Ventilador de tiro forzado**



Fuente: Ingenio Tzulá. Km 170 San Andrés Villa Seca. Retalhuleu Guatemala.

Este ventilador se clasifica como Máquina Grande (176KW) y su límite de vibración es de *11 mm/s RMS (Según tabla ISO 2372)*.

Se realizó un análisis de vibraciones inicial, para determinar la condición de operación del equipo y la condición encontrada fue *NO Aceptable* con un OBV máximo de *11.268 mm/s RMS* en el punto No.8. (Ver figura 21)

El espectro de frecuencias muestra un pico a (1X) velocidad de giro del ventilador, con una amplitud de 10.0157 mm/s RMS. Condición de desbalance en el ventilador.

Tabla I. **Mediciones de vibraciones**

**Vibración Global  
Antes de realizar el Balance**

<b>Motor</b>		<b>Ventilador</b>	
<b>PUNTO</b>	<b>OBV</b>	<b>PUNTO</b>	<b>OBV</b>
1	5.49	7	3.28
2	8.06	8	11.27
3	3.51	9	3.09
4	6.89	10	6.78
5	6.59	11	9.3
6	3.72	12	3.25
<b>Máximo</b>	<b>8.06</b>	<b>Máximo</b>	<b>11.27</b>

**Condición del equipo según la norma ISO 2372: No Aceptable**  
**Todas las mediciones fueron tomadas en mm/s RMS**

Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Al comprobar que el equipo muestra síntomas de desbalance en el ventilador, se procede a iniciar el proceso de balance en el ventilador.

Se inició el proceso de balanceo con una vibración máxima por desbalance de  $10.50 \text{ mm/s RMS}$ . Se colocó un peso de prueba de 89Gramos, y luego de realizado el balanceo se colocaron 35Gramos en pesos de corrección. Obteniendo una vibración por desbalance de  $0.455 \text{ mm/s RMS}$ . Condición de operación: Buena. La vibración Global máxima obtenida después de realizado el balanceo, fue de  $3.53 \text{ mm/s RMS}$  en el punto No.8. Condición: *Acceptable*.

Tabla II. **Medición de vibraciones**

**Vibración Global**  
**Después de realizado el Balance**

PUNTO	OBV	PUNTO	OBV
1	2.28	7	2.59
2	3.47	8	2.39
3	3.25	9	2.94
4	2.28	10	3.07
5	2.26	11	2.06
6	3.19	12	3.53
<b>Máximo</b>	<b>3.47</b>	<b>Máximo</b>	<b>3.53</b>

**Condición del equipo según la norma ISO 2372: No Aceptable**

**Todas las mediciones fueron tomadas en mm/s RMS**

Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Tabla III. **Condición del equipo antes y después de realizado el balance.**

**Todas las mediciones fueron realizadas en mm/s RMS**

**Antes del Balance**

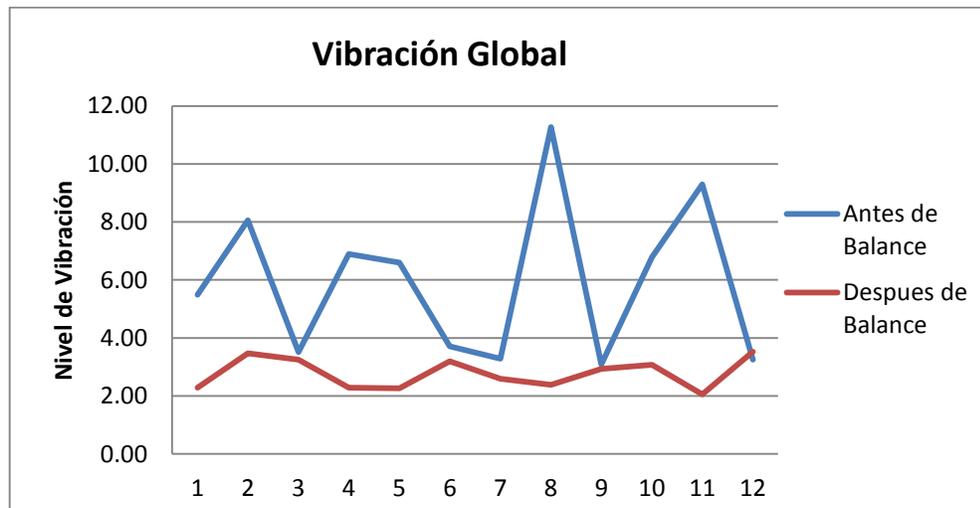
<b>Condición del Motor:</b>	<b>APENAS ACEPTABLE</b>	<b>Máximo</b>	<b>8.06</b>
<b>Condición del Ventilador:</b>	<b>NO ACEPTABLE</b>	<b>Máximo</b>	<b>11.27</b>

**Después del Balance**

<b>Condición del Motor:</b>	<b>ACEPTABLE</b>	<b>Máximo</b>	<b>3.47</b>
<b>Condición del Ventilador:</b>	<b>ACEPTABLE</b>	<b>Máximo</b>	<b>3.53</b>

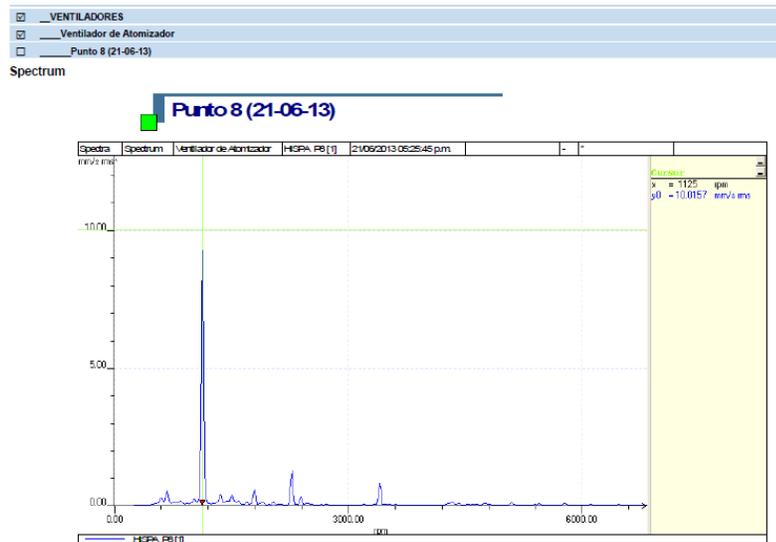
Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Figura 23. **Diferencia del nivel de vibración antes y después de realizado el balance**



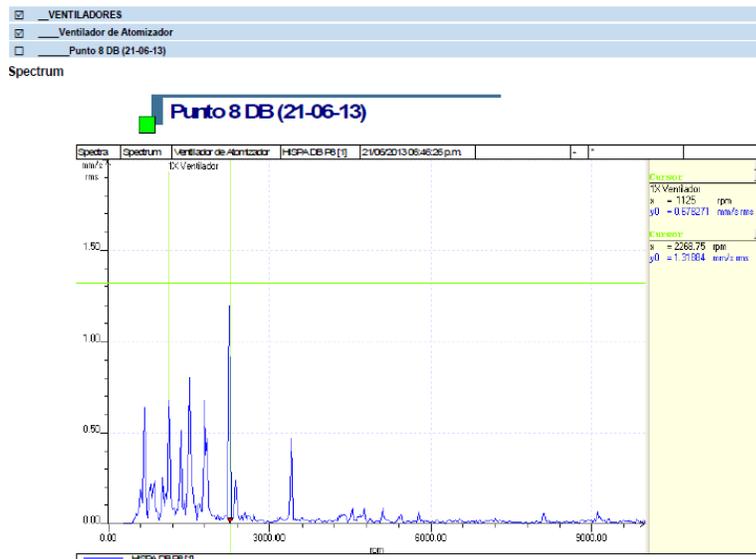
Fuente: elaboración propia. Excel 2010

Figura 24. Espectro de frecuencia antes de realizado el balance



Fuente: elaboración propia. Xms Schenck.

Figura 25. Espectro de frecuencia después de realizado el balance



Fuente: elaboración propia. Xms Schenck

## **5. SEGURIDAD INDUSTRIAL**

La seguridad industrial está incrementando su importancia en la actual industria guatemalteca. Su estudio y aplicación es de vital importancia pues su aplicación de forma correcta puede ayudar al colaborador a llevar a buen final la tarea encomendada, ya sea en el área de mantenimiento o de producción.

### **5.1. Normas de Seguridad**

Se entiende por norma a una regla a la que se debe ajustar la puesta en marcha de una operación. También se puede definir como una guía de actuación por seguir o como un patrón de referencia.

Las normas de seguridad se pueden considerar prácticamente como:

- Normas de carácter general: son las universalmente aceptadas
- Normas de carácter específico: las que regulan una función, trabajo u operación específica.

Las ventajas de las normas se reducen, entre otras, a lo siguiente:

- Representan un elemento de sistematización de seguridad
- Facilitan la comprensión y ejecución de las tareas de seguridad de forma clara y precisa.

- Permiten la dirección eficaz del sistema de seguridad
  - Impiden que existan vacíos acerca de la seguridad
  - Facilitan la rápida formación y concientización del personal
  - Permiten un buen manejo de las instalaciones y equipos
- 
- Homogenizan medios y procedimientos, además de facilitar la comunicación y la seguridad.
- 
- Aumentan el sentido de seguridad en el colaborador

En Guatemala, las normas de seguridad social están reguladas en primera instancia por la Constitución Política de la República de Guatemala, que de conformidad con el artículo 100 (ver apéndice), delega al Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), como entidad responsable de emitir y hacer cumplir las normas de seguridad social e industrial en el país. Para ello estas regulaciones se encuentran contenidas en el Reglamento General sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo.

A su vez en el título quinto, capítulo único de higiene y seguridad laboral, en el código de trabajo, artículo 198 (ver apéndice), se indica que todo patrono está obligado a acatar y hacer cumplir las medidas publicadas por el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social.

## **5.2. Equipos de protección**

Los equipos de protección personal (EPP) comprenden todos aquellos dispositivos, accesorios y vestimentas de diversos diseños que emplea el trabajador para protegerse contra posibles lesiones.

Los EPP constituyen uno de los conceptos más básicos en cuanto a la seguridad en el lugar de trabajo y son necesarios cuando los peligros no han podido ser eliminados por completo o controlados por otros medios.

Figura 26. **Distintos elementos de protección personal**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### **5.2.1. Requisitos de un equipo de protección personal**

Los requisitos para ser un correcto equipo de protección personal, son:

- Proporcionar máximo confort y su peso debe ser el mínimo compatible con la eficiencia en la protección.
- No debe restringir los movimientos del trabajador
- Debe ser durable y de ser posible el mantenimiento debe hacerse en la empresa.
- Debe ser construido de acuerdo con las normas de construcción

- Debe tener una apariencia atractiva para su uso

### **5.2.2. Clasificación de los equipos de protección personal (EPP)**

Los equipos de protección personal, se clasifican de la siguiente manera:

- Protección a la cabeza (cráneo)
- Protección de ojos y cara
- Protección a los oídos
- Protección de las vías respiratorias
- Protección de manos y brazos
- Protección de pies y piernas
- Cinturones de seguridad para trabajo en altura
- Ropa de trabajo
- Ropa protectora

#### **5.2.2.1. Protección a la cabeza**

- Los elementos de protección a la cabeza, básicamente se reducen a los *cascos de seguridad*.
- Los cascos de seguridad proveen protección contra casos de impactos y penetración de objetos que caen sobre la cabeza.
- Los cascos de seguridad también pueden proteger contra choques eléctricos y quemaduras.

- El casco protector no se debe caer de la cabeza durante las actividades de trabajo, para evitar esto puede usarse una correa sujetada a la quijada (barbiquejo).
- Es necesario inspeccionarlo periódicamente para detectar rajaduras o daños que puedan reducir el grado de protección ofrecido.

Figura 27. **Ejemplo básico de un casco de seguridad**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013

### **5.2.2.2. Protección de ojos**

Son elementos diseñados para la protección de los ojos, y dentro de estos se encuentran:

- Contra proyección de partículas
- Contra líquido, humos, vapores y gases
- Contra radiaciones

Figura 28. **Ejemplo de gafas de seguridad**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

Todos los trabajadores que ejecuten cualquier operación que pueda poner en peligro sus ojos, deberán de utilizar la protección apropiada para estos órganos.

Los anteojos protectores para trabajadores ocupados en operaciones que requieran empleo de sustancias químicas corrosivas o similares, serán fabricados de material blando que se ajuste a la cara, resistente al ataque de dichas sustancias.

Para casos de desprendimiento de partículas deben usarse lentes resistentes a impactos.

Para casos de radiación infrarroja deben usarse gafas o lentes protectores provistas de filtro.

También pueden usarse caretas transparentes para proteger la cara contra impactos de partículas.

### 5.2.2.3. Protección a la cara

Son elementos diseñados para la protección de los ojos y cara, dentro de estos se tiene:

Caretas con lentes de protección (caretas de soldador), están formadas de una máscara provista de lentes para filtrar los rayos ultravioletas e infrarrojos.

Protectores faciales, permiten la protección contra partículas y otros cuerpos extraños. Pueden ser de plástico transparente, cristal templado o rejilla metálica.

Figura 29. **Ejemplo de caretas de seguridad**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### 5.2.2.4. Protección de los oídos

Cuando el nivel del ruido exceda los 85 decibeles, punto que es considerado como límite superior para la audición normal, es necesario dotar de protección auditiva al colaborador.

Los protectores auditivos, pueden ser: tapones de caucho u orejeras (auriculares).

*Tapones*, son elementos que se insertan en el conducto auditivo externo y permanecen en esa posición sin ningún dispositivo especial de sujeción.

Figura 30. **Ejemplo de protectores de oído**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

*Orejas*, son elementos semiesféricos de plástico, rellenos con absorbentes de ruido (material poroso), los cuales se sostienen por una banda de sujeción alrededor de la cabeza.

Figura 31. **Ejemplo de orejas**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### 5.2.2.5. Protección respiratoria

Ningún respirador es capaz de evitar el ingreso de todos los contaminantes del aire a la zona de respiración del usuario. Los respiradores ayudan a proteger contra determinados contaminantes presentes en el aire, reduciendo las concentraciones en la zona de respiración por debajo del TLV (Valor permisible promedio) u otros niveles de exposición recomendados. El uso inadecuado del respirador puede ocasionar una sobre exposición a los contaminantes provocando enfermedades o muerte.

Figura 32. **Ejemplos de distintos tipos de mascarillas protectoras**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl).  
Consulta 12 de agosto de 2013.

#### *Limitaciones generales de su uso*

- Estos respiradores no suministran oxígeno
- No los use cuando las concentraciones de los contaminantes sean peligrosas para la vida o la salud, o en atmósferas que contengan menos de 16% de oxígeno.

- No use respiradores de presión negativa o positiva con máscara de ajuste facial si existe barba u otras porosidades en el rostro que no permita el ajuste hermético.

#### *Tipos de respiradores*

- Respiradores de filtro mecánico: polvos y neblinas
- Respiradores de cartucho químico: vapores orgánicos y gases
- Máscaras de depósito: Cuando el ambiente está viciado del mismo gas o vapor.

Respiradores y máscaras con suministro de aire: para atmósferas donde hay menos de 16% de oxígeno en volumen.

#### **5.2.2.6. Protección de manos y brazos**

- Los guantes que se doten a los trabajadores, serán seleccionados de acuerdo a los riesgos a los cuales el usuario este expuesto y a la necesidad de movimiento libre de los dedos.
- Los guantes deben ser de la talla apropiada al usuario y mantenerse en buenas condiciones.
- No deben usarse guantes para trabajar con o cerca de maquinaria en movimiento o giratoria.
- Los guantes que se encuentran rotos, rasgados o impregnados con materiales químicos no deben ser utilizados.

### *Tipos de guantes*

- Para la manipulación de materiales ásperos o con bordes filosos se recomienda el uso de guantes de cuero o lona.
- Para revisar trabajos de soldadura o fundición donde haya riesgo de quemaduras con material incandescente se recomienda el uso de guantes y mangas resistentes al calor.
- Para trabajos eléctricos se deben usar guantes de material aislante
- Para manipular sustancias químicas se recomienda el uso de guantes largos de hule o de neopreno.

Figura 33. **Ejemplos de guantes protectores**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

#### **5.2.2.7. Protección de pies y piernas**

El calzado de seguridad debe proteger el pie de los trabajadores contra humedad y sustancias calientes, contra superficies ásperas, contra pisadas

sobre objetos filosos y agudos y contra caída de objetos, así mismo debe proteger contra el riesgo eléctrico.

### *Tipos de calzado*

Para trabajos donde haya riesgo de caída de objetos contundentes tales como lingotes de metal, planchas, etc., debe dotarse de calzado de cuero con puntera de metal.

Para trabajos eléctricos el calzado debe ser de cuero sin ninguna parte metálica, la suela debe ser de un material aislante.

Para trabajos en medios húmedos se usarán botas de goma con suela antideslizante.

Para trabajos con metales fundidos o líquidos calientes el calzado se ajustará al pie y al tobillo para evitar el ingreso de dichos materiales por las ranuras.

Para proteger las piernas contra la salpicadura de metales fundidos se dotará de polainas de seguridad, las cuales deben ser resistentes al calor.

**Figura 34. Distintos tipos de calzado de seguridad industrial**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### 5.2.2.8. Cinturones de seguridad para trabajo en altura

Son elementos de protección que se utilizan en trabajos efectuados en altura, para evitar caídas del trabajador.

Para efectuar trabajos a más de 1.8 metros de altura del nivel del piso se debe dotar al trabajador de cinturón o arnés de seguridad enganchados a una línea de vida.

Figura 35. Ejemplos de arnés de seguridad para trabajos en altura



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### 5.2.2.9. Ropa de trabajo

Cuando se seleccione ropa de trabajo se debe tomar en consideración los riesgos a los cuales el trabajador puede estar expuesto y se seleccionarán aquellos tipos que reducen los riesgos al mínimo.

#### Restricciones de uso

La ropa de trabajo no debe ofrecer peligro de engancharse o de ser atrapado por las piezas de las máquinas en movimiento.

No se debe llevar en los bolsillos objetos afilados o con puntas, ni materiales explosivos o inflamables.

Es obligación del personal el uso de la ropa de trabajo dotado por la empresa mientras dure la jornada de trabajo.

#### **5.2.2.10. Ropa protectora**

Es la ropa especial que debe usarse como protección contra ciertos riesgos específicos y en especial contra la manipulación de sustancias cáusticas o corrosivas y que no protegen la ropa ordinaria de trabajo.

Tipo de ropa protectora

Los vestidos protectores y capuchones para los trabajadores expuestos a sustancias corrosivas u otras sustancias dañinas serán de caucho o goma.

Para trabajos de fundición se dotan de trajes o mandiles de asbesto y últimamente se usan trajes de algodón aluminizado que refracta el calor. Para trabajos en equipos que emiten radiación (rayos x), se utilizan mandiles de plomo.

**Figura 36. Ejemplos de ropa protectora**



Fuente: MONTANARES, Jorge. Prevención de riesgos. INACUI, S.A. [www.paritarios.cl](http://www.paritarios.cl). Consulta 12 de agosto de 2013.

### **5.3. Norma general de uso**

Un equipo de protección individual debe adecuarse a las disposiciones comunitarias sobre diseño y construcción en materia de seguridad y de salud que lo afecten. En cualquier caso, un equipo de protección individual deberá:

- Ser adecuado a los riesgos de los que haya que protegerse, sin suponer de por sí un riesgo adicional;
- Responder a las condiciones existentes en el lugar de trabajo
- Tener en cuenta las exigencias ergonómicas y de salud del trabajador
- Adecuarse al usuario

En caso de riesgos múltiples que exijan que se lleven simultáneamente varios equipos de protección individual, dichos equipos deberán ser compatibles y mantener su eficacia en relación con el riesgo o los riesgos correspondientes.

Las condiciones en las que un equipo de protección individual deba utilizarse, en particular por lo que se refiere al tiempo durante el cual haya de llevarse, se determinarán en función de la gravedad del riesgo, de la frecuencia de la exposición al riesgo y de las características del puesto de trabajo de cada trabajador, así como de las prestaciones del equipo de protección individual.

Los equipos de protección individual estarán destinados, en principio, a un uso personal.

Si las circunstancias exigen la utilización de un equipo individual para varias personas, deberán tomarse medidas apropiadas para que dicha

utilización no cause ningún problema de salud o de higiene a los diferentes usuarios.

Para que los elementos de protección personal resulten eficaces se deberá considerar lo siguiente:

- Entregar el equipo protector a cada usuario y verificar que el mismo sea utilizado. La responsabilidad de la empresa es proporcionar los EPP adecuados; la del trabajador es usarlos. El único EPP que sirve es aquel que ha sido seleccionado técnicamente y que el trabajador usa durante toda la exposición al riesgo.
- Capacitación respecto al riesgo que se está protegiendo
- Responsabilidad de la línea de supervisión en el uso correcto y permanente de los EPP.
- Es fundamental la participación de los supervisores en el control del buen uso y mantenimiento de los EPP. El supervisor debe dar el ejemplo utilizándolos cada vez que este expuesto al riesgo.
- El uso completo del EPP y el recordatorio constante de los demás colaboradores a sus compañeros, de la importancia de su utilización da como resultante la disminución de incidentes y accidentes dentro del lugar de trabajo.

## 6. NORMAS UTILIZADAS PARA BALANCE

La normalización de las acciones del mantenimiento en la actualidad está ayudando a la estandarización del mantenimiento. El mantener esta estandarización, ayuda a los ingenieros de mantenimiento a realizar sus actividades en la industria.

Las normas utilizadas para realizar el balance ayudan a mantener el desbalanceo en límites establecidos muy bajos para aumentar la vida útil de los equipos.

### 6.1. Norma ISO 2372

Las características más relevantes de la norma **ISO 2372** son:

- Es aplicable a los equipos rotativos cuyo rango de velocidades de giro está entre 600 y 12000 RPM.
- Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de la vibración en velocidad - valor eficaz RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1000 Hz, distinguiendo varias clases de equipos rotativos.

Tabla IV. **Clasificación de equipo según la norma ISO 2372**

<b>Clase</b>	<b>Descripción</b>
<b>Clase I</b>	Equipos pequeños hasta 15 KW. (20 HP)

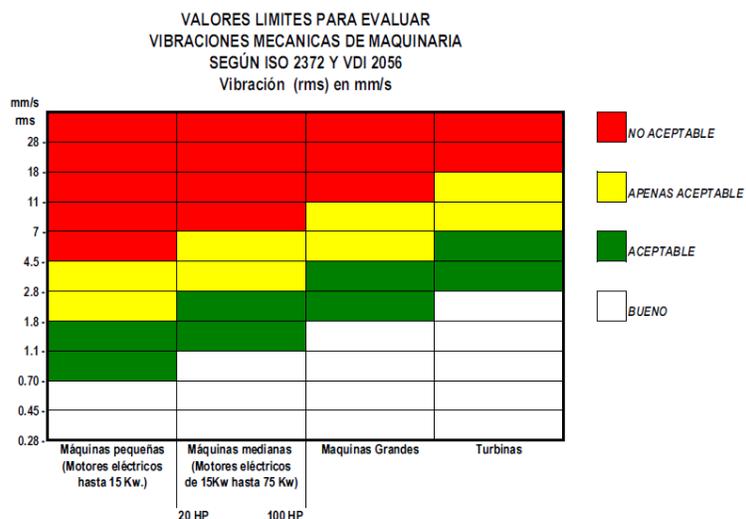
Continuación de la tabla IV.

Clase	Descripción
<b>Clase II</b>	Equipos medios de 15 (20 HP) a 75 KW (100HP) o hasta 300 KW con cimentación especial.
<b>Clase III</b>	Equipos grandes, por encima de 75 KW (100 HP) con cimentación rígida o de 300 KW con cimentación especial.
<b>Clase IV</b>	Turbo maquinaria (Equipos con RPM > velocidad crítica).

Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Para utilizar la norma **ISO 2372** basta con clasificar la máquina en estudio dentro de la clase correspondiente y una vez obtenido el valor global de vibración entre 600 y 60000 CPM, localizar en la tabla siguiente la zona en la que se encuentra.

Figura 37. **Tabla clasificatoria de equipo y valores permisibles de vibración según la norma ISO 2372**



Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

## 6.2. Norma ISO 1940

ISO 1940-1:2003. Son requisitos de balance de calidad para los rotores en estado rígido de acuerdo con el tipo de maquinaria y la velocidad de rotación máxima de servicio.

Estas recomendaciones se basan en la experiencia de profesionales expertos en el tema. La norma especifica las tolerancias de balance, el número necesario de planos de corrección y los métodos para verificar el desbalance residual. Esta norma también se destina a facilitar la relación entre el fabricante y el usuario de las máquinas rotativas, indicando los criterios de aceptación para la verificación de desbalance residual.

Las normas **ISO** contienen métodos detallados de cálculo de las diferentes tolerancias de desbalance estático que dependen de la relación entre el diámetro del rotor y de su longitud.

Las normas **ISO** también especifican un grado calidad de balance. Este es un término utilizado para definir los límites de desbalance residual. Se representa el producto de la excentricidad (en milímetros) y la frecuencia de funcionamiento (en Hz).

El estándar ha emitido directrices con respecto a un número de diferentes tipos de dispositivos (equipos rotativos). Un grado de calidad de equilibrado de **G6.3** es apropiado para la mayoría de los rotores. Una calificación inferior a **G2.5** es por lo general sólo alcanzable en un equipo muy especial.

La inspección detallada de los errores en el balance y la verificación del desbalance residual se encuentran en la norma ISO 1940-2.

La norma ISO 1940-1:2003 no cubre los rotores en un estado flexible. Los requisitos de calidad para el balance de rotores en un estado flexible están cubiertos por la norma ISO 11342.

*Relación entre un desbalance permitido y la masa del rotor:*

En general, es grande el desbalance residual permitido en un rotor de gran masa, sin embargo, el valor permisible residual  $U_{\text{per}}$  de un Rotor  $A$  de masa  $m$  en términos específicos, están dados por la siguiente fórmula:

$$U_{\text{Per}} = e_{\text{Per}} * m$$

Donde:

$U_{\text{Per}}$  = desbalance permisible

$e_{\text{Per}}$  = error permisible

$m$  = masa del rotor

Si se considera que existen  $n$  geometrías de rotores, se puede establecer el caso especial donde todo desbalance presente en un rotor pueda ser reducido al sistema equivalente de un único desbalance, localizado en un plano transversal a lo largo de la flecha axial asumiendo un desbalance tipo copla igual a cero, se considera entonces que el  $e_{\text{per}}$  es un equivalente del desplazamiento permisible del centro de masa del rotor al eje axial de la flecha.

*Grados de calidad relativos a la velocidad de servicio y desbalance específico.*

La experiencia muestra que en general, para rotores del mismo tipo de  $e_{per}$ , este varía inversamente a la velocidad del rotor en el intervalo de velocidad dado, en donde para un determinado grado de calidad la relación está dada por la siguiente fórmula:

$$e_{per} * \omega = C$$

Donde:

$e_{per}$  = error permitido

$\omega$  = *velocidad angular*

C = constante

Esta relación demuestra que, para un rotor geoméricamente similar y girando a parámetros de velocidad semejantes, los esfuerzos en rodamientos y rotores son los mismos. La tabla de grados de calidad está basada en esta relación.

Cada grado de calidad de balance es mostrado a continuación, y contiene un intervalo de desbalance específico permisible, desde un límite inferior cero hasta un límite superior dado por la magnitud del producto de ( $e_{per} * \omega$ ) expresado en mm/s. Los grados de calidad son designados de acuerdo al producto de la conexión. Si el producto de  $e_{per} * \omega$  es igual a 630 mm/s, el grado de calidad de balanceo es designado G 630.

Grados de Calidad de: Balanceo vs. Tipo de Rotor

Los grados de balance están separados uno respecto de otro por un factor de 2,5 veces. Un grado fino puede ser necesario en algunos casos, especialmente cuando la alta precisión de balanceo es requerida.

Tabla V. **Para grupo representativo de rotores acordada por ISO 1940**

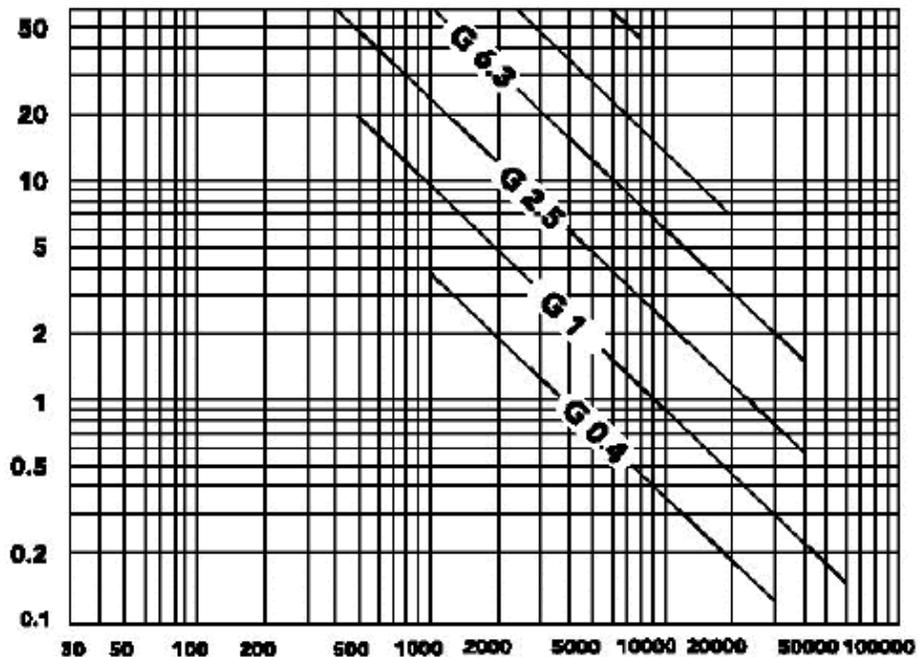
<b>Calidad Balance en Grados G</b>	<b>e per. <math>\omega</math> (mm/s)</b>	<b>Tipos de Rotor, Ejemplos Generales</b>
G 4000	4000	Juego de ejes montado en motores marinos diesel lentos con diferente número de cilindros.
G 1600	1600	Juego de ejes rígidos montados a maquinaria de dos ciclos.
G 630	630	Juegos de ejes rígidos montados en maquinaria de cuatro ciclos y rotores flexibles en motores diesel marinos.
G 250	250	Rotores rígidos rápidos, motores diesel de cuatro cilindros.
G 100	100	Rotores rápidos diesel con seis o más cilindros, gasolina o diesel para camiones y locomotoras.
G 40	40	Ruedas y aros de automóviles compactos.
G 16	16	Ejes de transmisión automotrices, partes de máquinas agrícolas y trituradoras.
G6, 3	6,3	Ejes de transmisión de requisitos especiales, rotores de maquinaria de procesamiento, envasadoras centrífugas, abanicos, volantes, bombas centrífugas, armaduras estándar de motores eléctricos, máquinas en general.

Continuación de la tabla V.

G2,5	2,5	Turbinas, sopladores, generadores, armaduras de tamaño mediano y grande para requisitos especiales, bombas con unidad motriz de turbina.
G1	1	Rotores de motores de reacción y sobrecargados, unidades motrices de grabadoras y tocadiscos.
G0,4	0,4	Armaduras, ejes y molduras de máquinas esmeriladoras de precisión.

Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

Figura 38. **Ejemplo de tabla para determinar el desbalance residual permitido de un rotor. Límites para grados de calidad del desbalance residual de acuerdo a ISO 1940**



Fuente: AL-SHUFARA, Ali M. Vibration Engineer.

p. 4.

Ejemplo de la determinación del desbalance residual utilizando el método anterior, datos:

Velocidad de operación = 5000 rpm

Se supone un balance de 2 planos,

Peso del rotor = 250 kg,

Grado de balanceo requerido = 2.5 (G),

Con los datos de velocidad y grado de balance requerido se encuentra en diagrama el valor de  $e_{per} = 5 \text{ g mm/kg}$ . (Límite inferior),

Para determinar el desbalance específico se tiene que:

$$U_{per} = (e_{per})(m), U_{per} = (5 \text{ g mm/kg})(250 \text{ kg}) = 1250 \text{ g-mm}$$

Como se tienen dos planos,  $1250/2 = 625 \text{ g-mm}$  por plano.

### 6.3. Norma ISO 10816

Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica.

Este estándar consta de 5 partes:

- Parte 1: Indicaciones generales

- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria Industrial con potencia nominal por encima de 15 Kw.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo.

Este nuevo estándar evalúa la severidad de la vibración de maquinaria rotativa a través de mediciones efectuadas en planta en partes no giratorias de las mismas. Abarca y amplía los estándares citados anteriormente.

Los criterios de vibración de este estándar se aplican a un conjunto de máquinas con potencia superior a 15Kw y velocidad entre 120 RPM y 15.000 RPM. Los criterios son sólo aplicables para vibraciones producidas por la propia máquina y no para vibraciones que son transmitidas a la máquina desde fuentes externas. El valor eficaz (RMS) de la velocidad de la vibración se utiliza para determinar la condición de la máquina. Este valor se puede determinar con casi todos los instrumentos convencionales para la medición de vibración.

Se debe prestar especial atención para asegurar que los sensores estén montados correctamente y que tales montajes no degraden la precisión de la medición. Los puntos de medida típicamente son tres, dos puntos ortogonales en la dirección radial en cada caja de descanso y un punto en la medición axial.

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la

máquina funcionando bajo condiciones nominales o específicas (por ejemplo de velocidad, voltaje, flujo, presión, y carga).

En máquinas con velocidad o carga variable, las mediciones deben realizarse bajo todas las condiciones a las que se espera que la máquina trabaje durante períodos prolongados de tiempo. Los valores máximos medidos, bajo estas condiciones, serán considerados representativos de la vibración.

Si la vibración es superior a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se deben realizar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de la vibración externa. Si con la máquina detenida excede el 25% de la vibración medida con la máquina operando, son necesarias acciones correctivas para reducir el efecto de la vibración de fondo. En algunos casos el efecto de la vibración de fondo se puede anular por análisis espectral o eliminado de las fuentes externas que provocan vibraciones de fondo.

La severidad de la vibración se clasifica conforme a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina
- Potencia o altura de eje
- Flexibilidad del soporte

*Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura de eje:*

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras soporte de la máquina, requieren una división en grupos. Las máquinas de

estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles.

- Grupo 1: Máquinas rotatorias grandes con potencia superior 300 Kw. Máquinas eléctricas con altura de eje  $H \geq 315$  mm.
- Grupo 2: Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 Kw. Máquinas eléctricas con altura de eje  $160 \leq H \leq 315$ .
- Grupo 3: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 Kw.
- Grupo 4: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 Kw.

La altura del eje H de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea de centro del eje y el plano base de la máquina misma. La altura del eje H de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantado o cualquier máquina vertical, se debe tomar como altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de la máquina puede ser utilizada.

*Clasificación según la flexibilidad del soporte:*

Si la primera frecuencia natural del sistema de máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección.

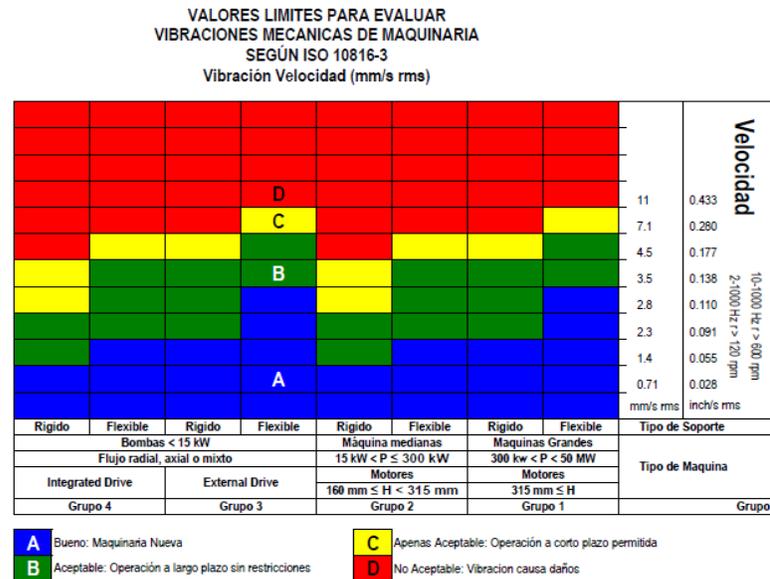
Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra dirección.

Por ejemplo, la primera frecuencia natural en la dirección vertical puede estar sobre la frecuencia principal de excitación mientras que la frecuencia natural horizontal puede ser considerablemente menor, tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexible en el plano horizontal; en estos casos la vibración debe ser evaluada de acuerdo a la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición.

#### Clasificación:

- Zona A: Valores de vibración de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas.
- Zona B: Máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones.
- Zona C: La condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente un período de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada.
- Zona D: Los valores de vibración son peligrosos, la máquina puede sufrir daños.

Figura 39. **Gráfica Clasificatoria de equipos según norma ISO 10816-3**



Fuente: elaboración propia. Excel 2010.

*ISO 10816-1 de 1995.* Evaluación de vibraciones de equipos mediante mediciones en anti giro de piezas.

Parte 1: Reglas generales. Establece las condiciones generales y los procedimientos para la medición y evaluación de vibraciones, utilizando las mediciones realizadas en las partes no giratorias de las máquinas. Los criterios generales de evaluación se refieren a ambos monitores operacionales y pruebas de aceptación y se han establecido principalmente con respecto a la obtención fiable a largo plazo de funcionamiento de la máquina. Sustituye a la norma ISO 2372 e ISO 3945.

*ISO 10816-2 de 2009.* Evaluación de vibraciones de equipos por medio de mediciones sobre piezas no móviles.

Parte 2: Realizada para turbinas de vapor y generadores de más de 50 MW, con velocidades normales de funcionamiento de 1500 RPM, 1800 RPM, 3000 RPM y 3600 RPM. Establece disposiciones para evaluar la gravedad de los equipos en sitio (*en su lugar de operación*), del ancho de banda de vibración medida radial (es decir, transversal), para el eje en todas las carcasas de los cojinetes principales o los pedestales y en la dirección axial de los cojinetes de empuje.

Estos son, en términos de:

- Vibraciones en condiciones normales de funcionamiento en estado estacionario;
- Vibraciones durante otras condiciones (no en estado estacionario) cuando los cambios transitorios están llevando a cabo, incluso correr hacia arriba o deteriorado, carga inicial y los cambios de carga;
- Los cambios en las vibraciones que pueden producirse durante el funcionamiento normal funcionamiento en estado estable.

La ISO 10816-2:2009 es aplicable a las turbinas de vapor terrestres y generadores con una potencia superior a 50 MW y una velocidad de funcionamiento normal de 1500 RPM, 1800 RPM, 3000 RPM o 3600 RPM.

*ISO 10816-3 de 2009.* Evaluación de vibraciones de equipos por medio de mediciones sobre la no rotación de piezas.

Parte 3: Máquinas industriales con una potencia nominal superior a 15 kW y velocidades nominales entre 120 RPM y 15 000 RPM medida en sitio (en su

lugar de operación). Proporciona criterios para evaluar las mediciones de vibración cuando se hace en sitio (en su lugar de operación). Los criterios especificados se aplican a la máquina fija, con una potencia superior a 15 kW y velocidades de operación entre 120 RPM y 15000 RPM.

*ISO 10816-4 de 2009* Evaluación de vibraciones de equipos por medio de mediciones sobre la no rotación de piezas.

Parte 4: Juegos de turbina de gas con cojinetes de película líquida. Establece disposiciones específicas para la evaluación de la gravedad en sitio (en su lugar de operación), ancho de banda de vibración medida radial (es decir, transversal) para el eje del eje en todas las carcasas de los cojinetes principales o los pedestales y en la dirección axial de los cojinetes de empuje. Estos son, en términos de:

- Vibraciones en condiciones normales de funcionamiento en estado estacionario;
- Vibraciones durante otras condiciones (no en estado estacionario) cuando los cambios transitorios están llevando a cabo, incluso correr hacia arriba o deteriorado, carga inicial y los cambios de carga;
- Los cambios en las vibraciones que pueden producirse durante el funcionamiento normal funcionamiento en estado estable.

La ISO 10816-4:2009 es aplicable a turbinas de gas de alta resistencia fija utilizada en aplicaciones de accionamiento eléctricos y mecánicos, con cojinetes de película de fluido, las salidas de más de 3 MW y un rango de operación de velocidad bajo carga entre 3000 RPM y 30000 RPM.



## CONCLUSIONES

1. La evolución del mantenimiento en la industria actual representa cambios en el pensamiento tanto del operario como del personal de producción, ya que el mantenimiento correcto proporcionará mayor vida útil a los equipos y por consiguiente aumentará la producción, reduciendo los paros por emergencia y los repuestos en bodega.
2. El desbalance en piezas rotativas es uno de los problemas más comunes en la industria y comúnmente es pasado por alto. Sin embargo el desbalance es un problema fácil de resolver y al brindarle la debida atención se logran grandes beneficios; entre ellos, aumenta la vida útil de los equipos, disminuyen los paros imprevistos, disminuye el gasto de energía eléctrica y repuestos adicionales, además se evitan ruidos excesivos que aumenten el estrés en los colaboradores.
3. El método necesario para realizar un correcto balance se utiliza de acuerdo a las necesidades de operación en la industria y la velocidad de operación que tengan los distintos equipos y su criticidad.
4. Los distintos sensores utilizados en la realización de un correcto balance son sensores de aceleración, sensores de velocidad y sensores de desplazamiento.

5. La seguridad industrial es en la actualidad uno de los temas más importantes a tratar, ya que la adecuada aplicación de las normas y reglas de seguridad en la industria, evitan y reducen considerablemente la ocurrencia de lesiones y/o accidentes fatales en el área laboral.
  
6. Las normas empleadas (normas ISO), para realizar los estudios tanto de análisis de vibraciones como de la realización del balance, se crearon con base en diversos estudios realizados por ingenieros que dedicaron su carrera a la resolución de problemas derivados de las vibraciones mecánicas en la industria; estas normas en el tiempo presente, ayudan a los ingenieros de mantenimiento a acelerar el proceso de análisis del tipo de mantenimiento que se debe seguir para la pronta solución a los problemas que se presenten.

## RECOMENDACIONES

1. Es importante realizar un correcto mantenimiento preventivo a los equipos de forma periódica de manera que el mismo trabaje de forma adecuada para el servicio que fue diseñado.
2. El realizar un correcto análisis de vibraciones ayuda a determinar la ruta correcta a seguir del mantenimiento predictivo para los equipos utilizados en la industria.
3. El realizar un correcto balance puede ayudar a aumentar la vida útil del equipo, evitar repuestos excesivos en bodega y disminuir los costos de operación.
4. La selección correcta del balance adecuado ayuda a resolver de una forma rápida el problema de desbalance, por lo tanto es conveniente realizar un óptimo análisis de vibraciones para determinar el camino a seguir.
5. La utilización del equipo protección personal en forma continua y de manera correcta, se propone tanto a los colaboradores como a los ingenieros encargados del proyecto, planta o centro de producción, ya que el uso de los mismos, evitará que sufran tanto incidentes como accidentes, los cuales van desde lesiones leves hasta situaciones fatales.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AVALLONE, Eugene A.; BAUMEISTER III, Theodore. *Manual del Ingeniero Mecánico*. 9a. ed. México: McGraw-Hill, 1996. 1683 p.
2. GUATEMALA, *Constitución Política de la República*. Fundación Cívica por un Mejor país. 2012. 78 p.
3. MORENO BARRA, Luis Antonio. *Balanceo dinámico de sistemas rotativos*. Trabajo de graduación de Ingeniería Naval. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile, 2006. 68 p.
4. PERALTA, Carlos Enrique. *Reglamento General sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo*. Ministro de Trabajo y Previsión Social, Guatemala, 1957. 31 p.
5. STEIDEL, Robert F. *Introducción al estudio de las vibraciones mecánicas*. México: Continental, 1981. 414 p.
6. VELÁSQUEZ AGUILAR, Luis Alberto. *Diagnóstico mediante análisis de vibraciones. Enfoque en bombas centrifugas del sistema de enfriamiento de motores de combustión interna de una planta de generación de energía eléctrica y ventiladores de tiro mecánicos de calderas acuotubulares en un ingenio*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica Industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 62 p.

7. WHITE, Glen. Introducción al análisis de vibraciones. México: Azima DLI, 2010. 107 p.

## APÉNDICE

### ✓ **Artículo 198 del Código de trabajo.**

Todo patrono está obligado a acatar y hacer cumplir las medidas que indique el Instituto Guatemalteco de Seguridad Social con el fin de prevenir al acercamiento de accidentes de trabajo y de enfermedades profesionales.

### ✓ **Artículo 100 de la Constitución Política de la República de Guatemala**

**Seguridad Social.** El Estado reconoce y garantiza el derecho a la seguridad social para beneficio de los habitantes de la nación. Su régimen se instituye como función pública, en forma nacional, unitaria y obligatoria.

El Estado, los empleadores y los trabajadores cubiertos por el régimen, con la única excepción de lo preceptuado por el artículo 88 de la Constitución Política de la República de Guatemala, tienen obligación de contribuir a financiar dicho régimen y derecho a participar en su dirección, procurando su mejoramiento progresivo.

La aplicación del régimen de seguridad social corresponde al Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, que es una entidad autónoma con personalidad jurídica, patrimonio y funciones propias; goza de exoneración total de impuestos, contribuciones y arbitrios, establecidos o por establecerse. El Instituto Guatemalteco de Seguridad Social, debe de participar con las instituciones de Salud en forma coordinada.

El Organismo Ejecutivo asignará anualmente en el Presupuesto de Ingresos y Egresos del Estado, una partida específica para cubrir la cuota que corresponde al Estado como tal y como empleador, la cual no podrá ser transferida ni cancelada durante el ejercicio fiscal y será fijada de conformidad con los estudios técnicos actuariales del Instituto.

Contra las resoluciones que se dicten en esta materia, proceden los recursos administrativos y el de lo contencioso-administrativo de conformidad con la ley. Cuando se trata de prestaciones que deba otorgar el régimen, conocerán los tribunales de trabajo y previsión social.

✓ **Artículo 88 de la Constitución Política de la República de Guatemala**

**Exenciones y deducciones de los impuestos.** Las universidades están exentas del pago de toda clase de impuestos, arbitrios y contribuciones, sin excepción alguna.

Serán deducibles de la renta neta gravada por el Impuesto sobre la Renta las donaciones que se otorguen a favor de universidades, entidades culturales o científicas.

El Estado podrá dar asistencia económica a las universidades privadas, para el cumplimiento de sus propios fines.

No podrán ser objetos de procesos de ejecución ni podrán ser intervenidas la Universidad de San Carlos de Guatemala y las universidades privadas, salvo el caso de las universidades privadas cuando la obligación que se haga valer provenga de contratos civiles, mercantiles o laborales.



