

**ANALISIS DE VIBRACIONES EN EMBARCACIONES Y EQUIPOS  
INDUSTRIALES (ESTUDIO DE CASOS)**

**JOSE ALFREDO ZAMORA MESTRA  
HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2011**

**ANALISIS DE VIBRACIONES EN EMBARCACIONES Y EQUIPOS  
INDUSTRIALES (ESTUDIO DE CASOS)**

**JOSE ALFREDO ZAMORA MESTRA  
HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA**

**Monografía para optar a título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**PhD. BIENVENIDO SARRIA LOPEZ**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**CARTAGENA DE INDIAS**

**2011**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

**Firma de Presidente del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Firma del Jurado**

---

**Cartagena de Indias D.T y C.; Octubre del 2011**

A Dios Todopoderoso, por darme la fortaleza, la paciencia  
Y la iluminación necesaria para llegar a la meta. A mis padres  
JOSE ZAMORA MORENO y MARTHA MESTRA POSADA,  
Por su incansable dedicación para hacer realidad mis sueños.

A mi esposa DILIA por su compañía incondicional.

A mis dos bellas princesas ISABELLA Y MARIA CAMILA

Por ser la luz de mí camino.

A mis hermanos Martica, Vane y Juan K,

Por su compañía y amor.

**JOSE ALFREDO ZAMORA MESTRA**

A mi Dios y mis cuatro ángeles, quienes me dieron la fe, la fortaleza, la salud y la esperanza para terminar este trabajo.

A mis padres, CARLOS GUILLERMO ALFONSO GONZALEZ Y EDDY NEIRA CORREA quienes con esfuerzo y sacrificio me enseñaron desde pequeño las bases y la manera de luchar para alcanzar mis metas. Este título es para ustedes, ¡Gracias, Nunca olvidare sus enseñanzas!

A mi hermano, JHON ALEXANDER ALFONSO NEIRA, quien me brindó su amor, su cariño, su estímulo y su apoyo constante. Su cariño, comprensión y paciente espera para que pudiera terminar el grado son evidencia de su gran amor. ¡Gracias!

A mi familia, Ligia Neira, Cecilia Alfonso, Yenny León, Sandra Patricia León, quienes siempre me motivaron a seguir adelante y a quien prometí que terminaría mis estudios. Promesa cumplida.

**HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA**

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

- ✚ A Dios quien nos llenó de paciencia y sabiduría para desarrollar de manera exitosa nuestra tesis de grado.
- ✚ A nuestras familias que con su amor y apoyo nos acompañaron en este proceso.
- ✚ A todos nuestros amigos y seres queridos que siempre nos tuvieron paciencia y no nos dejaron desistir
- ✚ Al PhD. Bienvenido Sarria López por ofrecernos su asesoría compartiéndonos sus conocimientos. Pero sobre todo compartiéndonos su amistad y apoyo incondicional, Mil Gracias.

**Cartagena de Indias, D.T y C; Agosto 14 de 2011**

**Señores  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
Programa de Ingeniería Mecánica;**

Respetados Señores;

Por medio de la presente, nos permitimos presentar ante ustedes para su estudio, consideración y aprobación, el trabajo de grado titulado “ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN EMBARCACIONES Y MÁQUINAS INDUSTRIALES. ESTUDIO DE CASOS”, realizado por los estudiantes HERNÁN GUILLERMO ALFONSO NEIRA y JOSÉ ALFREDO ZAMORA MESTRA, para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Agradeciendo la atención prestada;

---

**PhD. BIENVENIDO SARRIA LOPEZ**

**Cartagena de Indias, D.T y C; Agosto 14 de 2011**

Señores  
**COMITE EVALUADOR**  
**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR**  
**Programa de Ingeniería Mecánica**

Apreciados señores;

Por medio de la presente, nos permitimos presentar ante ustedes para su estudio, consideración y aprobación, el trabajo de grado titulado "ANALISIS DE VIBRACIONES EN EMBARCACIONES Y MAQUINAS INDUSTRIALES. ESTUDIO DE CASOS", realizado por los estudiantes HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA y JOSE ALFREDO ZAMORA MESTRA, para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente;

---

**JOSE ALFREDO ZAMORA MESTRA**

---

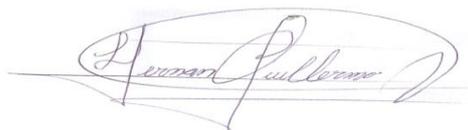
**HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA**

## **AUTORIZACION DERECHOS PATRIMONIALES**

**Cartagena de Indias D.T y C; Noviembre 02 de 2011**

Yo, HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA identificado con la cédula de ciudadanía número 80.177.286 de Bogotá, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor, del trabajo final denominado ANALISIS DE VIBRACIONES EN EMBARACACIONES Y EQUIPOS INDUSTRIALES (ESTUDIO DE CASOS) producto de mi actividad académica para optar a título de INGENIERO MECANICO de la Universidad tecnológica de Bolívar.

La universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Biblioteca de la Universidad Tecnológica de Bolívar.



---

**HERNAN GUILLERMO ALFONSO NEIRA**  
**CC. 80.177.286 de Bogotá**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b>	16
<b>JUSTIFICACION</b>	17
<b>INTRODUCCION</b>	18
<b>PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	20
<b>OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	21
1. VIBRACIONES MECANICAS	22
1.1. DEFINICION	22
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS VIBRACIONES	22
1.3. MEDICIÓN DE AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN	23
1.4. UNIDADES DE EXPRESIÓN DE LA VIBRACIÓN	23
1.5. PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE LA VIBRACIÓN	24
1.6. VENTAJAS DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES	25
1.7. MEDICIÓN DE VIBRACIONES	26
1.7.1. Procedimiento general para la toma y análisis de vibraciones	26
1.8. EQUIPOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	27
1.8.1. Sensores de Vibración. Acelerómetros	27
1.8.1.1. Ventajas de un acelerómetro	29
1.8.1.2. Desventajas de un acelerómetro	29
1.9. COLECTORES DE DATOS	29

1.10. MEDIDORES DE VIBRACIÓN	30
1.11. ANÁLISIS DE ESPECTROS	31
1.12. NORMAS DE EVALUACIÓN DE VIBRACIONES	31
1.13. VIBRACIONES EN EMBARCACIONES	36
1.13.1. Fuentes de excitación	36
1.13.1.1. Excitación por el propulsor	36
1.13.1.2. Excitación por fuerzas de superficie	37
1.13.1.3. Excitación en el eje de empuje	38
1.13.1.4. Excitación en el eje propulsor	38
1.13.1.5. Excitación en el motor principal	39
1.13.1.6. Excitación por fuerzas y momentos de desbalanceo	39
1.13.1.7. Excitación generada por la combustión de los gases	39
1.13.2. Modos de vibración de motores	40
1.13.3. Vibraciones axiales del cigüeñal	41
1.13.4. Excitación para motores auxiliares	41
1.14. ALGUNOS PROBLEMAS COMUNES DE VIBRACIÓN EN BUQUES Y POSIBLES SOLUCIONES	41
1.14.1. Vibraciones del motor	41
1.14.2. Desbalanceo del cigüeñal	42
1.14.3. Amortiguadores de vibración	43
1.14.4. Amortiguadores de vibración torsional	43

1.15. PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA PRUEBAS DE VIBRACIONES A BORDO DE BUQUES.	44
1.15.1. Campo de aplicación	45
1.15.2. Toma de datos	46
1.15.3. Condiciones ideales para las pruebas	47
1.15.4. Ubicación del sensor	47
1.15.5. Espejo	47
1.15.6. Superestructura	48
1.15.7. Maquinaria y cojinetes en la sala de maquinas	48
1.15.8. Parámetros a medir	49
2. ESTUDIO DE CASOS	50
2.1. ANALISIS DE CASOS EN EMBARCACIONES	51
2.2. ANALISIS DE CASOS EN EQUIPOS INDUSTRIALES	54
<b>CONCLUSIONES</b>	56
<b>RECOMENDACIONES</b>	58
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	59

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Influencia de la vibración	19
<b>Figura 2.</b> Relación Desplazamiento, velocidad y aceleración	24
<b>Figura 3.</b> Parámetros de medición de la Vibración	25
<b>Figura 4.</b> Acelerómetro piezoeléctrico	28
<b>Figura 5.</b> Colectores de datos	29
<b>Figura 6.</b> Medidores de vibración	30
<b>Figura 7.</b> Espacios considerados en el diseño de propulsores	37
<b>Figura 8.</b> Modos de Vibración de un motor	40
<b>Figura 9.</b> Motor Diesel MTU 20V1163 TB 82	44
<b>Figura 10.</b> Diagrama distribución problemas en casos en embarcaciones	52
<b>Figura 10.</b> Diagrama distribución problemas en casos en equipos industriales	54

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Unidades de parámetros de Vibración.	<b>Pág.</b> 22
<b>Tabla 2.</b> Guía para aceptación de la amplitud de vibración.	35

## **ANEXOS**

**ANEXO A.** Norma ISO 10816 – 3

**ANEXO B.** Technical Associates of Charlotte

**ANEXO C.** Norma ISO 2372 - 1974

**ANEXO D.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Patrullera

**ANEXO E.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Barcaza

**ANEXO F.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Barcaza

**ANEXO G.** Prueba de compresor de popa – Embarcación Tipo Bergantín

**ANEXO H.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Multipropósito

**ANEXO I.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Patrullera

**ANEXO J.** Prueba de equipos auxiliares – Embarcación Tipo Patrullera

**ANEXO K.** Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Multipropósito

**ANEXO L.** Ventilador de colector – Según especificaciones equipo

**ANEXO M.** Banda transportadora estándar – según especificaciones equipo

**ANEXO N.** Sistema moto reductor – Según especificaciones equipo

**ANEXO O.** Moto reductor válvula rotativa Colector carbón – Según especificaciones equipo

**ANEXO P.** Ventilador de un filtro – Según especificaciones equipo

**ANEXO Q.** Moto reductor separador – Según especificaciones equipo

**ANEXO R.** Transmisión tornillo sin fin filtro – Según especificaciones equipo

**ANEXO S.** Ventilador Enfriador – Según especificaciones equipo

**ANEXO T.** Moto reductor Trituradora del enfriador – Según especificaciones equipo

## RESUMEN

En la ejecución de los planes de mantenimiento de cualquier proceso productivo y en cualquier tipo de industria, vemos que se ha venido presentando un mejoramiento progresivo a través del tiempo, en cuanto a cantidad y calidad del mantenimiento. Desde la época en que el mantenimiento significaba reemplazar total de máquinas, hasta nuestros tiempos en los que la tecnología de los sistemas computarizados es capaz de predecir un defecto con gran exactitud permitiendo programar intervenciones de máquinas sin afectar los procesos.

Hoy día el mantenimiento está basado en herramientas y técnicas como el análisis de vibraciones, la termografía, el ultrasonido por medio de los cuales se pueden obtener datos reales y en operación de toda clase de elementos de un sistema, lo que significa una gran ventaja en muchos sentidos.

Para llegar a obtener las ventajas de estas técnicas es necesario conocer a profundidad los conceptos que estas encierran y es lo que este trabajo busca, recoger información de fuentes confiables acerca del tema y con los cuales se pueden realizar análisis de situaciones reales de cualquier tipo de maquinaria y proceso industrial.

En el trabajo se presentan estudios de casos de análisis reales realizados a embarcaciones según tipo descrito y maquinas industriales, los cuales plasman el contenido del documento y permiten de manera práctica aplicar los procedimientos y normas que aplican para cada caso y además son una guía para estudios que posteriores.

Como una contribución importante de este trabajo, debemos señalar que para el caso particular de las embarcaciones, la información existente sobre el tema es reducida y no hay textos actualizados y completos, por lo que fue necesario realizar una investigación más profunda y organizada, con el fin de construir un documento con el que más adelante se puedan realizar estudios prácticos.

## JUSTIFICACION

Las vibraciones es un fenómeno que está asociado a falla o mal funcionamiento de la maquinaria en general, sin embargo también es cierto que estos son inherentes a la misma operación de las máquinas, no existen máquinas capaces de trabajar sin producir una mínima vibración.

En el caso de las máquinas y las estructuras de una embarcación es igual, se trata de elementos en movimiento o sometidos a cargas y esfuerzos elevados y que varían de acuerdo a las condiciones de operación, por lo que será normal encontrar vibraciones. Es necesario entonces establecer un procedimiento adecuado para poder analizar estos fenómenos y poder sacar conclusiones que ayuden a controlar la condición de estos equipos y también que permitan solucionar problemas relacionados con el tema, con lo que podremos garantizar la confiabilidad de los mismos.

Las vibraciones mecánicas han sido uno de los mejores indicadores (sino el mejor), por mucho tiempo del estado de una máquina pero también de un sistema productivo en general, es decir hay una relación directa entre la vibración y la confiabilidad de un elemento, equipo, planta, etc. Sin embargo, no es suficiente con cuantificar la condición mediante un indicador como las vibraciones, sino, que se hace necesario conocer a profundidad, la manera como podría repercutir en cada sistema particular el indicador. Basta con ver ambos extremos de la situación para ver el impacto económico que podría haber, podría tratarse de un problema sencillo como reajustar un perno en 1 minuto, que no afecta la producción en lo más mínimo, hasta reparaciones estructurales o de equipos críticos que paran todo un proceso por meses, lo que se traduce en dinero.

A pesar de la importancia que tiene conocer este tema tan actual y útil para gran parte de los ingenieros, sobretodo en la especialidad mecánica, debido a su uso casi que general en la industria, es complicado conseguir información actualizada y confiable sobre la misma. Existe mucha información, pero esta está segmentada y aplicada a casos particulares, que no podrían o sería complicado aplicarla en general.

## INTRODUCCION

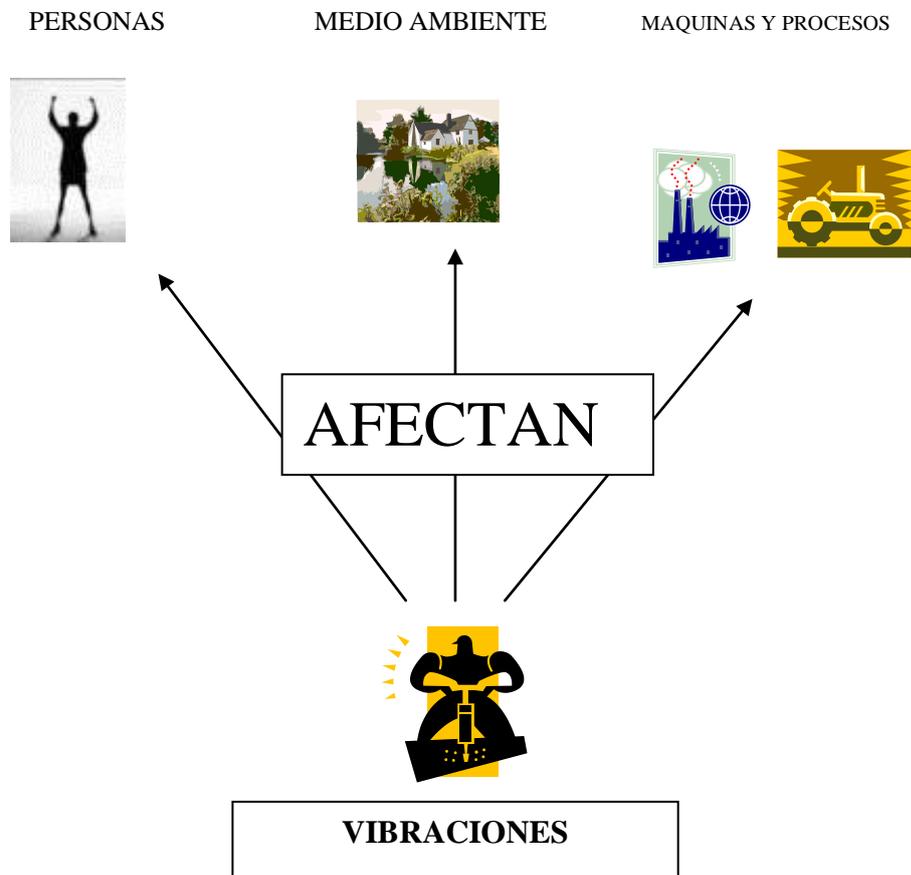
La vida común de un ser humano que tenga contacto con equipos industriales exige que cada día este se encuentre expuesto a vibraciones en equipos, estructuras, etc.

De igual manera es por bien sabido que todos los cuerpos presentan un comportamiento vibratorio inherente a su condición, es decir que no es posible encontrar un cuerpo que esté completamente estático. Por muy equilibrado que se encuentre un sistema y sus componentes siempre hay niveles de vibración motivados por la propia naturaleza de los materiales y la interacción de sus componentes ya sea con el medio, los productos, fuerzas externas, electromagnéticas, etc.; sin embargo existen límites máximos de exposición de vibración tanto en tiempo como en magnitud que deben ser controlados para evitar que ocurran efectos dañinos para las personas el medio y la confiabilidad de los equipos y el proceso.

Hasta el momento el control de las vibraciones es una disciplina que consiste en el ensayo y error ya que la naturaleza misma de los materiales puede producir efectos distintos en una situación y en otra y aunque en muchas ocasiones las recomendaciones para algunas situaciones son válidas no hay total seguridad de la manera de controlar la vibración y sus efectos.

En el capítulo dedicado a las vibraciones se analizará con mayor detenimiento lo relacionado con este fenómeno.

**La Figura 1.** Muestra un esquema sencillo sobre como la vibración es capaz de afectar todo un medio, en el que no solo hay seres humanos sino que también afectan el equilibrio del medio ambiente y la confiabilidad y eficiencia de las máquinas sino también el de los procesos productivos para los cuales dichos equipos son usados.



**Figura 1. Influencia de la vibración**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Los sistemas productivos cada día se enfrentan a situaciones que atentan contra la confiabilidad y productividad del mismo. Cuestiones como la calidad, las fallas de todo tipo (mecánicas, eléctricas, etc.), tiempos, seguridad, etc., son realidades que deben ser tenidas en cuenta para mantener en buena forma un sistema dado.

En la parte de la maquinaria, hay dos fenómenos particulares que pueden ser muy perjudiciales y su presencia puede causar estragos si no son analizados y controlados de una manera correcta: la vibración.

Actualmente no se cuenta con información suficiente, confiable y precisa sobre cómo puede la vibración afectar un entorno y un sistema productivo, situación que no favorece la mejora de la competitividad y la productividad de una empresa.

Por lo tanto es indispensable dar solución a esta falta de información mediante un estudio de la situación con el fin de proporcionar un documento válido en el que se plasmen los conceptos, normas y procedimientos más importantes para su uso y conocimiento.

## **OBJETIVO GENERAL**

Efectuar una caracterización general del nivel de vibraciones en embarcaciones y equipos industriales con el propósito de:

- Identificar las fuentes generadoras principales de vibración.
- Comparar con los estándares permisibles establecidos internacionalmente para este tipo de maquinaria.

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Realizar un estudio bibliográfico sobre vibraciones y su impacto ante la integridad de los equipos y estructuras asociadas.
- Caracterización de las posibles fallas en general (estructurales, operativas, mecánicas, eléctricas, etc.) debidas a las vibraciones en las embarcaciones y equipos industriales de los casos seleccionados.
- Identificar y seleccionar procedimientos que sirvan tanto para recopilar como analizar datos de vibraciones.
- Revisar casos reales de análisis de vibraciones que se hayan realizado en embarcaciones y en equipos industriales.

## 1. VIBRACIONES MECANICAS

### 1.1. DEFINICION

La vibración se define como ***el cambio de posición en el tiempo (movimiento), de un elemento alrededor de su posición de equilibrio.***

En su forma más sencilla, una vibración ***se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio.*** La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento. [1]

### 1.2. CARACTERISTICAS DE LA VIBRACION

Para conocer con precisión el estado vibratorio de un cuerpo es necesario conocer y establecer claramente algunos conceptos. Los más importantes y que son los que realmente afectan la vibración son:

- AMPLITUD
- FRECUENCIA
- FORMA DE ONDA
- ANGULO DE FASE

- **AMPLITUD:** Es el elemento cuantificador de la vibración. En vibraciones la amplitud es la que mide la severidad de una falla y el estado de un elemento o máquina.
- **FRECUENCIA:** Es el recíproco del período. También se define como la cantidad de ciclos que se producen en un segundo, se puede representar en varias unidades, pero la más importante es el Hertz (Hz). Es el indicador del problema. Al realizar un análisis de una máquina, se debe conocer las frecuencias características de los elementos de las máquinas con el fin de relacionar las fallas con los distintos elementos y con los espectros.

- **FORMA DE ONDA:** Es la representación gráfica de la vibración con respecto al tiempo. Es muy útil en el análisis de engranajes.
- **ANGULO DE FASE:** Describe la diferencia de tiempo entre dos eventos, comúnmente se expresa en ángulos. [2]

### 1.3. MEDICION DE AMPLITUD DE LA VIBRACION

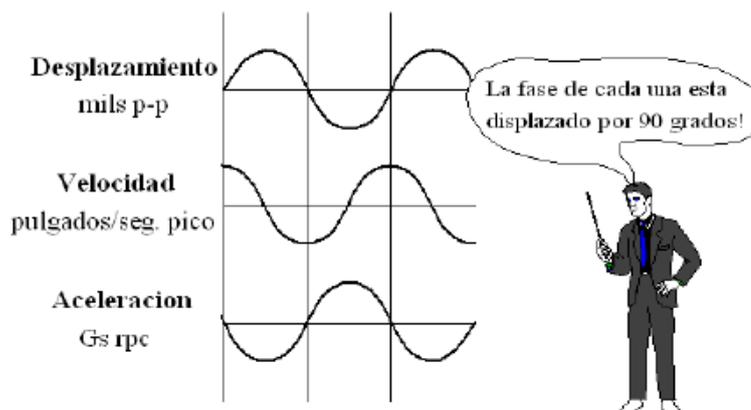
Las definiciones siguientes son de aplicación a la medición de la amplitud de las vibraciones mecánicas.

- **Amplitud Pico (Pk)** es la distancia máxima de la onda del punto cero o del punto de equilibrio.
- **Amplitud Pico a Pico (Pk - Pk)** es la distancia de una cresta negativa hasta una cresta positiva.
- **Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados (RPC) o RMS**

Es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda. En el caso de una onda senoidal el valor RPC es igual a 0. 707 del valor pico, pero esto es solo válido en el caso de una onda senoidal. El valor **RPC** es proporcional al área abajo de la curva. [1]

### 1.4. UNIDADES DE EXPRESION DE LA VIBRACION

El desplazamiento es sencillamente la distancia desde una posición de referencia, o punto de equilibrio ver **Figura 2**. Aparte de un desplazamiento variable, un objeto vibrando tendrá una velocidad variable y una aceleración variable. La velocidad se define como la proporción de cambio en el desplazamiento y en el sistema inglés, se mide por lo general en pulgadas por segundo (PPS) en el sistema métrico en mm/s ver **Tabla 1**. Aceleración se define como la Proporción de cambio en la velocidad y en el sistema inglés se mide en unidades G, o sea la aceleración promedia debida a la gravedad en la superficie de la tierra.



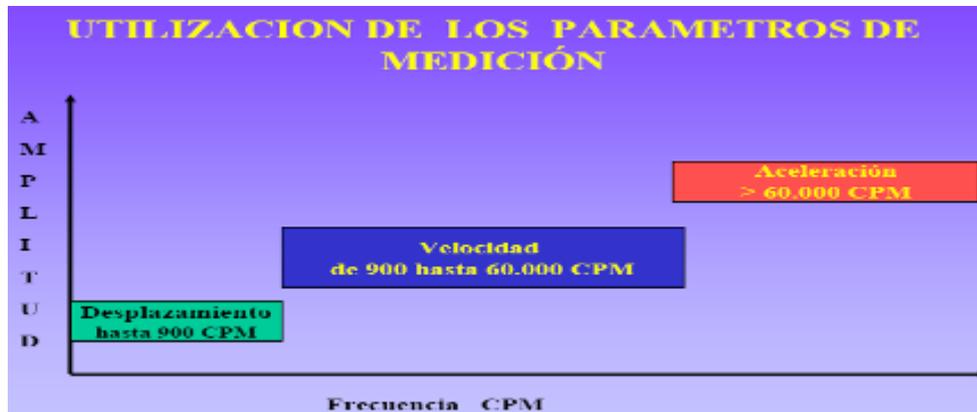
**Figura 2. Relación desplazamiento, velocidad, aceleración**

UNIDADES	SISTEMA METRICO	SISTEMA INGLES
DESPLAZAMIENTO	MILS (inches)	MICRAS
VELOCIDAD	PLG/SEG (inches/seg)	MM/SEG
ACELERACION	PLG/SEG <sup>2</sup> (inches/seg <sup>2</sup> ) Ó G's	MM/SEG <sup>2</sup> o G's

**Tabla 1. Unidades de Parámetros de Vibración.**

### 1.5. PARAMETROS DE EVALUACION DE LA VIBRACION

Es posible examinar la misma señal de vibración en términos de Aceleración, Velocidad y Desplazamiento **Ver Figura 3**. Se vio que la velocidad a cualquier frecuencia es proporcional al desplazamiento multiplicado por la frecuencia, lo que quiere decir que también es igual al desplazamiento multiplicado por el cuadrado de la frecuencia.



**Figura 3. Parámetros de medición de Vibraciones.**

Basándonos en esas relaciones notamos que el desplazamiento de vibración pone un fuerte énfasis en las frecuencias más bajas, y que la aceleración pone un fuerte énfasis en las frecuencias más altas. Cuando se estudia el espectro de vibraciones de una máquina, es deseable enseñar el parámetro que mantenga un nivel más uniforme en todo el rango de frecuencias. Eso aumentará al máximo el rango Dinámico de la señal medida. Para la mayoría de máquinas rotativas, de tamaño medio, se verá que es la velocidad de vibración que produce el espectro más uniforme, y por esa razón, es la que se escoge como parámetro de default del monitoreo de máquina.

## 1.6. VENTAJAS DEL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

- Reducción de los costos de mantenimiento correctivo.
- Reducción en inventarios en cuanto a repuestos.
- Reducción de tiempos extras para el área de mantenimiento.
- Mayor calidad en las reparaciones.
- Mejores condiciones de seguridad.
- Reducción de tiempos muertos inesperados.
- Extensión de la vida útil del equipo.
- Puede incrementar la velocidad de la producción y producir a buen tiempo las órdenes de producción.
- Reduce la pérdida de materia prima.
- Aumenta la probabilidad de calidad en los productos.
- La reducción de costos de mantenimiento pueden aumentar las ganancias de la empresa o la posibilidad de inversión.

## 1.7. MEDICION DE VIBRACIONES

### 1.7.1. Procedimiento general para la toma de vibraciones

Antes de iniciar la adquisición de datos de vibración en máquinas, es necesario establecer un procedimiento adecuado dependiendo del tipo de prueba, del equipo y otros aspectos como la seguridad.

- a. **Definición de la prueba:** En este aspecto se define si se trata de una prueba de aceptación de maquinaria, de una prueba de monitoreo, chequeo pos mantenimiento, etc. Esto se hace con el fin de identificar los niveles permisibles, el historial del equipo, el comportamiento del equipo, la instrumentación a utilizar, personal necesario, etc.
- b. **Configuración de datos técnicos de la máquina:** Un buen diagnóstico por vibraciones requiere una buena configuración de los datos a obtener, lo que depende directamente de las características técnicas de la máquina como tipo de máquina (bomba, compresor, ventilador, motor eléctrico, etc.) la potencia, velocidad del(los) eje(s), tipo de transmisión, tipo de montaje, elementos internos de la máquina (rodamientos, engranajes, álabes), puntos de toma de datos. En muchos casos no es posible obtener algunos de estos datos, lo que deja cierto grado de incertidumbre sobre algunos aspectos de la máquina. Lo más recomendable es alimentar el software de análisis con la mayor cantidad de información de la máquina.
- c. **Configuración de los datos a medir:** El software debe permitir hacer cambios en la configuración de los puntos a obtener. Según la experiencia es necesario para detectar ciertos problemas realizar una configuración diferente o especial, por ejemplo mayor número de líneas de resolución, mayor frecuencia máxima de muestreo, grabación de la Forma de la Onda, análisis en tiempo real, diferentes opciones de envolvente de aceleración, puntos de medición, etc. Esto sumado a los datos técnicos de la máquina garantizará la adquisición de datos útiles y suficientes que permitan hacer un diagnóstico acertado.

- d. **Preparación de la prueba:** Este aspecto se refiere a las condiciones necesarias para obtener datos confiables. Por ejemplo la velocidad de la máquina debe ser constante, la carga debe ser la misma o estar dentro de un rango cerrado durante la prueba, el tiempo de trabajo de la máquina debe permitir obtener todos los datos bajo las mismas condiciones, condiciones ambientales, y todo lo que se considere que puede afectar la adquisición de datos.
  
- e. **Toma de datos:** Realizar la toma de datos de acuerdo a lo establecido por las normas relacionadas con el tema por ejemplo la norma ISO 10816-3. [ANEXO A](#). Establece puntos de adquisición de datos de acuerdo al tipo de máquina. Los datos en lo posible deben ser tomados con equipos que permitan guardar la información, para su posterior descarga y análisis en un software de análisis en computador. Es necesario en este punto, considerar las condiciones de seguridad bajo las cuales se van a realizar las pruebas.
- f. **Análisis de datos:** Se realiza el análisis de los datos. El análisis se realizará de acuerdo a los criterios establecidos por la norma utilizada o definida en la definición de la prueba. Lo ideal es hacer un análisis de frecuencias para identificar los componentes que pudieran estar presentando problemas.
  
- g. **Realización de reporte o informe final:** Se debe contar con un formato adecuado para la presentación de los datos adquiridos y el diagnóstico, así como las recomendaciones para la resolución del problema.

## 1.8. EQUIPOS PARA ADQUISICION DE DATOS

### 1.8.1. Sensores de vibración. Acelerómetros

Los sensores son elementos que sirve para medir el nivel de vibración de un objeto, pieza o componente, que funciona como un transductor que al recibir un estímulo de tipo vibratorio, genera una señal que es proporcional al estímulo recibido. Estos aparatos son capaces de convertir una forma de energía en otra, en este caso la energía mecánica en eléctrica.

Los sensores de vibración se encuentran de tamaños variados y de distintas sensibilidades para responder a los estímulos dependiendo de cada uso.

#### a. ACELEROMETROS



**Figura 4. Acelerómetro piezo eléctrico**

Se puede considerar al acelerómetro piezoeléctrico ver **Figura 4**. Como el transductor estándar para medición de vibración en máquinas. El elemento piezoeléctrico está ajustado entre la base y la masa. Cuando una materia está sujeta a una fuerza, se genera una carga eléctrica entre sus superficies. Hay muchas materias de este tipo. Cuarzo se usa más. También hay materias piezoeléctricas sintéticas que funcionan bien y en algunos casos son capaces de funcionar a temperaturas más altas que el cuarzo.

El rango de frecuencias del acelerómetro es muy ancho y se extiende desde frecuencias muy bajas en algunas unidades hasta varias decenas de kilohertzios. Una regla general es que un acelerómetro se puede usar alrededor de  $1/3$  de su frecuencia natural.

#### b. Acelerómetros Piezoeléctricos

Comparados con otros transductores, los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado, bajo ruido de salida
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico
- Amplio rango de frecuencias
- Tamaño Compacto
- No lleva partes móviles
- Auto-generación – No se requiere alimentación externa.

### 1.8.1.1. Ventajas de un Acelerómetro

- Fácil instalación
- Pequeño tamaño
- Buenos resultados para mediciones a altas frecuencias
- Tiene las ventajas de un sensor de proximidad

### 1.8.1.2. Desventajas de un Acelerómetro

- Presenta errores de amplitud y fase a baja frecuencia 120 CPM aproximadamente
- Costosos
- Algunos necesitan energía externa
- Sensible a impactos

## 1.9. COLECTORES DE DATOS



Figura 5. Colectores de datos.

El colector de datos ver **Figura 5**. Fue diseñado para medir y almacenar el estado de vibración, tanto en aceleración como en velocidad y desplazamiento, de más de 1000 puntos. Los colectores de datos permiten hacer variaciones de la configuración con la cual se va a tomar la información, es así como podemos obtener datos con una resolución desde 400 líneas hasta 12800 o más. Los equipos también cuentan con un amplio rango dinámico que permite hacer análisis a frecuencias cada vez más altas, sin perder fidelidad o resolución. Las principales marcas en el mercado son SKF [5], CSI, Bentley Nevada, DLI.

Como elemento transductor se utiliza un acelerómetro activo que entrega un nivel de señal adecuado al circuito de entrada del equipo.

La plataforma de hardware está integrada por un kit de desarrollo estándar de DSP, una segunda placa de circuito impreso que aloja la memoria y las interfaces de pantalla y teclado, además de la electrónica para el acondicionamiento de la señal del sensor, el cargador de baterías y una pantalla gráfica LCD.

Mediciones:

- Espectro de aceleración.
- Espectro de velocidad.
- Valor Eficaz de aceleración.
- Valor Pico de aceleración.
- Valor Eficaz de velocidad.
- Valor Pico de velocidad.
- Envoltorio de aceleración.
- Envoltorio de velocidad.
- Desplazamiento.
- Datos de alta frecuencia (PeakVue, HFD, etc.).
- Amplitud vs tiempo.

#### 1.10. MEDIDORES DE VIBRACION



**Figura 6. Medidores de Vibración**

Los medidores de vibración **Figura 6**. Se emplean para medir vibraciones y oscilaciones en muchas máquinas e instalaciones, así como para el desarrollo de productos (por ejemplo de componentes o herramientas). La medición proporciona los siguientes parámetros: aceleración de la vibración, velocidad de vibración y variación de vibración. De este modo se caracterizan las vibraciones

con precisión. Los medidores de vibración son portátiles y sus resultados se pueden almacenar parcialmente. Los medidores de vibración son una ayuda insustituible in situ para el profesional.

### **1.11. ANALISIS DE ESPECTROS**

La mayoría de las máquinas tienen un conjunto de frecuencias forzadas relativamente sencillas, determinadas por la geometría de la máquina y por su velocidad. La existencia de otras frecuencias que las frecuencias forzadas tales como los armónicos de 1x en la firma de vibración de la máquina indica una no linealidad y la magnitud combinada de esas frecuencias nuevas es un buen indicador del estado de salud general de la máquina. A medida que se desgasta una máquina, el juego se hace más grande, y su firma de vibración se hace más compleja, debido a la generación de armónicos bandas laterales.

Los espectros más comunes y bajo los cuales se realizan la mayor parte de los análisis, se encuentra en la Tabla Ilustrada de Diagnóstico de Vibraciones de la Technical Associates of Charlotte, la cual se encuentra en los anexos, [ANEXO B.](#)

### **1.12. NORMAS DE EVALUACION DE VIBRACIONES**

Atendiendo al ámbito de desarrollo y de aplicación pueden distinguirse los siguientes tipos de normas:

- **Normas Internacionales (ISO – International Standards Organization)**  
Se Consideran de máxima prioridad en transacciones internacionales, siendo en la Práctica el punto de partida para valorar la severidad de vibraciones. El principal inconveniente que presentan dichas normas es su carácter general.
- **Normas Europeas (EN)** Dentro del ámbito de la Unión Europea, las normas o directrices europeas van constituyendo en los últimos años la referencia a la que adecuar las correspondientes Normas de carácter nacional. Así, es habitual que las mismas incorporen en su preámbulo una afirmación del tipo:  
“Esta norma europea deberá recibir el carácter de norma nacional, bien Por la publicación de un texto idéntico, bien por ratificación lo más tarde En enero de 1998 y las normas Internacionales en contradicción con

Ella deberán ser retiradas lo más tarde en enero de 1998”.

- **Normas Nacionales (UNE)** Por ejemplo, la norma UNE 20-180-86, que se comentará posteriormente. Esta norma debería ser la más utilizada para determinar la severidad de la vibración en un determinado tipo de máquinas, aunque se considera más como recomendación que como mandato legal.
- **Recomendaciones y guías de los fabricantes** Son recomendaciones de los fabricantes sobre los niveles de vibración permisibles por sus equipos. En la mayor parte de los casos, se limitan al área de la turbo maquinaria, aunque hay una gran tendencia a exigir este tipo de información al fabricante cada vez que se adquiere un equipo crítico.
- **Normas internas** Resulta recomendable desarrollar normativas internas propias de vibraciones por ser las que mejor se adaptan a los equipos tipo de cada planta productiva. Está en una de las tareas más difíciles dentro del Mantenimiento Predictivo, pero se ve recompensada a medio plazo por los excelentes resultados obtenidos.

A la hora de llevar a cabo una clasificación de la severidad de la vibración en una máquina, la variable del movimiento a considerar (desplazamiento, velocidad o aceleración de la vibración) depende del tipo de norma y del rango de frecuencias a analizar, amén de otros factores. Por ejemplo:

- I. El análisis del estado vibracional de una máquina en el rango de 10 a 1.000 Hz, se suele llevar a cabo a menudo en función de la velocidad de vibración, al resultar un parámetro prácticamente independiente de la frecuencia en este rango, lo que facilita el llevar a cabo una medida sencilla de la severidad de las vibraciones en una máquina.
- II. Cuando se trata de analizar un movimiento armónico simple, puede llevarse a cabo el estudio midiendo valores pico a pico, o valores Rms, del desplazamiento en vibración. Sin embargo, para máquinas cuyo movimiento es más complejo, el uso de estos dos índices da lugar a resultados claramente diferentes debido al distinto peso aportado por los armónicos de más alta frecuencia.
- III. En máquinas rotativas con velocidad de giro dentro del rango de 600 a 12.000 RPM, el valor Rms de las amplitudes de la velocidad de

vibración suele corresponderse bastante bien con el nivel de severidad de la vibración. Así, la International Standards Organization (ISO) define como “severidad de la vibración” el mayor valor Rms de la amplitud de velocidad de vibración obtenido en la banda de frecuencia 10 – 1.000 Hz y medido en unos puntos preestablecidos de la estructura (normalmente medidas tri-axiales en la tapa de los cojinetes o en los soportes). Por lo tanto, por regla general, las normas de severidad de vibraciones de maquinaria se basan en dos parámetros de la vibración: amplitud y frecuencia.

## ➤ **NORMAS ISO**

La normalización internacional (INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION) sobre la severidad de vibraciones de máquinas tiene una extensa gama de normas, entre las cuales pueden citarse:

- I. **ISO 2372-1974, [ANEXO C.](#)** “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s. Bases para la especificación de estándares de evaluación”. Es aplicable a máquinas rotativas con rotores rígidos y a máquinas rotativas con rotores flexibles en los que la medida de vibración en la tapa del cojinete resulta indicativa del comportamiento vibracional de eje. Sólo estudia vibración global, sin bandas de frecuencias. Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de vibración en velocidad - valor eficaz RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1.000 Hz (severidad de la vibración, según ISO). Por ello, cuando se trabaja en mantenimiento predictivo haciendo análisis por bandas, puede resultar muy útil definir siempre una banda ISO de 10 Hz a 1KHz, de cara a tener una referencia para posibles informes o reclamaciones.

El análisis de este rango de frecuencias permite incluir, para estas velocidades de operación, las acusas más comunes de vibración en máquinas rotativas:

- Excitaciones de carácter asíncrono debidas a rozamientos.
- Desequilibrio del rotor.
- Excitaciones de carácter eléctrico y sus armónicos.
- Armónicos de excitaciones asíncronas del rotor.

De cara al establecimiento de la severidad de vibración admisible, se distinguen varias clases de máquinas rotativas:

- **CLASE I** – Componentes individuales, totalmente conectados al conjunto de la máquina en condiciones normales de operación. Por ejemplo, pequeños motores eléctricos hasta 15 KW.
  
- **CLASE II** – Máquinas de tamaño medio. Por ejemplo, motores eléctricos de 15 a 75 KW o hasta 300 KW en motores con cimentación especial.
  
- **CLASE III** – Motores principales grandes, con cimentación rígida y pesada.
  
- **CLASE IV** - Motores principales grandes montados sobre cimentación blanda y ligera. Por ejemplo, Turbo maquinaria (equipos con RPM > velocidad crítica).

La norma ISO número 2372 [ANEXO C](#), proporciona guías para aceptación de la amplitud de vibración, para Maquinaria rotativa operando desde 600 hasta 12 000 RPM. Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales, y puede ser muy engañosa ver **Tabla 2**.

ISO 2372 [ANEXO C](#), especifica los límites de la velocidad de vibración basándose en los caballos vapor de la máquina y cubre un rango de frecuencias desde 10 Hz hasta 1 000 Hz. Debido al rango limitado de alta frecuencia, se puede fácilmente dejar pasar problemas de rodamientos con elementos rodantes. Esta norma está considerada obsoleta y se va a reformular.

Level Vdl	Menos que 20HP	20 a 100 HP	Mas que 100HP
125	No permisible	No permisible	No permisible
121	No permisible	No permisible	A penas tolerable
117	No permisible	A penas tolerable	A penas tolerable
113	A penas tolerable	A penas tolerable	Permisible
109	A penas tolerable	Permisible	Permisible
105	Permisible	Permisible	Bueno
101	Permisible	Bueno	Bueno
97	Bueno	Bueno	Bueno

**Tabla 2. Guía para aceptación de la amplitud de la vibración**

- II. **ISO 3945.** “Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas , in situ; velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s”: Esta norma, como su mismo título indica, permite clasificar la severidad de vibración de grandes máquinas rotativas “in situ”, para velocidades de operación también entre 600 y 1.200 RPM, mediante la Tabla de la página siguiente. Se aplica a los grandes motores principales, Clases III y IV definidas arriba.

En este caso, la clasificación de la severidad de vibración depende de las características de flexibilidad o rigidez del sistema soporte que presenta la máquina:

- ✓ Se dice que los soportes son flexibles si la frecuencia fundamental de la máquina sobre dichos soportes es menor que la principal frecuencia de excitación.
- ✓ Los soportes se dicen rígidos si la frecuencia fundamental de la máquina sobre los mismos es menor que la principal frecuencia de excitación.

### III. **ESPECIFICACIÓN TÉCNICA NAVSEA S 9073 – AX SPN 010/MVA**

Esta es una norma más reciente, de 1978 que fue elaborada por el mando de Sistemas Navales (NAVSEA) de los E.U.A. Está basada en firmas de vibraciones promediadas y dice que el criterio de aceptación después del reacondicionamiento de la máquina no puede ser más que una desviación estándar (1) arriba de los niveles espectrales promedio. El criterio de la aceptación durante la operación normal es el nivel espectral promedio más 2.

### **1.13. VIBRACIONES EN EMBARCACIONES**

Las vibraciones pueden tener efectos variados tanto en la maquinaria como la estructura y la tripulación de un barco. Se pueden producir grietas en las soldaduras, flexiones excesivas en estructuras como el casco y el eje de propela. El fenómeno más común que se presenta es el de resonancia, la cual se manifiesta debida a que las condiciones de carga que se presentan en este tipo de estructuras, es muy cambiante, lo que combinado con la flexibilidad de las piezas expuestas puede conducir a la resonancia.

Las principales fuentes de excitación en un barco son: **[3]**

- El propulsor.
- El eje de propela.
- Motor Principal.
- Motores Auxiliares.

#### **1.13.1. Fuentes de Excitación**

##### **1.13.1.1. Excitación por el propulsor**

El propulsor es la principal fuente excitadora de vibraciones, situada a popa del buque, debido a que las palas del propulsor están constantemente atravesando un flujo no uniforme y las fuerzas que actúan en cada pala son variables.

Estas cargas variables son transmitidas a través del eje propulsor, distribuidas a la estructura del buque y a la sala de máquinas a través de los descansos del eje propulsor. Las fluctuaciones de presión del agua son transmitidas al casco y producen flexión en los elementos estructurales, produciendo el fenómeno de las vibraciones.

La frecuencia y la magnitud de las fuerzas de excitación, son factores importantes en el análisis de vibraciones del casco producidas por el propulsor. La frecuencia de las fuerzas de excitación de la pala es dada por la rotación del eje, multiplicada por el número de palas.

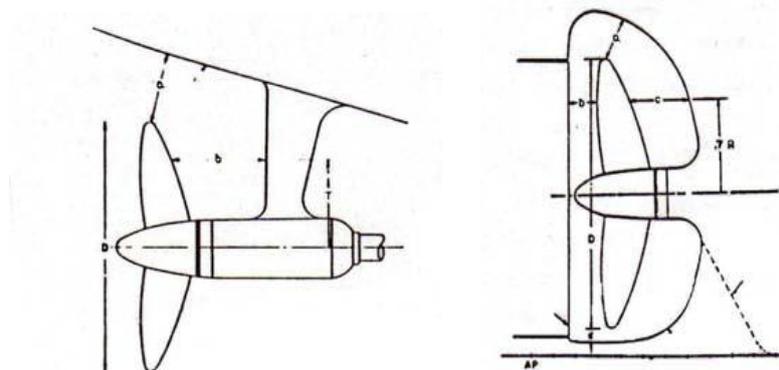
La magnitud de las fuerzas de excitación causadas por el propulsor, depende principalmente de los siguientes parámetros:

- Las claras de la hélice
- Número de palas
- Cavitación
- Campo de estela

### 1.13.1.2. Excitación por fuerzas de superficie

Las claras del propulsor es un factor muy importante para ser considerado por el proyectista, y al seleccionar éstos parámetros se tiene que optar por una relación de compromiso, tanto del punto de vista de la propulsión como del punto de vista de las fuerzas de superficie de excitación. Cuando se dejan grandes claras, implica una baja eficiencia del propulsor y pequeñas fuerzas de superficie. Por otro lado, claras muy pequeñas producen grandes presiones sobre el casco de popa, produciendo vibraciones excesivas. La **Figura 7**. Muestra dichas variables.

Cuando está presente el fenómeno de la cavitación aparecen fuerzas de excitación mayores, debido al aumento de presión. El problema de desbalanceamiento del propulsor ayuda a aumentar estas fuerzas de superficie.



**Figura 7. Espacios considerados en el diseño de propulsores.**

### **1.13.1.3. Excitación en el cojinete de empuje**

Esta fuerza depende básicamente del campo de estela del buque en el cual el propulsor trabaja, y es generada por las variaciones de empuje y arrastre que actúan sobre las palas del propulsor.

Debido al flujo no uniforme en la popa del buque, aparecen sobre las palas del propulsor una distribución de presión no simétrica, que da origen a momentos de flexión y torsión. El momento flector es transmitido para el casco vía tubo codaste, excitando el buque en sentido vertical y transversal. El momento toros transmite al eje propulsor una vibración torsional. Además, la variación del empuje por medio del eje propulsor, ocasiona vibraciones longitudinales.

Las frecuencias de las fuerzas excitadoras antes mencionadas son determinadas por el producto de la velocidad de rotación del eje propulsor y por el número de palas.

### **1.13.1.4. Excitación en el eje propulsor**

Si la frecuencia de la fuerza de empuje del propulsor y la frecuencia de vibración del eje cigüeñal del motor principal, coinciden con algunas de las frecuencias naturales de vibración axial del sistema propulsor, se tendrá una resonancia. Este fenómeno podría causar por ejemplo, vibraciones excesivas en cubierta o en superestructura del buque, incluso desperfecto en los elementos mecánicos.

De la misma forma, en el sistema propulsor podría existir resonancia, cuando una frecuencia de excitación del propulsor, coincide con alguna frecuencia natural de vibración torsional del eje.

En el caso de existir desalineamiento del eje propulsor o desbalanceamiento del propulsor, surgirán fuerzas excitadoras de vibraciones, cuyas frecuencias serán numéricamente iguales a la rotación del eje.

Es importante que el eje apoye en todos sus cojinetes, ya que al quedar el eje en voladizo, la frecuencia bajaría y podría quedar golpeando sobre el cojinete produciendo fuertes vibraciones en la estructura del buque y daño en el sistema propulsivo.

Para determinar las frecuencias propias del eje propulsor, es utilizado el método de los elementos finitos, el cual entrega los modos de vibraciones, como también las frecuencias naturales.

#### **1.13.1.5. Excitación en el motor principal**

Las fuerzas de excitación producidas por el motor principal son generadas por la combustión de los gases en los cilindros y por los movimientos de las piezas con movimiento alternativo y rotativo. Estas fuerzas transmiten vibraciones a través de las fundaciones de los motores a la estructura del buque.

#### **1.13.1.6. Excitación por fuerzas y momentos de desbalanceo**

Las masas en movimiento, del pistón y biela, generan fuerzas de excitación vertical, debido al movimiento de subida y bajada cuando el motor se encuentra en funcionamiento. En cambio, el eje cigüeñal en movimiento hace que las masas involucradas de la biela generen fuerzas de inercia en sentido horizontal. La suma de las fuerzas para todos los cilindros son llamadas fuerzas y momentos de desbalanceo de primer y segundo orden.

En general los momentos producidos por el desbalanceo no producen grandes vibraciones del casco de un buque.

#### **1.13.1.7. Excitación generada por la combustión de los gases**

La explosión en el cilindro genera una presión sobre el pistón tal que lo obliga a descender. Ésta presión, actuando en todo el área del pistón, resulta una fuerza que actúa sobre el pistón, seguidamente una parte de esta fuerza es transmitida al eje cigüeñal a través de la biela y lo que resta es transmitida a las paredes del cilindro del motor, entregando potencia en el eje. Este momento, depende de cada explosión y la frecuencia de estas excitaciones es cíclica.

En motores de varios cilindros, la fuerza de excitación es debido a la suma de las fuerzas de cada cilindro. La fuerza total que actúa en las paredes de los cilindros, produce una flexión y torsión de la estructura del motor y éste movimiento es transmitido hacia las fundaciones, produciendo las vibraciones de la estructura de la sala de máquinas. Las fuerzas que generan el momento

en el eje, producen flexión de la estructura de la fundación debido a la reacción del par. [3]

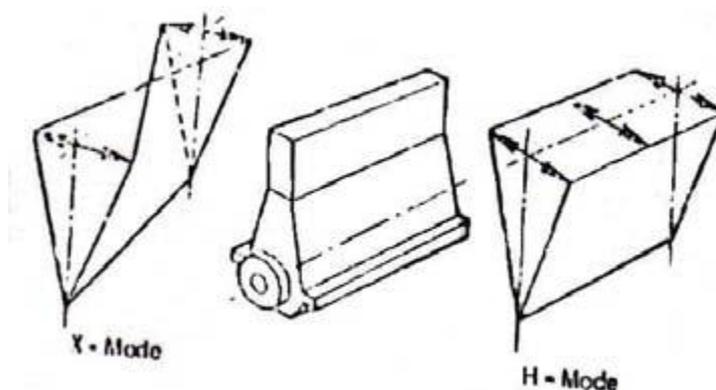
### 1.13.2. Modos de vibración de motores [3]

Los modos naturales de vibración de motores dependen de su propia estructura. Generalmente, el primer modo de vibrar de un motor es el modo "H" **Figura 8.**, que es cuando el motor tiene movimientos en sentido lateral, tratando de flectar el motor.

El segundo modo de vibración, generalmente es el modo "X" **Figura 8.**, éste modo se presenta con un movimiento de torsión respecto al eje vertical de simetría del motor.

En motores altos y con bajo número de cilindros, es posible que exista el modo "L" **Figura 8.**, que consiste en un movimiento de popa a proa del motor. Los siguientes modos, generalmente se encuentran a una frecuencia muy alta y no son de importancia ya que es muy difícil que el sistema entre en resonancia en niveles altos de frecuencia.

Un método aplicado para la determinación de las frecuencias propias de vibración de un motor es el de aplicaciones de programas computacionales de elementos finitos.



**Figura 8. Modos de Vibración de un Motor.**

### 1.13.3. Vibraciones axiales del cigüeñal

Las causas por la cual se producen vibraciones axiales en ejes principales, es debido a variaciones del empuje del sistema propulsor y de la variación de presión en los cilindros, debido a la combustión.

La rigidez del descanso de empuje es uno de los problemas que se presentan cuando existen vibraciones axiales. Para solucionar este problema se tiene que estudiar la rigidez de la fundación o instalar un amortiguador axial.

Para la obtención de las frecuencias propias de vibración es posible determinarla con el método de elementos finitos.

### 1.13.4. Excitación por motores auxiliares

Las fuerzas generadoras de vibraciones de los motores auxiliares, generalmente, no causan problema de vibraciones de estructura del buque, solo producen vibraciones locales en la sala de máquinas. Cuando existe este problema de vibración estructural, son utilizados apoyos elásticos.

## 1.14. ALGUNOS PROBLEMAS COMUNES DE VIBRACION EN BUQUES Y POSIBLE SOLUCION [3]

### 1.14.1. Vibraciones del motor

Estas se pueden clasificar por el tipo de desplazamiento que ellas producen:

- I. **Sacudimiento:** Causado por fuerzas verticales u horizontales que tienden a mover al motor hacia arriba y hacia abajo, o hacia los lados respectivamente. Esto se debe a fuerzas alternativas desbalanceadas y a componentes verticales u horizontales de las fuerzas centrífugas.
- II. **Balanceo u Oscilación:** Causado por fuerzas fluctuantes horizontales actuando por encima del centro de gravedad del motor, esto se debe a la variación en el componente horizontal de la reacción del pistón debido a

cambios en la presión del gas, a la fuerzas de inercia y a la reacción de la carga.

- III. **Cabeceo:** Causado por pares fluctuantes verticales que hacen que los extremos del motor se levante y caiga, esto es el resultado de un par desbalanceado.
- IV. **Guiñada:** Causado por pares fluctuantes horizontales que tienden a girar el motor en sentido trasversal o mover los extremos hacia la izquierda y a la derecha, esto ocurre principalmente como resultado de un par desbalanceado producido por componentes horizontales de las fuerzas centrífugas en un motor vertical y por componentes horizontales de las fuerzas en motores en V.
- V. **Torsional:** Causado reacciones de troqué fluctuante que tienden a torcer el cigüeñal.

Para prevenir la resonancia de estas vibraciones, la armazón del motor se hace tan rígida como sea posible para aumentar su frecuencia natural de vibración.

#### 1.14.2. Desbalanceo del cigüeñal

Se dice que el cigüeñal esta balanceado estáticamente, cuando su centro de gravedad coincide con su línea de centro, con sus extremos soportados en dos extremos, el árbol estará en una posición estable y no girara. Las fuerzas centrífugas de las partes rotativas de cada estructura de manivela de un cigüeñal balanceado estáticamente, si se consideran que actúan en un mismo plano, se balancearán unas a otras, sin embargo estas no actúan en el mismo plano sino en planos diferentes.

Estas fuerzas, por lo expuesto, forman pares, a menos que sean balanceadas, tenderán a producir cabeceo y guiñada según rote el cigüeñal. Cuando estos pares están completamente balanceados, se dice que el cigüeñal esta balanceado dinámicamente.

Sin embargo, algunos deben ser balanceados dinámicamente por medio de pesos, conocido como contrapeso o pesos de compensación, colocados opuestamente a su manivela.

Antes que otras partes móviles de un motor puedan ser balanceadas, su árbol cigüeñal deberá ser balanceado dinámicamente.

### **1.14.3. Amortiguadores de vibración**

A pesar de todas las precauciones que se usan, no es posible balancear todas las fuerzas y pares que ocurren en un motor, para absorber las vibraciones que no se puedan balancear, al motor se le debe proveer con amortiguadores que eviten averías en la misma o en su montaje.

Los amortiguadores de vibraciones para los montajes del motor consisten especialmente de un soporte flexible para el motor, hecho de corcho, goma o resorte.

Para absorber todos los tipos de vibraciones, este soporte deberá permitir una pequeña deflexión del motor en cualquier dirección y absorber las vibraciones sin transmitir las a la bancada.

### **1.14.4. Amortiguadores de vibración torsional**

No siempre es posible hacer el cigüeñal tan rígido que no ocurra resonancia con alguna de las armónicas de alto grado de su frecuencia natural, dentro del alcance de la velocidad de funcionamiento.

Por eso, los cigüeñales de los motores poli cilíndricos de alta velocidad están equipados con amortiguadores de vibración torsional los cuales previenen que las vibraciones se eleven a amplitudes peligrosas cuando se operan a velocidades críticas o cerca de ella.

Los amortiguadores de vibración torsional limitan las amplitudes de las vibraciones suministrando fuerzas de fricción resistentes que se oponen a ellas. De este modo la energía vibratoria se convierte en calor, el cual se disipa sin efectos dañinos en el motor.

Los amortiguadores de vibración torsional usualmente consisten de un volante pequeño con impulsión flexible montado en el extremo del cigüeñal opuesto al volante principal.

### 1.15. PROCEDIMIENTO RECOMENDADO PARA PRUEBAS DE VIBRACIONES A BORDO DE BUQUES [3]



**Figura 9. Motor Diesel MTU 20V1163 TB 82**

**La Figura 9.** Muestra un ejemplo de un motor Diesel MTU 20V 1163 TB 82 tomado para ensayo, estos ensayos están regidos por la norma ISO 4867 [7] e ISO 4868 [7]. A continuación veremos en qué consisten estas pruebas, las condiciones de las mismas y los principales aspectos a tener en cuenta.

Según la norma ISO 4867 [7] La necesidad de datos comparativos sobre la vibración de la nave requiere condiciones de prueba uniformes, en general, éstas pueden ser en pruebas de mar con condiciones de lastre conocidas. La vibración relativamente uniforme generada por el motor puede ser distorsionada debido a vibraciones transientes producidas por el impacto de olas. Cambios en la distribución de la estela debido a ángulos en el timón, pueden producir grandes aumentos de fuerzas excitadoras. Opciones en aguas poco profundas pueden producir un efecto significativo en las vibraciones del buque. Si una hélice emerge continuamente o esporádicamente, causa aumento en la fuerza excitadora. El efecto de vibraciones laterales de la parte más próxima a popa del eje propulsor en el casco y la superestructura, deberán ser considerados.

La parte más próxima a popa del eje propulsor podría tener frecuencias de resonancia lateral dentro del rango de velocidades de la embarcación, lo cual puede excitar fuertes vibraciones por desbalanceamiento o fuerzas de la hélice. Fuerzas alternativas de empuje, podrían generar vibraciones peligrosas en los rodamientos de los descansos de empuje, como resultado de la resonancia longitudinal en el sistema de propulsión.

Los motores diesel pueden vibrar sobre los tres ejes rotatorios y los tres ejes de traslación y generar grandes fuerzas que pueden causar grandes vibraciones en el buque.

La principal respuesta del casco de un buque es similar al comportamiento de una viga libre-libre en sus modos bajos. En frecuencias altas, la respuesta del casco del buque es equivalente a una respuesta de una fuerza con sus resonancias definidas y una máxima respuesta en el área del espejo en popa.

El área del espejo es un antinodo para cualquier modo excitador de flexión o torsión, generado por el sistema de propulsión y en un punto apropiado de frecuencia para las mediciones de una vibración y fuerzas de respuesta similar a la viga. La respuesta de la superestructura y estructura local puede ser evaluada en términos de la relación entre la amplitud de vibraciones y la amplitud de vibración de la periferia del casco en esas ubicaciones.

#### **1.15.1. Campo de aplicación**

Esta norma establece un procedimiento uniforme de acumulación y presentación de datos:

- a) Para vibraciones del casco con un ó múltiples ejes, buques mecánicos oceánicos.
- b) Para vibraciones del sistema eje – propulsor como sus efectos en el casco.

Éstos datos proveerán de una base para predicciones de diseño, mejoras y comparaciones con respecto a niveles vibratoriales.

Procedimientos similares podrán ser utilizados para buques de tránsito interno y remolcador. En casos especiales, cuando las vibraciones objetables existan, podrían requerirse una investigación específica.

Este Estándar Internacional concierne a:

- a) Vibraciones del casco principal y superestructuras excitadas por el sistema de propulsión.
  - Respecto a la frecuencia rotacional del eje
  - Relación de las palas de la hélice
  - Relación de los armónicos de las palas

- Frecuencias asociadas con los componentes mayores de la máquina.

b) Excitación del eje propulsor y el sistema de máquina principal

Pruebas de caída y para el ancla en aguas tranquilas pueden ser efectivas obteniendo los primeros modos verticales de vibración y sus constantes de amortiguamiento. En casos individuales, los elementos a ser medidos pueden ser agregados para complementar la ayuda de las mediciones para cada buque.

### **1.15.2. Toma de datos**

Las mediciones deben ser preferentemente hechas por un sistema digital, por entregar una medida permanente. Los transductores pueden generar indistintamente medidas de velocidad, aceleración o desplazamiento. El listado puede ser hecho en cinta magnética, papel oscilo gráfico o una combinación de éstas. El uso de papel oscilo gráfico durante las pruebas, significa que el trazado de las vibraciones puede ser inspeccionado directamente y es muy útil si se quiere evaluar problemas de vibraciones existentes. Cuando el desplazamiento, velocidad o aceleración son medidas, las frecuencias bajas deseadas, asociadas a un movimiento vibracional significativo, son los mayores componentes en el trazado de valores. También éstos son inmediatamente evaluados al sobrepasar las señales de frecuencias más altas con amplitudes de desplazamiento bajas. Debe tenerse cuidado al controlar y atenuar adecuadamente el sistema para permitir acomodarse a un amplio rango de amplitudes.

Una marca debe colocarse en el eje propulsor. Su posición con respecto al tope del centro muerto del cilindro número uno y una pala de la hélice debe ser anotada. La numeración de los cilindros deberá ser mostrada. El sistema de medición deberá ser calibrado por completo en laboratorio antes de las pruebas y es deseable verificar cada canal de medición antes de cada etapa de las pruebas.

### **1.15.3. Condiciones ideales para las pruebas**

Éstas deberán ser las siguientes:

- a) La prueba deberá realizarse con una profundidad del agua no menor que 5 veces el calado del buque, a menos que otra cosa sea especificada.
- b) La prueba deberá ser llevada a cabo en mar calmo (estado de mar grado 3 o menos).
- c) Durante la prueba en porciones a ruta libre, el ángulo del timón deberá ser restringido a 2 grados a babor o estribor (mínima acción del timón es deseada).
- d) El buque deberá ser lastrado hasta un desplazamiento tan cerca como sea posible a las condiciones de operación dentro de la capacidad normal de lastrado de está. El calado a popa deberá asegurar una inmersión completa del propulsor.

### **1.15.4. Ubicación del sensor**

Las mediciones vibraciones deberán ser tomadas en las siguientes ubicaciones; las mediciones deberán preferentemente ser tomadas en conjunto para obtener los modos vibraciones. **[3]**

### **1.15.5. Espejo**

Mediciones tanto verticales como longitudinales, y en el centro de la periferia del casco deberán ser tomadas tan cerca como sea posible a la línea de crujía en el espejo. Éstas medidas deberán ser usadas como referencia. Cuando una respuesta torsional de vibración del casco se determina, un par de transductores de cubierta en el borde para vibración vertical deberán ser empleados. Deberá asegurarse que la vibración periférica del casco sea medida, excluyendo efectos naturales.

### **1.15.6. Superestructura**

Mediciones verticales, longitudinales y en el centro serán tomadas en las siguientes ubicaciones para determinar la vibración completa de la superestructura:

- a) Puente de gobierno, en la línea céntrica al frente del puente.
- b) Cubierta principal, en la línea céntrica al frente de la cama alta.
- c) Un par de transductores para mediciones de movimientos torsionales de un castillo de cubierta en popa, cuando vibraciones torsionales sean determinadas.

Las mediciones deberán ser hechas con a lo menos un rango entre 90 y 100% de servicio normal de frecuencia rotacional del eje.

### **1.15.7. Maquinaria y cojinetes en la sala de máquinas.**

#### a) Motores con Reductor

Mediciones verticales, longitudinales y en el centro en lo más alto del descanso del eje. Mediciones en otros lugares pueden ser tomadas como opcionales a una velocidad constante. Otras mediciones que logren los mismos resultados son permitidas.

#### b) Motores Diesel de acción Directa

Las mediciones deberán ser tomadas en las siguientes ubicaciones:

- En lo más alto y en las fundaciones de los descansos.
- En lo más alto y en el extremo delantero y trasero del motor principal en dirección longitudinal.
- En lo más alto y en el extremo delantero y trasero del motor principal en dirección vertical y céntrica.

Es recomendable que las siguientes mediciones también sean hechas

- En la extremidad delantera del eje del cigüeñal (solamente longitudinal).
- En el extremo delantero y trasero de la fundación del motor (solamente vertical y céntrica).

c) Vibración Lateral del eje propulsor (opcional)

- I. Mediciones de vibraciones verticales y céntricas deberán ser tomadas en relación al tubo codaste. Otros puntos de mediciones también podrán ser tomadas. Las mediciones deben realizarse a través de la operación normal de la nave.
- II. Con motivo de eliminar posibles errores, des alineamiento del eje deberán ser chequeados rotando el eje desde un virador y anotando la señal del primer orden. Las señales deberán ser reparadas y el movimiento del eje reparado acorde.

d) Vibraciones Locales

Cuando se evidencian que ocurren vibraciones locales de importancia, las mediciones deben ser tomadas para generar una necesidad de mediciones correctivas.

e) Cubierta de Rumbo (opcional)

Las mediciones de vibraciones se deben realizar en el borde de la cubierta y determinar la flexión vertical y céntrica, en números suficientes de puntos que permitan determinar la forma de los modos en frecuencias bajas, para evitar resonancias locales. Estas mediciones se pueden realizar con un transductor en la popa o un instrumento portátil.

### **1.15.8. PARAMETROS A MEDIR**

Las cantidades que se medirán son las siguientes:

- a) Desplazamiento, velocidad, aceleración y presiones o deformaciones
- b) Frecuencias en ciclos por segundo o ciclos por minutos
- c) Frecuencia rotacional del eje (velocidad) en revoluciones por minutos o revoluciones por segundo
- d) Identificación de fase **[3]**

## 2. INTRODUCCION A CASOS DE ANALISIS

Luego de conocer los principales conceptos relacionados con la vibración, se procede a realizar unos análisis de casos reales de vibraciones en industria y en embarcaciones de equipos no rotativos.

Se revisaron 18 casos en total, de los cuales 9 corresponden a casos de embarcaciones y los otros 9 a casos de máquinas industriales de una planta de producción de cemento.

Los casos analizados son:

### ➤ EQUIPOS ANALIZADOS EMBARCACIONES:

- ✓ [ANEXO D.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Patrullera
- ✓ [ANEXO E.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Barcaza
- ✓ [ANEXO F.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Barcaza
- ✓ [ANEXO G.](#) Prueba de compresor de popa – Embarcación Tipo Bergantín
- ✓ [ANEXO H.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Multipropósito
- ✓ [ANEXO I.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Patrullera
- ✓ [ANEXO J.](#) Prueba de equipos auxiliares – Embarcación Tipo Patrullera
- ✓ [ANEXO K.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Multipropósito
- ✓ [ANEXO L.](#) Prueba de propulsores – Embarcación Tipo Patrullera

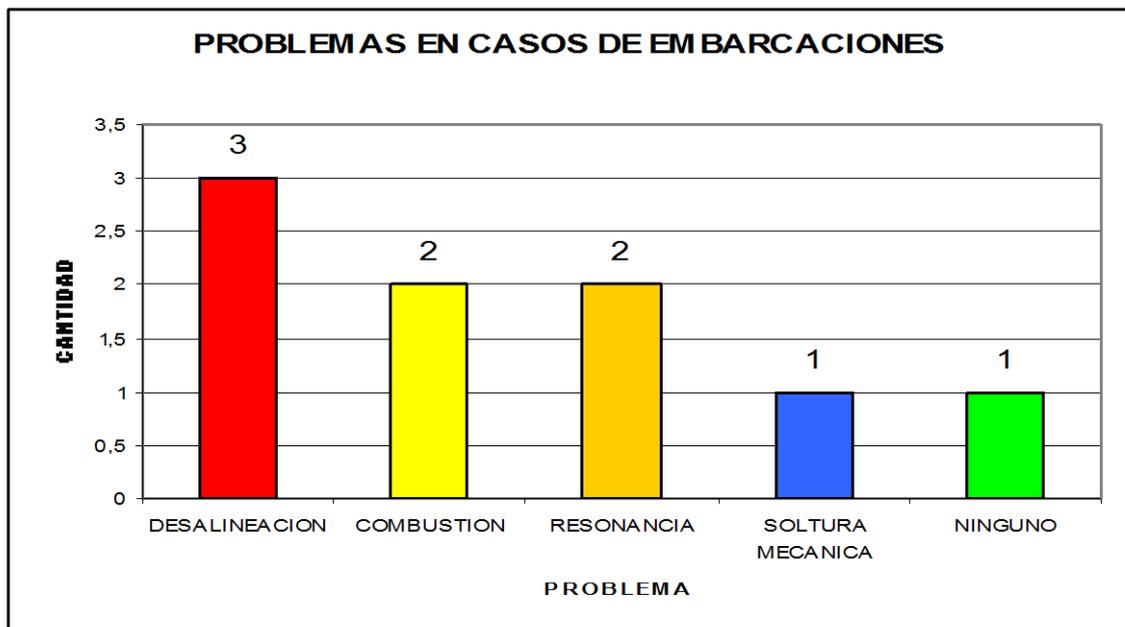
### ➤ EQUIPOS ANALIZADOS MAQUINAS INDUSTRIALES:

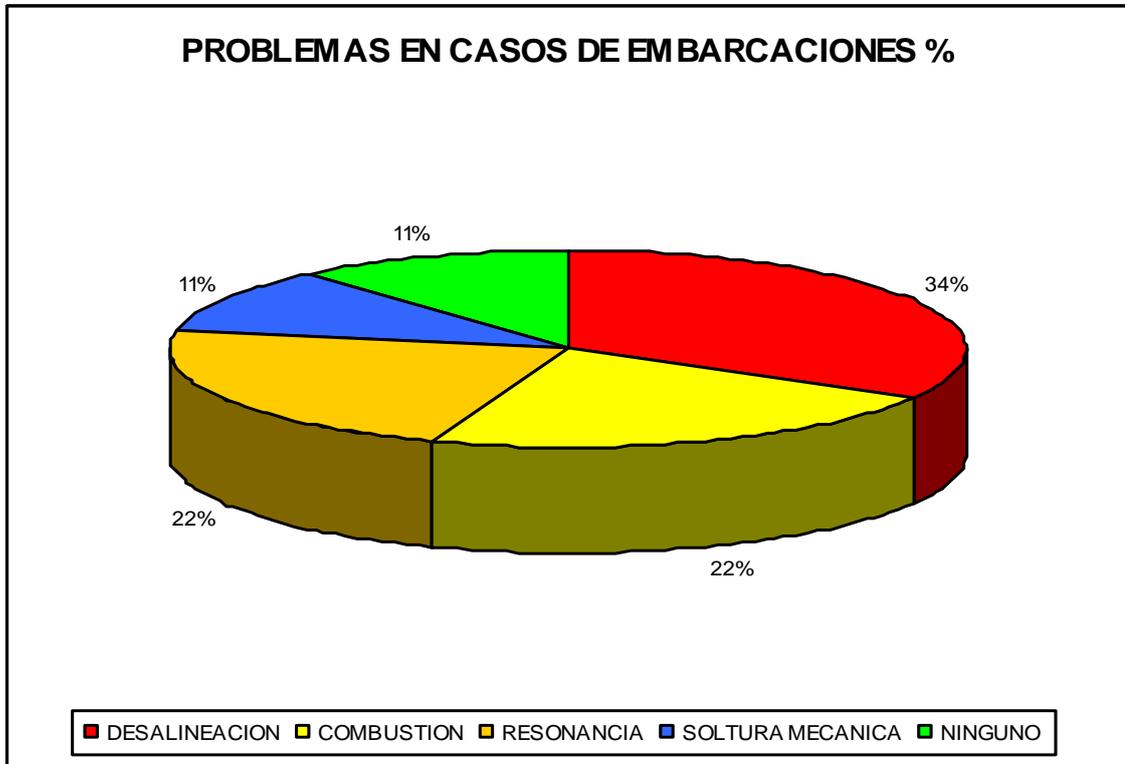
- ✓ [ANEXO M.](#) Ventilador de colector – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO N.](#) Banda transportadora estándar – según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO O.](#) Sistema moto reductor – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO P.](#) Moto reductor válvula rotativa Colector carbón – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO Q.](#) Ventilador de un filtro – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO R.](#) Moto reductor separador – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO S.](#) Transmisión tornillo sin fin filtro – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO T.](#) Ventilador Enfriador – Según especificaciones equipo
- ✓ [ANEXO U.](#) Moto reductor Trituradora del enfriador – Según especificaciones equipo

## 2.1. ANALISIS DE CASOS EN EMBARCACIONES

Antes de entrar a analizar los casos, es necesario hacer la salvedad que estos resultados solo se cumplen o son válidos para los casos analizados y no son una regla general.

Los primeros casos a analizar son los casos en embarcaciones. En estos se tiene que no todas las embarcaciones analizadas son iguales, ni están sometidas a las mismas condiciones de operación, lo que obviamente arrojará resultados totalmente diferentes en todos los casos ver **Figura 10**.





**Figura 10. Diagrama distribución problemas en casos de embarcaciones**

Las gráficas anteriores muestran la distribución de los diferentes tipos de problemas detectados en los casos analizados. Se observa claramente que en este tipo de equipos y situaciones, el problemas más común es la desalineación con un 34 % de ocurrencia, es decir que 1 de cada 3 casos analizados presentaron problemas de des alineamiento entre motor y reductor. Los siguientes problemas en ocurrencia están relacionados con la combustión y los cilindros de los motores (22% de los casos). La resonancia tuvo una frecuencia similar a los problemas de combustión, sin embargo estos resultados aplican solo para este análisis ya que este es un tipo de problema que suele ocurrir más a menudo debido a las mismas configuraciones de las máquinas y estructuras en las embarcaciones. Así mismo las condiciones de carga sobre estos sistemas suele propiciar este tipo de problemas. En un solo caso se observó un problema de soldadura mecánica, pero es un caso muy particular en el que se observó que los amortiguadores de la base no estaban en buen estado. Una sola máquina de las nueve analizadas presentó una condición normal.

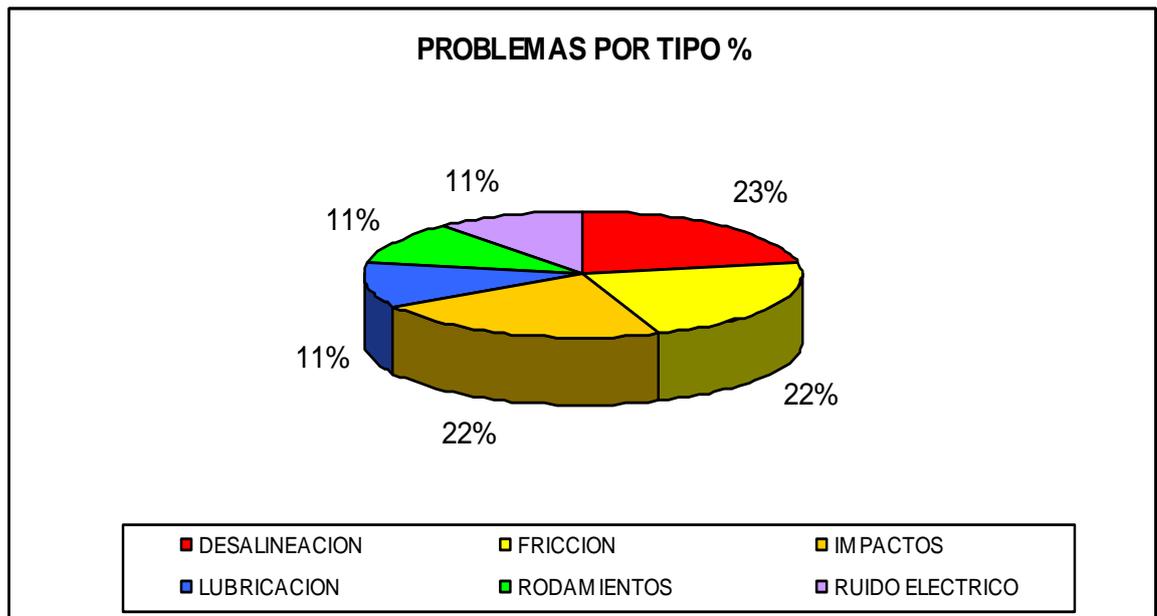
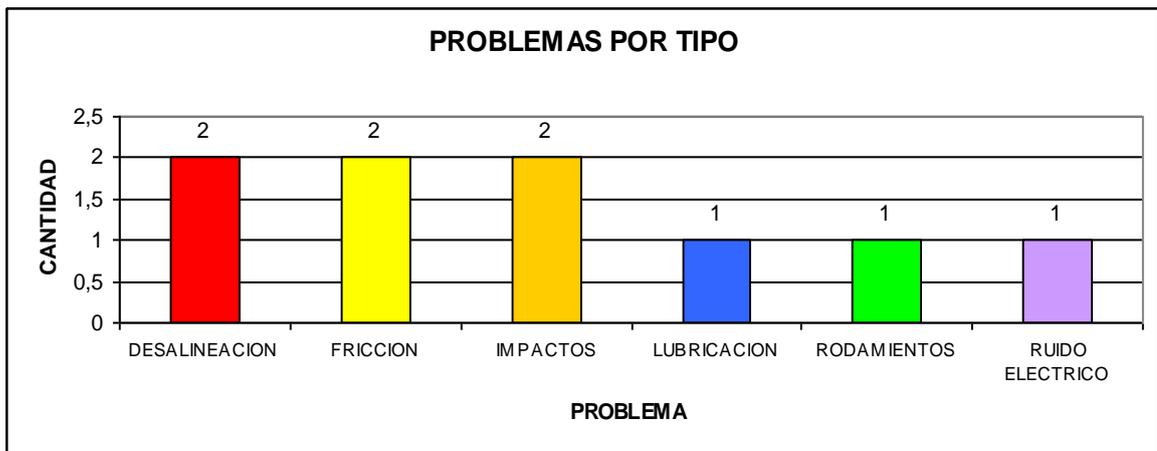
Observando estos resultados, se puede concluir que la desalineación es el problema más común. Esta situación puede tener varias causas según la experiencia de los autores: mal procedimiento de alineación, especificaciones no comprendidas, cambios estructurales debido al tipo de trabajo y a las condiciones del mismo, temperatura. Por su parte el problema de combustión suele estar relacionado con problemas puntuales de cilindros o cámaras de combustión, en los cuales es necesario calibrar y reajustar, también el taponamiento de las válvulas de admisión o escape puede llegar a causar problemas debido a una combustión diferente en un cilindro con respecto a otro, causando que sobretodo la explosión y la compresión generen roces y resonancias de los diferentes elementos, lo que finalmente se transmite a través de los cojinetes de bancada hacia toda la estructura. La resonancia suele ser uno de los principales problemas de vibración en todo tipo de sistemas. Esto ocurre porque los equipos son diseñados para operar bajo ciertas especificaciones y condiciones que no siempre se cumplen o son iguales. En el caso de la resonancia, este es un fenómeno que está relacionado con la frecuencia natural de un sistema, lo que depende a su vez de la masa y la rigidez de un sistema. En el caso de una planta en tierra fija, la rigidez de los sistemas se mantiene debido a que no hay movimiento asociado y las condiciones físicas y ambientales son iguales la mayor parte del tiempo. Sin embargo en una embarcación, la rigidez es una variable que cambia mucho, ya que el casco se ve sometido a cargas variables por diferente profundidad, por temperaturas variables, momentos torsores y tensores, etc. Lo anterior permite inferir que estos sistemas muchas veces están sometidos a resonancia de tipo estructural.

Existen muchos otros problemas que se pueden presentar en este tipo de equipos, sin embargo los casos estudiados no alcanzan a permitir presenciar la mayoría de estos.

También se debe tener en cuenta que los equipos analizados no son idénticos en cuanto a su configuración, lo que también dificulta la comparación entre los mismos y de alguna manera predispone los resultados obtenidos. No es igual la respuesta de un ventilador a la de un motor Diesel y tampoco es igual la respuesta del mismo motor bajo diferentes condiciones.

## 2.2. ANALISIS DE CASOS EN EQUIPOS INDUSTRIALES

Igual como sucedió con los equipos en embarcaciones, los casos analizados en equipos industriales, presentan diferencias en cuanto al tipo de máquinas, procesos o condiciones de operación ver **Figura 11**.



**Figura 11. Diagrama distribución problemas en casos de equipos industriales**

Las dos gráficas anteriores, representan las condiciones detectadas en los casos analizados en máquinas industriales. En esta se observa que hay una distribución muy similar entre tres tipos de problemas los cuales se presentan por estar muy asociados al tipo de industria en el que se realizaron las pruebas. Todos estos equipos hacen parte de una planta minera de fabricación de cemento en la que el ambiente generalmente está muy contaminado con partículas en suspensión, lo que hace que los lubricantes se degraden y que se tengan muchos problemas por fallas de sellos. También es común que este tipo de plantas tengan procesos en los que se manejan materiales pesados y muy duros lo que trae consigo fuertes impactos que se reflejan en las vibraciones de los diferentes sistemas (molinos, trituradoras, etc.). Nuevamente vemos que la desalineación es uno de los principales problemas debido a diferentes causas.

## CONCLUSIONES

- Con respecto a los ensayos en embarcaciones y sus resultados, se debe tener en cuenta que no todas las normas de vibraciones son acertadas o adecuadas para establecer la condición de una máquina. También es necesario verificar que tipos de normas existen, cuales son los parámetros que rigen dicha norma y por último seleccionar la que mejor se adecue al requerimiento de la prueba.
- Ha sido importante que se haya incluido en este trabajo la parte práctica, es decir los casos reales ya que se encuentra información teórica sobre el tema pero técnicamente es poco lo que se consigue debido a la dificultad misma de hacer este tipo de pruebas y a la confidencialidad de esta información. Es recomendable que a partir de este compendio, se realicen más investigaciones prácticas en todo tipo de embarcaciones partiendo de la información aquí recolectada.
- Es muy importante que se utilicen las técnicas y programas de monitoreo de condición tanto en la industria como en las embarcaciones, cosa que actualmente no sucede. Conociendo las ventajas que estas técnicas ofrecen y el costo de estas tecnologías, resulta muy ventajoso económicamente hablando, ya que se pueden detectar fallas tempranas que pudieran causar un fallo repentino y muy costoso, como por ejemplo la avería de un motor Diesel en un buque.
- De acuerdo al estudio, se encontró que estadísticamente las principales causas de vibración en los casos analizados en embarcaciones están relacionadas con la dinámica de las máquinas. Los problemas más comunes son: Desalineación (34% de las veces), problemas de combustión y calibración de cilindros y válvulas (22%), resonancias estructurales (22%) y casos puntuales de soltura mecánica. En el caso de los equipos industriales estudiados estos presentaron la siguiente distribución: Desalineación (23%), Fricción o lubricación deficiente (22%), Impactos por tipo de trabajo o desajuste (22%), Rodamientos en mal estado (11%) y un caso aislado de falla de tipo eléctrica. Se debe resaltar que estos valores no constituyen una regla general sino que están determinados para los casos revisados en este trabajo.

- Se revisaron varias normas de vibraciones y se analizaron en cuanto a sus especificaciones, y se pudieron establecer procedimientos válidos y/o adecuados para cada caso basados en las normas seleccionadas.
- Las principales fuentes de vibración dependen del tipo de industria en la que se haga el estudio. Por ejemplo, en la industria del cemento y la minería, las principales fuentes de vibración son ventiladores, bandas transportadoras y molinos, para el caso de la industria del plástico, las fuentes son rodillos, motores y reductores de velocidad, en el caso particular de las embarcaciones, como las de los casos anexos, las principales fuentes de vibración son los motores Diesel y los ejes de propela. Es necesario entonces identificar antes que nada, a que tipo de industria se dirige el estudio.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda que a partir de este trabajo y los procedimientos aquí descritos, se realicen más estudios prácticos tanto en embarcaciones como en los diferentes tipos de industria, ya sea a través de los grupos de investigación existentes o a través de proyectos enfocados en casos particulares. Esto servirá para fortalecer los conocimientos acerca del tema y para aumentar la cantidad de información real y práctica disponible para consultar.
- Se debe evaluar la utilidad y la posibilidad de que a partir de este trabajo y de los próximos estudios, se elaboren uno o más folletos para consulta tanto teórica como práctica de quien lo requiera.
- Es importante que el programa de Ingeniería Mecánica adquiera equipos y programas capaces de realizar mediciones, almacenamiento y análisis de datos de vibración, con los cuales los estudiantes puedan poner en práctica los conceptos aquí señalados.

## BIBLIOGRAFIA

[1] AZIMA/DLI ENGINEERING. Introducción al Análisis de Vibraciones. Woburn MA, USA. 2008.

[2] GAVIRIA RINCON, Alonso. Análisis de Vibraciones Mecánicas ESPECTRUM LTDA. Ed.2010. 2010. 99p.

[3] ALVAREZ BARRIENTOS, Eduardo. Problemática de las Mediciones de Vibraciones a Bordo. Valdivia, Chile. 2006. 77p. Trabajo de Grado (Ingeniero naval). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.

[4] HENAO ROBLEDO, Fernando. Riesgos Físicos 1, Vibraciones y Presiones Anormales. Bogotá, Ecoe Editions, 2007. 202p.

[5] SKF GROUP, BEARINGS AND UNITS LUBRICATION SOLUTIONS, SERVICES MECHATRONICS. [www.skf.com](http://www.skf.com)

[6] SKF GROUP, BEARINGS AND UNITS LUBRICATION SOLUTIONS, SERVICES MECHATRONICS. Catalog Online. Internet: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&newlink=first&lang=en>

[7] ISO INTERNATIONAL STANDART ORGANIZATION. [www.iso.org](http://www.iso.org)