



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

## **DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS**

**Alberto De Jesús Castillo**

Asesorado por el MA. Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta

Guatemala, marzo de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

## **DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ALBERTO DE JESÚS CASTILLO**

ASESORADO POR EL MA. ING. FREDY MAURICIO MONROY PERALTA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Campos Paiz
EXAMINADOR	Ing. Roberto Guzmán Ortiz
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernandez
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

### DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, el 01 de julio del 2008.

f.

Alberto De Jesús Castillo



Guatemala 08 febrero 2010.

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

Estimado Ingeniero Julio Campos

Respetuosamente de dirijo a usted con el propósito de informarle que, luego de haber revisado el trabajo de graduación, titulado:

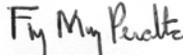
**DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS**

El cual fue presentado por el estudiante ALBERTO DE JESÚS CASTILLO y después de haber realizado las correcciones pertinentes, considero que cumple con los objetivos que le dieron origen.

Por lo tanto, hago de su conocimiento que, en mi opinión, dicho trabajo llena los requisitos necesarios para ser sometido a discusión en su examen General Público y recomiendo su aprobación para el efecto.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



---

Fredy Mauricio Monroy Peralta

Maestro en Ingeniería de Mantenimiento

Ingeniero Mecánico

Colegiado No. 4899

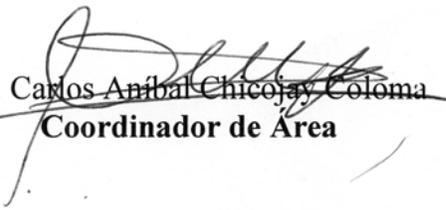
**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área de Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS del estudiante Alberto De Jesús Castillo, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Carlos Anibal Chicojay Coloma  
Coordinador de Área

Guatemala, febrero de 2010.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

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 de laboratorio, al Trabajo de Graduación titulado DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS, del estudiante Alberto De Jesús Castillo, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, marzo de 2010

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: **DEMOSTRACIÓN DE PROTOTIPO EN VIBRACIONES MECÁNICAS**, presentado por el estudiante universitario **Alberto De Jesús Castillo**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, marzo de 2010



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- DIOS:** Por ser la luz y guía en mi camino.
- MIS PADRES** Lesbia Marina y Roberto q.e.p.d.  
Por incentivar y apoyarme en la conclusión de mi carrera y principalmente por ser mi fuente de inspiración para cumplir estas metas.
- MIS ABUELOS** Gregoria González y Máximo Alberto q.e.p.d. Por sus sabios consejo.
- MI HIJA:** Sharon Isabel, con cariño.
- MI FAMILIA:** Por su apoyo durante mi desarrollo profesional, por lo que comparto esta meta lograda.
- AMIGOS:** Por la amistad y experiencias que hemos compartido.
- ASESOR:** Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta, por sus valiosos consejos, apoyo y orientación a lo largo de mi carrera, además por su colaboración en la elaboración del presente trabajo de graduación.
- FACULTAD DE INGENIERÍA** Por haberme formado académica en sus aulas.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>V</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>IX</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. TEORÍA DE VIBRACIONES Y AISLAMIENTO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Origen de las vibraciones.....	1
1.2. Concepto de las vibraciones.....	1
1.2.1. Período y frecuencia de la vibración.....	2
1.2.1.1. Movimiento armónico y vibración armónica.....	5
1.2.1.2. Movimiento periódico y vibración periódica.....	6
1.2.2. Desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración.....	6
1.3. Transmisibilidad (Tr).....	8
1.4. Tipos de vibraciones.....	10
1.4.1. Tipos de vibraciones en máquinas.....	10
1.4.2. Suma de vibraciones.....	11
1.4.3. Frecuencia natural, resonancia y velocidad crítica.....	12
1.4.4. La amplitud de la vibración.....	13

1.5. Sensores para tomar medidas de vibración.....	14
1.5.1. Introducción.....	14
1.5.2. Tipos de sensores y sus aplicaciones.....	14
1.5.2.1. Sensor de aceleración.....	15
1.5.2.2. Sensor de velocidad.....	17
1.5.2.3. Sensor de desplazamiento de proximidad sin contacto.....	19
1.6. Norma ISO 2372.....	22
1.6.1. Descripción de la norma ISO 2372.....	22
1.7. Aisladores para vibraciones.....	25
1.7.1. Introducción.....	25
1.7.2. Tipos y características de aisladores.....	26
1.7.3. Aisladores de elastómeros.....	26
<b>2. PROTOTIPOS.....</b>	<b>29</b>
2.1 Generalidades de formas y durezas de aisladores utilizados en pruebas.....	29
2.2. Motor con eje y tolva.....	30
2.2.1. Descripción del equipo.....	30
2.2.2. Pruebas con aisladores.....	31
2.2.3. Datos obtenidos de las pruebas.....	35

<b>3. EQUIPO PARA MEDIR VIBRACIONES.....</b>	<b>39</b>
3.1. Equipo VIBRALOG I.....	39
3.1.1. Características / ventajas.....	40
3.1.2. Accesorios.....	41
3.1.3. Opciones.....	42
3.2. Acelerómetro SA6200A.....	43
3.2.1. Características.....	44
3.2.2. Aplicaciones.....	44
3.3. Programa de mantenimiento PM4.....	44
3.3.1. Características / ventajas.....	44
3.3.2. Compatible con amplios software estándar.....	45
3.3.3. Especificar el diagnóstico apropiado.....	45
3.3.3.1. Obtener un diagnóstico inmediato.....	45
3.3.4. Fácil y uso intuitivo.....	46
 <b>CONCLUSIONES.....</b>	 <b>47</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>53</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1. Masa en posición neutral sin ninguna fuerza aplicada.....	2
2. Masa siendo estimulada por la aplicación de una fuerza.....	3
3. Masa liberada de la fuerza aplicada moviéndose hacia abajo.....	3
4. Trazo descrito por la masa sobre el papel.....	4
5. Desplazamiento y frecuencia en la onda de vibración.....	5
6. Movimiento periódico $T$ .....	6
7. Gráfica senoidal de velocidad y aceleración de la vibración.....	7
8. Gráfica de transmisibilidad.....	9
9. Superposición de ondas en vibraciones armónicas.....	11
10. Onda de vibración real.....	12
11. Sensor de aceleración con piezoeléctricos a compresión.....	16
12. Diagrama de un sensor de velocidad.....	18
13. Sensor de desplazamiento de no contacto montado en la carcasa de un cojinete.....	20
14. Sensor de desplazamiento por el método de corrientes Eddy.....	21
15. Formas del aislador con su respectivo grado de dureza.....	30
16. Partes del prototipo del motor con eje y tolva.....	31
17. Medición en la base del prototipo motor con eje y tolva.....	33
18. Medición en el cojinete del motor en prototipo motor con eje y tolva.....	34

19. Vistas del aislador en el prototipo motor con eje y tolva.....	35
20. Gráficas de dureza versus vibración de la tabla II.....	37
21. Recolector de datos con el acelerómetro.....	38
22. Maletín del equipo.....	40
23. Cable del acelerómetro.....	40
24. Base magnética.....	41
25. Cargador del equipo.....	41
26. Cable para PC RS 232.....	41
27. Acelerómetro SA6200A.....	42
28. Transferencias a otras aplicaciones con el software PM4.....	45

## TABLAS

I. Severidad de vibración.....	24
II. Datos obtenidos de mediciones en el prototipo motor con eje y tolva.....	36



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>T</b>	Período.
<b>cpm</b>	Ciclos por minuto.
<b>cps</b>	Ciclos por segundo.
<b>Hz</b>	Hertz, unidad de medida de la frecuencia.
<b>g</b>	Gravedad, unidad de medida 9.8 m/s <sup>2</sup> .
<b>Ft</b>	Módulo de la fuerza transmitida.
<b>Tr</b>	Transmisibilidad.
<b>fo</b>	Módulo de la fuerza excitadora.
<b>D</b>	Amplificación dinámica.
<b>m</b>	Masa.
<b>ξ</b>	Relación de amortiguamiento.
<b>ω</b>	Frecuencia de excitación.
<b>ω</b>	Frecuencia natural.
<b>RMS</b>	Valor efectivo (Raíz media cuadrada).
<b>A<sub>i</sub></b>	Amplitud de vibración en cada frecuencia.
<b>° F</b>	Grados Fahrenheit.
<b>°C</b>	Grados Celsius.
<b>rps</b>	Revoluciones por segundos.
<b>kW</b>	Kilovatios, unidad de medida para potencia eléctrica.
<b>RPM</b>	Revoluciones por minuto.



## GLOSARIO

<b>Vibraciones</b>	Movimiento oscilatorio rápido de un cuerpo.
<b>Período</b>	Cantidad de tiempo que le toma a la masa realizar un ciclo completo.
<b>Frecuencia</b>	Cantidad de ciclos que la masa puede realizar en una unidad de tiempo.
<b>Desplazamiento</b>	Es una medida del movimiento total de la masa, esto es, que tanto de desplaza la masa en su movimiento hacia arriba y abajo cuando está vibrando, desde su posición de reposo.
<b>Velocidad</b>	La velocidad de la vibración es la velocidad a la cual la masa se está moviendo o vibrando durante sus oscilaciones.
<b>Aceleración</b>	Cantidad de cambio en la velocidad a la cual se está moviendo la masa vibrante.
<b>Transmisibilidad</b>	Puede definirse como el cociente entre la amplitud de la fuerza transmitida por un sistema y la fuerza de excitación que se introduce en el mismo.

<b>Frecuencia Natural</b>	Se puede definir como la frecuencia de oscilación de un sistema, cuya amplitud decrece y presenta un grado de libertad.
<b>Resonancia</b>	Es un fenómeno que ocurre cuando una fuerza de frecuencia determinada es igual a la frecuencia natural.
<b>Aislador de vibración</b>	Base elástica instalada bajo un bloque de inercia que evita la transmisión de la vibración y el ruido a la estructura sustentante.
<b>Prototipo</b>	Referente a cualquier tipo de máquina en pruebas, o un objeto diseñado para una demostración de cualquier tipo.
<b>Dureza Shore</b>	Emplea un escleroscopio. Se deja caer un indentador en la superficie del material y se ve el rebote. Es adimensional, pero consta de varias escalas. A mayor rebote -> mayor dureza. Aplicable para control de calidad superficial. Es un método elástico, no de penetración como los otros.
<b>Software</b>	Programa que se utiliza en la PC para llevar un registro, control de las reparaciones y mantenimientos realizados a los equipos.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación fue realizado en la Escuela de Ingeniería Mecánica. Este consiste en la demostración de prototipos en vibraciones mecánicas.

La primera parte es sobre la teoría de vibraciones y aislamiento, este tema trata sobre los conceptos de vibraciones, los diferentes tipos de materiales de los aisladores elastoméricos utilizados para disminuir las vibraciones en las máquinas.

La segunda parte consiste en utilizar un prototipo para realizar pruebas en el comportamiento de la forma y dureza del aislador. Para definir el comportamiento del aislador tomaremos mediciones con el equipo vibralog I, con el fin de saber cuál es el valor de las vibraciones. Estos resultados serán presentados en gráficas para una mejor visualización.

En la tercera parte describiremos el equipo utilizado para medir las vibraciones, que consiste en un acelerómetro con punta imantada y el equipo para visualizar valores vibralog I. Las tomas de mediciones en el prototipo son directas y se despliegan en la pantalla del aparato en números que nos indican cuanto es la aceleración. También se puede utilizar el software PM4, este es un complemento para llevar un registro en el mantenimiento del equipo.

La variedad de aisladores que actualmente se encuentran en nuestro medio es grande, por lo que se puede ampliar el número de prácticas.

Con este trabajo se demuestra que aunque no tengamos manuales de referencia en las máquinas para disminuir las vibraciones, se puede combinar diferentes aisladores para alcanzar el aislamiento óptimo.

Es importante mencionar que este trabajo de graduación servirá como complemento al curso de vibraciones, porque actualmente no se realizan prácticas de laboratorio.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL:**

Demostrar por medio del prototipo, el comportamiento del aislador para la disminución de las vibraciones mecánicas.

### **ESPECÍFICOS:**

1. Conocer la importancia de los conceptos de vibraciones y aislamiento.
2. Investigar que aislador se comercializa en Guatemala.
3. Selección del equipo de medición de vibraciones.
4. Evaluar experimentalmente un aislador de vibración.
5. Determinar las aplicaciones del software PM4.
6. Determinar el prototipo adecuado para la selección del aislador.



## INTRODUCCIÓN

El trabajo fue estructurado de tal manera que se inicia con los conceptos de vibraciones y aisladores, luego se analizan las vibraciones en el prototipo con el aislador, por medio del equipo Vibralog I.

Se realizó la investigación bibliográfica minuciosa sobre principios de vibraciones y aisladores.

Los aisladores permiten que un equipo funcione como se pretende, alargar la vida operable; reducen el nivel de ruido, vibraciones y proporcionan mayor confort a los ocupantes de una planta industrial.

El propósito de este trabajo es demostrar que el aislador es capaz de disminuir considerablemente las vibraciones en el prototipo.

Para llevar a cabo las prácticas, se consideraron aspectos como colocar el prototipo en un lugar plano y sólido, como también colocar los aisladores correctamente para tener repetitividad en las mediciones.

# 1. TEORÍA DE VIBRACIONES Y AISLAMIENTO

## 1.1 Origen de las vibraciones

Todas las máquinas vibran. La forma en que éstas vibran depende del tipo de máquina, como está operando y los problemas que pueda tener. Una vibración excesiva significa que la máquina tiene problemas, si los dejamos sin corregir, finalmente estos problemas causarán que algunas partes de la máquina fallen. Una buena operación normalmente hará que la máquina dure mucho tiempo.

Pero ¿qué causa vibración? Debido a fallos de la maquinaria, pudiendo diferenciarse: fallos de utilización, funcionamiento o de mantenimiento en cualquier caso, generadores de fuerzas dinámicas, susceptibles de generar vibraciones. Los más frecuentes se producen por tolerancias de fabricación, desgaste de superficies, excentricidades, desequilibrio de elementos giratorios, cojinetes defectuosos, etc.

## 1.2 Concepto de las vibraciones

En cualquier diccionario de la lengua castellana encontraremos que vibración se define como “movimiento oscilatorio rápido de un cuerpo”. Para personas vinculadas con la industria de la vibración, la vibración es un movimiento pulsante que obliga a la máquina o partes de una máquina a moverse de su posición original de reposo y puede ser representada por la fórmula:

$$\text{Amplitud de Vibración} \propto \frac{\text{Fuerza Dinámica}}{\text{Resistencia Dinámica}}$$

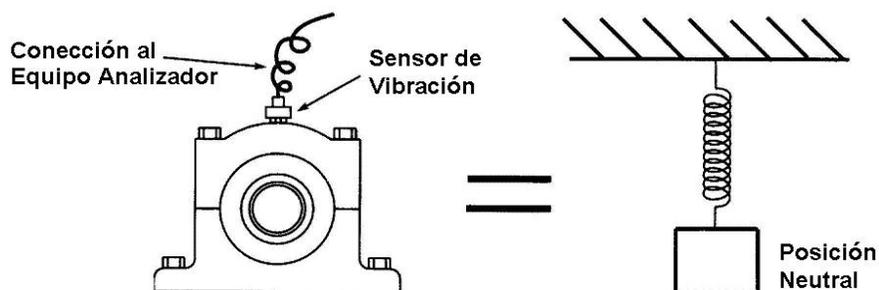
La ecuación anterior nos indica que la amplitud de la vibración varía proporcionalmente al cociente de la fuerza dinámica dividido por la resistencia dinámica, dicho de otra forma, una máquina con vibración aceptable puede tener un nivel alto si se le da una estructura de soporte o cimiento insuficiente.

Fundamentalmente, la vibración es la respuesta de un sistema a ciertas fuerzas internas o fuerzas externas aplicadas que estimulan al sistema. La vibración tiene tres parámetros importantes que deben ser medidos: amplitud, frecuencia y fase. Cada uno de estos parámetros se irán discutiendo más adelante.

### 1.2.1 Período y frecuencia de la vibración

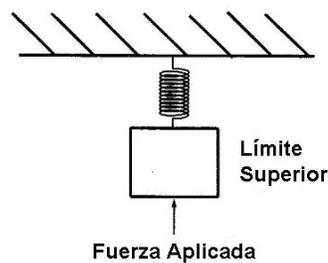
La vibración en una máquina puede ser representada por una masa suspendida de un resorte en espiral, como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 1.** Masa en posición neutral sin ninguna fuerza aplicada.



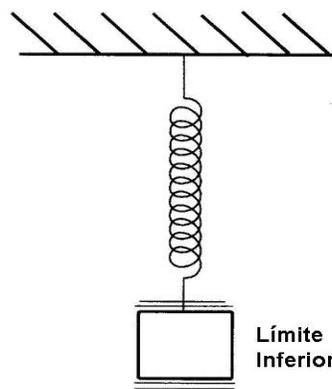
Mientras no exista una fuerza aplicada a la masa, ésta permanecerá suspendida en una posición neutral. Cuando una fuerza es aplicada a la masa (en dirección hacia arriba como se muestra en la figura 2), la masa se mueve hacia arriba y el resorte es comprimado por la fuerza.

**Figura 2.** Masa siendo estimulada por la aplicación de una fuerza.



Una vez que la masa alcanza el límite superior la fuerza es removida y la masa empezará a caer. En su movimiento hacia abajo, la masa pasará a través de la posición neutral y continuará cayendo hasta llegar a su límite inferior como se muestra en la figura 3.

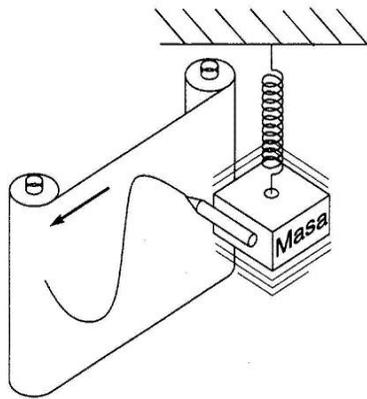
**Figura 3.** Masa liberada de la fuerza aplicada moviéndose hacia abajo.



Una vez que el límite inferior es alcanzado, la masa se detendrá y su movimiento cambiará de dirección, la masa pasa nuevamente por la posición neutral alcanzando el límite superior, nuevamente la masa se detiene y volverá a caer en dirección al límite inferior. La masa se mantendrá oscilando hacia arriba y abajo hasta que exista una fuerza externa que detenga su movimiento.

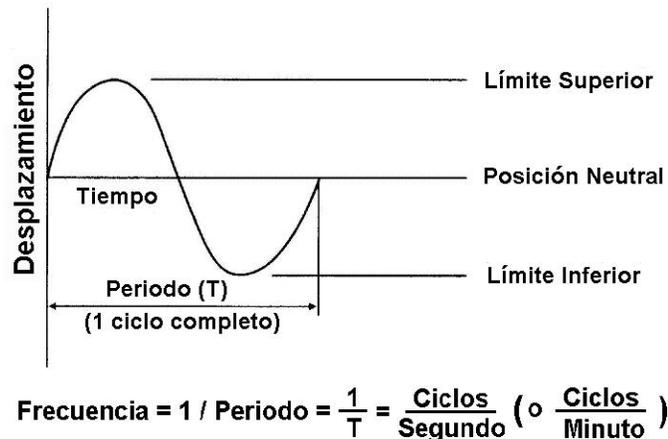
Si colocáramos un lápiz en la masa, su movimiento puede ser registrado en una tira de papel, que esté moviéndose a velocidad constante. El movimiento que se origina por la vibración de la masa es registrado en el papel, como se muestra en la figura 4.

**Figura 4.** Trazo descrito por la masa sobre el papel.



Cuando examinamos el trazo descrito por la masa suspendida del resorte en la figura 4, vemos que este trazo describe una gráfica senoidal. La figura 5 muestra esta onda senoidal y su nomenclatura.

**Figura 5.** Desplazamiento y frecuencia en la onda de vibración.



El **período** es la cantidad de tiempo que le toma a la masa realizar un ciclo completo, la **frecuencia** se refiere a la cantidad de ciclos que la masa puede realizar en una unidad de tiempo. Normalmente la frecuencia está expresada en unidades ciclos por minuto (cpm) o ciclos por segundo (cps) conocido también como Hertz, abreviado como Hz (1 Hz = 60 cpm).

### 1.2.1.1 Movimiento armónico y vibración armónica

El movimiento oscilatorio puede repetirse a si mismo regularmente, como la masa que se mencionó anteriormente o tener una considerable irregularidad, como un movimiento sísmico. Cuando el movimiento se repite a intervalos de tiempo T, se le llama periódico. El movimiento periódico más simple es el **movimiento armónico**. Las figuras 4 y 5, muestran un movimiento armónico descrito por la masa suspendida del resorte.

La **vibración armónica**, es también denominada vibración senoidal, y tiene una única frecuencia. Una vibración de esta clase puede ser originada por

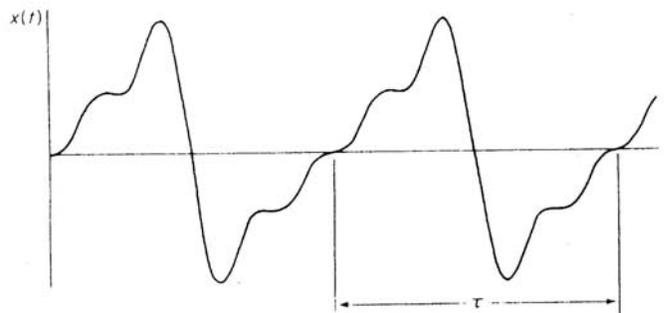
un desbalance en un rotor. Una vibración armónica puede ser completamente descrita o caracterizada por su amplitud, frecuencia y ángulo de fase.

### 1.2.1.2 Movimiento periódico y vibración periódica

Es frecuente que se presenten vibraciones de diferentes frecuencias simultáneamente. Tales vibraciones se manifiestan en una forma de onda compleja que se repite **periódicamente**, como el caso de la figura 6.

De modo que, la característica básica de la vibración periódica es que se repite a sí misma luego de un intervalo de tiempo específico o período  $T$ .

**Figura 6.** Movimiento periódico  $T$ .

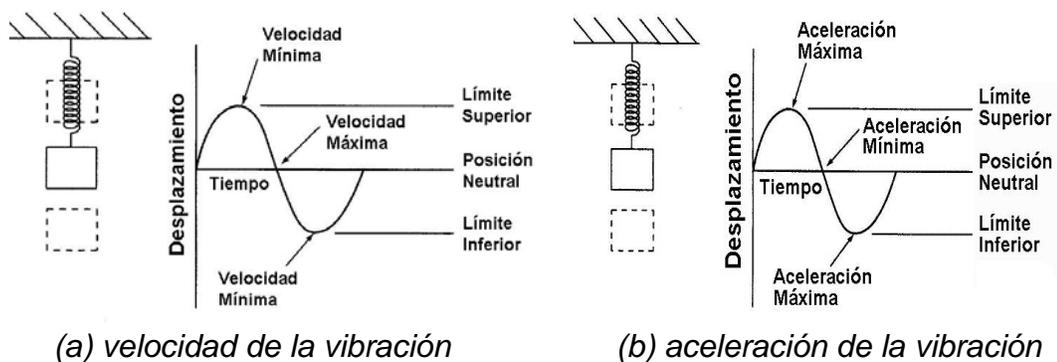


### 1.2.2 Desplazamiento, velocidad y aceleración de la vibración

En el campo de las vibraciones, las magnitudes que comúnmente son usadas para medir las vibraciones mecánicas son: desplazamiento, velocidad y aceleración.

- **Desplazamiento:** El desplazamiento es una medida del movimiento total de la masa, esto es, que tanto se desplaza la masa en su movimiento hacia arriba y abajo cuando está vibrando, desde su posición de reposo. El desplazamiento de la masa es expresada en micras (1 micra = 0.001 mm).
- **Velocidad:** La velocidad de la vibración es la velocidad a la cual la masa se está moviendo o vibrando durante sus oscilaciones. La velocidad de la masa es cero en el límite superior e inferior del movimiento de la masa. Luego de pasar por éstos puntos, la velocidad empieza a incrementarse hasta alcanzar su máximo valor en el punto que corresponde a la posición neutral y luego comienza a decrecer hasta volverse cero en el límite opuesto (ver figura 7a). La velocidad es expresada en milímetros por segundo (mm/s).

**Figura 7.** Gráfica senoidal de velocidad y aceleración de la vibración.



- **Aceleración:** La aceleración es definida como la cantidad de cambio en la velocidad a la cual se está moviendo la masa vibrante. La aceleración es máxima cuando la velocidad es mínima (límites superior e inferior) y cero cuando la velocidad es máxima en la posición neutral (ver figura 7b). En el

campo de las vibraciones, la aceleración es comúnmente expresada en unidades de aceleración de la gravedad, g ( $1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$ ).

### 1.3 Transmisibilidad ( $T_r$ )

Puede definirse como el cociente entre la amplitud de la fuerza transmitida por un sistema y la fuerza de excitación que se introduce en el mismo.

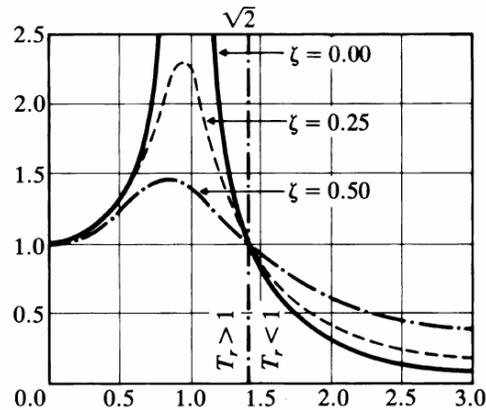
Al analizar el problema de la transmisión de vibraciones de un sistema mecánico a su base o soporte, se define el concepto de transmisibilidad como la relación entre el módulo de la fuerza transmitida al soporte  $F_t$  y el módulo de la fuerza excitadora  $f_0$ . La Amplificación Dinámica (D).

Al analizar el problema de la transmisión de vibraciones de una base o soporte a su sistema mecánico, se define el concepto de transmisibilidad como la relación entre la amplitud del desplazamiento del sistema de masa  $m$  y la del desplazamiento de la base. La expresión correspondiente en este caso para  $T_r$  sigue siendo la misma.

$$T_r = \frac{F_t}{f_0} = D\sqrt{1 + (2\xi\beta)^2}$$

En un caso como otro, la transmisibilidad tenga la misma expresión, vea la figura 8.

**Figura 8.** Gráfica de Transmisibilidad.



Para poder decir que se ha conseguido el **aislamiento** es preciso que la transmisibilidad sea  $<1$ . Puede observarse que ello obliga a que la frecuencia de excitación  $\omega$  sea, por lo menos,  $\sqrt{2}$  veces la frecuencia natural del sistema  $\omega$ .

Para los valores de  $\beta = \omega/\omega$  próximos a la unidad, el sistema actúa no como un aislante, sino como un amplificador, transmitiendo esfuerzos o desplazamientos muy superiores a los originales.

Para una frecuencia de excitación dada  $\omega$ , puede reducirse el valor de transmisibilidad disminuyendo la frecuencia natural  $\omega$  del sistema (lo que equivale a aumentar la  $\beta$ ).

Por lo que al amortiguamiento se refiere, la transmisibilidad también puede reducirse disminuyendo la relación de amortiguamiento ( $\xi$ ) ya que si  $\beta$  es  $> \sqrt{2}$ , la  $T_r$  disminuye al hacerlo  $\xi$ .

Sin embargo, este planteamiento resulta perjudicial si el sistema se ve obligado a pasar por la resonancia, por ejemplo durante situaciones de

arranque y parada. Por ello, en cualquier caso, siempre será necesario un cierto amortiguamiento que evite amplitudes de vibración infinitamente grandes en el paso por la resonancia.

## **1.4 Tipos de vibraciones**

Se entiende por vibraciones mecánicas, las oscilaciones perceptibles y medibles en la superficie de las máquinas, elementos constructivos, sus carcasas, etc. También es llamado ocasionalmente, ruido estructural ya que se propaga exclusivamente en cuerpos sólidos, en contraste el ruido aéreo se transmite por un medio gaseoso como el aire.

Las vibraciones mecánicas solo pueden ocurrir técnicamente cuando las masas se mueven. Estas masas pueden ser partes rotativas u oscilantes de las máquinas, así como líquidos y gases en contacto con cuerpos sólidos.

### **1.4.1 Tipos de vibraciones en máquinas**

Las vibraciones generadas en máquinas son principalmente rotativas y reciprocantes. A menudo tiende a confundirse los tipos de vibraciones en las máquinas, con las fuerzas que pudieran actuar como excitador de las vibraciones, tal como es el caso de un desbalance, que genera fuerzas centrífugas causando que el rotor y su eje vibren.

Las vibraciones rotativas son las que se generan en aquellas máquinas cuyas partes o elementos móviles rotan alrededor de un eje, tal es el caso de los ventiladores, motores eléctricos, etc.

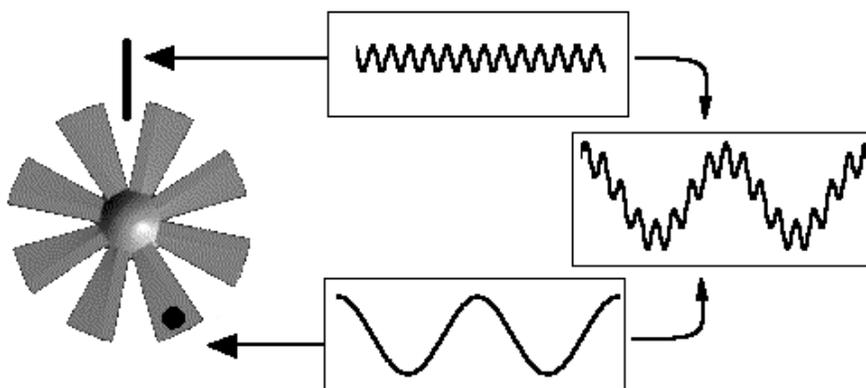
Las vibraciones recíprocas se generan básicamente en dos tipos de máquinas: los motores de combustión interna y los compresores de émbolo.

Esas vibraciones y esfuerzos son transmitidos por los elementos rodantes de los rodamientos o película de aceite de los cojinetes de deslizamiento a las carcasas, llegando hasta las carcasas de la máquina.

### 1.4.2 Suma de vibraciones

En una máquina, es de esperarse que se presenten dos o más vibraciones armónicas de diferentes frecuencias ocurriendo al mismo tiempo. Estas ondas al ocurrir al mismo tiempo, se superponen y el resultado es una suma de vibraciones, en donde la vibración resultante aún será periódica porque se repite a intervalos regulares de tiempo, como puede verse en la figura 9.

**Figura 9.** Superposición de ondas en vibraciones armónicas.

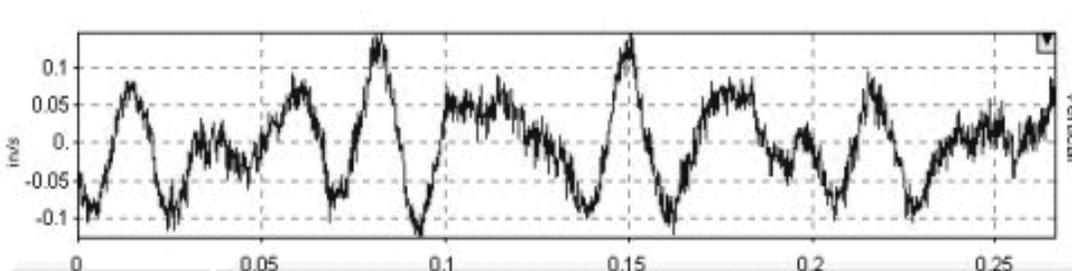


Esta figura muestra el ejemplo de un ventilador que genera dos ondas de vibración armónica, una generada por el choque de cada una de las aspas con

un objeto, y una segunda generada por una masa agregada a una de las aspas generando un ligero desbalance.

Al superponer las ondas, resulta en una suma de vibraciones cuya onda se muestra en el cuadro del centro que indican las flechas. En la realidad, una máquina tendrá un número bastante grande de fuentes de vibración, tales como los apoyos, rodamientos, etc., generando éstos elementos vibraciones armónicas a diferentes frecuencias, pudiendo generarse ondas de vibración tan complejas como las de la figura 10.

**Figura 10.** Onda de vibración real.



### 1.4.3 Frecuencia natural, resonancia y velocidad crítica

Los términos frecuencia natural, resonancia y velocidad crítica, aunque realmente no son sinónimos, en vibraciones suelen emplearse para describir el mismo concepto. Para tratar de dar una definición básica, primero deben verse los siguientes ejemplos.

El sistema oscilatorio más simple, del cual hemos hablado anteriormente, consta en una masa suspendida de un resorte. Este sistema posee un grado de libertad puesto que su movimiento queda descrito por una coordenada

singular, como  $x$ . Cuando se le pone en movimiento, la oscilación tendrá lugar a la frecuencia natural, que es una propiedad del sistema.

En una máquina, usualmente la vibración ocurre debido a la presencia de una o varias fuerzas externas que actúan como excitadores, siendo la vibración resultante una vibración forzada. Cuando la excitación es oscilatoria, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación. Si está coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se produce una situación de resonancia y ocurren vibraciones con amplitudes peligrosamente grandes.

La expresión velocidad crítica se usa precisamente cuando el rotor de la máquina es quien proporciona las condiciones para que ocurra una condición de resonancia, al encontrarse este girando a una frecuencia de giro equivalente con alguna de las frecuencias naturales. En resumen tenemos:

- **Frecuencia natural:** Se puede definir como la frecuencia de oscilación de un sistema, cuya amplitud decrece y presenta un grado de libertad.
- **Resonancia:** Es un fenómeno que ocurre cuando una fuerza de frecuencia determinada es igual a la frecuencia natural. Se identifica típicamente por un substancial incremento en la amplitud y cambio en la fase de la vibración.
- **Velocidad crítica:** Cualquier velocidad de rotación la cual está asociada con alta amplitud de vibración.

#### 1.4.4 La amplitud de la vibración

La amplitud en la vibración es la medida de la magnitud del movimiento dinámico o vibración que ocurre en la máquina o partes de la misma. En las

figuras 5 y 6 se muestran una onda de vibración armónica y vibración periódica, respectivamente, y en ambos casos, puede tomarse la amplitud como la distancia que existe de la cresta más positiva a la cresta más negativa. La amplitud se puede expresar de varias formas, como se verá a continuación.

## **1.5 Sensores para tomar medidas de vibración**

### **1.5.1 Introducción**

Para medir el nivel de vibración absoluto, es necesario un elemento convertidor, que transforme la onda de vibración que se está generando en la máquina, a otro tipo o forma de señal, por ejemplo mecánica, eléctrica, etc.

Estos elementos convertidores son los sensores de vibración. La vibración será transmitida al sensor cuando este montado en la máquina para luego convertir ese movimiento en una señal eléctrica y enviarla al equipo analizador. Dicha señal eléctrica será proporcional al nivel de vibración.

Es importante hacer notar que la información sobre los sensores de vibración que se mencionan en este trabajo, es información general del diseño y funcionamiento. Las características específicas de cada uno de estos sensores pueden variar de acuerdo con su fabricante.

### **1.5.2 Tipos de sensores y sus aplicaciones**

Usualmente, encontraremos 3 tipos de sensores para medir vibración: sensor de aceleración, sensor de velocidad y sensor de desplazamiento.

Cada uno de estos sensores tienen sus propias aplicaciones, las cuales justifican su uso para el monitoreo de vibraciones. Es importante comprender las aplicaciones, ya que esto hará que el analista de vibraciones obtenga ventaja de los datos e información que con ellos puede obtener.

### **1.5.2.1 Sensor de aceleración**

El sensor de aceleración o acelerómetro, es un sensor que proporciona directamente la medida de la aceleración de la vibración.

**Principio de operación:** La operación de un acelerómetro se basa en el principio masa-resorte. En este caso, la frecuencia natural del sistema masa-resorte se sintoniza muy alta, para asegurar que el acelerómetro funcione a frecuencias por debajo de su resonancia.

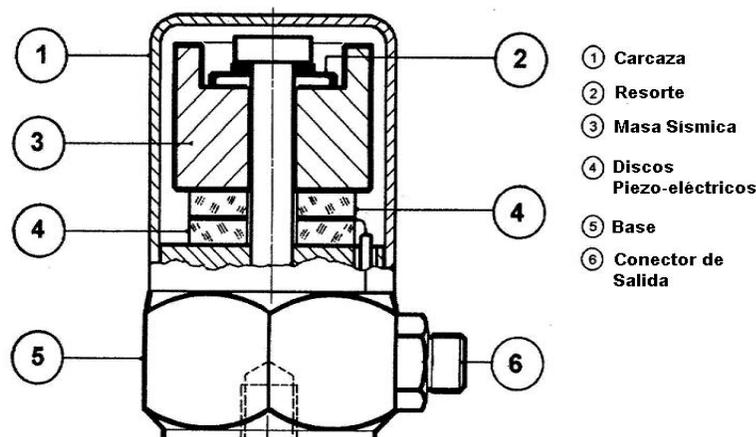
Para la conversión del movimiento mecánico de la vibración a una señal eléctrica se emplea el efecto piezoeléctrico del cuarzo. Ese efecto es la existencia de una carga eléctrica en una de las caras del cristal que está sometido a una tensión o compresión. Esa carga eléctrica es causada por el desplazamiento polar de moléculas en el cristal.

La figura 11, muestra el diseño de un sensor de aceleración por principio de compresión. En ese tipo de sensor se disponen discos piezoeléctricos cerámicos precargados por una masa sísmica. Con esta construcción los discos constituyen el resorte del sistema masa-resorte.

Si el sistema se somete a vibración, la masa sísmica impone una fuerza alternativa en los discos, originando una carga eléctrica alternativa como

resultado del efecto piezoeléctrico. Esa carga es proporcional a la aceleración de la vibración, y se convierte en tensión mediante un amplificador de carga.

**Figura 11.** Sensor de aceleración con piezoeléctricos a compresión.



Como resultado de la técnica constructiva se pueden obtener frecuencias de resonancia muy altas. Normalmente los acelerómetros para aplicaciones industriales tienen como límite inferior y superior frecuencias de 1 Hz a 20 kHz.

**Aplicaciones:** Normalmente, los acelerómetros son usados para medir vibraciones en máquinas cuyos ejes son soportados por rodamientos. La causa de esto es que los rodamientos transfieren de buena manera la vibración del eje a la carcasa, sin embargo, los acelerómetros pueden trabajar también muy bien en máquinas cuyos ejes son soportados por cojinetes de deslizamiento debido a los avances hechos en la sensibilidad de los mismos.

Los acelerómetros son los sensores de mayor uso común en los programas de monitoreo de vibración, debido a las ventajas siguientes:

- Construcción robusta.
- Insensibles a campos magnéticos.
- No son unidireccionales.
- Reducidas dimensiones.
- Carcasa de material inoxidable sellada herméticamente.
- Costo menor en comparación con sensores de velocidad o desplazamiento.
- Amplio rango de frecuencias.

Sin embargo, los acelerómetros tienen también ciertas desventajas en relación con los sensores de velocidad.

- Sensor pasivo, requiere potencia externa para operar.
- Baja sensibilidad a bajas frecuencias.

### **1.5.2.2 Sensor de velocidad**

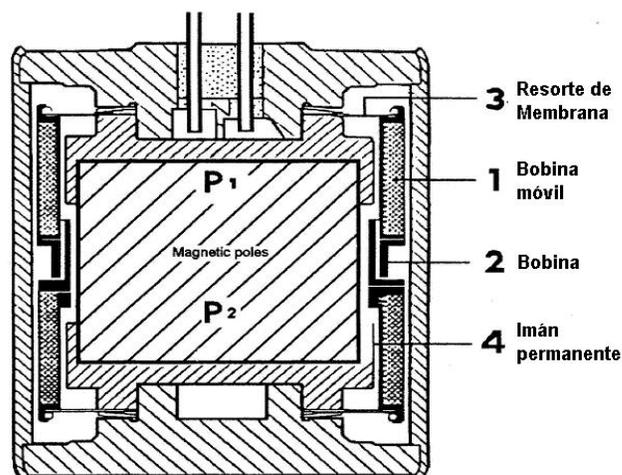
Los sensores de velocidad o velocímetros, proporcionan directamente la velocidad de la vibración en la máquina que se está midiendo.

Pero los velocímetros, están siendo reemplazados por los acelerómetros debido a su amplia gama de aplicaciones, sin embargo los velocímetros cuentan con ventajas importantes, no necesitan una fuente de alimentación, además de proporcionar directamente la velocidad de vibración, en tanto que la señal proveniente de un acelerómetro necesita ser integrada para dar una lectura de velocidad.

**Principio de operación:** Los sensores de velocidad operan de acuerdo al principio electrodinámico. Se suspende una bobina, libre de fricciones, mediante

dos resortes o muelles de membrana que forman, junto a la bobina, un sistema masa-resorte. Al estar suspendida en un campo magnético permanente, la tensión que se genere será proporcional a la velocidad de vibración.

**Figura 12.** Diagrama de un sensor de velocidad.



Cuando el sensor es colocado o unido a la máquina vibrando, la bobina permanece estacionaria en el espacio (a cualquier frecuencia por encima de la frecuencia natural de su sistema masa-resorte), mientras el magneto vibra al compás de la máquina.

El corte del campo magnético producido por las bobinas genera una tensión inducida, la cual es proporcional a la velocidad, sin que el sensor requiera fuente de potencia externa alguna. Por tal razón, un sensor de velocidad de vibración es conocido como un sensor activo.

**Aplicaciones:** La aplicación principal de los sensores de velocidad se da cuando existe la necesidad de medir la vibración en máquinas de baja velocidad

rotacional, debido a su capacidad de elevada sensibilidad a bajas frecuencias, donde además los sensores de aceleración no son recomendados.

Por otro lado, los velocímetros normalmente se emplean para tomar medidas de vibración en máquinas con ejes soportados por rodamientos, al igual que los acelerómetros, pero se ven limitados por la velocidad de respuesta, sobre todo a altas frecuencias y su limitado rango de frecuencias.

Entre las características que se constituyen como ventajas para los sensores de velocidad, tenemos:

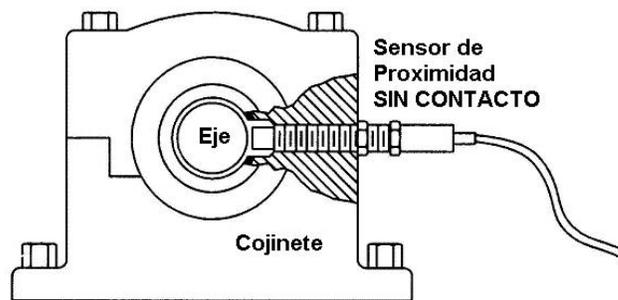
- Construcción robusta.
  - Elevada sensibilidad aún a bajas frecuencias.
  - Fuerte señal de salida con baja resistencia interna.
  - Sensor activo, no requiere fuente de alimentación.
  - Impermeable, estanco al aceite y al vacío.
  - Resistencia a productos químicos (carcasa de acero inoxidable).
- Estos sensores, tienen ciertas desventajas en el campo de aplicación.
- Frecuencia superior limitada (aproximadamente 2 kHz).
  - Sensible a campos magnéticos fuertes.

### **1.5.2.3 Sensor de desplazamiento de proximidad sin contacto**

El sensor de desplazamiento sin contacto, llamado también, sensor de proximidad sin contacto, normalmente es empleado para medir la vibración relativa de los ejes en las máquinas con respecto a sus carcasas, como se ve

en la figura 13, donde el sensor va unido a la carcasa del cojinete o de la máquina dejando una pequeña holgura entre el sensor y el eje de la máquina.

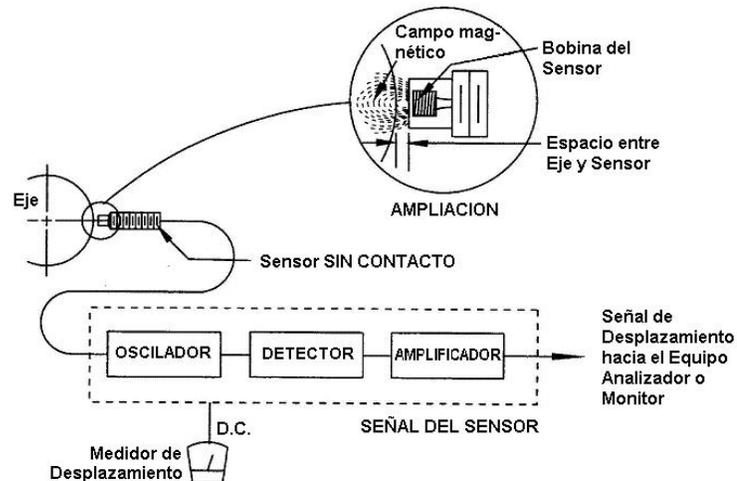
**Figura 13.** Sensor de desplazamiento de no contacto montado en la carcasa de un cojinete.



**Principio de operación:** En la figura 14, se ve un diagrama esquemático de un sensor de proximidad sin contacto por el método de corrientes Eddy. Este sensor no genera un voltaje o carga eléctrica como respuesta a la vibración, que es lo que ocurre en los sensores de velocidad y aceleración, en su lugar, un sensor de desplazamiento sin contacto necesita de un circuito electrónico (externo o interno) para generar una señal de corriente alterna de alta frecuencia y detectar las oscilaciones en la señal de corriente alterna causada por la vibración del eje.

La corriente alterna de alta frecuencia alimenta a una pequeña bobina que se encuentra en la punta del sensor, cercana al eje, generando esta bobina un campo magnético.

**Figura 14.** Sensor de desplazamiento por el método de corrientes Eddy.



La energía de éste campo magnético será absorbida parcialmente por el eje de la máquina, y la cantidad absorbida dependerá de la cercanía al eje, resultando en una disminución de la fuerza del campo magnético medido en el oscilador, el cual además transforma la corriente alterna en una señal de corriente directa que por consiguiente, será proporcional al espacio que existe entre el sensor y el eje de la máquina.

Los sensores de desplazamiento sin contacto para medir las vibraciones relativas en ejes de una máquina en operación, deben llenar algunos requerimientos especiales, tales como: medir el valor de vibración sin contacto; no ser influidos por aceite u otro medio entre el sensor y la superficie medida; rango de medida lineal amplio, con elevada resolución; instalación, ajuste y calibración simples.

Además del sensor con método a corrientes Eddy, existen otros tipos disponibles (capacitivos, inductivos y corrientes de Foucault).

**Aplicaciones:** En el campo de las vibraciones, su principal aplicación es la medida de las vibraciones relativas en ejes, ya que también son empleados para medir la posición axial, radial del eje y medir el diferencial de expansión entre la carcasa y el rotor.

Las vibraciones relativas de ejes son los movimientos rápidos en el eje del rotor en relación a las carcasas del cojinete. Normalmente esas vibraciones se miden en máquinas cuyos rotores empleen cojinetes de deslizamiento.

## **1.6 Norma ISO 2372**

### **1.6.1 Descripción de la norma ISO 2372**

ISO 2372-1974. “Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre (10 y 200) rps. 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:

- 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 frecuencias, puede resultar

muy útil definir siempre una frecuencia ISO de 10 Hz a 1KHz, a tener una referencia para posibles informes o reclamos.

El análisis de este rango de frecuencias permite incluir, para estas velocidades de operación, las causas 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.

Según 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 eléctricos hasta 15 kW.
- CLASE II. Máquinas de tamaño medio. Por ejemplo, motores eléctricos de (15a 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).

El criterio de severidad en vibración admisible para cada una de las clases de máquinas mencionadas, es el reflejado en la tabla I.

**Tabla I.** Severidad de vibración.

**RANGOS DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN PARA MÁQUINAS PEQUEÑAS (CLASE I), MÁQUINAS DE TAMAÑO MEDIANO (CLASE II), GRANDES MÁQUINAS (CLASE III), Y TURBOMÁQUINAS (CLASE IV).**

RANGO DE SEVERIDAD DE VIBRACIÓN		CLASES DE MÁQUINAS			
VELOCIDAD RMS (mm/s)	VELOCIDAD (mm/s)	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0.28	0.3960	A	A	A	A
0.45	0.6364				
0.71	1.0041				
1.12	1.5839	B	B	B	B
1.8	2.5456				
2.8	3.9598	C	C	C	C
4.5	6.3640				
7.1	10.0409	D	D	D	D
11.2	15.8392				
18	25.4558				
28	39.5980				
45	63.6396				
71	100.4092				
<b>FSM para las máquinas</b>		1.57020	1	0.62608	0.39625
<b>FSN para los niveles (1/FSM)</b>		0.63686	1	1.59725	2.52364

Nota:

FSM: factor de servicio para las clases de máquinas.

FSN: factor de servicio para los niveles.

Como puede observarse en la tabla I, la severidad de vibración se divide en cuatro rangos: A-Buena, B-Satisfactoria, C-Insatisfactoria o D-Inaceptable. 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 (RMS) de vibración entre (600 y 60,000) ciclos por minuto (cpm), localizar en la tabla la

zona en la que se encuentra. La clasificación de la máquina se llevará a cabo en base a una serie de consideraciones:

- El tipo y tamaño de la máquina.
- El tipo de servicio que la misma va a proporcionar o proporciona.
- El sistema de soporte de la máquina.
- El efecto de la vibración en la máquina sobre el entorno de la misma. (Instrumentación, equipos adyacentes, personas)

En general, se suele considerar que la severidad de vibración de la máquina se mantiene invariable si presenta siempre el mismo valor RMS de amplitud de velocidad de vibración en el rango de frecuencias (10 – 1,000) Hz.

## **1.7 Aisladores para vibraciones**

### **1.7.1 Introducción**

La primera parte de este capítulo está dedicado a los distintos tipos de vibraciones y aisladores de vibración, así como sus características. El siguiente tema considera las propiedades de las combinaciones de aisladores en serie y en paralelo. La discusión se presenta en la selección, instalación y la especificación de los aisladores. Entonces se tiene en cuenta a los aisladores que se combinan con las masas y amortiguamiento, la formación de un sistema de control para vibración, por ejemplo, permitir que un equipo funcione como se pretende, a menudo alargar su vida operable; proteger el equipo sensible montado sobre una estructura con daños como consecuencia de golpes y vibraciones que ocurren en la estructura; reducir el nivel de ruido y vibraciones cerca del equipo o proporcionar un mayor confort a los ocupantes de la planta industrial.

### **1.7.2 Tipos y características de aisladores**

Los aisladores están comercialmente disponibles en diferentes materiales resistentes e innumerables formas y tamaños, con características muy diversas. En los Estados Unidos de Norteamérica hay más de 100 fabricantes de aislamiento elastomérico, cada uno ofrece una amplia gama de modelos en una gran variedad de compuestos sintéticos de elastómeros y cauchos naturales. El número sería significativamente mayor si los fabricantes de plástico, metal, neumáticos y otros materiales aisladores estuvieran incluidos. Las propiedades de un aislador dado dependen no sólo en el material de que se fabrica, sino también en su configuración y construcción en general con respecto a los materiales estructurales utilizados en el cuerpo del aislador. Los datos sobre estos parámetros se pueden encontrar en los catálogos de los diferentes fabricantes.

### **1.7.3 Aisladores de elastómeros**

Un elastómero es un caucho natural o cualquier polímero con propiedades elásticas similares a las de caucho natural. Estos materiales son ampliamente utilizados en los aisladores, ya que pueden ser convenientemente moldeado en muchas formas y seleccionadas para proporcionar una amplia gama de rigideces, tienen más amortiguación que los resortes de metal, por lo general requieren un mínimo de espacio y peso, pueden haber combinaciones entre elastómero y metal adaptados para la inserción en estructuras. El tipo más común de aislante se fabrica de elastómero. Estos aisladores son capaces de sostener grandes deformaciones y luego regresar a su estado original aproximado con prácticamente ningún daño o cambio de forma. Los aisladores elastoméricos son superiores a otros tipos de aisladores, por una cantidad dada de elasticidad, la capacidad en deformación, la energía y la disipación,

requieren menos espacio y menos peso, también, pueden ser moldeados en muchas configuraciones por lo general a un menor costo que otros tipos de aisladores.

Los elastómeros tienen extensibilidad excepcional y deformabilidad: Pueden ser utilizados en elongaciones de hasta 300 por ciento, con elongaciones finales en algunos elastómeros de alrededor de 1,000 por ciento. Pueden ser deformados entre (1,000 a 1,500) psi (0.145 a 0.218) Pa o más, antes de su límite elástico sea alcanzado. Tienen gran capacidad para el almacenamiento de la energía, les permite tolerar la tensión. Tras la liberación de la tensión, hay una recuperación casi total de la deformación.

La amortiguación inherente de los elastómeros a menudo es útil para prevenir la amplitud excesiva de la vibración en la resonancia, la amplitud es mucho menor que si el metal se utilizara en muelles helicoidales. De los diferentes elastómeros, el caucho natural, probablemente representa la más favorable combinación en propiedades mecánicas, tales como la mínima y máxima resistencia a la fuerza de tracción y elongación máxima hacia la falla. Su utilidad disminuye por su limitada resistencia al deterioro bajo la influencia de los hidrocarburos, ozono y alta temperatura en el ambiente.

El Neopreno y Buna N (nitrilo) presentan una resistencia superior a hidrocarburos y ozono, Buna N es particularmente satisfactoria para las aplicaciones en temperaturas relativamente altas. Buna S es generalmente buen caucho sintético para uso en aisladores de vibración. La goma de silicona es un elastómero costoso. Sus propiedades son muy estables, y proporciona un aislamiento eficaz en un rango muy amplio de temperatura: (-65 a +350) °F o (-54 a 177) °C. En comparación, el neopreno es limitado en el uso en un intervalo de aproximadamente (-40 a +200) °F o (-40 a 93) °C. El límite superior de

temperatura depende de las propiedades del compuesto en particular, el grado de deterioro que se permite como resultado de la exposición continua a altas temperaturas, y la duración de la exposición. Para silicona, una temperatura sensiblemente superior a 300 ° F (149 ° C) es admisible para varias horas. La capacidad excepcional en los elastómeros de silicona para soportar condiciones extremas de temperatura se compensa en parte por su baja fuerza, resistencia al desgarre y resistencia a la abrasión.

Los aisladores fabricados de elastómeros son complejos en el comportamiento debido a la viscoelásticidad de la naturaleza (relación entre un sólido y un líquido) de los elastómeros en el rendimiento, debido a su límite elástico indefinido, y debido a sus propiedades físicas varían con el tiempo, temperatura y medio ambiente. Por ejemplo, el caucho es un material muy incompresible (que tiene un coeficiente de Poisson de aproximadamente 0.5). Así, la rigidez de un resorte de goma cuando se comprime, depende, en gran medida, del área de superficie disponible para la expansión lateral. En cambio, la rigidez de un aislador de goma en corte es independiente de la forma de la goma. Como regla empírica, puede suponer que la rigidez de compresión mínima probable en un aislador de goma es cinco veces la rigidez de corte. La rigidez a la compresión máxima puede ser de varias veces mayor si la expansión lateral de la goma es limitada.

## **2. PROTOTIPO**

### **2.1 Generalidades de forma y dureza del aislador utilizado en prueba**

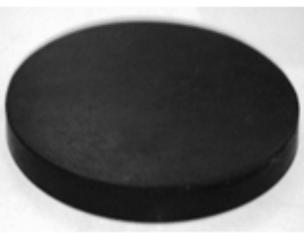
En el capítulo anterior describimos los amortiguadores de elastómero disipadores de vibración.

El amortiguador que utilizaremos para la experimentación está fabricado de nitrilo en un grado de dureza 60 grados.

Para realizar la prueba, debemos de corroborar que estamos colocando correctamente los cuatro amortiguadores, esto evitará mediciones erróneas.

A continuación describo el aislador que utilizaré en la práctica en la figura 15, tiene forma de cilindro con una pequeña altura (forma de moneda), este tiene una dureza de 60 grados en la escala shore. Tiene una altura de 0.3 cm y un diámetro externo de 4.6 cm.

**Figura 15.** Formas del aislador con su respectivo grado de dureza.

#	Forma del Aislador	Dureza (Shore)
1	Sin aislador	0
2		60

## 2.2 Motor con eje y tolva

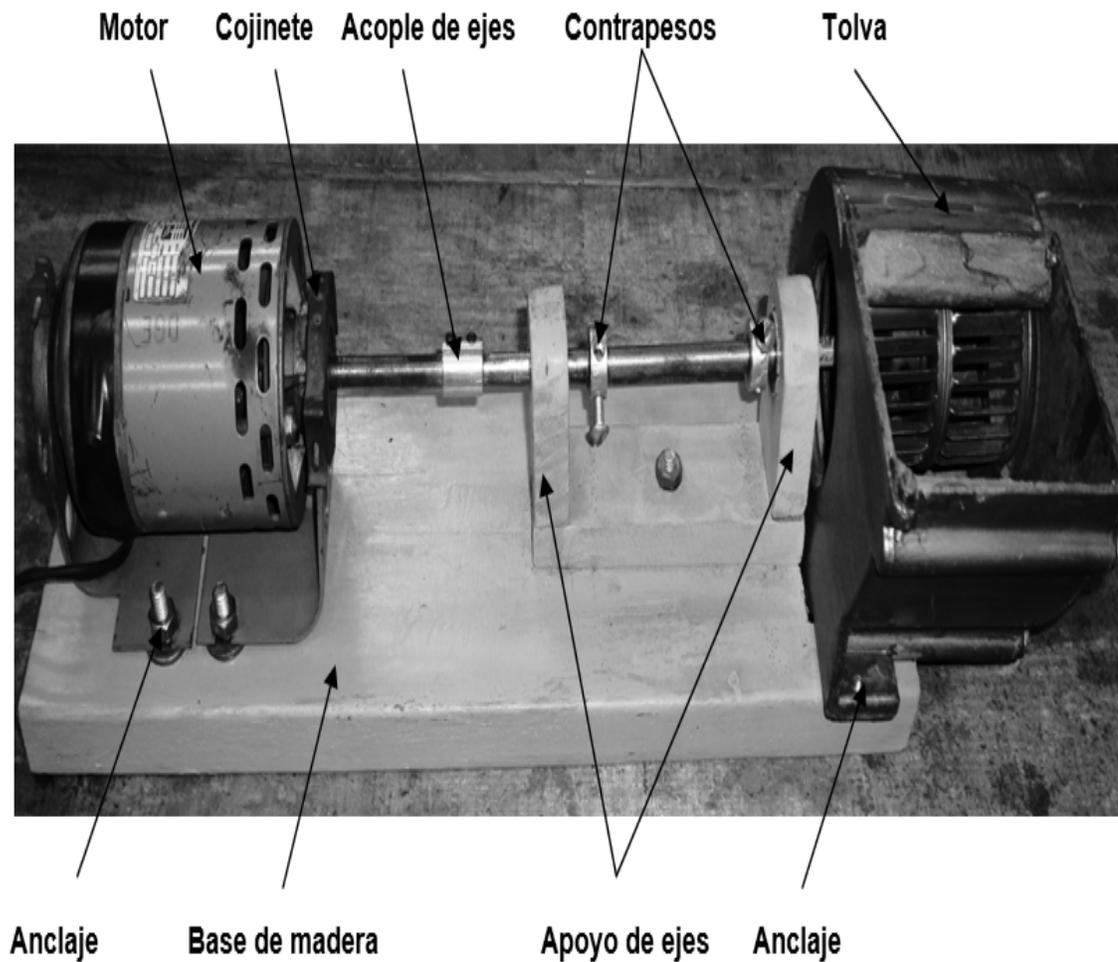
### 2.2.1 Descripción del prototipo

El prototipo consta de una base de madera sobre la cual se monta un motor de 156 vatios y un voltaje de 120 V, unido a la tolva por medio de un eje.

A continuación se hace referencia a las partes del prototipo, vea la figura 16.

- El motor monofásico y tolva van anclados a la base por pernos.
- El motor y tolva se acoplan por medio de un eje.
- El eje descansa por dos bases de madera.
- El eje tiene dos contrapesos.
- El eje del motor y tolva se unen por medio de un acople.

**Figura 16.** Partes del prototipo del motor con eje y tolva.



### **2.2.2 Pruebas con aisladores**

En este prototipo la vibración es producida por los contrapesos acoplados en el eje y la desalineación del mismo.

La intensidad de vibración se regula cambiando la excentricidad de los contrapesos, también se puede quitando o colocando tornillos a la base de los contrapesos. De esta forma mientras más desplazado del centro se encuentre los contrapesos, mayor será la vibración en la unidad.

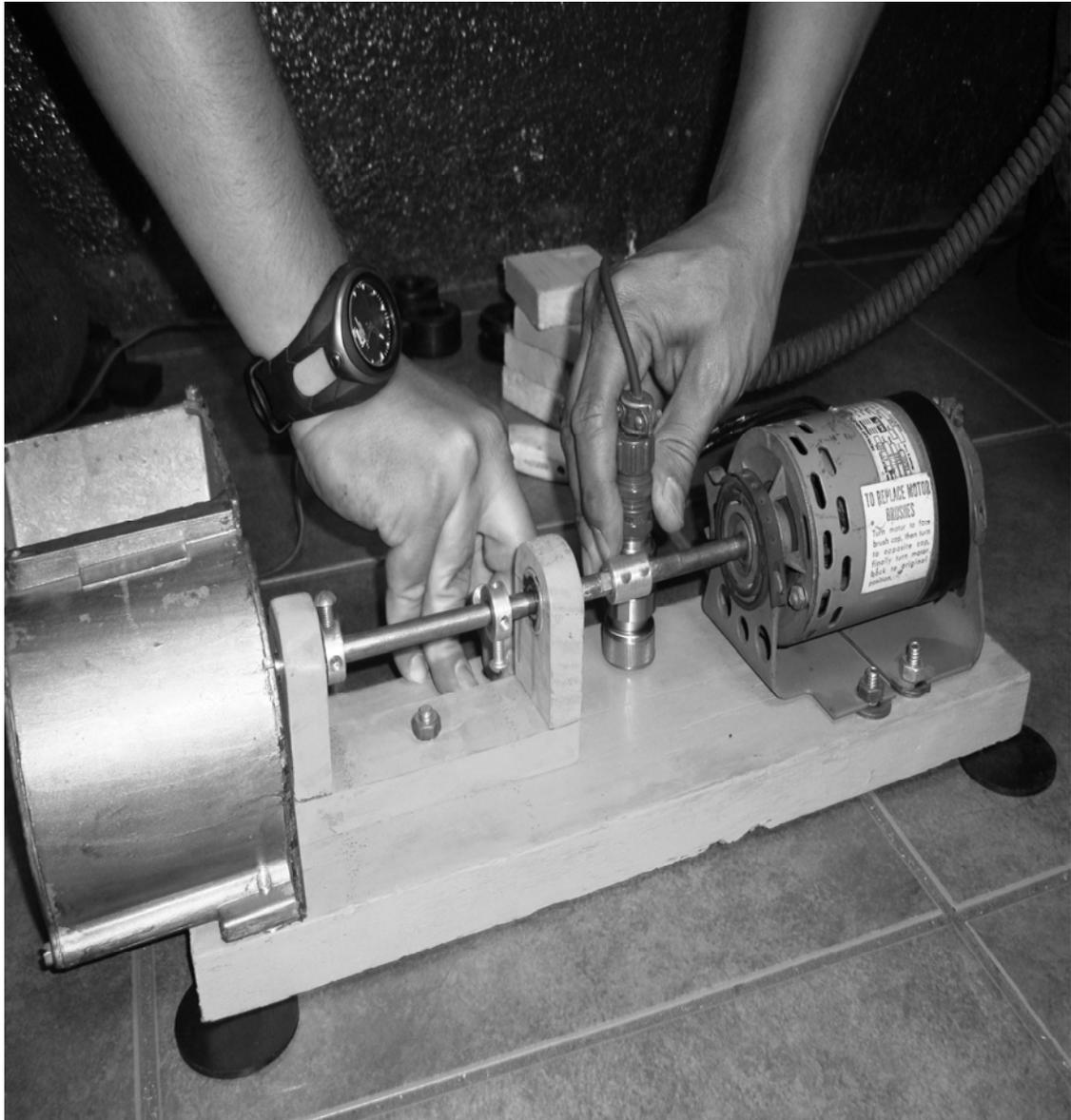
El sistema de amortiguación consta de cuatro aisladores, permitiendo una disminución en la vibración del equipo.

En las figuras (17 y 18), se hace referencia a como tomar la medición en los diferentes puntos. Teniendo en cuenta que se debe sujetar la base del prototipo como la del sensor de aceleración.

Las pruebas se realizaron en diferentes puntos del prototipo, los cuales se mencionan a continuación:

- Base del prototipo.
- Motor.
- Cojinete del motor.
- Apoyo de eje.
- Tolva.

**Figura 17.** Medición en la base del prototipo motor con eje y tolva.



**Figura 18.** Medición en el cojinete del motor en prototipo motor con eje y tolva.



En la figura 19, se muestran las vistas con las formas de aisladores por debajo del prototipo. También se puede apreciar en la última columna a la derecha como quedan los aisladores bajo la base.

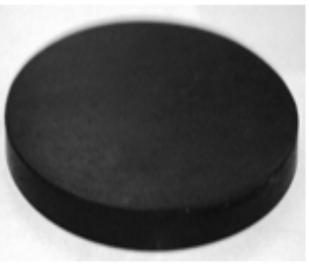
**Figura 19.** Vistas del aislador en el prototipo motor con eje y tolva.

Forma del Aislador	VISTA DEL AISLADOR EN MOTOR CON EJE Y TOLVA		
			

**2.2.3 Datos obtenidos de las pruebas**

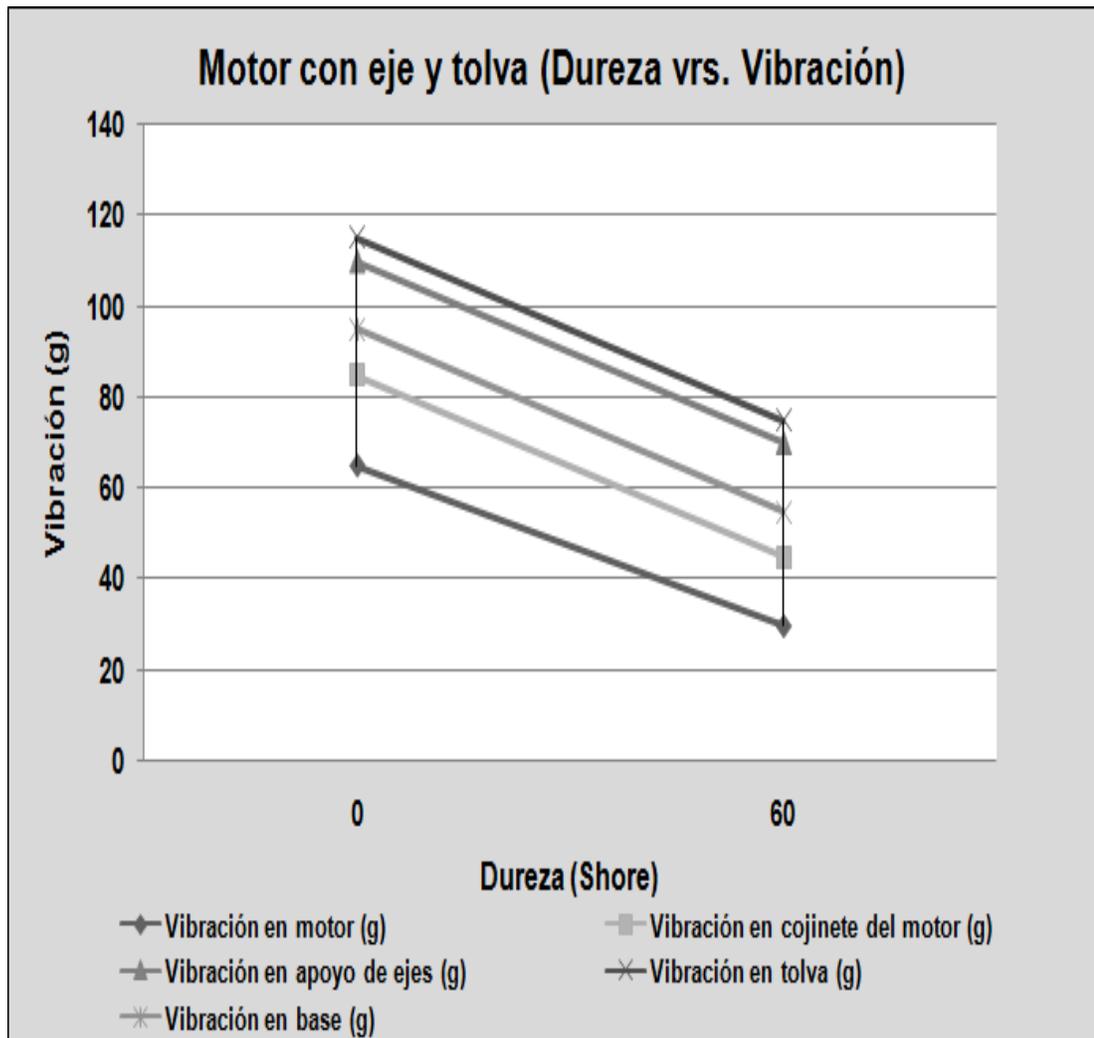
En la tabla II, se muestran los diferentes aisladores o amortiguadores en orden descendente según la dureza y forma. También se puede observar los diferentes puntos y valores obtenidos en las mediciones.

**Tabla II.** Datos obtenidos de mediciones en el prototipo motor con eje y tolva.

#	Forma del Aislador	Dureza (Shore)	Vibración en motor (g)	Vibración en cojinete del motor (g)	Vibración en apoyo de ejes (g)	Vibración en tolva (g)	Vibración en base (g)
1	Sin aislador	0	65	85	110	115	95
2		60	30	45	70	75	55

En la figura 20, se muestran las gráficas de las mediciones obtenidas en la tabulación de la tabla II. En la gráfica se puede apreciar disminución de vibración considerablemente. Como por ejemplo el valor máximo de vibración es porque no tiene ningún aislador, en cambio el valor mínimo de vibración es porque se utilizó el aislador (ver tabla I), en menor grado de dureza y también se debe a la forma de moneda.

**Figura 20.** Gráficas de dureza versus vibración de la tabla II.





## 3. EQUIPO PARA MEDIR VIBRACIONES

### 3.1 Equipo Vibralog I

La figura 21 muestra el recolector de datos portátil Vibralog I es un dispositivo de alto rendimiento que permite el acceso a los parámetros indispensables para el estado de la maquinaria de producción: mediciones de las vibraciones, cojinetes, velocidad de rotación y la temperatura.

**Figura 21.** Recolector de datos con el acelerómetro.



Diseñado para los servicios de mantenimiento, en la mayoría de los casos detecta los niveles de daños con suficiente antelación para realizar cambios de repuestos durante períodos de tiempo de inactividad planificado, ahorrando costosas paradas no programadas en las máquinas todavía capaces de funcionar hasta la fecha prevista del mantenimiento.

El Vibralog I es adecuado para los motores eléctricos, trituradoras, ventiladores, turbinas, ventiladores, máquinas-herramientas, bombas, cajas reductoras y equipo similares.

### **3.1.1 Características / ventajas**

- Dos modos de funcionamiento: controlador y colector.
- Dos niveles de alarma.
- Comparación con mediciones anteriores.
- Capacidad de memoria: 350 mediciones.
- RS 232 interfaz para la PC.
- Creación de bases de datos: las plantas, máquinas, mediciones.
- Administración de base de datos.
- Compatible con Windows 2000, 98, 95, NT.
- Compatible con el software de mantenimiento PM4.
- Informes sobre las mediciones.
- Comparación en los puntos de ajuste.
- Análisis de tendencias.
- Selección de funciones a través del menú de desplazamiento.
- Salida de voltaje dinámico.
- Auto rango, indicador de sobrecarga.
- Fuente de alimentación con batería recargable.
- Capacidad de batería: 12 horas en operación permanente.

- Modo en espera automático.
- Control de carga de la batería.
- Temperatura de funcionamiento: -10°C a +50°C.

### 3.1.2 Accesorios

- Maletín, vea figura 22.
- Acelerómetro SA 6200A.
- Cable de acelerómetro, vea figura 23.
- Base magnética en el acelerómetro AE/M6 o 1/4-28, vea figura 24.
- Cargador de batería a 9 voltios, vea figura 25.
- Manual del usuario.
- Cable para PC RS 232, vea la figura 26.
- Software de mantenimiento PM4.
- SQL licencia de Centura.

**Figura 22.** Maletín del equipo.



**Figura 23.** Cable del acelerómetro.



**Figura 24.** Base magnética.



**Figura 25.** Cargador del equipo.



**Figura 26.** Cable para PC RS 232.



### **3.1.3 Opciones**

- Sonda de temperatura.
- Sonda de tacómetro.
- Paquete de batería adicional.
- Multímetro de pinza.
- Pirómetro.

### 3.2 Acelerómetro SA6200A

Capaz en detectar una amplia gama en frecuencias de vibración, el acelerómetro, vea figura 27, es ideal para uso en una variedad de máquinas. Un amplificador integrado proporciona baja impedancia de salida para la conexión a la serie SC Metrix para una señal de (4 a 20) mA. Este consiste en un sensor piezo-eléctrico y un amplificador empaquetado conjuntamente en una carcasa de acero inoxidable, el circuito de detección está eléctricamente aislado.

**Figura 27.** Acelerómetro SA6200A.



### **3.2.1 Características**

- Respuesta de frecuencia amplia.
- Carcasa hermética.
- Polaridad indiferente.

### **3.2.2 Aplicaciones**

- Motores.
- Cajas de engranaje.
- Maquinas para papel.
- Bombas para procesos.
- Ventiladores grandes.
- Turbocompresor.
- Ventiladores en torre de enfriamiento.

## **3.3 Programa de mantenimiento PM4.**

### **3.3.1 Características / ventajas**

- Compatible con amplios software estándar.
- Satisface la mayoría de los complejos requisitos de mantenimiento predictivo.
- Fácil de usar.

Este software es la herramienta perfecta para aprender cómo se comporta su maquinaria rotativa. Proporciona una gama completa de software para un programa eficiente y rentable de mantenimiento predictivo.

Uno de los registros de base de datos en todos los parámetros de proceso, análisis de vibraciones y análisis de aceite adoptadas desde:

- Fuera de red: Vibralog I, Vibralog II.
- En red: SYSTEM 670, MACHINESCANTM.

### **3.3.2 Compatible con amplios software estándar**

- Base de datos relacional SQL (Centura).
- Lenguaje (C++).
- Funciona bajo Windows 3.11, 95 y NT.

### **3.3.3 Especificar el diagnóstico apropiado**

- Análisis de vibración.
- Resultados en análisis de aceite.
- Parámetros de procesos.

A:

- Todos los tipos de medición en única base de datos.
- Para cada máquina: un diagnóstico específico, para cada tipo de medida (vibraciones, aceite, procesos).

#### **3.3.3.1 Obtener un diagnóstico inmediato**

- Un primer nivel de diagnóstico automático para identificar los puntos y parámetros de cero fallas o peligro, por ejemplo: desequilibrio.
- Herramientas adicionales para apoyo en el diagnóstico. El servidor gráfico provisto de herramientas poderosas y avanzadas como por

ejemplo: cursores múltiples, bandas laterales, el traslado automático de frecuencias, concatenación.

- Acceso directo a “experto” modulo de diagnostico, utilizando el icono de Neurodiag.

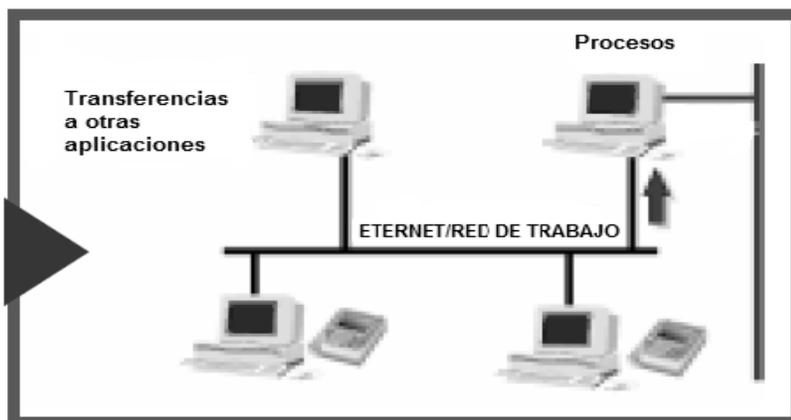
### 3.3.4 Fácil y uso intuitivo

- Tres pantallas principales.
- Inmediato y diagnóstico comprensivo en códigos de colores.
- Dedicados menús e iconos.

El uso de una base SQL (Centura) acoplado al estándar de Windows, hace que sea fácil transferir datos de PM4 (Software de mantenimiento) a otras aplicaciones de Windows, tales como:

- Excel, Lotus, etc.
- Proceso de redes PM4 (protección de mantenimiento) funciona igual en una computadora como en una red, vea la figura 28.

**Figura 28.** Transferencias a otras aplicaciones con el software PM4.



## CONCLUSIONES

A través de esta experimentación del prototipo con el aislador, se puede concluir que es necesaria la implementación de este trabajo como laboratorio de vibraciones.

1. El aislamiento es importante para disminuir la vibración de un equipo, porque se reduce el nivel de ruido, se alarga la vida útil de la maquinaria.
2. El siguiente aislador que se comercializa en Guatemala: tiene forma de cilindro con una pequeña altura (forma de moneda), este tiene una dureza de 60 grados en la escala shore. Tiene una altura de 0.3 cm y un diámetro externo de 4.6 cm.
3. El equipo Vibralog I es el idóneo para realizar mediciones, porque es de fácil lectura y manipulación.
4. El aislador de vibraciones en forma de moneda fue eficiente para disipar las vibraciones por tener un grado de dureza menor que a la superficie en donde se realizó la prueba.
5. El software PM4 es útil en el monitoreo de las vibraciones, porque es compatible con Vibralog I y tiene herramientas para diagnosticar fácilmente las vibraciones.
6. Con base al diseño experimental planteado se construyó un prototipo: motor con eje y tolva.



## **RECOMENDACIONES**

### **A los alumnos.**

1. Usar el equipo de protección adecuado para realizar las prácticas, porque en la industria ustedes serían los encargados en la seguridad de sus colaboradores.
2. Verificar antes de empezar a realizar las prácticas, que los prototipos no tengan piezas flojas para evitar accidentes.
3. Utilizar y cuidar adecuadamente el equipo de vibraciones, prototipos y aisladores para que las generaciones venideras puedan utilizarlo.

### **A la Escuela de Ingeniería Mecánica.**

4. Implementar un Laboratorio de Vibraciones Mecánicas para que los estudiantes del curso puedan aplicar la teoría aprendida. Utilizando este trabajo como guía para el laboratorio.



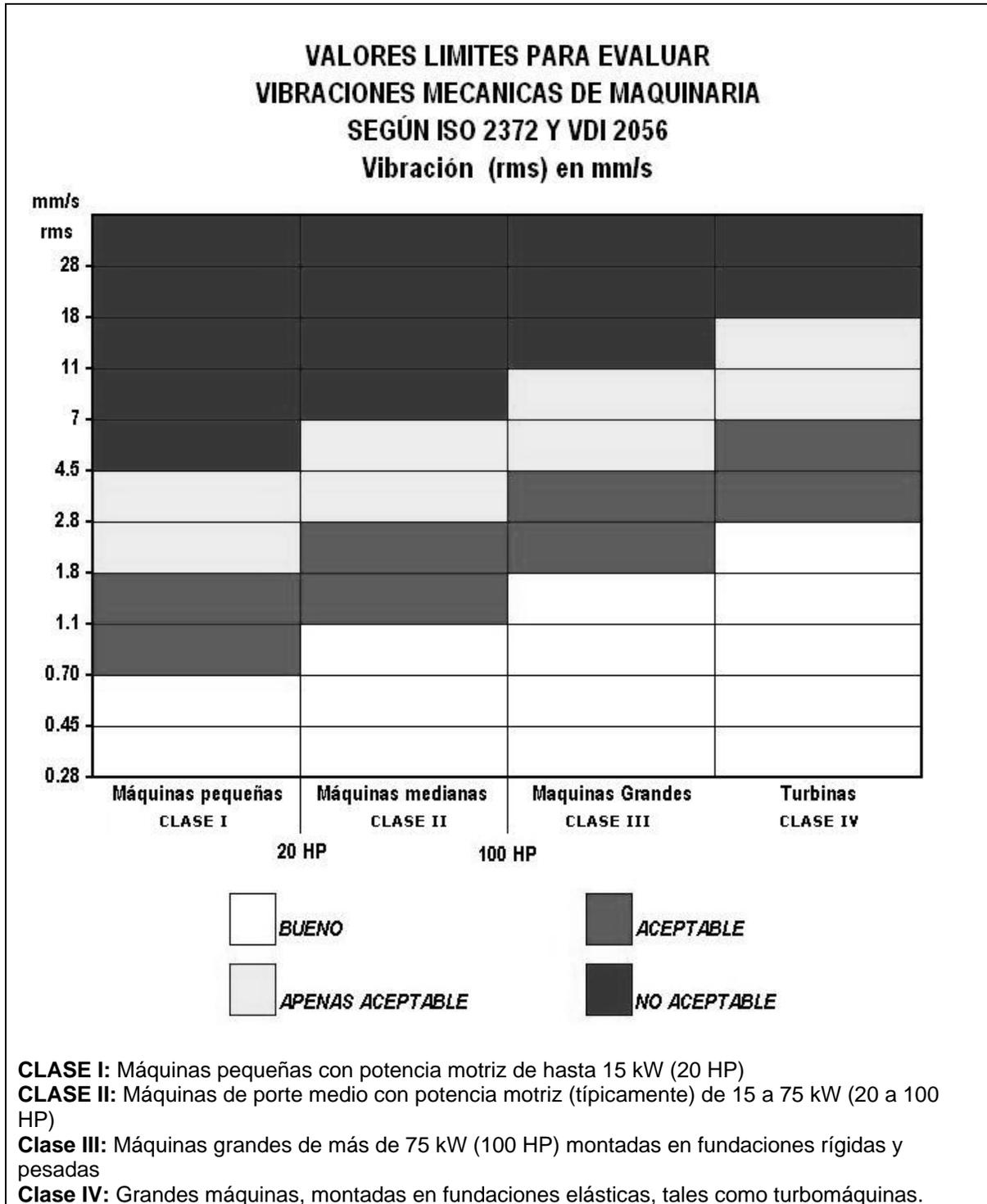
## BIBLIOGRAFÍA

1. CYRIL, Harris & Charles Crede. Shock and vibration handbook. Sexta edición. Estados Unidos. Editorial McGRAW-HILL. 2009.
2. Balachandran, Balakumar & Edward Magrab. Vibraciones. Editorial Thomson. 2006.
3. [www.metrix1.com/](http://www.metrix1.com/). Sitio de la marca del equipo de vibraciones. 2010.
4. PINZÓN Camacho, Álvaro. Medición de Vibración. Técnicas de Medición, Balanceo y Mantenimiento Predictivo. Bogotá, Colombia. 2008.
5. KELLY, Graham. Vibraciones Mecánicas. Editorial McGraw Hill. 2006.
6. MONROY, Fredy. Principios Básicos de Mantenimiento. Guatemala, 2003.
7. MONROY, Fredy. Guía para los Cursos de Montaje y Mantenimiento de Equipo y Vibraciones Mecánicas. Guatemala, 2003.



## ANEXO A

**Tabla A.1.** Valores límite para la evaluación de vibraciones mecánicas según ISO 2372.



**Fuente:** Norma ISO 2372, edición 1984.