

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**  
**OSCAR LUCERO MOYA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio  
en máquinas rotatorias.**

**Autor: Manuel Alejandro Salazar Calderín.**

**Tutor: Dr. C. Ing. Fernando Daniel Robles Proenza.**

**Frase**

"La única posibilidad de descubrir los límites de lo posible es aventurarse un poco más allá de ellos, hacia lo imposible."

**Arthur C. Clarke**

## **AGRADECIMIENTOS**

- A mis padres por toda la ayuda que me brindaron para el desarrollo de este trabajo.
- A mis hermanos
- A mi cuñada
- A mi novia
- A toda mi familia
- A mi tutor Fernando Daniel Robles Proenza.
- A José Peña Padroza. Especialista Grupo diagnóstico y Héctor Linares. Jefe de Programación de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín por todo su apoyo.
- A todos mis amigos.
- A todos los profesores que me educaron.
- A todas las personas que contribuyeron de forma directa e indirecta a la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

Esté trabajo de diploma está dedicado:

- A mis padres por todo su ejemplo, por apoyarme e instruirme.
- A toda mi familia y amigos.
- A mi novia.

## **RESUMEN**

El presente trabajo es un estudio sobre las diferentes tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias, las cuales representan las tecnologías proactivas más utilizadas en la actualidad en el diagnóstico técnico. Se elaboraron propuestas de selección y uso de estas tecnologías con fines didácticos y una práctica de laboratorio donde se pueden simular problemas mecánicos durante un proceso, con el fin de enriquecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica en este tema. Determinando que la propuesta número uno para medir vibraciones es más factible y cumple los mismos objetivos, donde es necesario medir variables de comportamiento de las máquinas para garantizar un buen estado técnico en equipos complejos de gran responsabilidad para elevar la efectividad del mantenimiento.

## **SUMMARY**

The present work is a study about the different instrumental technologies for vibration analysis on rotating machinery, which represent the most proactive technologies currently used at the present time in technical diagnosis. Selection proposals and use of these technologies were elaborated with didactic intentions and a laboratory practice where you can simulate mechanical problems during the process, in order to enrich the learning process of students of mechanical engineering career in this thematic. Determining that the proposal number one for measuring Vibration is feasible and complies with the same objectives, when it is necessary to measure behavioral variables of the machines to ensure a good technical condition to complex equipment's of great responsibility to raise the effectiveness of maintenance.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción .....	6
1.2 Principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias.....	6
1.3 Mantenimiento .....	6
1.4 Principios teóricos que sustentan el análisis vibratorio en máquinas rotatorias .....	9
1.4.1 Definición y características .....	9
1.4.1.1 Características .....	9
1.4.1.2 Severidad de vibración.....	12
1.4.2 Principios básicos para el análisis de vibraciones .....	13
1.4.2.1 Relación fuerzas - vibraciones .....	18
1.4.2.2 Caracterización de las vibraciones en maquinarias .....	22
1.4.2.3 Sistema máquina - soportes.....	25
1.4.2.5 Origen de las frecuencias de las vibraciones en maquinarias.....	30
1.4.2.6 Influencia de las vibraciones externas .....	32
1.5 Conclusiones .....	34
2.1 Introducción .....	35
2.2 Tecnologías existentes en la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín .....	35
2.2.1 Funcionamientos y aplicaciones .....	35
2.2.1.1 Medidor de vibraciones VIBRATION PEN PLUS:.....	35
2.2.1.2 Analizador de vibraciones VIBXPERT I.....	37
2.2.1.3 Analizador de vibraciones Smart Scanner .....	38
2.3 Procedimiento de diagnóstico en el uso de las tecnologías instrumentales para análisis vibratorio en máquinas rotatorias.....	39
2.3.1 Medición de la vibración .....	39
2.3.2 Equipos de medición.....	42
2.3.3 Puntos de medición.....	42

2.3.4 Condiciones de operación.....	43
2.3.5 Clasificación de las máquinas .....	43
2.3.6 Adquisición e Interpretación de los datos en el uso de las tecnologías instrumentales para análisis vibratorio en máquinas rotatorias .....	45
2.3.6.1 Pasos a seguir en la adquisición de datos:.....	45
2.3.6.2 Interpretación de datos.....	48
2.3.6.2.1 Desequilibrio .....	50
2.3.6.2 .2 Desalineación .....	51
2.3.6.2 .3 Problemas eléctricos .....	56
2.3.6.2 .4 Rodamientos.....	57
2.4 Propuestas a la facultad de ingeniería en la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” que pudieran fomentar el uso de estas tecnologías, para un posible laboratorio de análisis vibratorio .....	60
2.4.1 Propuesta # 1 para realizar análisis vibratorio a máquinas rotatorias .....	60
2.4.1.1 Información de los componentes del sistema de adquisición de datos.....	62
2.4.2 Propuesta # 2 para realizar análisis vibratorio a máquinas rotatorias .....	66
2.4.2.1 Datos del equipo.....	67
2.4.3 Propuestas de Prácticas de Laboratorio.....	70
2.4.3.1 Desalineación .....	70
2.4.3.2 Desbalance .....	73
2.4.3.3 Pedestal flojo.....	76
Impacto económico .....	78
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES.....	80



## INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la humanidad y como parte de la evolución del hombre siempre fue necesario y hasta indispensable crear herramientas, utensilios o técnicas que permitieran agilizar y facilitar las tareas a realizar, así como garantizar una mayor eficiencia durante las mismas. Uno a uno fueron sucediéndose grandes descubrimientos científicos, pero no fue hasta la "Revolución Industrial" que se crearon grandes máquinas e industrias capaces de agilizar el trabajo del hombre. Durante este período surge una nueva idea, el mantenimiento, debido a que era necesario mantener estas grandes máquinas en funcionamiento.

A medida que pasaba el tiempo el hombre fue modernizando las técnicas de fabricación, la tecnología de los equipos y diseñó nuevas estrategias de trabajo debido a que el costo de mantenimiento de las máquinas iba en ascenso. Una de estas estrategias son las tecnologías proactivas, que no son más que aquellas técnicas de diagnóstico con las que se puede determinar el estado técnico de un equipo sin tener que desarmarlo, lo cual garantiza una mayor eficiencia del proceso y una disminución en los costos. Una de las técnicas de diagnóstico es el análisis vibratorio, considerada por muchos especialistas como la más importante y con el cual se pueden determinar los valores raíz cuadrada de los cuadrados medios del nivel de vibración (RMS) y el espectro de frecuencia, a partir de los cuales se pueden determinar a su vez cuáles pueden ser los posibles defectos o fallas de un equipo.

La mayoría de las industrias buscan cada vez más productividad y necesitan que sus máquinas estén funcionando a plena capacidad todo el tiempo y que la producción no se detenga. Es por estas razones que se han incluido dentro de los programas de mantenimiento, el mantenimiento predictivo que utiliza el monitoreo y análisis de las vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de las máquinas y en particular de sus elementos más críticos para de esta manera poder prevenir fallas catastróficas en un futuro.

El alto costo de instrumentos comerciales para la recolección y análisis de vibraciones, así como su arquitectura compacta y cerrada ha llevado a los

especialistas a buscar nuevas alternativas. Los instrumentos basados en sistemas de adquisición de datos constituyen una herramienta poderosa para el desarrollo de instrumentos más económicos y flexibles, haciendo a la tecnología como la principal aliada en la gestión del mantenimiento.

Resulta fundamental además determinar las características físicas del sistema, es decir, las frecuencias naturales y los modos normales de las vibraciones presentes en los sistemas. Esta es una parte muy importante para el diseño de máquinas porque si las frecuencias de trabajo de un equipo en cierto momento se igualan a alguna de estas frecuencias pueden ocurrir desastres catastróficos. En el caso específico de los grandes equipos producto de la resonancia.

Es necesario tomar las lecturas de la magnitud de las vibraciones, su frecuencia, velocidad y aceleración. Con estas lecturas de datos se podrá realizar el estudio de los espectros, y compararlos con los límites permisibles para poder determinar su estado actual.

Una máquina ideal no produciría vibraciones, ya que toda la energía se emplearía en el trabajo a realizar. En la práctica, las vibraciones aparecen como consecuencia de la transmisión de fuerzas cíclicas por los diversos mecanismos. Los elementos de la máquina reaccionan entre sí, transmitiéndose las fuerzas por toda la estructura hasta disipar la energía en forma de vibraciones.

Un buen diseño producirá bajos niveles de vibración, pero en la medida que la máquina se vaya desgastando, aparecerán sutiles cambios en sus propiedades dinámicas. Los ejes se desalinean, los rodamientos se desgastan, los rotores se desbalancean y las holguras aumentan.

En el pasado remoto, los ingenieros de planta podían reconocer por medio del tacto y escucha si una máquina marchaba con suavidad o si se avecinaba alguna avería. Hoy, debido a que la mayoría de la maquinaria gira a velocidades en la que la frecuencia de las vibraciones es muy alta, se hace necesario el uso de instrumentación para detectarlas y medirlas.

Actualmente en el mundo existe un amplio desarrollo del diseño y la fabricación de equipos para realizar disímiles tareas, pero antes de fabricarlos y distribuirlos a los usuarios el fabricante debe comprobar que son seguros para trabajar porque de lo contrario serían sancionados por no cumplir con las normas internacionales establecidas. He aquí la importancia de saber que según el diseño de una máquina ella se comportará de una manera e incluso cambiando las posiciones de las cargas y los apoyos pueden cambiar sus frecuencias naturales, por eso en todas las empresas que fabrican máquinas de cualquier tipo en el mundo realizan análisis del comportamiento de las frecuencias naturales y sus modos de vibración para que en su funcionamiento las frecuencias se encuentren lejos y así estar seguro que no ocurrirá ninguna falla inesperada del equipo.

**Situación Problemática:**

En la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya" se han estudiado las diferentes aplicaciones de las vibraciones pero aún no existe una documentación de consulta que permita elaborar propuestas de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias, por lo que se hace necesario realizar un estudio profundo sobre este tema con el objetivo de que esté disponible para ser consultado por estudiantes, profesores e ingenieros vinculados con la carrera de mecánica.

**Problema:**

La no existencia de la documentación de consulta para elaborar propuestas de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias con fines didácticos.

**Objeto de la investigación:**

Análisis vibratorio en máquinas rotatorias

**Campo de acción:**

Tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias.

**Objetivo General:**

Elaborar propuestas de selección y uso de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias con fines didácticos.

### **Hipótesis:**

Si se elaboran las propuestas para la selección y empleo de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias entonces se garantizará la disponibilidad de este material para su posterior consulta por estudiantes, profesores o especialistas de esta rama.

### **Tareas de Investigación:**

- Elaborar el marco teórico conceptual sobre las principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias para elevar la efectividad del mantenimiento.
- Estudiar los principios teóricos que sustentan el análisis vibratorio en máquinas rotatorias para una mejor comprensión del tema.
- Estudiar cómo se emplean los principales instrumentos y equipos de análisis vibratorio en máquinas rotatorias para conocer sobre su funcionamiento y aplicaciones.
- Proponer alternativas de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias bajo las condiciones existentes en la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” que permitan alcanzar las habilidades en el uso de estas tecnologías.

### **Métodos de investigación:**

- Métodos teóricos.

**Analítico-Sintético:** Posibilita el análisis y procesamiento de la información recopilada durante la investigación sobre el análisis vibratorio en máquinas rotatorias.

**Histórico-Lógico:** Permite el estudio de los antecedentes y tendencias actuales de las tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias.

- Métodos empíricos.

**Criterios de los expertos:** Consulta a profesionales que tengan conocimiento del análisis vibratorio de automatización de procesos.

**Resultados esperados:**

Obtener las propuestas de selección y uso de las tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias para que tanto los estudiantes, profesores o profesionales de la carrera de Ingeniería Mecánica puedan obtener los conocimientos necesarios acerca del funcionamiento de estas tecnologías.

## **CAPÍTULO I Marco Teórico Referencial**

### **1.1 Introducción**

Este capítulo tiene como objetivo proveer las herramientas necesarias para elaborar el marco teórico conceptual sobre las principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio a máquinas rotatorias, para elevar la efectividad del mantenimiento y conocer los principios teóricos que lo sustentan para una mejor comprensión del tema.

### **1.2 Principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias**

La ciencia y la técnica han avanzado mucho y cada vez la técnica de las máquinas se hace más compleja y por consiguiente el ensamblaje de las mismas necesita un nivel de precisión aún mayor, por lo que se hace necesario crear técnicas para diagnosticar fallas en los equipos sin tener que desarmarlos. Para detectar inconvenientes en el funcionamiento de una máquina se han ideado varios análisis como: el ultrasonido, el infrarrojo, el láser, el vibratorio, entre otros. El más importante entre todos los anteriormente mencionados es el vibratorio, pues este se realiza mediante un modelo matemático que tiene en cuenta parámetros físicos del equipo tales como: la masa, la amortiguación y la constante de rigidez; y como parámetros de funcionamiento: las fuerzas, las velocidades, las aceleraciones y los desplazamientos. Los resultados de esta tecnología permiten predecir el estado técnico de la máquina.

### **1.3 Mantenimiento**

En los últimos años, por las estrictas normas de calidad certificada que se deben cumplir, así como la intensa presión competitiva entre industrias para mantenerse en el mercado nacional e internacional, han estado forzando a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a implementar los cambios que se requieren para pasar de ser un departamento que realiza reparaciones y cambio de piezas y/o máquinas completas, a una unidad de alto nivel que contribuye de gran

manera en asegurar los niveles de producción. Es por tanto necesario hacer notar que la actividad de “mantener”, si es llevada a cabo de la mejor manera, puede generar un mejor producto lo que significa producción de mejor calidad, en mayor cantidad y con costos más bajos. (Saavedra, Mayo 2001).

Por tanto conlleva a clasificar las estrategias de mantenimiento de la siguiente forma y así poder determinar la estrategia más efectiva de realizar el plan de mantenimiento:

- **Mantenimiento Preventivo:** Estrategia en la que se programan periódicamente las intervenciones en las máquinas, con el objeto principal de inspeccionar, reparar y/o reemplazar componentes. Las intervenciones se realizan aun cuando la máquina esté operando satisfactoriamente.

- **Mantenimiento Predictivo:** Estrategia de mantenimiento que busca por medio de la medición y el análisis de los diversos síntomas que la máquina emite al exterior establecer la condición mecánica de la máquina y su evolución en el tiempo. Una de sus grandes ventajas es que se lleva a cabo mientras la máquina está en funcionamiento y sólo se programa su detención cuando se detecta un problema y se desea corregir.

- **Mantenimiento Proactivo:** Con esta estrategia de mantenimiento se pretende maximizar la vida útil operativa de las máquinas y sus componentes, identificando y corrigiendo las causas que corrientemente originan las fallas. Por ejemplo, asegurando que las máquinas funcionan bajo las condiciones de carga y velocidad establecida por su condición de diseño y que además sus componentes (rodamientos, sellos, acoples, etc.) son instalados correctamente y que su condición de lubricación es adecuada ya se puede asegurar una vida útil operativa más extendida y con menos paradas intermedias que el promedio de las máquinas del mismo tipo.

Es indudable que el aumento de la vida operativa de la máquina a través de una estrategia de mantenimiento predictiva–proactiva, disminuye los costos de

mantenimiento e incrementa la productividad de la Planta. Sin embargo, se ha podido notar a través de experiencias de varias empresas, que no se han logrado los resultados esperados principalmente por falta de personas bien capacitadas en el tema. La ingeniería ha avanzado en todas sus ramas incluyendo los instrumentos y técnicas que se han desarrollado y que de alguna manera sustentan la credibilidad de los programas de mantenimiento predictivo implementados en la industria. Para que estos programas sean efectivos, es necesario poder determinar en cualquier instante la condición mecánica real de las máquinas bajo estudio, lo cual se logra analizando las diferentes señales que ellas emiten al exterior. Modernos sistemas computacionales se han desarrollado para monitorear continuamente, registrar y procesar información proveniente tanto de los síntomas tanto de vibración como de temperatura, presión, ruido entre otros. (Saavedra, Mayo 2001).

Se puede decir que a través del mantenimiento predictivo se logra considerar a cada máquina por separado. Sustituyendo las revisiones periódicas por medidas periódicas que pueden seguir en detalle el desarrollo del estado de funcionamiento de cada máquina en específico. Con la medida regular de las vibraciones se puede detectar el nacimiento de irregularidades y seguir su posterior desarrollo. Además, esas medidas se pueden extrapolar para predecir cuándo se alcanzarán niveles de vibración inaceptables y cuando se debe revisar la máquina. A esto se le llama Monitoreo de Tendencias y permite al profesional programar las reparaciones con suficiente anticipación.

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración-reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan. (Consulta con experto: Peña, mayo 2014).



## **1.4 Principios teóricos que sustentan el análisis vibratorio en máquinas rotatorias**

A través de los años ya sea por contacto directo o con el empleo de algún dispositivo de naturaleza subjetiva, los operadores de máquina han empleado técnicas de verificación auditiva «también subjetivas» para comprobar si el comportamiento de "su máquina" es NORMAL o no. De aquí que, tradicionalmente y quizás en forma inconsciente, las vibraciones hayan sido utilizadas como un indicador del estado técnico de las máquinas y hasta hoy día, continúen siendo el fenómeno más representativo del estado técnico de éstas, pudiéndose a través de la medición de vibraciones, detectar e identificar fallos ya desarrollados o en período de desarrollo prematuro. (Palomino, 1997).

### **1.4.1 Definición y características**

La vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio.

Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados; fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos. Estas causas como se puede suponer son fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, estas fuerzas son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta estudiando las características de vibración. (Acosta, 2011).

#### **1.4.1.2 Características**

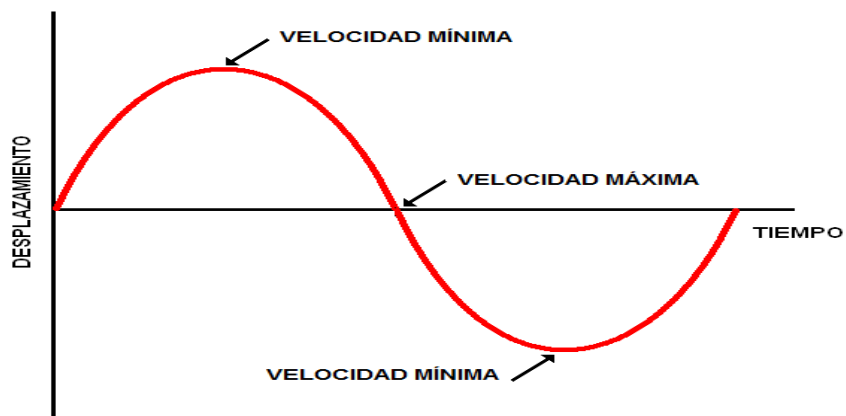
Las características más importantes son: frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulsos.

La frecuencia es una característica simple y significativa en este análisis. Se define como el número de ciclos completos en un período de tiempo. La unidad característica es cpm (ciclos por minuto). Existe una relación importante entre frecuencia y velocidad angular de los elementos rotativos. La correspondencia entre

cpm y rpm (ciclos por minuto-revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación es debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta.

La amplitud de la vibración indica la importancia o gravedad del problema. Esta característica da una idea de la condición en la que se encuentra la máquina. Se podrá medir la amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración. La velocidad de vibración tiene en cuenta el desplazamiento y la frecuencia, por tanto este es un indicador directo de la severidad de vibración. Esta última es indicada de una forma más precisa midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el intervalo de frecuencias entre las que tiene lugar. Así se tiene que para bajas frecuencias, por debajo de 600 cpm, se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60.000 cpm, se mide velocidad y para altas frecuencias, mayores a 60.000 cpm, se toman aceleraciones.

La velocidad es otra característica importante en la vibración, gráficamente se puede ver en la **Figura 1.1**.

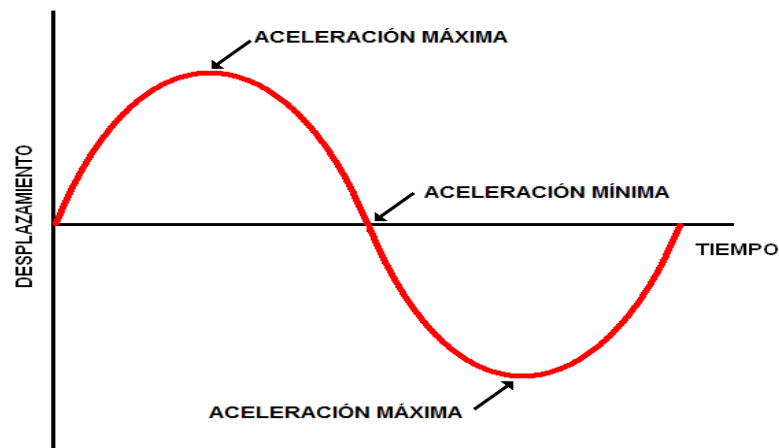


**Figura 1.1 Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra.**

Se mide la velocidad de pico mayor de todo el recorrido que realiza el elemento al vibrar. La unidad es mm/s. El cambio de esta característica trae consigo un cambio

de aceleración. La velocidad tiene una relación directa con la severidad de vibración, por tanto este es el parámetro que siempre se debe medir. Las vibraciones que tienen lugar entre 600 y 60.000 cpm se analizan teniendo en cuenta el valor de la velocidad. Mínima máxima

La aceleración está relacionada con la fuerza que provoca la vibración, algunas de ellas se producen a altas frecuencias, aunque velocidad y desplazamiento sean pequeños. En la **Figura 1.2** se puede ver la aceleración de vibración.



**Figura 1.2 Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra.**

La energía de impulsos proporciona información importante a la hora de analizar vibraciones. Este parámetro mide los impulsos de energía de vibración de breve duración y, por lo tanto, de alta frecuencia.

Pueden ser impulsos debidos a:

- Defectos en la superficie de elementos de rodamientos o engranajes.
- Rozamiento, impacto, contacto entre metal-metal en máquinas rotativas.
- Fugas de vapor o de aire a alta presión.
- Cavitación debida a turbulencia en fluidos.

Sin este parámetro es muy difícil detectar engranajes o rodamientos defectuosos. Con esta medida se encuentran rápidamente las vibraciones a altas frecuencias

provocadas por estos defectos. El valor de la energía de impulsos es básicamente una medida de aceleración, pero tiene como unidad g-SE.

#### **1.4.1.2 Severidad de vibración**

Un punto importante a la hora de hablar de vibraciones es conocer la severidad de vibración, ella indica la gravedad que puede tener un defecto. La amplitud de la vibración expresa la gravedad del problema, pero es difícil establecer valores límites de la vibración que detecten un fallo.

La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina.

Una vez obtenido un histórico de datos para cada elemento de las máquinas que se estudian, el valor medio refleja la normalidad en su funcionamiento. Desviaciones continuas o excesivas indicarán un posible fallo que será identificado después, teniendo en cuenta la frecuencia a la que se producen las mayores vibraciones.

Cuando no se posee histórico de datos para una máquina, puede analizarse la severidad de vibración teniendo en cuenta las siguientes gráficas. (Ver las figura 1 y 2 en los anexos)

**ISO 2372:** Vibraciones mecánicas de máquinas que operan con velocidades entre 10 y 200 (rev/s). Bases para especificar estándares de evaluación.

Este es un estándar general para máquinas rotatorias diseñado para evaluar principalmente la severidad vibratoria de máquinas en el taller o en los ensayos de aceptación de máquinas.

Las especificaciones vibratorias para ensayos de aceptación de máquinas nuevas o reparadas garantizan al comprador que el equipo está estadísticamente normal o con buena salud inicial.

### 1.4.2 Principios básicos para el análisis de vibraciones

El Análisis de Vibraciones requiere de toda la información necesaria del equipo que se desea monitorear. La información útil para el análisis es:

- Tipo de rodamientos.
- Velocidades de giro.
- Condiciones de apoyo.
- Potencia del equipo.
- Condiciones de Carga.

En la actualidad, el análisis de vibraciones se realiza a través de dispositivos electrónicos. Los fundamentos básicos en los que se basa el Análisis de Vibraciones son:

#### 1. Movimiento Armónico Simple de los cuerpos

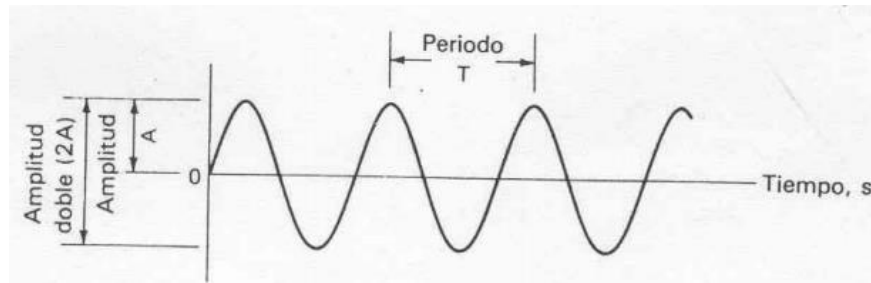
Como se conoce, toda vibración mecánica simple tiene un comportamiento periódico repetitivo en el tiempo; por lo que podemos decir que una vibración mecánica sigue la tendencia de una función senoidal.

La forma general como se puede representar un movimiento armónico simple es:

$$\chi = A \text{ sen } (\omega t + \varphi) \quad \text{Fuente: Castellanos, 2005. (1.1)}$$

Las componentes principales de una vibración mecánica en función de una onda senoidal son:

- Amplitud de la vibración: Es el desplazamiento que tiene un punto o un cuerpo desde su posición de equilibrio.
- Frecuencia de Vibración: Es el número de vueltas que realiza un elemento rotatorio por unidad de tiempo.
- Período: Es el tiempo que tarda un elemento en dar una vuelta (ciclo).

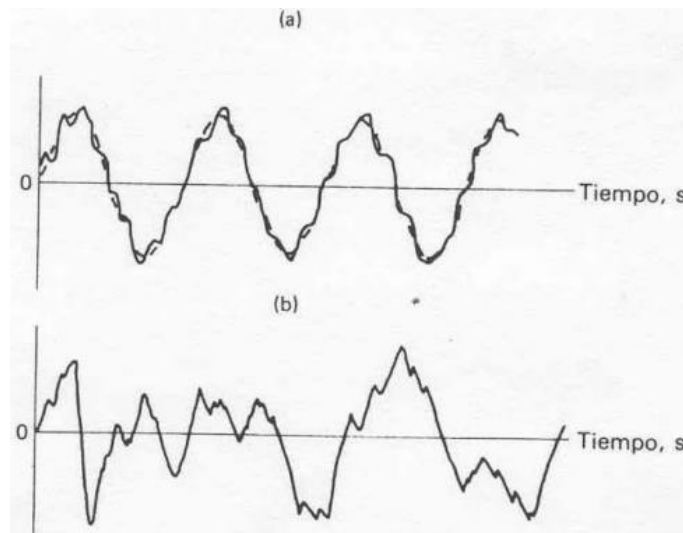


**Figura 1.3. Vibración armónica simple senoidal continua** Fuente: Castellanos, 2005.

## 2- Teorema de Fourier

El teorema de Fourier es un método matemático utilizado para transformar una función periódica cualquiera a una única serie trigonométrica uniformemente convergente a dicha función, llamada Serie de Fourier.

Gráficamente, se puede observar el comportamiento de una señal analizada por el teorema de Fourier:



**Figura 1.4 a) Vibración continua de muchas frecuencias; b) Vibración irregular (No periódica)** Fuente: Castellanos, 2005.

La forma matemática como se puede representar el teorema de Fourier es:

Señal de Entrada:

$\chi_1 = A_1 \sin(\omega_1 t (2\pi) + \phi_1 (\pi/180))$  Fuentes: Castellanos, 2005 (1.2).

Señal de Salida:

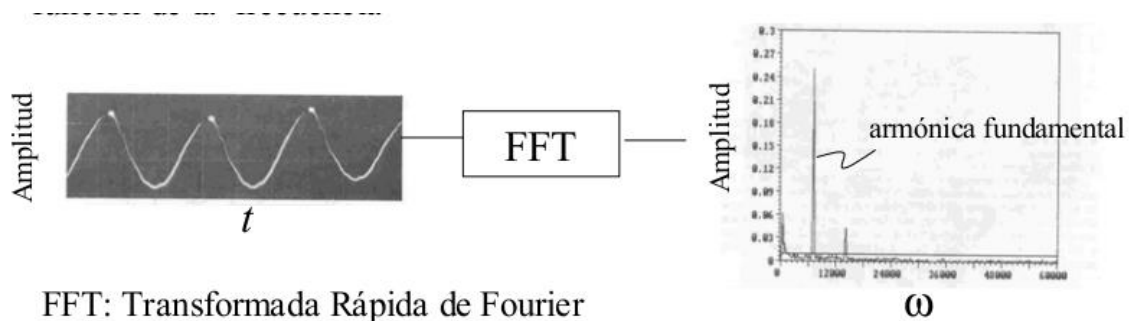
$\chi_2 = A_2 \sin(\omega_2 t (2\pi) + \phi_2 (\pi/180))$  Fuente: Castellanos, 2005. (1.3)

Donde el comportamiento total de la vibración viene dado por la suma algebraica de las señales.

Basándose en estos principios físicos y matemáticos, se puede proceder a analizar de una manera más profunda el fenómeno de las vibraciones.

### **Dominio del Tiempo y Dominio de la Frecuencia**

La vibración puede ser estudiada como función del tiempo y como función de la frecuencia.



**Figura. 1.5 Ejemplo (Fuente: Díaz, (s/f)).**

¿Es útil estudiar la vibración en el dominio de la frecuencia?

Permite identificar posibles fuentes de excitación cuando se expresa la vibración como una suma de señales armónicas al identificar las respectivas frecuencias.

El análisis espectral de vibraciones consiste simplemente en realizar una transformación de una señal en el tiempo al dominio de la frecuencia, donde podemos identificar la vibración característica de cada uno de los componentes o defectos que puede presentar nuestro equipo.

Llamamos **RMS** (Root Mean Square) al valor eficaz y representativo de la señal vibratoria. Se calcula normalmente mediante magnitudes como la velocidad o la aceleración.

Es uno de los parámetros que nos da más información de la amplitud de la vibración, ya que, además de tener en cuenta el historial de la onda, da un valor directamente relacionado con la energía que contiene la vibración. El valor **RMS** está calculado de la siguiente manera:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (x^2(t)) dt} \quad (\text{Fuente: Díaz, (s/f)}. (1.4))$$

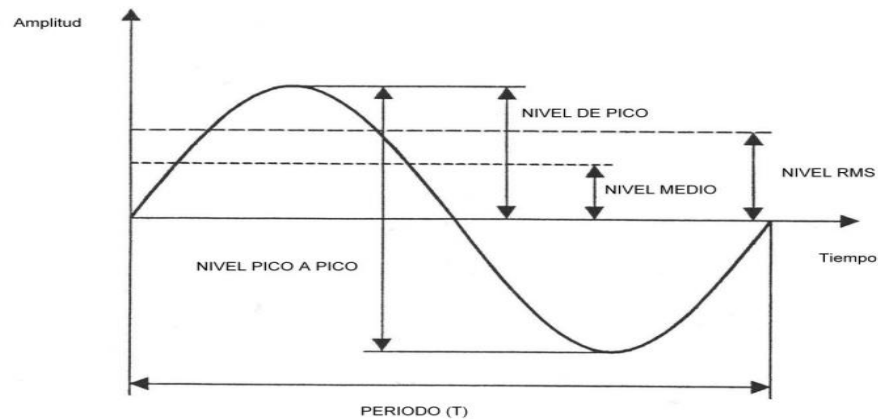
Factor de cresta

Hace referencia al cociente entre el nivel Pico a Pico y la velocidad de vibración en **RMS**.

Es un valor extremadamente sensible a los fenómenos de impulso que tienen lugar, por ejemplo, en el caso de defectos en rodamientos. Cuando la señal no presenta picos de impacto. Este es el caso de una vibración producida por una máquina que funciona con normalidad, el factor de cresta toma valores moderados.

La aparición de defectos en su fase inicial, por el contrario, se manifiesta por la presencia de picos en la señal vibratoria que implica el incremento en el nivel de Pico a Pico, mientras el nivel de **RMS** varía muy poco, de tal forma que el factor de cresta aumenta con la aparición de defectos. Después de esto, a medida que el defecto crece, la energía de vibración se incrementa y así también la **RMS**. Es decir, cuando el defecto ya ha pasado la fase inicial el valor de cresta disminuye.





**Figura 1.6 Ejemplo (Fuente: Díaz, (s/f)).**

El cálculo de estos niveles globales hace posible el seguimiento de la evolución de los niveles de vibración. Por otro lado, no es posible determinar variaciones de frecuencia de una amplitud no dominante, ya que pasan desapercibidas. Por lo tanto, el nivel global es un valor que da información general sobre el estado de la máquina pero, a veces, puede ser engañoso ya que su medida, puede ser estable y a la vez puede existir un aumento peligroso de la vibración a una frecuencia determinada, no reflejándose este aumento en el nivel global puesto que se compensa por la disminución de energía a otra frecuencia.

Parece claro que estos valores globales no hacen posible la aplicación de técnicas de diagnóstico, pero son muy útiles como parámetros de control o vigilancia del correcto funcionamiento de la máquina.

### **Análisis temporal de la señal de vibración**

La observación de la señal temporal consiste en la visualización de la señal captada por el transductor durante un cierto período de tiempo. La integración de esta señal a lo largo del tiempo nos daría el valor global comentado anteriormente.

En principio, la única importancia del análisis temporal es poder observar la señal en caso de que se produzcan impactos. Las señales temporales presentan también fenómenos que no son forzosamente representativos del funcionamiento de la máquina y que a su vez, pueden falsear el análisis de la señal. Por eso, la utilización

de diferentes y complejas técnicas para mitigar o eliminar la influencia de estos fenómenos parasitarios.

### **Análisis frecuencial de la señal de vibración**

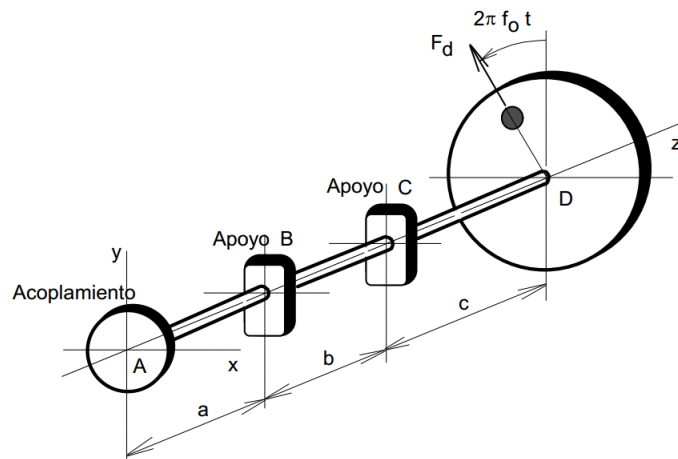
Cualquier forma de onda puede ser generada por la adición de señales sinusoidales. Cada una de ellas está caracterizada por una amplitud, una frecuencia y una fase propia relacionada con las otras.

Representando las amplitudes de las ondas sinusoidales en función de su frecuencia, se puede ver el mismo fenómeno de otra manera: cada onda sinusoidal resultante de la descomposición de las señales de entrada aparecen como una línea vertical, cuya altura representa su amplitud y cuya posición representa su frecuencia. Esta representación recibe el nombre de espectro de señales y cada onda sinusoidal representada por la línea del espectro se llama componente de la señal total.

Los mecanismos de obtención de los espectros de frecuencia se pueden clasificar básicamente, en analizadores dinámicos de señal. Su funcionamiento se basa en la Transformada Rápida de Fourier (**FFT**), un algoritmo que transforma rápidamente datos del campo temporal al frecuencial, actuando como un analizador de filtros en paralelo con centenares de filtros.

#### **1.4.2.1 Relación fuerzas - vibraciones**

En la **Figura 1.7** se muestra el esquema de la unidad conducida de cierta máquina. En aras de simplificar el ejemplo se asumirá excelencia en la alineación tanto de la unidad conducida con la unidad conductora a través del acoplamiento A, como entre los apoyos BC que sirven de sustento al eje ABCD. De igual forma, se admitirá que la única afectación que existe en la condición mecánica de la máquina estudiada es el desbalance del rotor D, en el cual se ha representado la fuerza dinámica que produce este desbalance.



**Figura 1.7. Ejemplo de la relación fuerzas – vibraciones. (Fuente: Palomino, 1997)**

Por su parte, la **Figura 1.8a)** ilustra en el plano **xz** las reacciones que se generan en los apoyos B y C debido a la acción de la fuerza dinámica generada por el desbalance que por supuesto, sólo existe si la máquina rota y esto lo hace con una frecuencia  **$f_0$**  .

Ambas reacciones se determinan según las siguientes expresiones:

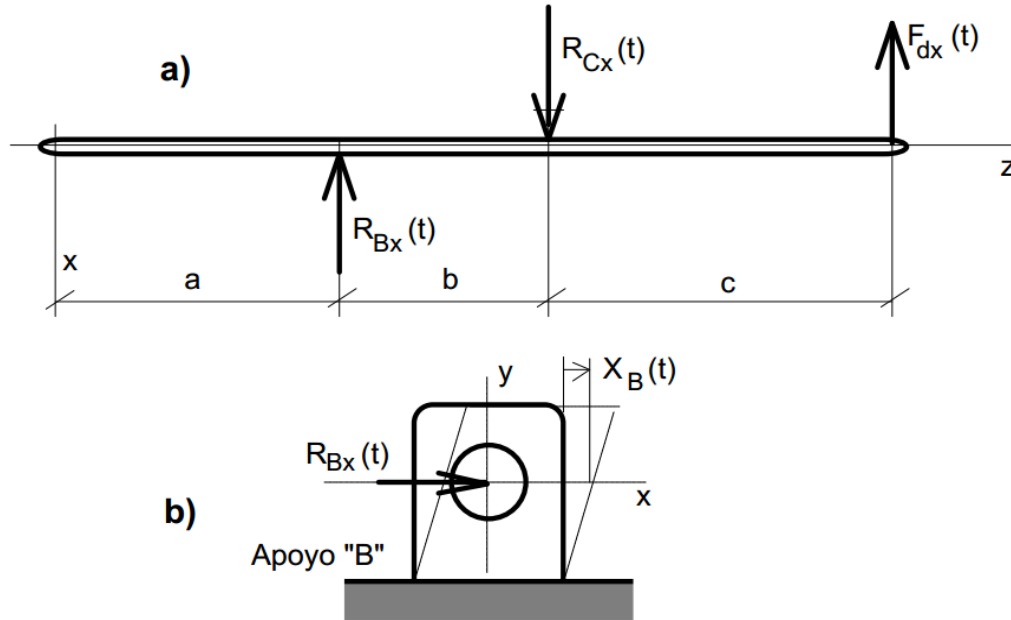
$$R_{bx}(t) = F_d \left(\frac{c}{b}\right) \text{sen}(2\pi f_0 t), R_{cx}(t) = F_d \left(1 + \frac{c}{b}\right) \text{sen}(2\pi f_0 t) \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.5)$$

Por supuesto, ambas reacciones también son de naturaleza dinámica, toda vez que son el resultado de la acción de una fuerza también dinámica, originada por el desbalance del rotor.

Luego entonces, si se analiza el apoyo B por ejemplo (**Figura 1.8b)**), sobre éste actúa una fuerza dinámica de la cual sólo se ha representado su componente horizontal (eje x), que en el instante observado produce un desplazamiento  $x^B(t)$  del apoyo hacia la derecha. Este desplazamiento dinámico estará condicionado, por la severidad de la fuerza dinámica y por la rigidez del propio apoyo en la dirección horizontal  $KB_x$  según:

$$x_B(t) = \frac{1}{k_{Bx}} R_{Bx}(t)$$

(Fuente: Palomino, 1997) (1.6)



**Figura 1.8. a) Diagrama de distribución de fuerzas, b) Relación fuerzas – desplazamiento (Fuente: Palomino, 1997)**

De esta forma, los desplazamientos de las vibraciones de ambos apoyos podrán ser descritos a través de las siguientes expresiones:

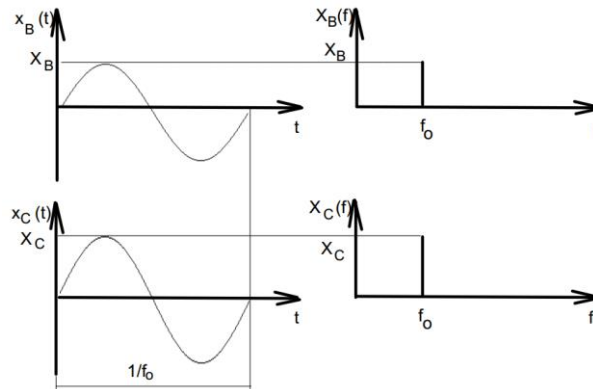
$$x_B(t) = \frac{F_d}{k_{Bx}} \left( \frac{c}{b} \right) \text{sen}(2\pi f_0 t) \quad ; \quad x_C(t) = \frac{F_d}{k_{Bx}} \left( 1 + \frac{c}{b} \right) \text{sen}(2\pi f_0 t)$$

(Fuente: Palomino, 1997)

(1.7)

Todo esto puede ser representado gráficamente de acuerdo con lo ilustrado en la **Figura 1.9**. Observe que el desplazamiento dinámico en ambos apoyos tiene lugar en el dominio del tiempo, según una función senoidal cuya frecuencia es  $f_0$  para ambos apoyos con amplitudes  $X_B$  y  $X_C$  respectivamente, de acuerdo con:

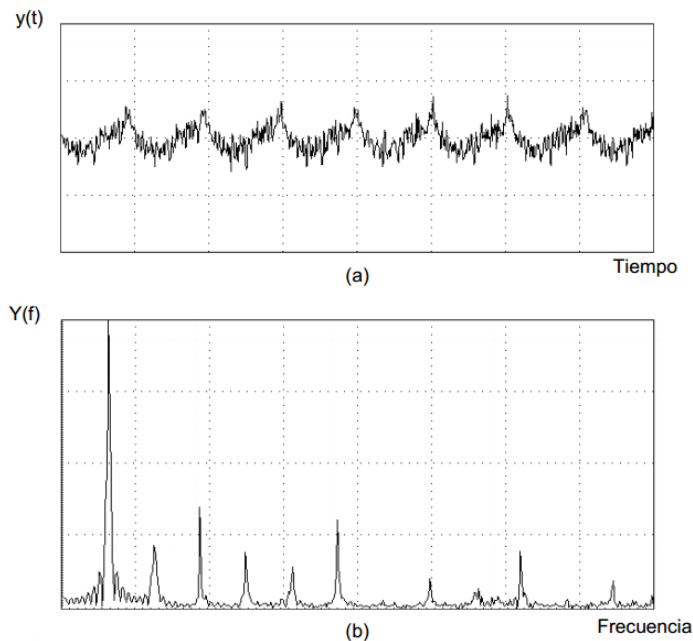
$$x_B(t) = \frac{F_d}{k_{Bx}} \left( \frac{c}{b} \right); \quad x_C(t) = \frac{F_d}{k_{Bx}} \left( 1 + \frac{c}{b} \right) \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.8)$$



**Figura 1.9. Representación temporal y espectral de las vibraciones debidas al desbalance (Fuente: Palomino, 1997)**

Otro tanto sucede en el dominio de la frecuencia. Ambos espectros de desplazamiento exhiben una línea a la frecuencia  $f_0$  con amplitudes  $X_B$  y  $X_C$  respectivamente. El lector no debe perder de vista que el ejemplo mostrado ha sido concebido como resultado de muchas simplificaciones, ya que no sólo es el desbalance el único problema que afecta la condición mecánica de la maquinaria industrial. De manera que en el peor de los casos, las vibraciones mostrarán en el dominio del tiempo una apariencia similar a la ilustrada en la **Figura 1.10a)** y en el dominio de la frecuencia no sólo exhibirán una línea sino que se observarán tantas como frecuencias contengan los registros de vibraciones.

Observe la **Figura 1.10b)**. Esta última forma es la de mayor utilidad ya que cada fallo tiene su "firma" característica en el denominado espectro de las vibraciones. Ambas formas de observación tienen sus virtudes y sus inconvenientes pero en cualquier caso se requiere por una parte, de una instrumentación adecuada para registrar los niveles de vibraciones y por otra parte, de una formación teórico-práctica que permita la interpretación y comprensión de los fenómenos dinámicos que estén teniendo lugar en la máquina en cuestión.



**Figura 1.10. Formas de observación de las vibraciones. (Fuente: Palomino, 1997)**

#### **1.4.2.2 Caracterización de las vibraciones en maquinarias**

El estudio de las vibraciones está relacionado con el comportamiento oscilatorio de los cuerpos, teniendo en cuenta que la mayoría de las maquinarias y estructuras experimentan vibraciones en mayor o menor grado, por lo cual éstas se deberán tener en cuenta al abordar los cálculos de diseño y/o comprobación así como en los controles periódicos del estado técnico de las mismas.

Según la norma ISO 2041 en relación con la Terminología en Vibraciones se establecen dos cosas:

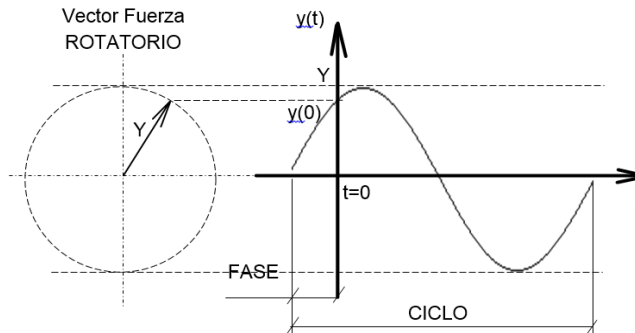
**Vibración es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia.**

De igual forma, se establece que:

**Vibración Lineal es una vibración en la cual la trayectoria vibratoria de un punto tiene lugar según una línea recta.**

El movimiento físico de una máquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas

frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas a través de un dispositivo que las convierta en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente. Así, la frecuencia describirá ¿qué está mal? en la máquina y la amplitud ¿cuán severo? es el problema. Las vibraciones pueden ser de naturaleza armónica, periódica o aleatoria.



**Figura 1.11. Vibración armónica. (Fuente: Palomino, 1997)**

### Vibración Armónica

Constituye la forma más simple de oscilación (**Figura 1.11**). Caracterizada por una senoide, puede ser generada en sistemas lineales debido a la presencia de algún problema potencial, un desbalance por ejemplo. Este movimiento puede ser estudiado a través de un vector rotatorio con velocidad angular constante  $\omega$  a partir de la cual se define la frecuencia de oscilación  $f$  expresada en Hertz [Hz], a diferencia de la frecuencia angular que se expresa en [1/s]. Todo esto conduce a la modelación matemática de este fenómeno según:

$$y = Y\text{sen}(\omega t + \varphi) = Y\text{sen}(2\pi f t + \varphi); \quad \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997})$$

(1.9)

Siendo  $\varphi$  la fase de la vibración.

Estas expresiones avalan la definición de frecuencia que hace la norma ISO 2041.

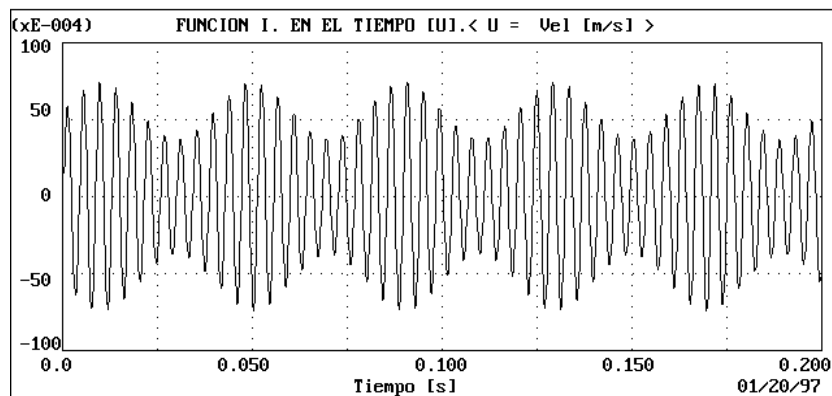
**Frecuencia es el recíproco del período fundamental (tiempo de repetición de un fenómeno periódico). Se expresa en Hertz [Hz], lo cual se corresponde con un**

**ciclo por segundo.**

Más adelante se profundizará en el concepto de fase de la vibración por ser de gran utilidad en el monitoreo de la condición mecánica de máquinas rotatorias.

### **Vibración Periódica**

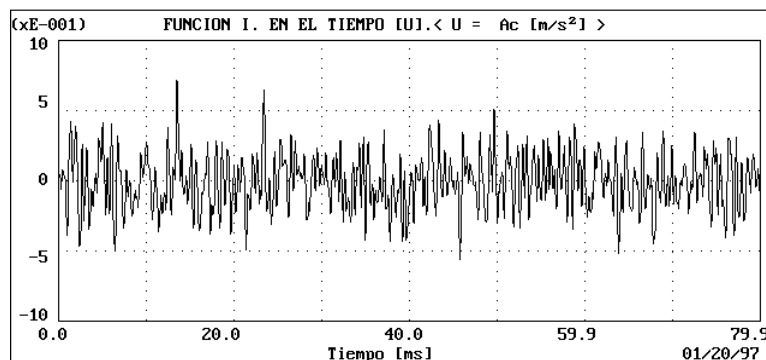
Es un movimiento que se repite periódicamente tal y como se observa en la **Figura 1.12**. Por ejemplo, un problema en una transmisión dentada puede producir una vibración que aunque no es armónica es periódica.



**Figura 1.12. Vibración periódica (Fuente: Palomino, 1997)**

### **Vibración Aleatoria**

Ocurre en forma errática y tiene contenidos de frecuencias en toda la banda de frecuencias analizada. Observe la **Figura 1.13**. Esto quiere decir que las vibraciones aleatorias producirán un espectro continuo o lo que es lo mismo, el espectro estará constituido por "infinitas" vibraciones armónicas, cada una caracterizada por amplitud, frecuencia y fase respectivamente.



**Figura 1.13. Vibración aleatoria (Fuente: Palomino, 1997)**



### 1.4.2.3 Sistema máquina - soportes

El sistema máquina - soportes puede ser descrito a través de un sistema masa - resorte-amortiguador. Desde el punto de vista práctico, cualquier parte de un sistema que pueda ser deformado al aplicársele una fuerza y pueda recuperar su forma inicial al cesar ésta, podrá ser tratado para su estudio como un resorte, siendo la constante elástica  $k$  de éste, la magnitud de fuerza necesaria para deformarlo la unidad de longitud o sea, esta constante  $k$ , denominada habitualmente rigidez, se expresa en unidades de [fuerza/longitud]. De aquí que, un elemento elástico responda con una fuerza que es  $k$  veces su propia deformación (**Figura 1.14**).

Así, el tramo de árbol que media entre dos rodamientos, el bloque de hormigón sobre el cual descansa una máquina o la carcasa de un motor, pueden ser tratados como resortes durante el análisis dinámico de estos sistemas.

Realmente, en la práctica de ingeniería durante el fenómeno vibratorio se disipa energía en mayor o menor grado, lo que implica que la amplitud del movimiento no se mantenga constante en el transcurso del tiempo posterior a un "impulso" inicial, como no sea que una fuerza se encargue de restablecer estas pérdidas. Las fuerzas amortiguadoras son extremadamente complicadas de modelar por lo que, de acuerdo al alcance de este material, sólo será considerada la influencia del llamado amortiguamiento viscoso, caracterizado por el hecho de que la fuerza amortiguadora (**Figura 1.14**), es proporcional a la velocidad del movimiento en una magnitud  $C$ , denominada **coeficiente de amortiguamiento** y que es expresado en unidades de [fuerza - tiempo/longitud].

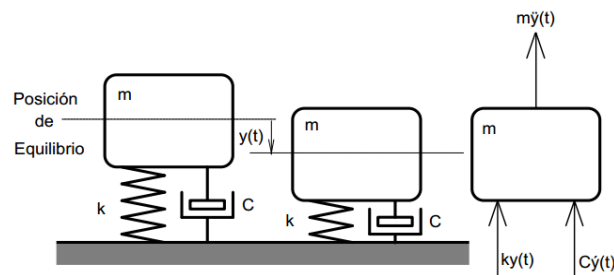
Tal sistema máquina-soportes, simplificado a un sistema masa-resorte-amortiguador, formado por una masa  $m$  vinculada a tierra a través de un resorte  $k$  y un amortiguador  $C$  según se observa en la **Figura 1.14**, tendrá un comportamiento dinámico que estará caracterizado fundamentalmente por su frecuencia natural o frecuencias de las vibraciones propias no amortiguadas, que a su vez serán descritas por las siguientes expresiones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ en } \left[\frac{1}{s}\right]; f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \text{ en [Hz]}; f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [c.p.m.]} \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.10)$$

Identificándose  $\omega_n$  como frecuencia angular natural y  $f_n$  como frecuencia natural.

De todo esto es importante destacar que, prescindiendo del efecto del amortiguamiento propio de los soportes de las máquinas es posible aseverar que:

Todo sistema máquina-soportes está caracterizado por una frecuencia que sólo depende de la masa y la rigidez de éste, denominada frecuencia natural.



**Figura 1.14. Sistema máquina - soportes (masa - resorte - amortiguador).**

Adicionalmente, existen otros dos parámetros en la caracterización dinámica del sistema máquina-soportes. Si se admite que las fuerzas disipadoras de energía son proporcionales a la velocidad de las vibraciones del sistema máquina - soportes, entonces estos parámetros serán definidos según:

➤ Coeficiente de amortiguamiento  $C_c = 2\sqrt{km}$  (Fuente: Palomino, 1997)

(1.11)

➤ Razón de amortiguamiento  $\zeta = \frac{C}{C_c}$  (Fuente: Palomino, 1997)

(1.12)

El coeficiente de amortiguamiento crítico  $C_c$  es una propiedad del sistema y no depende del amortiguamiento del mismo, mientras que la razón de amortiguamiento  $\zeta$  se define como el cociente entre el coeficiente de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento crítico. Estos parámetros constituyen elementos decisivos a

tener en cuenta cuando se pretenda desarrollar un Programa de Aislamiento y Control de las Vibraciones, tanto para maquinarias como para estructuras.

De igual forma, es sumamente importante destacar que cuando se considera en el análisis el posible amortiguamiento de los soportes de la máquina, entonces la frecuencia característica de la vibración en ausencia de fuerzas que restauren las pérdidas energéticas será la denominada frecuencia de las vibraciones amortiguadas:

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.13)$$

#### **1.4.2.4 Sistema máquina-soportes ante la acción de una fuerza de carácter armónico**

Durante la operación de las máquinas se presentan fuerzas excitadoras que suministran la energía necesaria para mantener las vibraciones aun cuando exista amortiguamiento. Estas fuerzas pueden ser consideradas de carácter armónico, o sea:

$$F(t) = F \text{sen}(2\pi ft) \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.14)$$

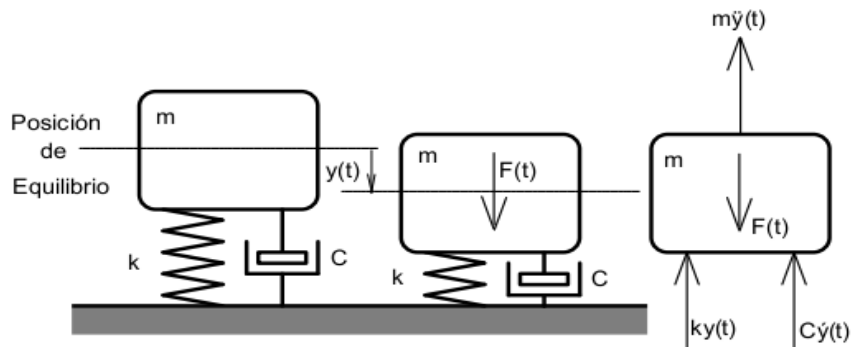
En este caso, F es la amplitud de la fuerza y f la frecuencia de la variación en el tiempo de la fuerza, que también puede ser analizada como un vector rotatorio.

Ahora en el sistema máquina-soportes se incluye una fuerza excitadora generalizada, tal y como se observa en la **Figura 1.15**, que podrá ser producida por la propia máquina y/o transmitida a ésta por otros agentes externos.

**Si la excitación es una fuerza de carácter armónico, el sistema vibrará también en forma armónica con la misma frecuencia que la excitación pero desfasado en el tiempo.**

Particular interés reviste el hecho relacionado con él a veces inexplicable incremento substancial de la amplitud de las vibraciones, en máquinas que exhiben un estado técnico satisfactorio. Este fenómeno, denominado resonancia tiene lugar cuando se sintoniza alguna de las frecuencias de la excitación con alguna frecuencia natural. En estos casos, las vibraciones son amplificadas en una banda de frecuencias cercana y

a ambos lados de la frecuencia natural, según se observa en las **Figuras 1.16** y **1.17**.



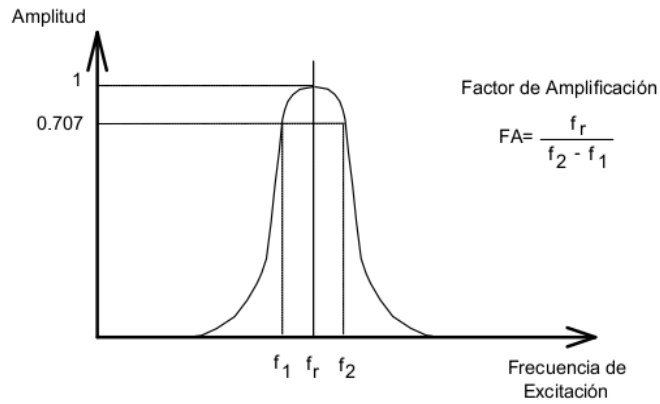
**Figura 1.15. Sistema máquina - soportes bajo excitación armónica. (Fuente: Palomino, 1997).**

La resonancia tendrá lugar si la frecuencia de la fuerza excitadora está contenida dentro de la denominada banda de potencia media. Esta banda se define a 3 dB por debajo del pico correspondiente a la frecuencia de resonancia. Por otro lado, lógicamente esta frecuencia de resonancia tendrá que estar relacionada con la frecuencia natural en dependencia del amortiguamiento presente, todo lo cual se expresa según:

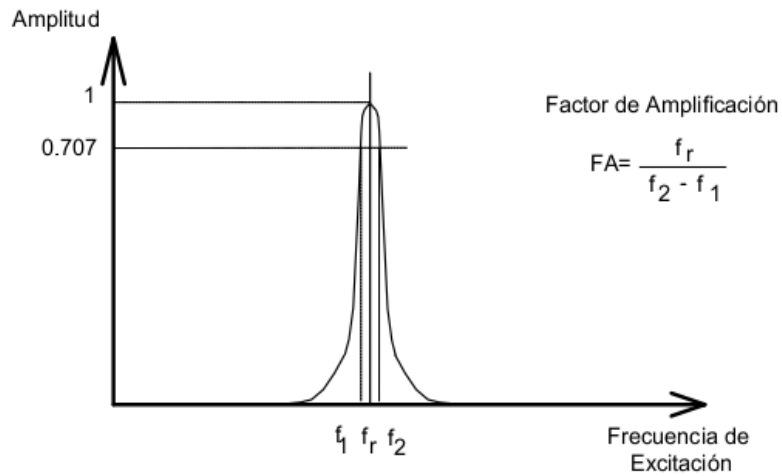
$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (\text{Fuente: Palomino, 1997}) \quad (1.15)$$

La norma **ISO 2041** establece que:

**La resonancia de un sistema bajo oscilaciones forzadas existe cuando cualquier cambio, incluso muy pequeño, en la frecuencia de la excitación, causa un decrecimiento en la respuesta del sistema.**



**Figura 1.16. Resonancia modificada por cierta cantidad de amortiguamiento. (Fuente: Palomino, 1997)**



**Figura 1.17. Resonancia modificada por poco amortiguamiento. (Fuente: Palomino, 1997).**

#### **1.4.2.5 Origen de las frecuencias de las vibraciones en maquinarias**

Existen tres causas fundamentales que propician la presencia de vibraciones en las máquinas rotatorias a determinadas frecuencias, estas últimas se identifican como:

- a) Frecuencias generadas
- b) Frecuencias excitadas
- c) Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos

##### **Frecuencias generadas**

A veces se les identifica como frecuencias forzadas o frecuencias de diagnóstico y son aquellas que la máquina genera realmente durante su funcionamiento habitual.

Representativas de estas frecuencias se tienen a los desbalances, el paso de las paletas de una turbina, la frecuencia de engranaje o el paso de los elementos rodantes por los defectos locales de las pistas de un cojinete de rodamiento, por citar algunas.

##### **Frecuencias excitadas**

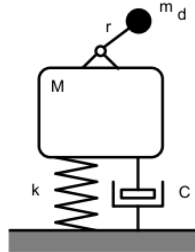
Las frecuencias excitadas no son más que las frecuencias de resonancias de los elementos que componen las máquinas, incluyendo las estructuras portantes los elementos no rotatorios en general. Cuando se excitan las frecuencias de resonancia, las vibraciones son amplificadas de acuerdo con lo ilustrado en las **Figuras 1.16 y 1.17**, en virtud del amortiguamiento presente.

El problema que más excita las frecuencias de resonancias cercanas a la frecuencia de rotación de la máquina es el desbalance, que por muy pequeño que sea, puede ser amplificado severamente si se sintoniza la frecuencia de operación del rotor desbalanceado con la frecuencia natural de éste en sus apoyos o del sistema máquina soportes.

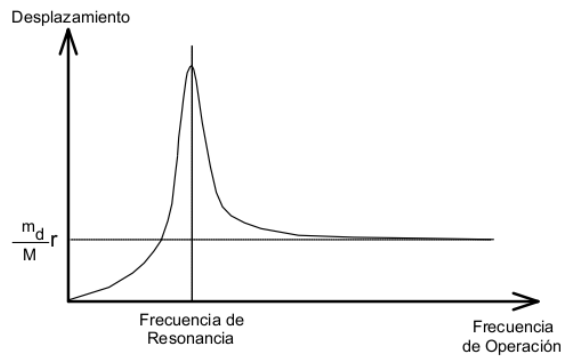
Los especialistas en diagnóstico consideran que aproximadamente el 40% de los casos de niveles de vibraciones excesivos que se encuentran en la práctica, tienen como fuente principal al desbalance. Este tipo de problema constituye la mejor representación de una fuerza excitadora de carácter armónico, dada a



través de la fuerza de inercia que se genera debido a la aceleración de una masa desbalanceada  $m_d$  que gira respecto al eje de rotación con una velocidad angular constante  $\omega$ . Observe la **Figura 1.18**.



**Figura 1.18. Presencia de una masa desbalanceada en el sistema máquina–soportes. (Fuente: Palomino, 1997).**



**Figura 1.19. Respuesta de un sistema máquina-soportes ante los efectos de un desbalance rotatorio. (Fuente: Palomino, 1997).**

Es importante destacar que la masa excéntrica produce una fuerza que es a su vez un vector rotatorio con velocidad angular  $\omega$  y amplitud  $m_d \omega^2 r$ . De igual forma, es conveniente analizar el problema desde el punto de vista de las frecuencias, cuyo comportamiento se representa en la **Figura 1.19**.

Observe como a frecuencia cero, lógicamente no existe amplitud del movimiento. Sin embargo, merece especial atención el hecho de que con independencia del amortiguamiento, la vibración estabilizará a una amplitud de desplazamiento  $m_d r / M$  por lo cual es obvio que una buena condición de balanceo deberá garantizar el menor producto  $m_d r$ . Esto será abordado más adelante cuando se trate el problema del Grado de calidad del balanceo y el Desbalance residual. Observe además el notable crecimiento de la amplitud de las vibraciones en la máquina,



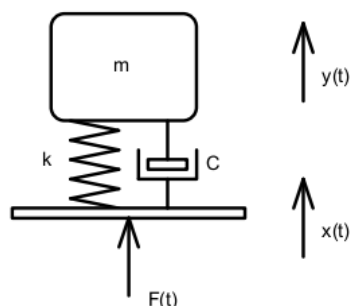
cuando la velocidad de operación del rotor se asemeja a la frecuencia natural del sistema máquina- soportes.

#### 1.4.2.6 Influencia de las vibraciones externas

En muchas ocasiones, es de gran importancia estudiar, cuantificar y controlar las vibraciones que llegan a la máquina debido a diferentes fuentes externas o sea, debido a fuerzas que no son generadas durante el funcionamiento de la propia máquina sino como consecuencia de la operación de máquinas vecinas.

En la **Figura 1.20** se observa que ahora la fuerza excitadora actúa en la base «de masa despreciable» del sistema, por lo que se tendrá movimiento en el cuerpo de la máquina y en su propia base. Al igual que en otros casos, este efecto se representará en el dominio de las frecuencias, sobre la base de relacionar la amplitud de las vibraciones en el cuerpo de la máquina respecto a la amplitud de las vibraciones en su base.

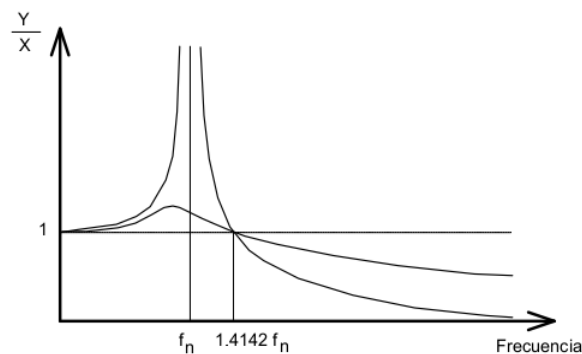
En este caso, cuando la frecuencia de las vibraciones transmitidas por máquinas vecinas hacia la base de la máquina afectada es mucho mayor que la frecuencia natural del sistema máquina- soportes, entonces los propios soportes filtrarán los niveles de vibraciones, limitando la llegada de estos al cuerpo de la máquina (**Figura 1.19**). Por otra parte, en la propia **Figura 1.19** se observa también que la influencia del amortiguamiento cambia drásticamente, dependiendo de la relación frecuencia de excitación/frecuencia natural por lo que, se deberá ser extremadamente cuidadoso al seleccionar o diseñar calzos o soportes antivibratorios.



**Figura 1.20. Problema de vibraciones en soportes. (Fuente: Palomino, 1997).**







**Figura 1.21. Relación entre la amplitud de las vibraciones en el cuerpo de la máquina y en la base de ésta. (Fuente: Palomino, 1997).**

Pero seguramente se preguntarán, ¿por qué analizar las vibraciones?

Se ha demostrado a partir de estudios realizados que la forma de vibración de una máquina en operación da mucha más información acerca del funcionamiento interno de la máquina que cualquier otra clase de prueba no destructiva. El análisis de vibraciones, cuando se aplica correctamente, permite a los especialistas detectar defectos mecánicos nacientes mucho antes que representen una amenaza a la maquinaria y a la producción. Estos análisis no solo detectan grandes posibles fallas, sino también pequeñas que por mucha experiencia no se detectan fácilmente y en un futuro se pueden hacer mayores. Con este análisis se obtiene el tiempo suficiente para programar el mantenimiento o para realizarlo al momento, en dependencia de los problemas presentados o las necesidades de la planta.

Entonces se puede afirmar que el análisis de vibraciones es una técnica, que aunque no precisamente exacta, es capaz de encontrar fallos en las máquinas anticipándose a la avería. Las ventajas de realizar este tipo de mantenimiento son la desaparición de fallos repentinos en los equipos estudiados y el conocimiento del estado de la máquina en cada momento. Así se disminuyen los costes económicos por reparaciones imprevistas o el paro en el proceso de producción, los cambios de elementos que todavía pueden seguir funcionando, el aumento de



la eficiencia y la disminución de costes de una parada. Además de todo esto, ayuda a mejorar el mantenimiento preventivo a realizar en la fábrica.

De esta manera se puede afirmar que es importante conocer sobre el análisis vibratorio ya que todo gira en mantener el mayor tiempo posible la máquina trabajando sin fallos para sí aumentar los tiempos de trabajo y disminuir el tiempo de reparación, para de esta forma aumentar el rendimiento de la máquina, que al disminuir el tiempo de reparaciones, disminuye el costo de mantenimiento y al aumentar el tiempo de trabajo se pueden obtener más utilidades del equipo.

### **1.5 Conclusiones**

Con el estudio de las principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias se conocieron algunas de las formas para elevar la efectividad del mantenimiento. Además se estudiaron los principios teóricos que sustentan el análisis vibratorio en máquinas rotatorias para obtener una mejor comprensión sobre el funcionamiento y el objetivo de todas estas tecnologías a la hora de realizar cualquier análisis vibratorio.



## **CAPÍTULO II Propuestas de tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias**

### **2.1 Introducción**

Este capítulo tiene como objetivo estudiar las tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias para elaborar la documentación de consulta necesaria que permita conocer sobre sus funcionamientos y aplicaciones en grandes industrias con el fin de proponer alternativas en las condiciones de la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” que pudieran fomentar el uso de estas tecnologías.

### **2.2 Tecnologías existentes en la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín**

Las tecnologías instrumentales usadas para el análisis vibratorio a máquinas rotatorias cumplen un factor importante dentro el desarrollo de cualquier industria, por su gran importancia de poder encontrar las causas de posibles fallos anticipándose a la avería, evitando las paradas no deseadas en la producción, reduciendo así los costos de mantenimiento. Se toma como ejemplo las tecnologías implementadas en la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín que son las siguientes:

- Medidor de vibraciones **TV-300** (con un precio de **2383,8** cuc)
- Analizador de vibraciones **VIBXPERT** (con un precio de **30889** cuc)
- Analizador de vibraciones **Smart Scanner** (con un precio de **37823** cuc)

#### **2.2.1 Funcionamientos y aplicaciones**

##### **2.2.1.1 Medidor de vibraciones VIBRATION PEN PLUS:**

Un instrumento de medir vibraciones globales en velocidad y aceleración y se utiliza en inspecciones de rutina no planificadas. Y las máquinas que se detectan con desviaciones de parámetros con este instrumento, permiten planificar tareas



de análisis con los equipos colectores de datos a los equipos detectados con problemas.

Los medidores de vibraciones ya sea mediante el procedimiento estándar recomendado por ISO o mediante procedimientos particulares propios de cada fabricante (aceleración (SKF), acústico (SKF), impulsos de choque (SPM), etc.), proporcionan información útil sobre el estado de las máquinas. Pérdidas mecánicas, desequilibrios, mala cimentación, falta de alineamiento, falta de lubricación, daños en los rodamientos, rotores arqueados, pérdidas de aletas, cavitación de bombas, holguras excesivas, etc.

### **Funcionamiento VIBRATION PEN PLUS:**

Este instrumento tiene un botón de encendido **ON** (con apagado automático). En la pantalla se muestran dos valores que corresponden a los dos modos de medición del aparato mm/s para Overall Vibración y gE para Acceleration Enveloping. Estas dos mediciones aparecen simultáneamente, dependiendo de cada caso puede aportar más información un método de medición o el otro.

También puede aparecer **OVER** si hay sobrecarga, **HOLD** cuando memorizo la medición y **BATT** si la batería esta baja.

- Overall Vibración (medición de la vibración conforme el estándar ISO 3954):

Este método está indicado para velocidades de vibración entre 10Hz y 1kHz. Muchos problemas mecánicos causan bajas frecuencias de vibración: pérdidas mecánicas, desequilibrios, mala cimentación, falta de alineamiento, resonancias, rotores arqueados, perdidas de aletas, etc.

- Acceleration Enveloping:

Este método puede ser más indicado para pequeñas amplitudes y altas frecuencias (10kHz - 30kHz).

### **Modo de medición:**



**Aplicación:** Este tipo de instrumentos se utiliza para seguir la evolución de una máquina. Por ello, hay que medir siempre en condiciones semejantes (temperatura, velocidad, etc.). De este modo se podrán comparar los datos recopilados.

A la hora de situar la sonda, es importante evitar grasa, aceite, superficies pintadas, huecos estructurales, zonas descargadas.

El ángulo que forma el instrumento, tiene que ser de aproximadamente 90° con la superficie.

La presión ejercida, tiene que ser firme pero no tan fuerte que modifique la vibración de la máquina.

La posición de la sonda de medida depende de cada caso.

#### **2.2.1.2 Analizador de vibraciones VIBXPRT I**

Es un instrumento colector de datos que registra las variables físicas tanto en valores totales de vibración como espectros de la señal sea desplazamiento, velocidad y aceleración, tomadas en la máquina. Este permite analizar la magnitud del problema en valor numérico y el análisis de la frecuencia para detectar posibles fallas del equipo, esto da la posibilidad de juzgar el estado técnico de la máquina y dictar un diagnóstico.

Por otra parte permite también realizar el balanceo en los ventiladores. Otras de las tareas fundamentales de este equipo es la evaluación de los rodamientos mediante el impulso de choque de los mismos. Con este instrumento se realizan las rutas planificadas en el mes que posteriormente son descargadas al programa de diagnóstico Omnitrend.

El colector de datos FFT y analizador de señales VIBXPRT es usado en casi cada sector de mantenimiento industrial, para la supervisión y diagnóstico de condiciones de máquinas.

El VIBXPRT se destaca por su:



- Rápida adquisición de datos.
- Análisis completo in situ.
- Ajustes pre-definidos basados en experiencia ideal para principiantes, confortable para expertos.
- Conexión para casi todos los tipos de sensores.

Con sus funciones comprensivas de mediciones y análisis, así como una interfaz gráfica de operación intuitiva, el VIBXPert es ideal para las inspecciones diarias. Junto con el software de PC OMNITREND, el VIBXPert proporciona una contribución importante al mantenimiento basado en condiciones, para prevenir tiempos muertos imprevistos de la máquina y pérdidas de producción costosas.

### **Funciones destacadas**

- Los íconos intuitivos ofrecen una guía para seleccionar la tarea de medición.
- Análisis de vibración de rotor con órbita, posición estática de rotor y excentricidad.
- Monitorización de bandas estrechas y anchas de frecuencias características en el espectro.
- Prueba de parada de máquina de uno o dos canales con RMS, amplitud o cascada.
- Balanceo en sitio en dos planos. Un "smiley" aparece cuando se ha logrado el grado de balanceo adecuado.
- Colección de datos basada en ruta con indicaciones claras de la localización de la medición.

#### **2.2.1.3 Analizador de vibraciones Smart Scanner**

Realiza todas las tareas del VIBXPert I pero tiene incorporado el software de alineación láser, que se utiliza en la alineación de los equipos principales y equipos de altas revoluciones.



VIBSCANNER es un multímetro y recopilador de datos para el monitoreo fuera de línea de condiciones de máquina. Con sus amplias funciones de medición y análisis y su conveniente navegación mediante palanca de mando, este útil instrumento resulta ideal para las rondas diarias de medición e inspección. (Catálogo, 2008)

¿Qué puede hacer el VIBSCANNER?

VIBSCANNER mide las variables más importantes de las condiciones de una máquina:

- Velocidad de vibración / desplazamiento /aceleración (según la nueva norma ISO 10816-3 y también para máquinas de baja velocidad a partir de 2 Hz)
- Impulso de choque (condiciones del rodamiento)
- Cavitación (por ejemplo, en bombas)
- Temperatura
- $s^{-1}$  o  $min^{-1}$

Se pueden ingresar otras variables de proceso manualmente a través de tareas definidas por el usuario o grabarse como voltajes /corrientes (corriente directa (DC)/corriente alterna (AC)) extra bajas. Balance, FFT (Fast Fourier Transform o Transformada rápida de Fourier) y análisis de señal como opción.

Si es necesario, el VIBSCANNER también puede actualizarse como FFT, analizador de señales o instrumento de balanceo. Sólo ingresado la contraseña las funciones de medición apropiadas se activan en el programa.

## **2.3 Procedimiento de diagnóstico en el uso de las tecnologías instrumentales para análisis vibratorio en máquinas rotatorias**

### **2.3.1 Medición de la vibración**

Se puede decir que la medición y análisis de vibraciones es utilizado, en conjunto con otros procesos, en todo tipo de industrias como técnica de diagnóstico de



fallas y evaluación de la integridad de máquinas y estructuras. En el caso de los equipos rotatorios, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas como tintas penetrantes, radiografía, ultrasonido, etc., es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención. (Saavedra, 1997)

Las etapas seguidas para medir y/o analizar una vibración, que constituyen la cadena de medición son:

- Etapa transductora.
- Etapa de acondicionamiento de la señal.
- Etapa de análisis y/o medición.
- Etapa de registro.

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

Típicamente hay cuatro tipos de sensores o transductores de vibraciones:

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

Para la medición de vibraciones en el exterior de las máquinas y en las estructuras hoy en día se utilizan fundamentalmente los acelerómetros. El acelerómetro tiene la ventaja respecto al velocímetro de ser más pequeño, tener mayor rango de frecuencia y poder integrar la señal para obtener velocidad o desplazamiento vibratorio. El sensor de desplazamiento se utiliza para medir





directamente el movimiento relativo del eje de una máquina respecto a su descanso.

Para la selección adecuada del sensor se debe considerar: valor de la amplitud, temperatura de la superficie y fundamentalmente el rango de las frecuencias a medir. La **Tabla 2.1** indica rangos de frecuencias de sensores de vibraciones típicos.

**Tabla 2.1. Rango de frecuencias de transductores de vibración típicos.**

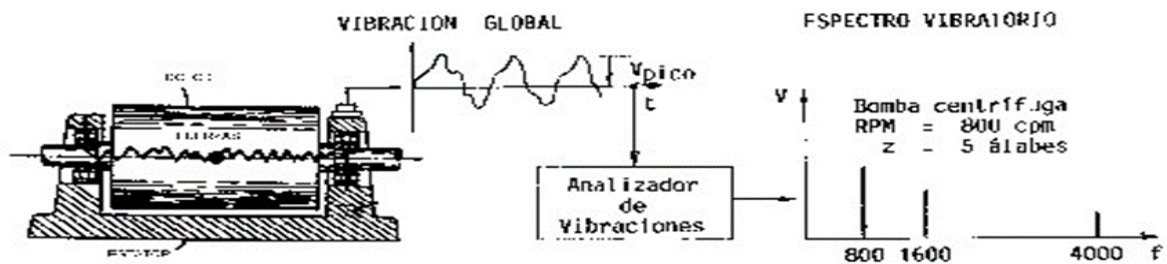
Fuente (Saavedra, 1997)

<b>Tipo de transductor</b>	<b>Rango típico de frecuencia (Hz)</b>
Desplazamiento sin contacto	0 - 10.000
Desplazamiento con contacto	0 -150
Velocímetro sísmico	10 - 1.000
Acelerómetro de uso general	2 - 7.000
Acelerómetro de baja frecuencia	0.2 - 2.000

Otro factor que debe tenerse en cuenta en la selección del sensor es el ruido eléctrico inherente a él. Por ejemplo, un acelerómetro de uso industrial tiene un ruido eléctrico típico de 500  $\mu\text{g}$  pico, mientras que un acelerómetro de baja frecuencia sólo tiene un ruido eléctrico típico de 10  $\mu\text{g}$  pico.

La etapa de acondicionamiento de la señal consiste en acondicionar la señal que sale del transductor para que pueda ser medida adecuadamente. Esto contempla en algunos casos, dependiendo del tipo de transductor, filtraje, integración, amplificación o demodulación.





**Fig. 2.1. Análisis espectral y de la forma de onda de una bomba centrífuga.**

**(Fuente: Saavedra, 1997)**

Una vez acondicionada la señal ésta puede ser medida o analizada. Un medidor de vibraciones es un instrumento que mide el valor pico, pico a pico o RMS de la vibración. Un analizador de vibraciones es un instrumento que realiza análisis espectral.

### 2.3.2 Equipos de medición

Antes de realizar las mediciones se debe asegurar que el instrumento de medición entregará el valor RMS de la velocidad vibratoria en el rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. Además, se debe verificar que el instrumento y sensor de vibraciones soportarán las condiciones ambientales tales como:

- Temperatura
- Campos magnéticos
- Longitud del cable
- Orientación del sensor

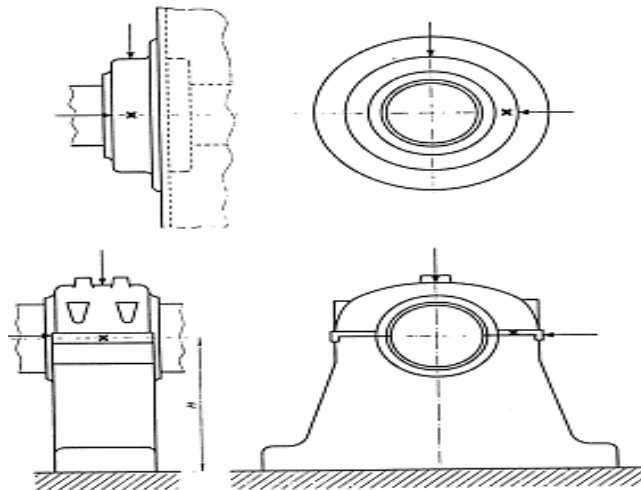
Especial atención debe ponerse en que el sensor esté correctamente montado y que su presencia no altere las vibraciones de la máquina. (Acosta, 2011)

### 2.3.3 Puntos de medición

Hay al menos un punto en la máquina (descansos) donde es importante conocer si existe una vibración significativa. Otro punto importante es en los pies de la máquina, es decir, en los puntos de unión a la fundación.



Las mediciones deben ser realizadas sobre cada descanso principal de la máquina, en las direcciones radiales (vertical y horizontal) y en la dirección axial. Se debe asegurar que las medidas representen la vibración de la caja de los descansos y no incluyan una resonancia local. (Acosta, 2011).



**Figura 2.2 Puntos de medición**

### 2.3.4 Condiciones de operación

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando bajo condiciones nominales como voltaje, flujo, presión y carga. En máquinas con velocidad variable, las mediciones deberían realizarse en las condiciones extremas. Los valores medidos máximos serán considerados representativos de la severidad de la vibración. (Consulta con experto: Peña, mayo 2014)

### 2.3.5 Clasificación de las máquinas

En este estándar, las máquinas se clasifican según la potencia, el tipo de montaje utilizado y el uso de la máquina. Las clasificaciones se muestran a continuación para las máquinas que giran entre 10 y 200 (rev/s).

- **CLASE I:** Máquinas pequeñas con potencia menor a 15 kW.



- **CLASE II:** Máquinas de tamaño mediano con potencia entre 15 y 75 kW, o máquinas rígidamente montadas hasta 300 kW.
- **CLASE III:** Máquinas grandes con potencia sobre 300 kW, montadas en soportes rígidos.
- **CLASE IV:** Máquinas grandes con potencia sobre 300 kW, montadas en soportes flexibles.
- **CLASE V:** Máquinas y sistemas conductores con fuerzas de inercia desbalanceadas debido al movimiento recíproco de alguno de sus elementos), montadas en fundaciones las cuales son relativamente rígidas en la dirección de la medición de la vibración.
- **CLASE VI:** Máquinas con fuerzas de inercia desbalanceadas, montadas en fundaciones las cuales son relativamente elásticas en la dirección de la medición de la vibración, tales como harneros vibratorios, máquinas centrífugas, molinos, etc.

La **Tabla no.1** para las máquinas de clase I a IV es apropiada para la mayoría de las aplicaciones de acuerdo a la experiencia. Las máquinas de clase V y VI, son difíciles de clasificarlas debido a que ellas varían considerablemente sus características vibratorias. Ver **Tabla no.1** en los anexos. En el rango de la velocidad, los valores de rms de la vibración según la experiencia adquirida en la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín permiten tener un parámetro para evaluar cualitativamente una máquina dada. Debe tenerse presente que esta es una evaluación cualitativa. Un nivel vibratorio **BUENO** significa que este nivel vibratorio le permitirá a la máquina funcionar en el largo plazo libre de problemas. Es decir, la vibración no disminuirá la vida nominal esperada en los componentes de la máquina. Por otro lado, un nivel vibratorio **INACEPTABLE** significa que la vida especificada para los elementos de la máquina disminuirá significativamente.



### 2.3.6 Adquisición e Interpretación de los datos en el uso de las tecnologías instrumentales para análisis vibratorio en máquinas rotatorias

#### 2.3.6.1 Pasos a seguir en la adquisición de datos:



**Figura 2.3 Toma de datos con transductor.**

1. Determinación de las características de diseño y funcionamiento de la máquina, como son:

Velocidad de rotación de la máquina, tipo de rodamiento, engranaje y condiciones del entorno en que esté situada como es el tipo de apoyo, acoplamientos, ruido, etc. También habrá que tener en cuenta las condiciones de funcionamiento como velocidad y cargas entre otras que normalmente afectarán a las mediciones de vibración.

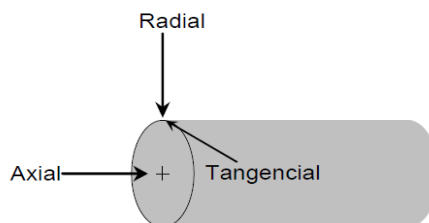
Determinación de la finalidad de la vibración que podrá incluir:

- Medidas de rutina para detectar en un momento determinado un posible fallo y determinar las causas que lo originan.
- Medidas para crear un histórico de datos y con él obtener un valor de base, sobre el que estará el valor de vibración que deba tener la máquina cuando sus condiciones de trabajo sean normales.

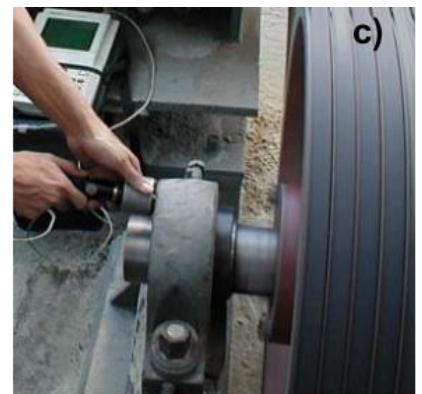
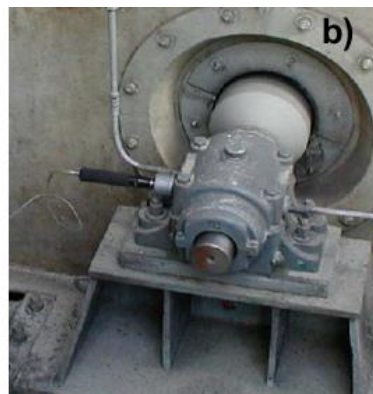


- Toma de datos antes y después de una reparación, la medida de antes pondrá de manifiesto el problema, elemento defectuoso y será más eficaz así su reparación. Después de la reparación se tomarán medidas que indiquen la evolución del elemento sustituido o la corrección del defecto existente.
  
- Selección de los parámetros de medición: desplazamiento, velocidad, aceleración, energía de impulsos. Ellos determinarán el transductor a utilizar.
  
- Determinación de posición y dirección de las medidas con los transductores, la vibración se tomará generalmente en rodamientos de la máquina o puntos donde sea más probable un fallo por acoplamiento, equilibrio, puntos donde se transmitan las fuerzas vibratorias.

Los tres sentidos principales en una medición son: horizontal, vertical y axial. Sentidos radiales son: horizontal y vertical, y se toman con eje del transductor a 90°; respecto al eje de rotación.



**Figura 2.4 Sentido de toma de datos.**



**Figura 2.5. Colocación de sensor de vibraciones en a) Dirección vertical, b) Dirección horizontal, c) Dirección axial.** Fuente: Castellanos, 2005.

- Selección del instrumento de medición y transductores.
  
- Determinación del tipo específico de datos requeridos para la interpretación de las medidas realizadas. Así se ahorrará tiempo a la hora de realizar las medidas y se obtendrá de estas, información más útil en el análisis.
  
- Los datos obtenidos pueden ser: valores de magnitud total, espectro de frecuencias amplitud-frecuencia que indica el tipo de problema existente, amplitud-tiempo para vibraciones transitorias rápidas o vibraciones muy lentas, energía de impulsos en rodamientos, engranajes y problemas de cavitación.
  
- Toma de datos. Paso esencial en el análisis, precisa de atención y fiabilidad de las medidas tomadas.

A la hora de la adquisición de datos es importante tener en cuenta:

- Secuencias de medición, tomar datos correctos y lo más rápido posible, evitan tiempo perdido.
  
- Lugar de toma de datos siempre será el mismo, con el transductor unido de una forma firme, para la veracidad de los datos.
  
- Seguimiento de la máquina, es decir, mantener un contacto con los operarios que trabajan con ella y los de mantenimiento, ellos serán las personas que conocen de cerca la máquina.
  
- Controlar el entorno exterior de la máquina, aspecto, ruido.



- Atender tendencias inesperadas. Estar preparado para tomar más datos, medidas cuando pueda haber signos de algún problema.
  
- Mantener sólo datos coherentes, tomados con precisión.
  
- Comparar con máquinas similares y en igual forma de trabajo.

Por tanto, se puede decir que la toma de datos es un paso esencial para un buen análisis de vibraciones. Para una buena interpretación de los datos es necesario tener unos datos fiables que hayan sido tomados de una forma metódica y precisa. Así podrá hacerse un diagnóstico de algún problema lo más exacto posible. (Consulta con experto: Peña, 2014)

#### **2.3.6.2 Interpretación de datos**

Una vez obtenidos de una forma metódica y precisa los datos de vibraciones de una máquina donde se ha detectado un problema, es necesario identificar cual ha sido su causa y así buscar la forma y momento de reparación más eficiente, es decir, que elimine el fallo y su coste económico sea el mínimo posible.

Un defecto puede localizarse al comparar las amplitudes de las vibraciones tomadas. Normalmente una máquina que funciona correctamente tiene valores que suelen seguir una línea con tendencia ligeramente ascendente o constante. Cuando en algún momento los valores aumentan o la tendencia asciende de una forma inesperada, se puede pensar en la presencia de algún problema.

Generalmente los valores de amplitud que se comparan son los de velocidad, una vez observado que esta ha aumentado de una forma inesperada, es importante comparar los valores de la energía de impulsos (g). Estos valores indicarán la gravedad del problema. Así un fallo puede detectarse al encontrar una tendencia de velocidad ascendente de forma imprevista y unos valores del parámetro g altos. También es posible que existiendo un problema haya valores de energía de impulsos altos, de repente disminuyan y poco a poco aumenten, esto puede dar





lugar a un fallo total donde la máquina deje de funcionar. Valores altos de energía de impulsos pueden ser indicadores en la mayor parte de los casos de problemas de rodamientos, acoplamientos y en los casos más extraños de problemas hidráulicos.

Generalmente la máxima amplitud de vibración se da en los puntos donde se localiza el problema, aunque muchas veces la vibración es transmitida a otros puntos de la máquina aunque en ellos no se encuentre el problema. El análisis de las gráficas puede indicar el tipo de defecto existente, pero muy pocas veces aparecen problemas únicos y por tanto espectros donde se refleje un defecto claramente. La experiencia y el conocimiento de la máquina son dos factores fundamentales a la hora de identificar la causa que produce una vibración importante.

Es esencial una vez corregido el problema seguir la evolución de la reparación. De esta forma se conocerá si realmente existía el defecto, si estaba situado en el punto con máxima vibración y lo que es más importante, seguir la evolución tras la reparación y asegurarse que el problema ha desaparecido.

El estudio de los datos de vibraciones, de sus espectros es la base para encontrar las causas y la forma de corregir el defecto que ellas indican. Sólo es importante prestar especial atención a las vibraciones que vayan acompañadas de otros efectos como ruido, pérdida de aceite o cualquier fallo, o bien los valores de amplitudes que sean excesivos comparados con otros en funcionamiento correcto, en esos casos se analizará la forma de los espectros que identificarán las causas de los problemas.

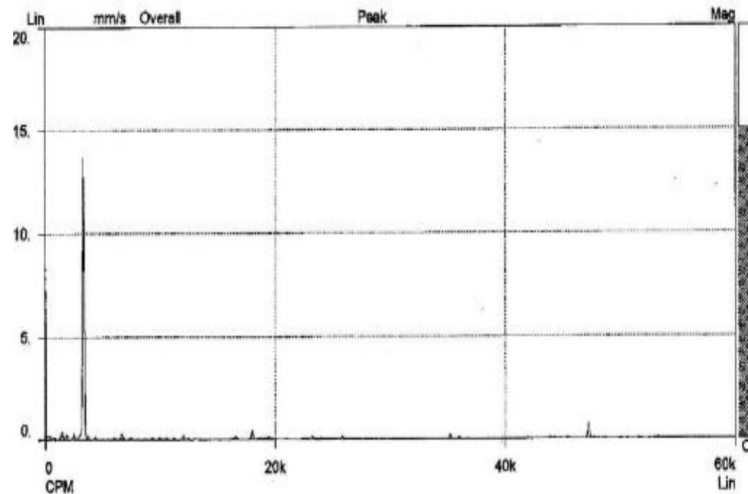
Los problemas mecánicos más comunes en las máquinas que producen vibraciones son desequilibrio entre ejes, falta de alineación de acoplamientos, defectos en rodamientos y engranajes y problemas eléctricos.

A continuación se puede ver la forma de identificar estos problemas analizando los datos y espectros de vibraciones.

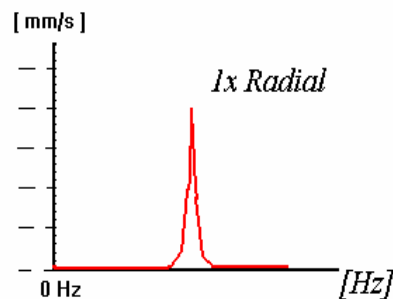


### 2.3.6.2.1 Desequilibrio

Esta es una de las causas más probable de que exista vibración en las máquinas, se puede identificar al ver un pico en una frecuencia que coincide con la velocidad de giro.



*Espectro característico:*



**Fig.2.6 Espectro de velocidad de un problema de desequilibrio.**

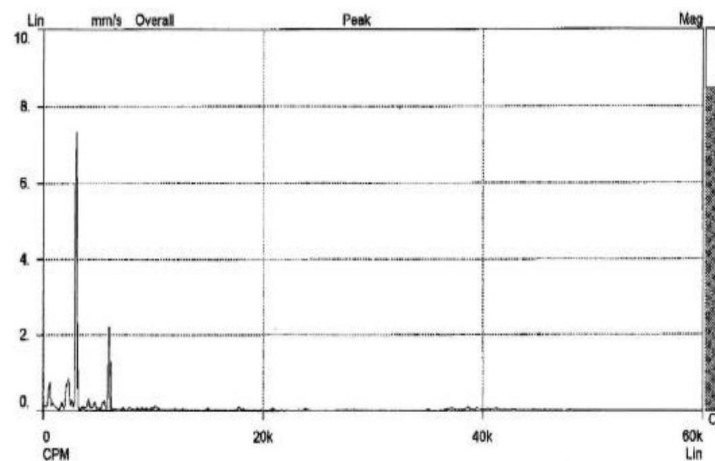
Para conocer la cantidad de desequilibrio hay que encontrar la amplitud de la vibración en la frecuencia igual a la frecuencia natural. La amplitud es proporcional a la cantidad de desequilibrio. Normalmente, la amplitud de vibración es mayor en sentido radial (horizontal y vertical) en las máquinas con ejes horizontales, aunque la forma de la gráfica sea igual en los tres sentidos.



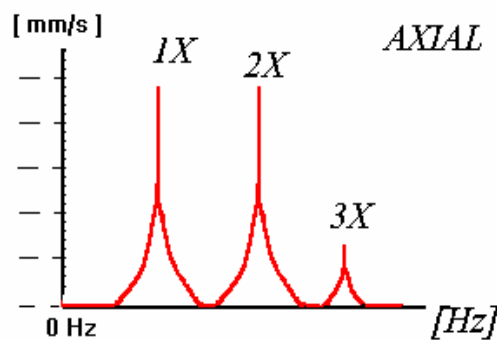
Para analizar los datos de las vibraciones es importante la experiencia y el conocimiento de la máquina así como los datos tomados en ella. Cuando aparece un pico en frecuencia igual a la frecuencia natural.

El desequilibrio no es la única causa posible, la desalineación también puede producir picos a esta frecuencia. Al surgir vibraciones en esta frecuencia como otras causas posibles están los engranajes o poleas excéntricas, falta de alineamiento o eje torcido si hay alta vibración axial, bandas en mal estado (si coincide con sus frecuencias naturales), resonancia o problemas eléctricos, en estos casos además del pico a frecuencia de la frecuencia natural habrá vibraciones en otras frecuencias.

### 2.3.6.2 .2 Desalineación



*Espectro característico:*



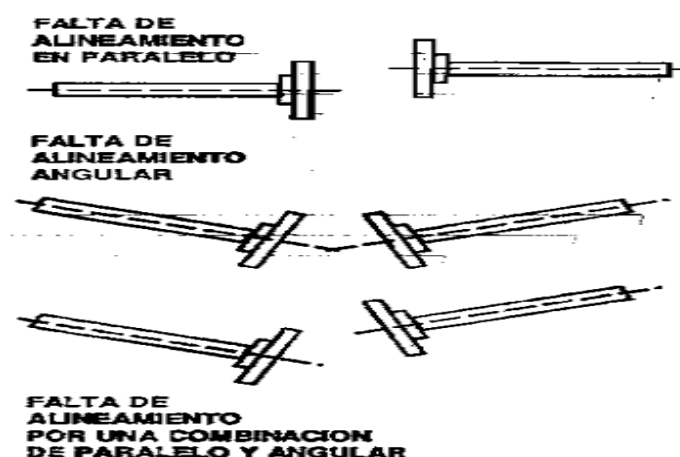
**Fig.2.7 Espectro de velocidad de un problema de desalineación.**



Es un problema muy común debido a la dificultad que supone alinear dos ejes y sus rodamientos de forma que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones. La forma de vibración de un eje torcido es similar a la de una mala alineación angular.

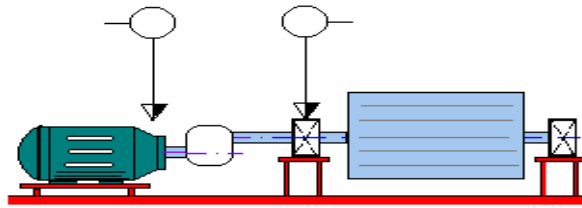
Para reconocer una vibración debida a una desalineación en la gráfica se pueden ver picos a frecuencias iguales a la velocidad de giro del eje, de dos o tres veces esta velocidad en situaciones donde este problema sea grave. Un ejemplo del espectro de este problema se observa en la **Figura 2.7**, la forma de la gráfica será similar en las tres direcciones, variando únicamente la amplitud. Igual que en todos los casos, la amplitud es proporcional a la gravedad del defecto, aquí de desalineación. Este fallo puede presentar alta vibración en sentido axial además de radial. Así siempre que exista una alta vibración en axial y radial; y si la axial es mayor que la mitad de la radial puede existir entonces un problema de desalineación o ejes torcidos.

En la **Figura 2.8** se pueden ver los tres tipos básicos de desalineación, en paralelo, angular y una combinación de ambos. La falta de alineación en paralelo, **Figura 2.9**, produce sobre todo vibración en dirección radial con frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje.



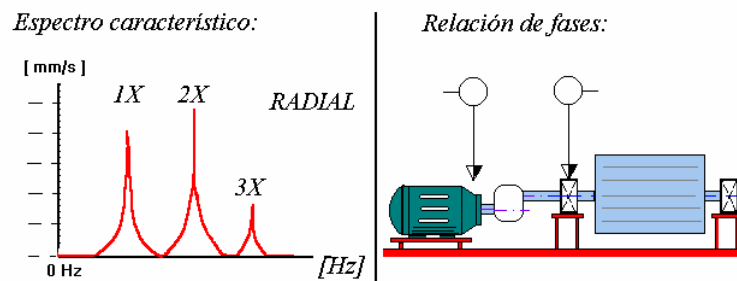
**Fig. 2.8 Tipos de falta de alineación.**



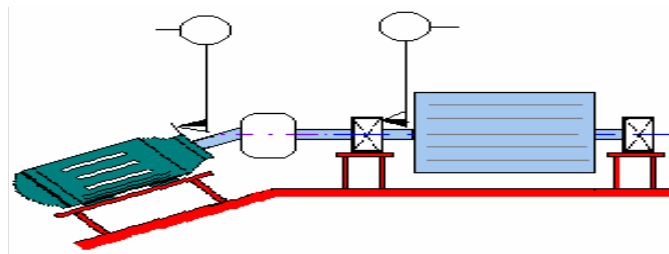


**Figuras. 2.9 Ejemplo de Falta de alineación en paralelo.**

La falta de alineación en paralelo, **Figura 2.9**, produce sobre todo vibración en dirección radial con frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje.



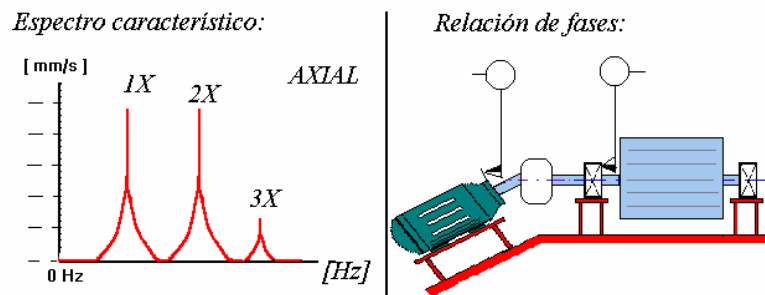
**Figura 2.10 Falta de alineación en paralelo.**



**Figuras. 2.11 Ejemplo de Falta de alineación angular.**

La falta de alineación angular, representada en la **Figura 2.11**, da vibración en dirección axial en los dos ejes a una frecuencia igual a la frecuencia natural.

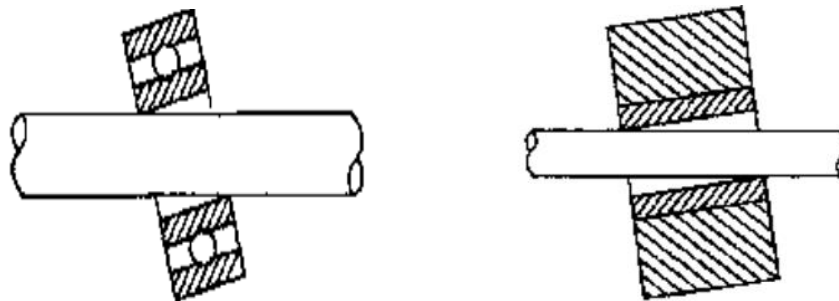




**Figura 2.12 Falta de alineación angular.**

Las condiciones de una desalineación no siempre llevan consigo un acoplamiento. Una desalineación entre eje y su rodamiento, **Figura 13**, es un ejemplo usual de este defecto y que sólo se elimina corrigiendo la colocación del rodamiento.

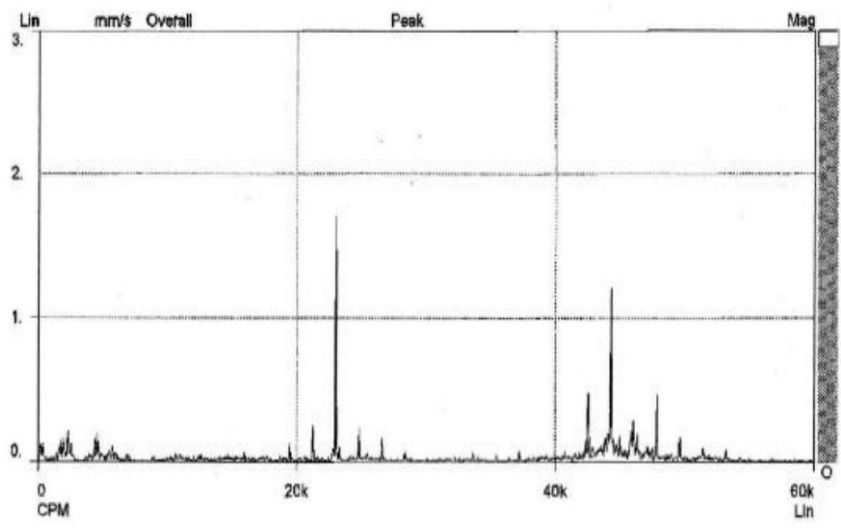
Un casquillo mal alineado con su eje, como se ve en la figura 2.12, no crea vibración importante, a menos que además exista un problema de desequilibrio, este defecto sería el que produciría una falta de alineación.



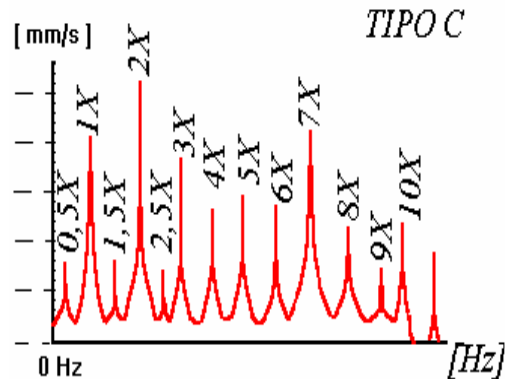
**Fig. 2.13 Rodamiento y casquillo mal alineados respecto al eje.**

Este defecto se puede observar al encontrar picos a frecuencias que coinciden con múltiplos enteros de la velocidad de giro del engranaje que falla, además existirá vibración de amplitud menor de forma simétrica a la frecuencia del engranaje. En la **Figura 2.14** se pueden observar picos de valor importante a frecuencias que son múltiplos de la velocidad de giro de un piñón, de forma simétrica a estos picos existen otros de valor muy pequeño y separados una distancia igual a la velocidad de giro.





*Espectro característico:*



**Fig. 2.14 Espectro de velocidad de un problema de engranaje.**

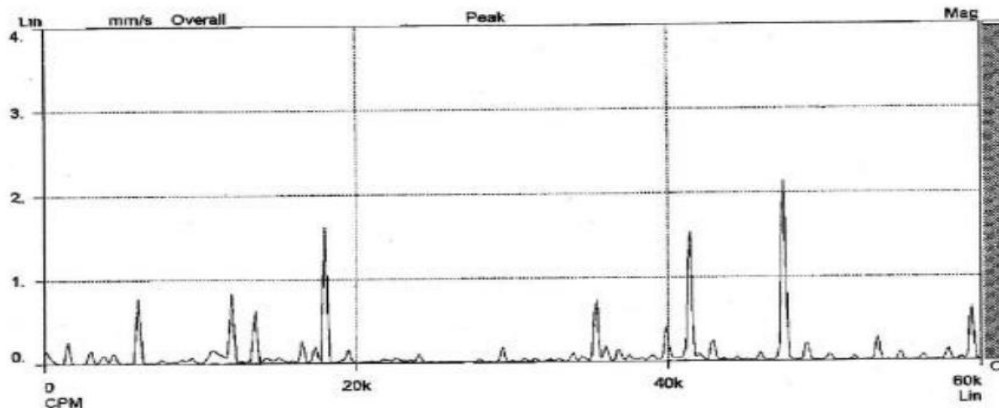
Los problemas de engrane que dan esta vibración son: desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallos de lubricación y elementos extraños entre dientes. Las vibraciones causadas por defectos de engranajes pueden ser detectadas en varios puntos de las máquinas. Esta es una característica que diferencia una gráfica causada por un engranaje con poca carga y la vibración producida por un rodamiento, ya que el diagrama de amplitud frente a frecuencia puede dar lugar a confusión cuando la carga del piñón es baja. Tanto el fallo de engranaje como el de un rodamiento llevan consigo también la aparición de ruido.

### 2.3.6.2 .3 Problemas eléctricos

La vibración es creada por fuerzas desiguales que pueden ser causadas por la forma interna del elemento. Es complicado reconocer gráficamente este problema, ya que no tiene características que indiquen de forma sencilla que esta es la causa de vibración. El espectro puede llevar a errores por ser similar a la del desequilibrio, solo que aquí al desconectar la corriente el problema desaparecerá. Se detectarán picos mayores a distancias iguales a cuatro veces la velocidad de giro si los polos son



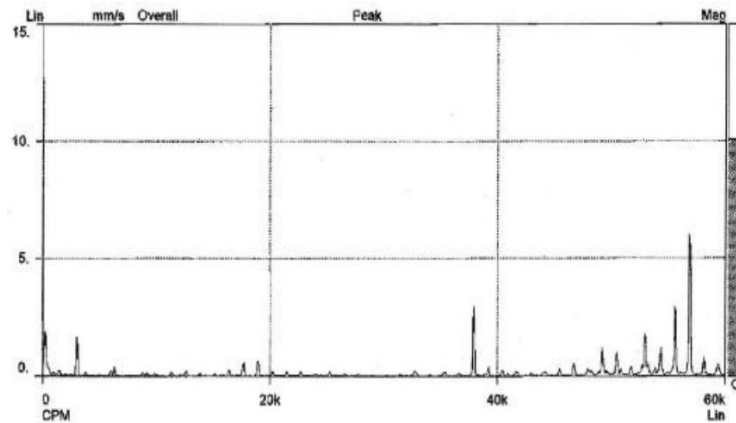
cuatro, distinguiendo la vibración separada una frecuencia coincidente con la velocidad de giro. En la **Figura 2.15** se ve el espectro que da este tipo de problema.



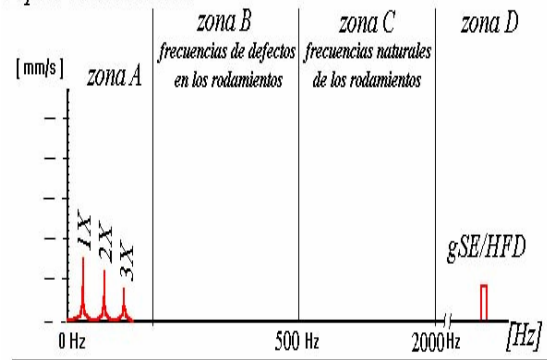
**Fig. 2.15 Espectro de velocidad de un problema eléctrico.**

#### **2.3.6.2 .4 Rodamientos**

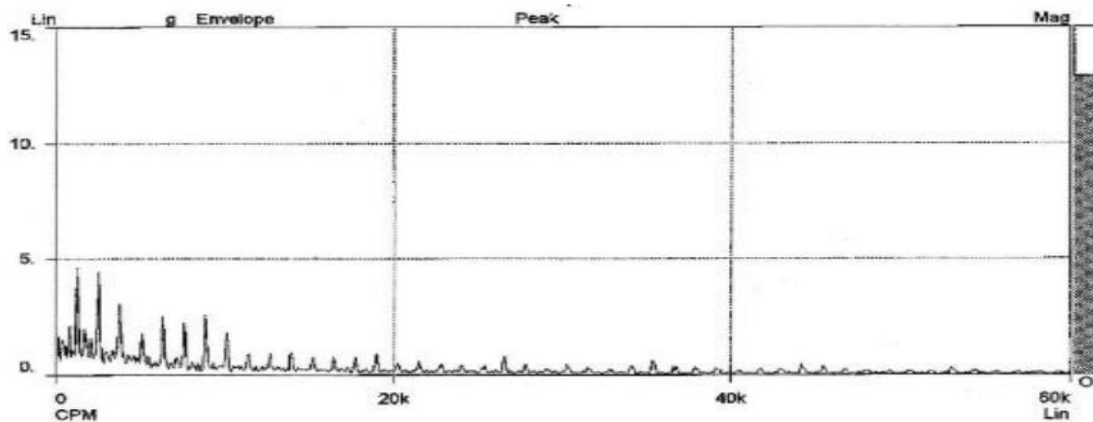
Fallos en elementos del rodamiento dan vibración a unas frecuencias altas no relacionadas con la velocidad de rotación y de amplitud también aleatoria. A continuación, en las **Figuras 2.16** y **2.17** se pueden observar los espectros de velocidad y aceleración, respectivamente, de un rodamiento de bolas defectuoso. Es relativamente fácil reconocer este fallo a ver la gráfica de amplitud-frecuencia, ya que se caracteriza por tener muchos picos juntos a altas frecuencias y de amplitud variable que dependerá de la gravedad del problema. La frecuencia a la que se produce la máxima amplitud puede dar una idea del elemento defectuoso del rodamiento. Los defectos en elementos rodantes, pistas de rodamiento o jaula de retención generan fuerzas que se transmiten al alojamiento y estructura que les rodea.



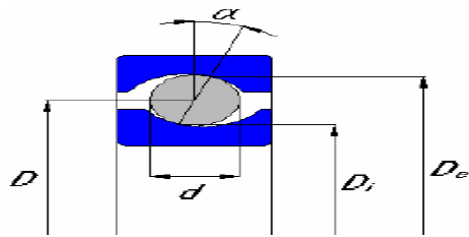
*Espectro característico:*



**Fig. 2.16** Espectro de velocidad de un rodamiento defectuoso.



**Fig. 2.17** Espectro del parámetro g de un rodamiento defectuoso.



$\alpha$ : ángulo de contacto.  
 $D$ : diámetro primitivo.  
 $d$ : diámetro del cuerpo rodante.

$$D_i = D - d \cdot \cos \alpha = D \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$D_e = D + d \cdot \cos \alpha = D \cdot \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Frecuencia de deterioro del aro exterior	$BPF0 = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro del aro interior	$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro de un elemento rodante	$BDF = \frac{D}{d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cdot \cos^2 \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro de la jaula	$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$

**Figura 2.18 Frecuencias características de los rodamientos.**

Para detectar que tipo de fallo existe se ha de obtener la frecuencia a la que la amplitud es mayor y comparar con las calculadas según las fórmulas dadas en la **Figura 2.17**.

Cuando esta es la causa de la vibración es importantísimo conocer el valor de la energía de impulsos. Con este parámetro se puede intuir la gravedad del problema. La gráfica que representa g-frecuencia indica que la vibración del rodamiento a alta frecuencia es inestable y generada al azar.

Así el estado de la máquina se identifica según la siguiente tabla:

**Tabla 2.3 Nivel de vibración Fuente: (Torres s/f)**

Estado de la máquina	Desplazamiento	Velocidad	Aceleración	Energía de impulsos
Buenas condiciones	Normal	Normal	Normal	Normal
Rodamiento defectuoso Funcionamiento	Normal	Normal	Alto	Alto

Problemas Analizar, reparar	Alto	Alto	Alto	Alto
--------------------------------	------	------	------	------

El fallo de un rodamiento se detecta sólo en la medida realizada en él, es decir, no se transmitirá al resto de los puntos de la máquina. Exteriormente el rodamiento defectuoso se notará por el exceso de ruido.

Los rodamientos son elementos importantes en la máquina y cuyo fallo puede dar problemas más graves, por eso es necesario tener un especial cuidado con ellos. Pueden fallar por errores en el montaje, lubricación inadecuada, defectos internos en la fabricación, corriente eléctrica, desalineación, rodamiento no preparado para la carga que soporta. Estas son las causas más comunes de fallo.

#### **2.4 Propuestas a la facultad de ingeniería en la Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya” que pudieran fomentar el uso de estas tecnologías, para un posible laboratorio de análisis vibratorio**

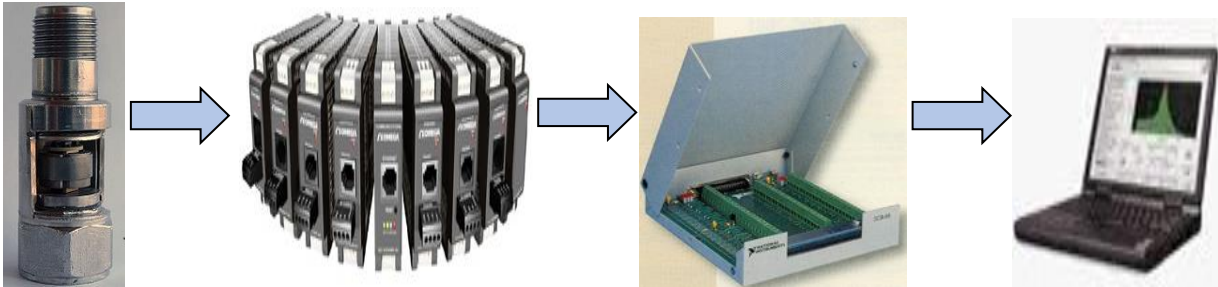
Por todas las razones anteriormente expuestas se realiza las siguientes propuestas, ya que se considera que los estudiantes vinculados a la carrera de Ingeniería Mecánica deben tener conocimiento sobre todas estas aplicaciones por la gran importancia que tienen para su futuro como profesionales de la rama, ya que una vez egresados de la universidad comenzarán su vida laboral dentro del sistema empresarial donde tendrán que cumplir tareas relacionadas con el análisis vibratorio dentro del programa de mantenimiento predictivo y logrando tener una mayor preparación sobre el tema pueden cumplir eficientemente dichas tareas.

##### **2.4.1 Propuesta # 1 para realizar análisis vibratorio a máquinas rotatorias**

La primera propuesta sería:

Crear un sistema de adquisición de datos con los siguientes elementos:

- Transductor (Sensor)
- Acondicionador de señal (analógica-digital)
- Tarjeta de adquisición de datos
- Software (Computadora)



**Figura 2.19 Componentes de un sistema de adquisición de datos.**

El sistema de adquisición de datos puede ser creado con el programa LabVIEW (acrónimo de Laboratorio Virtual Instrumentación Engineering Workbench), con un lenguaje de programación visual gráfico, capaz de montar un procedimiento virtual idóneo para realizar un análisis vibratorio. En él se pueden obtener dos parámetros fundamentales como el espectro de frecuencia y valores de rms (Valor eficaz de la vibración).

Utilizando la maqueta existente en el departamento de ingeniería mecánica del área de mantenimiento se podrán elaborar varias prácticas de laboratorio con el equipo mediante las cuales se pueden hacer comparaciones de los resultados para determinar el estado técnico del equipo.

El proceso de medición comienza por el transductor (acelerómetro), el cual permite convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica medible. Este valor tomado en tiempo real genera una señal analógica, que mediante el acondicionador se adecua a niveles compatibles con la tarjeta de adquisición de datos que hace la

transformación a señal digital permitiendo de esta manera ser manipulado por un ordenador.

La práctica de laboratorio tiene como objetivo enriquecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Con la aplicación de que puedan desarrollar un análisis vibratorio en tiempo real, comparando mediciones de los resultados obtenidos.

Estos equipos se pueden comprar con la compañía National Instruments.

**Tabla 2.4 Componentes del sistema**

<b>Componentes de un sistema de adquisición de datos</b>	<b>Precio por equipo (euro)</b>
Transductor (acelerómetro)	250
Acondicionador de señal	213
Tarjeta de adquisición de datos	337
Computadora	500
Total	1300

### **2.4.1.1 Información de los componentes del sistema de adquisición de datos**

#### **Software**

El LabVIEW no es más que una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando así su comprensión. Al tener ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de demorar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario

final. Un programa se divide en Panel Frontal y Diagrama de Bloques. El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, en la cual se definen los controles e indicadores que se muestran en pantalla. El Diagrama de Bloques es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí es donde se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan.

Este programa fue creado por National Instruments en el año 1976 para funcionar sobre máquinas MAC. Salió al mercado por primera vez en 1986. Actualmente está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales o VIs, lo que da una idea de para que se usa: el control de instrumentos. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no solamente en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a programadores no expertos o con escasos conocimientos.

### **Tarjeta de Adquisición de Datos**

Serie OME-PCI-1002 es una familia de PCI.

Presentan una adquisición de datos de 110 kilohercios bajo DOS y Windows. Las Juntas proveen 32 aportes de fines solo o 16 diferenciales, 16 aporte digital y 16 digitales canales de salida.

El OME-PCI-1002 incluye 16 canales de aporte digital y 16 canales de producción digital. Un panel OME-DB 8025 tornillo terminal puede usarse para conectarse a digital y a las líneas de la /O. El OME-DB 16P aisló a la junta digital de aporte y el pizarrón del relevador DE OME-DB 16R puede usarse para conectar lo digital y o/la O en el OME-PCI-1002 para señales mundiales reales.

### **Acondicionador de Señal**

La nueva serie iD de acondicionadores de señal combina la precisión del instrumental de laboratorio con el rendimiento requerido por las exigentes

aplicaciones industriales. Las series iD de acondicionadores de señal son perfectas para aquellas aplicaciones de adquisición de datos, pruebas y medidas, procesos de control y automatización industrial donde precisión, rendimiento y fiabilidad son extremadamente importantes.

Estas se montan sobre un carril DIN de 35 mm y funcionan con cualquier voltaje de alimentación de 10 a 32 CC. (También está disponible la correspondiente fuente de alimentación conmutada de 24 Vcc 850 mA). Los dispositivos se caracterizan por tener tres vías de aislamiento de hasta 1800 Vcc entre las entradas de señal, salidas y fuente de alimentación.

Las series iD se caracterizan por siete modelos diseñados para cada una de las entradas de señal más ampliamente medidas: proceso (CC) de voltaje y corriente; calibrador de tensión; termopares; RTD; voltaje CA; corriente CA; frecuencia/pulso.

Los dispositivos de la serie iD están diseñados para trabajar directamente con una variedad de sensores y transductores; no son necesarios otros componentes. Para sensores como RTD, calibradores de tensión y algunos transductores de procesos, se necesita una excitación estable que se proporciona directamente desde el módulo iD.

	Salida analógica o digital
	Modelos disponibles para: termopar, RTD, proceso de voltaje y corriente, tensión, frecuencia/pulso, voltaje CA y corriente
	Hasta 1800 Vcc de aislamiento
	La serie iDRN proporciona una salida de 0 a 10 Vcc, de 4 a 20 mA o de 0 a 20 mA
	La serie iDRX proporciona salida RS- 485 (Protocolo de serie ASCII y protocolo de serie MODBUS)
	Instalación y configuración de software gratis
	Ajuste de fábrica y configuración disponibles sin cargo (para modelos iDRN de salida



analógica)

### **Características**

Alimentación de entrada: de 10 a 32 Vcc

Salida iDRX: 2 hilos (semidúplex) RS- 485 (Protocolo en serie Omega® y protocolo en serie Modbus)

Salida iDRN: 0 a 10V @ 10 mA máx.; 0 a 20 mA o 4 a 20 mA, 10V de conformidad

Aislamiento: Pico de 1800 Vcc

Respuesta gradual típica al 99%: 1 segundo

Entorno operativo: -5 a 55 °C (23 a 131 °F)

Rango de temperatura de almacenamiento: -40 a 85 °C (-40 a 185 °F)

Montaje: Carril DIN de 35 mm

Dimensiones: 90 de alto x 25 de ancho x 107 mm de profundidad  
(3,54 x 0,99 x 4,21")

### **Transductor (sensor, acelerómetro)**

En este caso es un sensor **piezoeléctrico** que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas.

Los **sensores piezoeléctricos** son catalogados como herramientas versátiles para la medición de varios procesos. Estos son utilizados para garantías de calidad, procesos de control, investigación y desarrollo en diferentes campos industriales. Aunque el efecto piezoeléctrico fue descubierto por Curie en 1880, comenzó a ser implementado en las aéreas sensoriales de la industria solamente a partir del año 1950. Desde entonces, el uso de este principio de medición se ha incrementado, ya que puede ser considerado como una tecnología madura gracias a su fácil manejo y

su alto nivel de confiabilidad. Tiene aplicaciones en campos como la medicina, la industria aeroespacial y la instrumentación nuclear, así como pantallas táctiles de teléfonos celulares. En la industria automovilística, los elementos piezoeléctricos son utilizados para monitorear la combustión durante el desarrollo de motores de combustión interna.

El ascenso de la tecnología piezoeléctrica está directamente relacionado a un conjunto de ventajas inherentes. El alto módulo de elasticidad de muchos materiales piezoeléctricos puede ser comparado con el de metales con magnitudes cuyo orden alcanza 106 N/m. A pesar de que los sensores piezoeléctricos son sistemas electromecánicos que reaccionan a la compresión, los elementos sensoriales muestran casi una deflexión nula. Por esta razón los sensores piezoeléctricos son tan precisos, tienen una frecuencia natural extremadamente alta y una excelente linealidad en amplio rango. Además, la tecnología piezoeléctrica es insensible a campos electromagnéticos y radiación, facilitando mediciones bajo condiciones adversas. Algunos materiales usados (especialmente fosfato de galio o turmalina), poseen un alto grado de sensibilidad incluso al ser expuestos a altas temperaturas, permitiendo que el sensor sea eficiente hasta temperaturas de 1000 °C. La turmalina también posee piroelectricidad; gracias a esta característica se genera una señal eléctrica cuando la temperatura del cristal es alterada. Este efecto es muy común en materiales piezo-cerámicos con un sensor piezoeléctrico en miniatura.

#### **2.4.2 Propuesta # 2 para realizar análisis vibratorio a máquinas rotatorias**

La segunda propuesta está conformada por:

- Un colector de datos
- Una maqueta

El colector de datos sería: VIBSCANNER Smart SCANNER.

El cual permite desarrollar un interfaz completo en el análisis vibratorio a las máquinas rotatorias. Se pueden descargar directamente en la computadora los resultados de las mediciones tomadas y con el software OMNITREND que trae incluido se puede planificar todo un proceso de recolección de datos.

La práctica de laboratorio tiene como objetivo enriquecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Con la aplicación de que puedan desarrollar un análisis vibratorio en tiempo real a las máquinas rotatorias existentes en la universidad y comparar los resultados obtenidos.

Con este equipo se podrán elaborar varias prácticas de laboratorio. No es necesario contar con una computadora ya que se pueden observar y comparar en él los parámetros a evaluar para determinar el estado técnico del equipo.

Este equipo se puede obtener en la compañía National Instruments con un costo de **37823** cuc.

#### 2.4.2.1 Datos del equipo

Trae incluido, sensores, cables, accesorios de VIBRONET, software para PC.



### **Figura 2.20. Componentes del equipo**

Edición 04/2008    VIB 9.661-4EG

El paquete de "Mantenimiento" contiene los componentes básicos para la grabación de datos de medición y diagnósticos de máquina. El CD-ROM contiene una versión demo del software OMNITREND para la computadora, el firmware (software) básico de VIBSCANNER y la documentación completa en formato PDF (manual y catálogos).

Contenido:

- VIB 5.400 Instrumento VIBSCANNER
- VIB 5.420 Cargador de batería de VIBSCANNER
- VIB 5.425 Juego de batería recargable de
- VIBSCANNER
- VIB 5.428 Estuche de VIBSCANNER
- VIB 5.430-2 Cable de VIBSCANNER para PC
- VIB 8.970 OMNITREND versión demo
- Instrumento sin juego de batería recargable (VIB 5.425)



**Figura 2.21 Aplicaciones del equipo**

VIBSCANNER es un multímetro y recopilador de datos para el monitoreo fuera de línea de condiciones de máquina. Con sus amplias funciones de medición y análisis y su conveniente navegación mediante palanca de mando, este útil instrumento resulta ideal para las rondas diarias de medición e inspección.

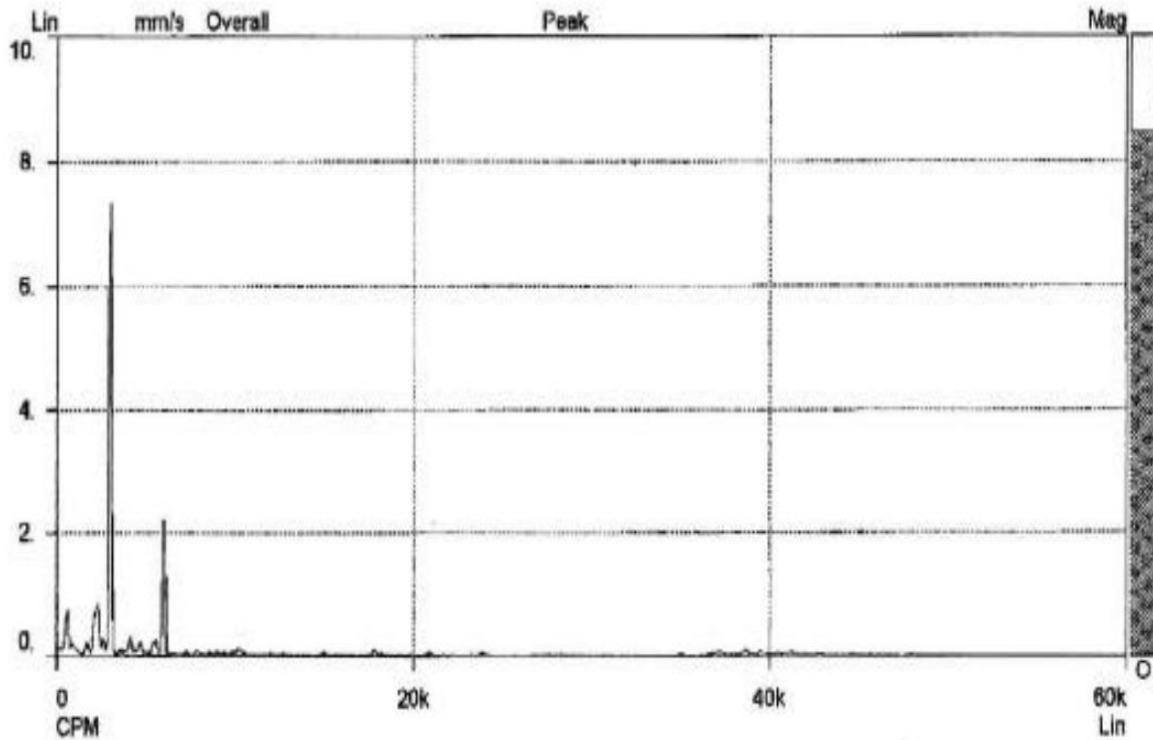
En conjunto con el software OMNITREND para computadoras, contribuye en gran medida a evitar paradas de máquinas no planificadas y costosas pérdidas de producción dentro del marco de un programa previsto de mantenimiento.

Mide las variables más importantes de las condiciones de una máquina:

- Velocidad de vibración / desplazamiento / aceleración (según la nueva ISO 10816-3 y también para máquinas de baja velocidad a partir de 2 Hz)
- Impulso de choque (condiciones del rodamiento)
- Cavitación (por ej. en bombas)
- Temperatura
- RPM

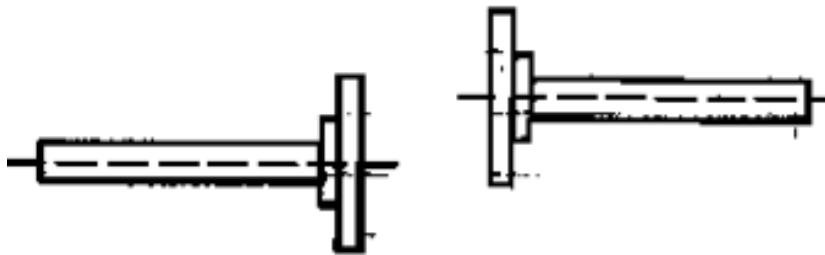


- Obtener el espectro de frecuencia con el equipo en condiciones de operación.



**Figura 2.23 Ejemplo de un espectro de velocidad de un problema de desalineación.**

- Modificar la posición del acoplamiento de bridas.



**Figura 2.24 Ejemplo de falta de alineamiento en paralelo.**

- Poner en funcionamiento el motor y tomar relaciones rms y espectro de frecuencia.

- Comparar resultados.
- Referencia en bibliografía de consulta.



**Figura 2.25 Ejemplo de Alineado.**

En el equipo están marcados 6 puntos donde se pueden realizar las mediciones.

Pasos a seguir:

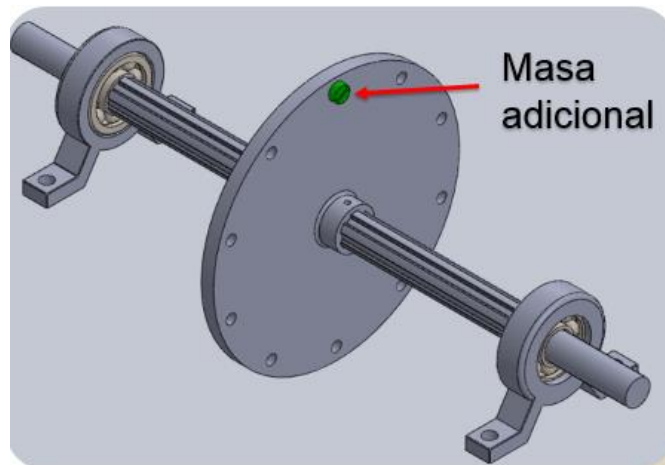
- 1) Se toman como vibraciones normales las normadas en el punto 5 de la simulación del desbalance.
- 2) Con el equipo detenido se baja el pedestal trasero y se corre un milímetro hacia un lado, luego se aprieta el pedestal.
- 3) Se arranca el medio en la velocidad 3.
- 4) Se coloca el sensor en los puntos 1, 2, 3 y 4, 5 y 6.



- 5) Se enciende el equipo de medir las vibraciones, se utiliza la misma escala de la simulación del desbalance.
- 6) Se registran los valores de las amplitudes de las vibraciones en cada eje, (x, y, z).
- 7) Los valores de las vibraciones se comparan con los normales y la norma ISO 2372.
- 8) Se observará en qué eje aumentan las vibraciones producto a la desalineación.

**NOTA:** La desalineación que se simulará es la angular.

#### 2.4.3.2 Desbalance

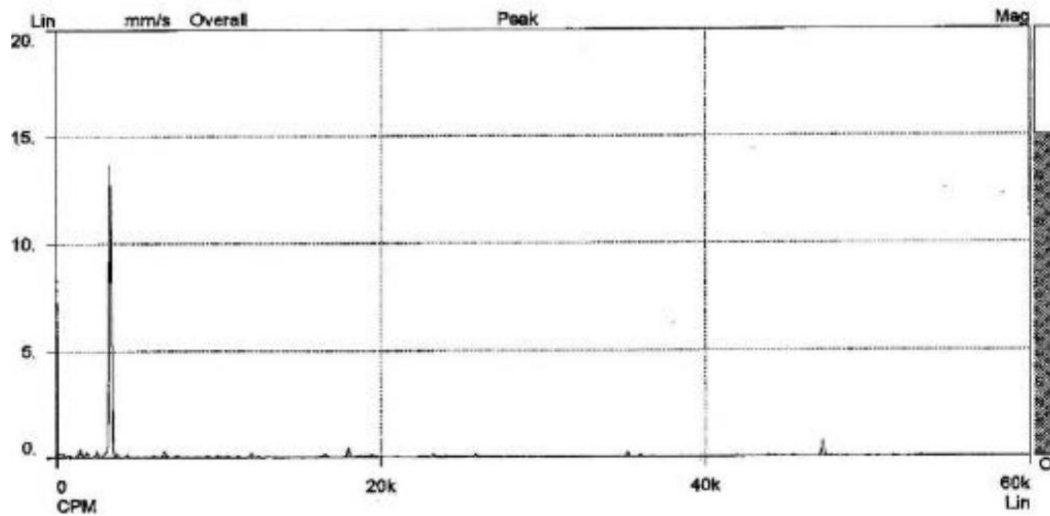


**Figura 2.26 Ejemplo de Desbalance.**

**Objetivo:** Que los estudiantes puedan conocer los efectos de desbalance en comportamiento vibratorio de una máquina rotatoria.

#### **Preparación de la práctica:**

- Medir niveles de rms de la aceleración, velocidad, desplazamiento con el equipo.
- Obtener el espectro de frecuencia con el equipo.



**Figura 2.27 Ejemplo de un espectro de velocidad de un problema de desequilibrio.**

- Modificar la posición del acoplamiento.
- Poner en funcionamiento el motor y tomar relaciones rms y espectro de frecuencia.
- Comparar resultados.
- Referencia en bibliografía de consulta.

Pasos a seguir:

1. Se arranca el motor en la velocidad 3.
2. Se coloca el sensor del equipo en uno de los puntos 1, 2, 3, 4, 5, 6 unido de una forma firme, comprobando que la superficie este limpia.
3. Se mide los niveles de rms de la aceleración, velocidad, desplazamiento con el equipo.
4. Se obtiene el espectro de frecuencia con el equipo en condiciones de operación.

5. Se anotan los valores de las mediciones y se analizarán según la norma ISO 2372 en la columna para máquinas rotatorias según los kW de potencia.
6. Se detendrá el motor.
7. Uno de los tornillos existentes en el volante se desenroscará completo.
8. Se tomarán los valores de la amplitud de las vibraciones y se comparará con los resultados y con la ayuda de la norma ISO se llegará a la conclusión del estado del equipo.

La norma ISO 2372 especifica diferentes límites en la condición mecánica de la máquina de acuerdo con la potencia de ésta y el tipo de soporte. Estos indicadores contemplan la medición del NIVEL TOTAL de Velocidad RMS dentro de un rango de frecuencias de entre 10 Hz y 1000 Hz.

La norma ISO número 2372 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.

ISO 2372 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.

**Tabla 2.5 Norma ISO 2372**

<b>Nivel, V dB</b>	<b>Menos que 20 HP</b>	<b>20 a 100 HP</b>	<b>Más que 100 HP</b>
125	No Permisible	No Permisible	No Permisible
121	No Permisible	No Permisible	A Penas Tolerable

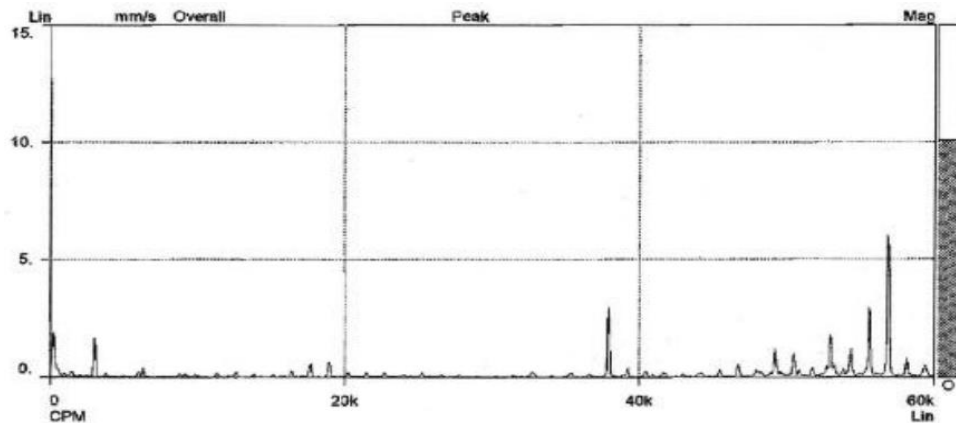
117	No Permissible	A Penas Tolerable	A Penas Tolerable
113	A Penas Tolerable	A Penas Tolerable	Permissible
109	A Penas Tolerable	Permissible	Permissible
105	Permissible	Permissible	Bueno
101	Permissible	Bueno	Bueno
97	Bueno	Bueno	Bueno

#### 2.4.3.3 Pedestal flojo

**Objetivo:** Que los estudiantes puedan conocer los efectos de desbalance en comportamiento vibratorio de una máquina rotatoria.

#### Preparación de la práctica:

- Medir niveles de rms, de la aceleración, velocidad, desplazamiento con el equipo.
- Obtener el espectro de frecuencia con el equipo.



**Figura 2.28 Ejemplo de un espectro de velocidad de un problema en los rodamientos.**

- Modificar la posición del acoplamiento.
- Poner en funcionamiento el motor y tomar relaciones rms y espectro de frecuencia.
- Comparar resultados.
- Referencia en bibliografía de consulta.

Pasos a seguir:

- 1) Se toma del ejercicio las vibraciones en el punto 5 de la simulación del desbalance.
- 2) Se arranca el medio en la velocidad 3.
- 3) Uno de los tornillos del apoyo del pedestal trasero se afloja.
- 4) Se miden las vibraciones en los tres ejes en el pedestal y se compara con las del punto 1.
- 5) Se aprieta el tornillo.
- 6) Se vuelve a medir en los tres ejes y se comparan con los normados en el punto 1.

## 2.5 Conclusiones

Con el estudio de los procedimientos de diagnóstico en el uso de las tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias se pudo conocer cómo es que se realiza la medición de las vibraciones y los equipos necesarios para realizar esta actividad. Además, se describieron los pasos a seguir para realizar el proceso de adquisición e interpretación de los datos, fundamental para realizar el análisis vibratorio. Uno de los aspectos más significativos es la realización de dos propuestas para fomentar el uso de las tecnologías instrumentales para un posible laboratorio de análisis vibratorio, además de las propuestas de prácticas de laboratorio elaboradas con el fin de fortalecer el proceso de aprendizaje de los estudiantes sobre el empleo de estas tecnologías en el análisis vibratorio.

### Impacto económico

El estudio de las vibraciones es necesario en todas las carreras de ingeniería, pues, un mal control de ellas provocaría grandes daños materiales y pérdida de vidas humanas.

Es importante reconocer que en ocasiones las vibraciones son buenas y en otros casos provocan grandes daños. Las máquinas de gran responsabilidad si no se tiene control de su diseño, su explotación y su mantenimiento pueden ocasionar destrucción de estructuras, así como de la humanidad. Su falla podría terminar con la vida de sus operarios u otras personas y ocasionar prejuicios a la economía por el gran costo de reparación o de compra de estos equipos, por no controlar factores tan importantes como las vibraciones y sus frecuencias resonantes.

## CONCLUSIONES

1. En el desarrollo actual de la ciencia y la técnica es indispensable el empleo de equipos y tecnologías para medir las variables de comportamiento de las máquinas y garantizar su estado técnico.
2. Con la realización del presente trabajo de diploma se ha obtenido como resultado la propuesta de selección y uso de las tecnologías instrumentales para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias, permitiendo de esta manera que tanto estudiantes, como profesores y profesionales de esta rama puedan contar con un material de consulta útil y que contribuya a enriquecer sus conocimientos en la materia.
3. Posteriormente al estudio de las principales tendencias en el mundo en el uso de las tecnologías para el análisis vibratorio en máquinas rotatorias se pudo conocer una de las formas para elevar la efectividad del mantenimiento y una vez estudiados los principios teóricos que sustentan el análisis vibratorio en máquinas rotatorias se pudo comprender mejor el funcionamiento y el principal objetivo de todas estas tecnologías a la hora de realizar cualquier análisis vibratorio.
4. La aplicación consecuente de la propuesta realizada puede incidir notablemente en la formación integral de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda gestionar en Cuba o en el extranjero la compra, alquiler o préstamo de los equipos propuestos para poder realizar el análisis vibratorio en máquinas rotatorias.
2. Diseñar una maqueta para realizar análisis vibratorio a máquinas rotatorias, con la que se puedan simular todos los defectos durante un proceso.
3. Realizar prácticas de laboratorio que ilustren y enseñen la independencia que existe entre el mal funcionamiento y comportamiento vibratorio.
4. Poner el documento a disposición de todos aquellos interesados en el tema.



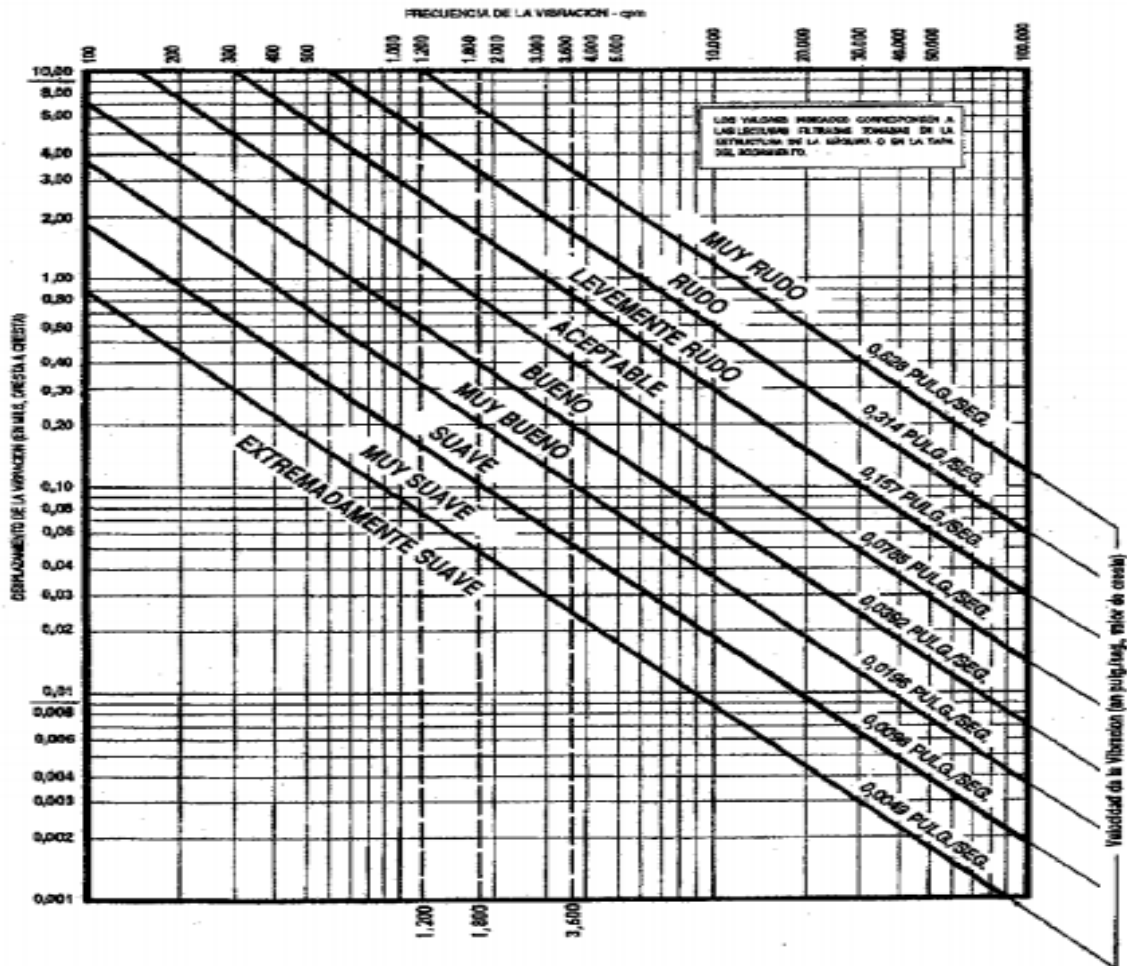
## BIBLIOGRAFÍA

1. [Online] [Cited: Abril 13, 2014.]  
<http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/viewFile/73/72>.
2. [Online] [Cited: Abril 14, 2014.] <http://www.finaltest.com.mx/Analizadores-de-espectro-s/22.htm>.
3. [Online] [Cited: Abril 15, 2014.] [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/3708.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/3708.pdf).
4. [Online] [Cited: Abril 15, 2014.] <http://www.nch.com.au/wavepad/es/fft.html>.
5. [Online] [Cited: Abril 17, 2014.]  
[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0171\\_EO.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0171_EO.pdf).
6. **Acosta Avecillas, Douglas Steven and Molina Jiménez, Johannex Kingsiño.** Adquisición de vibraciones mecánicas de un motor en funcionamiento. Guayaquil : s.n., 2011.
7. BlogSpot. BlogSpot. [Online] [Cited: Abril 12, 2014.]  
<http://monitoreodemaquinarias.blogspot.com/>.
8. **Castellanos Torres, Melvin Enrique and Sánchez Miranda, Max Francisco.** Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera. San Salvador : s.n., 2005.
9. **Colegio de Ingeniería Industrial.** Mantenimiento Industrial. 2008.
10. Condition monitoring of variable-speed and load machinery using time - frequency distributions. **Saavedra, P and Araya, F.** 8, s.l: INSIGHT, 2001, Vol. 43.
11. CUJAE. CUJAE. [Online] [Cited: Abril 14, 2014.]  
<http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/viewFile/113/112>.
12. **Díaz, Sergio E.** Medición y Análisis de vibración.

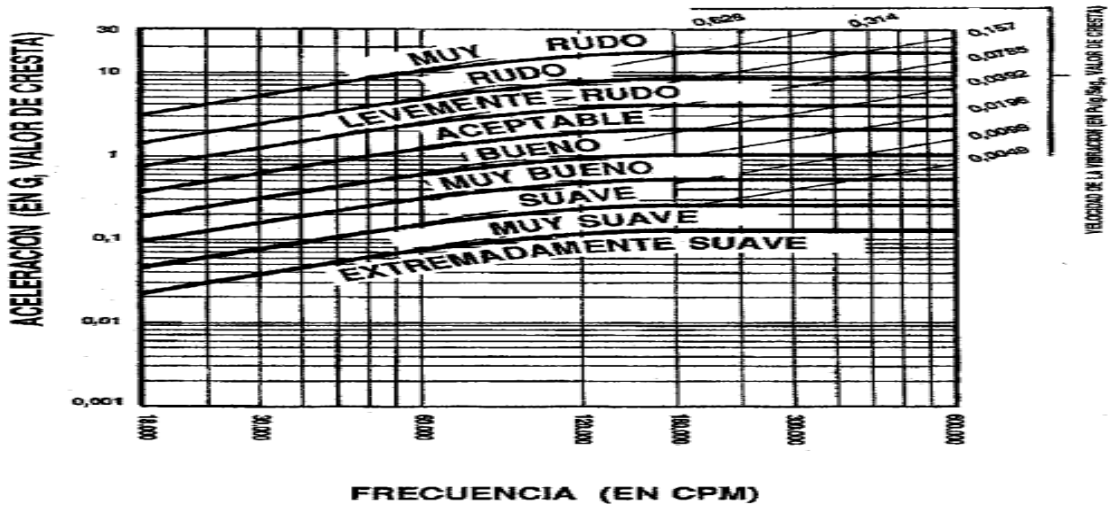
13. **Domínguez Gómez, Miguel Ángel.** DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS II. 2010.
14. **Harris, C M.** Shock and vibration handbook. New York : s.n., 1988.
15. **López, Pedro I.** Práctica 2 – Filtrado y amplificación de señales. 2012.
16. **Marín, Dr. Ing. Evelio Palomino.** Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias. 1997.
17. MES. MES. [Online] [Cited: Abril 12, 2014.]  
<http://revistas.mes.edu.cu/greenstone/collect/repo/import/repo/20120830/71208057810.pdf>.
18. **Penkova Vassileva, María.** 1, s.l. : Ciencia y Sociedad, 2008, Vol. XXXIII.
19. **Peña Padroza, José.** Especialista Grupo diagnóstico de la Empresa Productora de Níquel y Cobalto “Comandante Ernesto Che Guevara” Moa, Holguín, Abril 14, 2014.
20. **Saavedra, P and Estupiñan, E.** Impacto del Mantenimiento Proactivo en la Productividad. Lima, Perú : s.n., 2001.
21. Time-Frequency Distributions. A Review. **Cohen, L.** 7, s.l: Proceeding of the IEEE, 1989, Vol. 77.
22. Vibration Analysis and Diagnosis of a crack shaft. **Tsai and Wang, T C.** 3, s.l: Journal of Sound and Vibration, 1992, Vol. 192.

## ANEXOS

Anexo 1. Gráfica de la severidad de la velocidad y el desplazamiento.



Anexo. 2. Gráfica de la severidad de la velocidad de aceleración.



Anexo. 3. Rango de velocidad Norma ISO 2372.

Rango de Velocidad Efectiva RMS (mm/s)	Tipos de Máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 - 0,28	A	A	A	A
0,28 - 0,45				
0,45 - 0,71				
0,71 - 1,12	B	B	B	
1,12 - 1,8	B			
1,8 - 2,8	C	C	B	B
2,8 - 4,5				B

4,5 - 7,1	D		C	
7,1 - 11,2		D		C
11,2 - 18			D	
18 - 28		D		

A: Buena, B: Satisfactoria, C: Insatisfactoria, D: Inaceptable

#### Anexo 4. Ejemplos de instrumentos para el análisis vibratorio a máquinas rotatorias



Anexo 5. Ejemplo de un diagrama de bloques usando el LabVIEW de un sistema de adquisición de datos.

