

**Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas.
Facultad de Ingeniería Mecánica.
Departamento de Ingeniería Mecánica.**



TRABAJO DE DIPLOMA

**Análisis de las vibraciones en máquinas rotatorias en el sector industrial de la
construcción**

Autor: Roberto Rafael Jacomino Cañizares

Tutor: Prof. Dr. C. Ing. Jose R. Marty Delgado.

Curso: 2012-2013

Desarrollo del Pensamiento



Facultad de Ingeniería Mecánica

Cuando un hombre de ciencia busca conocimiento, aun no hallándolos en su totalidad, descubre fragmentos muy importantes, que son precisamente los que constituyen la ciencia

Claude Bernard

Mediocratoria



Facultad de Ingeniería Mecánica

A dios nuestro señor que nos guía por siempre, a mis padres, abuelos que me han transmitido todo su amor y experiencia y han hecho de mí el hombre que soy hoy en día, por eso le dedico este trabajo por ser ellos los principales autores de mi vida, que con todo el amor y gratitud del mundo a todos sus esfuerzos le dedico esta mínima recompensa.

A mis tíos y tía por darme un profundo apoyo moral.

No se puede dejar de mencionar a mis compañeros de cuarto, el Chino, Perdomo, Javier, Calimba, Ignacio y a Freddy que fueron las personas más allegadas a mí en la universidad y por los gratos, buenos y difíciles momentos compartidos.

Tampoco puedo dejar de mencionar a mis amigos de mi pueblo que han jugado un papel fundamental en cada momento de mi vida, me han dado la confianza para seguir adelante en cada tropiezo que nos da la misma, por eso les agradezco a Idonis, Alberto, Jorge Alfredo, Reiby, Jorgito, Álvaro, Yoslandi, Laritza, Yadira, Lizandra, Dianelis, Denise, Ilien, Lisy, Figueroa y Geiny.

Agradecimientos



Facultad de Ingeniería Mecánica

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron con la realizacion de este trabajo y especialmente, el Dr. C. Ing. Jose R. Marty Delgado por su entrega y dedicación en esta investigación.

Figura 1.1	Sistema mecánico simple.....	7
Figura 1.2	Péndulo simple.....	9
Figura 1.3	Sistema masa resorte.....	10
Figura 1.4	Sistema mecánico simple con amortiguamiento.....	11
Figura 1.5	Ejemplo de vibraciones verticales traslacionales.....	12
Figura 1.6	Conjunto rueda neumático.....	13
Figura 1.7	Sistema con dos grados de libertad.....	13
Figura 2.1	Diagrama para el uso de las vibraciones.....	25
Figura 2.2	Señalizaciones rotor para el balanceo en un plano sin medición de fase.....	29
Figura 2.3	Ilustración del efecto cruzado.....	33
Figura 2.4	Planos de balanceo y puntos de medición.....	33
Figura 2.5	Desbalance.....	34
Figura 2.6	Puntos de vista del rotor.....	34
Figura 2.7	Espectro del desbalance.....	35
Figura 2.8	Puntos de medición del desbalance.....	36
Figura 2.9	Punto del desbalance.....	36
Figura 2.10	Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor puntos de medición y su espectro.....	36
Figura 2.11	Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor, puntos de medición y su espectro.....	37
Figura 2.12	Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor, puntos de medición y su espectro.....	37
Figura 2.13	Espectro para rotores en voladizo.....	38
Figura 2.14	Puntos de medición.....	38
Figura 2.15	Puntos de medición.....	39
Figura 2.16	Espectro para los ejes flexados.....	39
Figura 2.17	Puntos de medición.....	39
Figura 2.18	Espectro para el desalineamientos.....	39
Figura 2.19	Puntos de medición.....	40

Figura 2.20	Espectro caso de paralelo.....	40
Figura 2.21	Puntos de medición.....	41
Figura 2.22	Espectro para angular.....	41
Figura 2.23	Ejemplo de diferentes espectros en rodamientos para diferentes pistas.....	42
Figura 2.24	Ejemplo de diferentes espectros en rodamientos para diferentes pistas.....	42
Figura 3.1	Máquina de fabricar bloques.....	48
Figura 3.2	Molino de bolas.....	49
Figura 3.3	Desalineamientos en paralelo	50
Figura 3.4	Desalineamientos angular.....	50
Figura 3.5	Espectro del desalineamientos paralelo.....	50
Figura 3.6	Espectro del desalineamientos angular.....	50
Figura 3.7	Medición para el desbalance.....	51
Figura 3.8	Espectro del desbalance.....	51
Figura 3.9	Puntos de medición en el caso de nuestro equipo.....	51
Figura 3.10	Esquema del cuerpo libre escogido por el autor.....	52
Figura 3.11	Primer modo de frecuencia.....	54
Figura 3.12	Segundo modo de frecuencia.....	54
Figura 3.13	Tercer modo de frecuencia.....	55
Figura 3.14	Cuarto modo de frecuencia.....	55
Figura 3.15	Quinto modo de frecuencia.....	56

Introducción.....	1
Capítulo I: Fundamentos de las técnicas del procesamiento de vibraciones para el monitorizado de maquinarias rotatorias	
1.1 Las vibraciones mecánicas. Definiciones y conceptos básicos.....	4
1.2 Clasificación de las vibraciones mecánicas.....	6
1.3- Normas técnicas relacionadas para la medición y el control de las vibraciones	14
Capítulo II: Elementos fundamentales para la caracterización de la vibración en máquinas rotatorias	
2.1 Empleo de las vibraciones en el mantenimiento.....	23
2.1.1 Diagnóstico usando mediciones de vibraciones:.....	24
2.1.2 Evaluación del estado de la máquina usando valores globales de vibración....	25
2.1.3 Identificación de problemas usando análisis de frecuencias de vibración.....	25
2.1.4 Uso del espectro de frecuencias de vibración en el mantenimiento.....	26
2.2 Técnicas generales de detección de fallos en máquinas rotatorias.....	27
2.2.1 Técnicas de balanceo.....	28
2.3 Defectos más frecuentes en máquinas rotatorias.....	34
2.4 Consejos para diagnosticar desalineamiento.....	42
2.5 Características generales y especificaciones técnicas de los colectores de vibraciones.....	43
Capítulo III: Caso de estudio para la caracterización de la vibración	
3.1 Estudio funcional y constructivo de la maquinaria seleccionada del sector industrial de la construcción.....	48
3.2 Defectos más frecuentes en la maquina seleccionada y puntos de medición para el caso de desalineamientos.....	49
3.3 Calculo de velocidad crítica del molino de bolas utilizando el sistema de cuerpo libre escogido por el autor.....	51

3.4	Modelación de vibraciones debidas a fallos locales.....	53
	Conclusiones Generales.....	57
	Recomendaciones.....	59
	Bibliografía.....	61
	Anexos.....	63

Resumen



Facultad de Ingeniería Mecánica

Las vibraciones han sido utilizadas como un indicador del estado técnico de las máquinas y hasta hoy día, continúan 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. En el presente trabajo se abordan de forma general, los procesos de detección de fallos en máquinas rotatorias con el objetivo de elaborar una guía metodológica para la caracterización de la vibración en máquinas del sector industrial de la construcción. Se ofrecen además, los conceptos fundamentales sobre las vibraciones y las normas técnicas relacionadas para la medición y el control de las vibraciones. Se brindan las técnicas generales de detección de fallos en máquinas rotatorias; algunos de los aspectos tratados se aplican a un caso de estudio de un molino de bolas. Los resultados obtenidos pueden ser extendidos a otros tipos de equipos y situaciones.

Palabras Claves: Vibraciones Mecánicas, Equipos Rotatorios, Operaciones, Fallos

Abstract



The vibrations have been used as an indicator of the technical condition of the machines and to this day, continue to be the most representative phenomenon related to their technical state, being able through vibration measurements, detect and identify failures already developed or are premature development. In this paper we address a general, process fault detection in rotating machinery with the aim of developing a methodological guide for the characterization of vibration in machines construction industry. They also present, the fundamental concepts of vibration and related technical standards for the measurement and control of vibrations. They provide general techniques for fault detection in rotating machinery, some of the issues discussed apply to a case study of a ball mill. The results can be extended to other types of equipment and situations.

Keywords: Mechanical Vibrations, Rotating Equipment, Operations and Fault

Introducción



Facultad de Ingeniería Mecánica

Las máquinas y las estructuras no son cuerpos rígidos, sino sistemas formados por elementos elásticos que reaccionan a las fuerzas externas e internas con deformaciones finitas. Dependiendo de la variación de las fuerzas en el tiempo, estas deformaciones pueden ser estudiadas por la dinámica y dentro de estas, las vibraciones. Por muy precisa que sea la construcción de una máquina, el desbalance siempre estará presente en menor o mayor grado. El desbalance producirá a su vez vibraciones que serán de mayor magnitud a medida que el desbalance aumenta y a medida que la tecnología permite elevar las velocidades de las máquinas. Con el aumento de las vibraciones, los elementos que constituyen las máquinas estarán sometidos a sollicitaciones mayores que se traducirán en esfuerzos mayores, lo cual acarreará una vida menor de la máquina. (Autores and Colectivo 2006)

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 para comprobar si el comportamiento 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. (Cruz, Barillas et al. 2007)

Cuando el nivel de deterioro de una máquina llega a un cierto punto, ésta empieza a operar de manera anómala. Si dicha anomalía no es corregida, los daños evolucionan, con mayor o menor rapidez, hasta llegar a su completa inoperatividad, bien por rotura o deterioro de alguno de sus componentes o bien por no ofrecer las prestaciones para las que había sido diseñada. Independientemente del tipo de máquina de la que se hable los niveles de vibración excesivos son siempre peligrosos para su funcionamiento y están limitados por algunas normativas vigentes. (Autores and Colectivo 2006)

Situación problemática: Teniendo en cuenta el tema de estudio, las empresas que poseen equipos industriales con partes móviles, especialmente con movimientos rotatorios, así como también diversas estructuras sometidas a esfuerzos externos, desarrollan sus diagnósticos a partir del sistema de mantenimientos planificados, en

donde, el análisis de vibraciones, en ocasiones, no toma en cuenta todas las potencialidades del diagnóstico de equipos mediante el análisis de vibraciones.

Se delimita como **Objeto de Investigación** los elementos móviles que conforman las maquinas del sector industrial de la construcción.

Se define como **Campo de Acción** la prevención de posibles fallos en las máquinas industriales a partir del diagnóstico de vibraciones en los elementos móviles que las conforman

Valor Científico de la propuesta

Se presenta una guía para identificar los fallos en las máquinas rotatorias con el fin de diagnosticar y caracterizar las vibraciones que en ellas se producen.

El **Objetivo General** es elaborar una guía metodológica para la caracterización de la vibración en máquinas rotatorias del sector industrial de la construcción.

Para el cumplimiento del objetivo general se han propuesto los siguientes **objetivos específicos**:

1. Evaluar la necesidad del empleo de técnicas de diagnóstico por vibraciones en la maquinaria del sector industrial de la construcción.
2. Definir la configuración adecuada para efectuar el análisis y las mediciones de las vibraciones con el empleo de los colectores de vibración en máquinas del sector industrial de la construcción.
3. Caracterizar los defectos más frecuentes que se presentan en un equipo del sector de la construcción mediante el análisis funcional y constructivo del mismo.

La Hipótesis de investigación plantea que si se establece un correcto diagnóstico, tomando como base el análisis de las vibraciones, se puede incidir favorablemente en la prevención de futuros fallos en equipos rotatorios del sector industrial de la construcción.

Justificación de la investigación

Los resultados de esta investigación le brindarán a la comunidad científica-técnica una herramienta para el diagnóstico de equipos industriales mediante vibraciones. Con esta investigación se contribuye a ampliar el horizonte cognoscitivo sobre este tema en los

profesionales de la Ingeniería Mecánica, lo cual será un elemento favorecedor para la introducción al estudio de las vibraciones mecánicas en equipos rotatorios. Las conclusiones a las que se arriban sirven como punto de partida para investigaciones posteriores.

Viabilidad de la Investigación

La investigación es viable ya que se cuenta con profesionales y estudiantes de la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas” capacitados para llevar a cabo la investigación.

Estructura del trabajo

El trabajo de diploma consta de una síntesis o resumen, introducción, tres capítulos, así como conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos. En el capítulo I se abordan los conceptos fundamentales sobre las vibraciones mecánicas y los fundamentos de las técnicas de procesamiento de vibraciones para el monitorizado de maquinarias rotatorias. En el capítulo II se proporcionan los elementos fundamentales para la caracterización de la vibración en máquinas rotatorias y finalmente en el Capítulo III se aplican los elementos anteriores a un caso de estudio para la caracterización de los elementos fundamentales de la vibración.

Capítulo 1



Facultad de Ingeniería Mecánica

1.1 Las vibraciones mecánicas. Definiciones y conceptos básicos.

Desde que aparecieron los primeros instrumentos musicales, en especial los de cuerda, la gente ya mostraba un interés por el estudio del fenómeno de las vibraciones, por ejemplo, Galileo encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación, además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas.(Internet 2011)

El estudio de las vibraciones mecánicas también llamado mecánica de las vibraciones, es una rama de la mecánica, o más generalmente de la ciencia, que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos o sistemas y de las fuerzas asociadas con ella.

Estos estudios y otros posteriores ya indicaban la relación que existe entre el sonido y las vibraciones mecánicas: Se pueden mencionar entre otros, Taylor, Bernoulli, D' Alembert, Lagrange, Fourier, etc. La ley de Hooke en 1876 sobre la elasticidad, Coulomb con la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales, Rayleigh con su método de energías, etc., fueron grandes físicos que estructuraron las bases de las vibraciones como ciencia.

Movimiento vibratorio o vibración es la variación o cambio de configuración de un sistema en relación al tiempo, en torno a una posición de equilibrio estable, su característica fundamental es que es periódico, siendo frecuente el movimiento armónico simple, por lo que este movimiento adquiere una singular importancia en los estudios vibratorios.(2008)

Los sistemas mecánicos al ser sometidos a la acción de fuerzas variables con el tiempo, principalmente periódicas, responden variando sus estados de equilibrio y, como consecuencia, presentan cambios de configuración que perturban su normal funcionamiento, presentan molestias al personal que los maneja y acortan la vida útil de los mecanismos.(2008)

Actualmente, el estudio y análisis de las vibraciones mecánicas ha adquirido gran importancia en la supervisión de los sistemas mecánicos, sobre todo de elementos de tipo rotativo. Independientemente de los planes de mantenimiento correctivo y

preventivo, el plan de mantenimiento predictivo se basa, principalmente, en el estudio de las vibraciones mediante la instalación de sensores que permiten detectar vibraciones fuera de rango.(2008)

El estudio de las vibraciones mecánicas también llamado, mecánica de las vibraciones, es una rama de la mecánica, o más generalmente de la ciencia; que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos o sistemas y de las fuerzas asociadas con ella.(Internet 2011)

Vibración mecánica: Es el movimiento de vaivén de las moléculas de un cuerpo o sistema debido a que posee características energéticas cinéticas y potenciales.

En cualquiera que sea el caso, la excitación es el suministro de energía. Como ejemplos de excitación instantánea se tienen el golpeteo de una placa, el rasgueo de las cuerdas de una guitarra el impulso y deformación inicial de un sistema masa resorte, etc.

Como ejemplo de una excitación constante se tienen el intenso caminar de una persona sobre un puente peatonal, un rotor desbalanceado cuyo efecto es vibración por desbalance, el motor de un automóvil, un tramo de retenedores es una excitación constante para el sistema vibratorio de un automóvil.

Las Vibraciones Mecánicas comprenden el estudio del movimiento oscilatorio (o vibratorio) de los cuerpos, así como de las fuerzas (o torques) que les están asociadas. Antiguamente, el objeto principal de estudio era el movimiento periódico, esto es, aquél que se repite de tiempos en tiempos iguales. Un ejemplo clásico de movimiento periódico es el conocido Movimiento Armónico Simple (MAS), estudiado en Física. Hoy, se considera también de suma importancia el movimiento no periódico, teniendo en cuenta la gran frecuencia con que él ocurre en la vida real. Un ejemplo práctico de ese tipo de movimiento es lo que ocurre con la carrocería de un vehículo cuando transita sobre un suelo irregular.

Todos los cuerpos dotados de masa y de elasticidad son capaces de vibrar. Así, máquinas y estructuras están sujetas a un cierto grado de vibración y su proyecto

requiere el examen de sus comportamientos vibratorios. Por tanto, las Vibraciones Mecánicas, juntamente con Resistencia de los Materiales, Elementos de Máquinas, Mecanismos, Dinámica de Máquinas y otras disciplinas afines, componen los elementos para el proyecto racional de máquinas, motores y equipos mecánicos en general.

El estudio de vibraciones tiene también íntima relación con el Mantenimiento Predictivo, pues la mayor causa de desgaste de piezas móviles es, además de la fricción, el movimiento vibratorio a que ellas están sometidas. Conociendo el comportamiento vibratorio de una pieza de un mecanismo es posible prever su vida útil, providenciando su sustitución antes que ocurra el fallo.

1.2 Clasificación de las vibraciones mecánicas

Existen en la literatura diferentes criterios para el estudio y clasificación de las vibraciones. Un punto de vista a considerar es la existencia ó no de un forzamiento durante la vibración, así aparecen los siguientes tipos de vibración:

Vibración libre: Es cuando un sistema vibra debido a una excitación instantánea.

Vibración forzada: Es cuando un sistema vibra debido a una excitación constante.

Esta clasificación muestra que un sistema vibra libremente, solo si existen condiciones iniciales, ya sea que se suministre la energía por medio de un pulso (energía cinética) o debido a que posee energía potencial. Esta energía es disipada por el fenómeno llamado amortiguación, en ocasiones es despreciable. Aun cuando la energía es disipada durante la vibración, en el caso de la vibración forzada está descompensada por la excitación constante. (Rao 2009)

Vibraciones libres o naturales

En este caso, según.(2010), el forzamiento, también conocido como excitación o entrada, no ocurre durante el movimiento vibratorio, siendo el mismo originado apenas por condiciones iniciales, tales como un desplazamiento inicial y/o una velocidad inicial. La vibración consecuente del golpe de un martillo de forja satisface esa condición, pues el golpe apenas dio inicio al movimiento vibratorio, desapareciendo durante la vibración

subsiguiente. Si se considera un sistema mecánico simple como el de la figura 1.1, compuesto por un resorte y una masa, inicialmente en reposo. A continuación, se supone que una fuerza de excitación F (una fuerza muscular, por ejemplo) estire el resorte de un cierto largo inicial x , que constituye una condición inicial. Si es retirada la fuerza F , la energía potencial elástica almacenada en el resorte hará con que la masa entre en movimiento vibratorio, denominado vibración libre o natural, pues la masa se encuentra, entonces, libre de excitación durante la vibración. El movimiento de la masa es también denominado respuesta o salida del sistema.

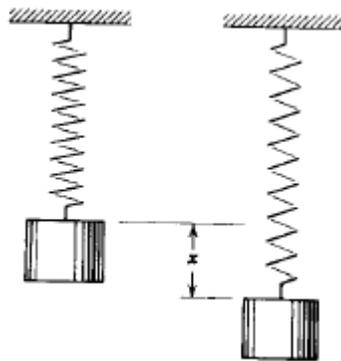


Figura 1. 1.Sistema mecánico simple (2010)

La excitación que dio inicio al movimiento podría ser un impulso, lo cual imprimiría a la masa una velocidad inicial (otro tipo de condición inicial).

Vibraciones forzadas

En este caso, existe una excitación persistente que ocurre durante el movimiento vibratorio. Las irregularidades del terreno actuando sobre la carrocería de un automóvil provocan una vibración forzada de la misma. El motor del automóvil, durante su funcionamiento, también origina una vibración forzada, debida a desbalanceamientos inherentes al mecanismo biela-manivela del motor. Los ejemplos arriba mostrados caracterizan, respectivamente, dos tipos de excitación persistente: una externa, esto es, que viene de fuera del sistema, y otra interna, originada adentro del propio sistema mecánico.

La vibración forzada, a su vez, puede ser de dos tipos: periódica, cuando la excitación se repite en intervalos de tiempos iguales, o no periódica, cuando no existe tal regularidad. Como ejemplo de vibración forzada no periódica se tiene la vibración de la carrocería de un auto cuando el mismo rueda sobre suelo irregular. Ya la vibración de un motor de combustión interna puede ser considerada periódica cuando el mismo mantiene constante su velocidad de rotación.

El forzamiento da origen a un movimiento compuesto de dos etapas, una primera etapa denominada respuesta transiente, que tiende a desaparecer con el tiempo, y una segunda etapa llamada a respuesta permanente, que tiende a persistir a lo largo del tiempo. Por ejemplo, un motor eléctrico que se encontraba parado; al encenderlo el motor aumentará la velocidad de cero hasta alcanzar su velocidad de régimen. Como consecuencia de desbalanceamientos inherentes al motor, el conjunto vibrará inicialmente de una manera irregular (la respuesta transiente), luego cuando se alcanza la rotación de régimen de trabajo, pasará a vibrar regularmente (la respuesta permanente). Esa última fase de la respuesta, tiende a ser armónica.

Clasificación de las vibraciones en cuanto a la linealidad

Según(2010) las vibraciones para que se comporten de manera **lineal** deben comportarse de manera que cumplan las siguientes condiciones:

- 1- Si una causa A provoca sobre un sistema un efecto A' y si una causa B provoca sobre el mismo sistema un efecto B', entonces una causa A+B provoca sobre el sistema un efecto A'+B';
- 2- Si una causa A provoca sobre un sistema un efecto A', entonces una causa αA (donde α es un escalar) provoca sobre el mismo sistema un efecto $\alpha A'$.

En otras palabras, un sistema es lineal cuando existe una proporción lineal entre causa y efecto.

Comportamiento no lineal:

No siguen el Principio de la Superposición de los Efectos, esto es, no existe proporción lineal entre causa y efecto del movimiento vibratorio.

Las vibraciones no lineales tienen tratamiento matemático más complicado, pues son descritas por ecuaciones diferenciales no lineales, que son de solución analítica bien más difícil.

Todos los sistemas reales son no lineales. La mayoría de los sistemas mecánicos presentan un comportamiento lineal dentro de una cierta banda de operación. Como ejemplo, se considera el caso del péndulo simple de la figura. 1.2

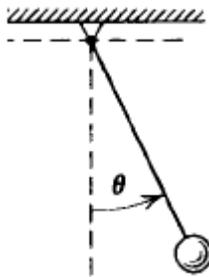


Figura 1. 2. Péndulo simple (2010)

Vibración lineal: Si los componentes básicos de un sistema tienen un comportamiento lineal, la vibración resultante es lineal. (Rao 2009)

Vibración no lineal: Se produce si alguno de sus componentes se comporta como no lineal.

El comportamiento lineal de un elemento facilita su estudio, en la realidad todo elemento se comporta como no lineal pero los resultados de su estudio no difieren, en su mayoría, a los realizados si se consideran como elementos lineales. (2006)

En cuanto a la existencia de resistencia pasiva

Vibración amortiguada: Es cuando la vibración de un sistema es disipada. (Rao 2009)

Vibración no amortiguada: Es cuando la disipación de energía no se puede despreciar para su estudio.

El amortiguamiento es un sinónimo de la pérdida de energía de sistemas vibratorios. Este hecho puede aparecer como parte del comportamiento interno de un material, de rozamiento, o bien, un elemento físico llamado amortiguador. (Rao 2009)

Vibraciones sin amortiguación, según (2010). En este caso, no existen resistencias pasivas oponiéndose al movimiento vibratorio, o sea, no hay retirada de energía del sistema mecánico (normalmente por fricción). Teóricamente, la vibración continuaría indefinidamente. En la práctica, siempre existirán tales resistencias al movimiento: fricción con el aire, fricción seca o lubricada entre las piezas del sistema, fricción interna entre moléculas dentro de las masas que componen el sistema, etc. Sin embargo, se suelen considerar algunos sistemas como desprovistos de amortiguación, cuando éste es muy pequeño. Un ejemplo clásico es la vibración de una masa cuyo única fricción presente es la del aire. El sistema mecánico más simple sin amortiguación es el de la figura 1.3, compuesto apenas de una masa y de un resorte:



Figura 1. 3. Sistema masa resorte (2010)

En la figura 1.3, la masa podría estar siendo excitada, permanentemente o no. En el primer caso, la vibración sería forzada sin amortiguación y, en el segundo caso, libre sin amortiguación.

Vibraciones con amortiguación. Según (2010). En este caso, existen resistencias pasivas oponiéndose al movimiento vibratorio, retirando energía del sistema. Si la vibración es libre, la amortiguación hace que el movimiento cese dentro de un cierto tiempo; mientras, en la vibración forzada, la excitación repone energía en el sistema, manteniendo el movimiento vibratorio. Como ilustración, se considera un motor eléctrico funcionando, apoyado sobre una suspensión elástica constituida de resortes y amortiguadores. El sistema, como un todo, estará en vibración forzada con amortiguación, siendo la excitación causada por las masas giratorias desbalanceadas y

la amortiguación provocada por la fricción existente en los contactos de las piezas móviles, así como por la fricción con el aire. Existe, por tanto, una reposición de energía en el sistema, haciendo que la vibración continúe.

Mientras, desde el momento en el que el motor eléctrico es apagado, el sistema prácticamente entra en vibración libre con amortiguación, con disminución de la amplitud del movimiento, pues no hay, ahora, reposición de energía. La tendencia es que el motor pare, después de transcurrido un pequeño intervalo de tiempo.

El sistema mecánico más simple con amortiguación es representado por una masa, un resorte y un amortiguador (el disipador de energía), según muestra en la figura 1.4. La masa podría estar siendo excitada, permanentemente o no, constituyendo, respectivamente, una vibración forzada con amortiguación o una vibración libre con amortiguación.

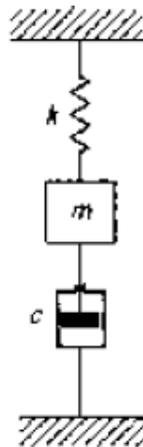


Figura 1. 4.Sistema mecánico simple con amortiguamiento (2010)

En la figura 1.4 se ilustra un tipo de amortiguador, denominado amortiguador viscoso, lo cual representa la fricción viscosa existente entre un sólido y un fluido, bastante común en máquinas cuyas piezas móviles trabajan lubricadas.

En cuanto a la naturaleza del movimiento, las vibraciones se clasifican en:

Vibraciones traslacionales o longitudinales. Según (2010)

En este caso, la masa es sometida a un movimiento de traslación. La medida del desplazamiento de la masa es hecha en unidades de longitud. Como ejemplo se puede

citar el movimiento vibratorio vertical de una prensa mecánica (aquí, se considera despreciables los movimientos de la máquina en un plano horizontal). La figura 1 5 ilustran dos tipos de vibración traslacional.

En la figura 1.5 a, la masa unida al resorte helicoidal ejecuta, claramente, vibraciones verticales traslacionales. Ya en la figura 1.5 b, la masa que cae sobre una viga apoyada (la cual es un resorte en lámina) da origen a un movimiento vibratorio traslacional en la dirección vertical.

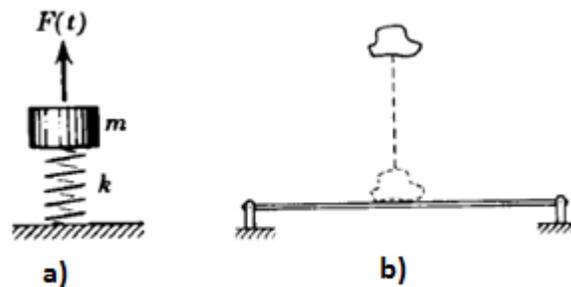


Figura 1. 5. Ejemplo de vibraciones verticales traslacionales (2010)

Vibraciones torsionales. Según (2010)

En este caso, la masa ejecuta movimiento de rotación en torno a un eje, siendo que la medida de desplazamiento es angular. Muy común en máquinas y motores, son las de mayor interés para el Ingeniero Mecánico.

Por ejemplo, durante el funcionamiento de un motor de combustión interna, el árbol de manivelas es sometida a torsiones. La figura.1.6 ilustra un sistema en el que la masa, un conjunto rueda-neumático de un coche, ejecuta movimiento vertical debido a las irregularidades del terreno, sometiendo el eje a la torsión. Ese último recibe el nombre de resorte de torsión o barra de torsión.

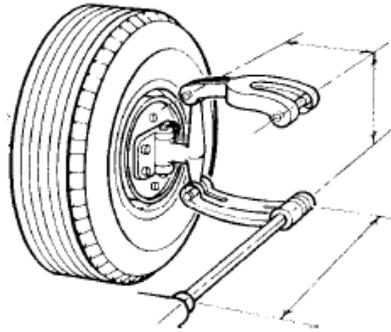


Figura 1. 6. Conjunto rueda neumático (2010)

Clasificación de la vibraciones en cuanto a la cantidad de grados de libertad, Según (2010)

Grado de libertad, es el número de coordenadas independientes necesarias para la descripción del movimiento. La vibración torsional de la masa de la fig.1.6 requiere apenas una coordenada lineal para describir su movimiento, luego ella posee apenas un grado de libertad. Ya si existiesen dos masas, serían necesarias dos coordenadas (una para cada masa), y el sistema tendría dos grados de libertad, según ilustra la figura 1.7.

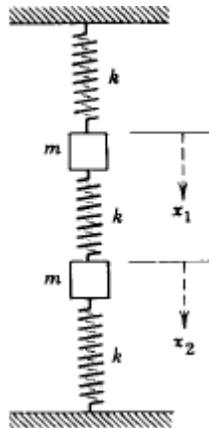


Figura 1. 7. Sistema con dos grados de libertad (2010)

Los sistemas con parámetros concentrados poseen un número finito de grados de libertad, mientras que los sistemas con parámetros distribuidos poseen un número infinito de grados de libertad, pues, en éste último caso sería necesaria una coordenada para describir el movimiento de cada molécula de la masa vibrante.

Por tanto, de acuerdo con la cantidad de grados de libertad, pueden aparecer vibraciones con un grado de libertad (o unidimensionales), con dos grados de libertad (o bidimensionales), con 3, 4,..., N grados de libertad (o multidimensionales) o con infinitos grados de libertad.

En cuanto a la expectativa de la ocurrencia de la vibración, Según (2010), las vibraciones pueden ser:

Vibraciones determinísticas.

Son aquéllas cuya ocurrencia es previsible, como en los casos de un motor eléctrico desbalanceado, de un péndulo simple, etc., en que las excitaciones son conocidas. Son las vibraciones posibles de ser modeladas matemáticamente.

Vibraciones aleatorias

Son aquéllas de ocurrencia impredecible como, por ejemplo, en el caso de terremotos. El modelado matemático, en este caso, requiere el uso de técnicas estadísticas.

1.3 Normas técnicas relacionadas para la medición y el control de vibraciones

Con el seguimiento y cumplimiento de normas se puede realizar un correcto diagnóstico ya que las mismas brindan parámetros y valores guías para el diagnóstico.

Algunas de las normas más utilizadas en el diagnóstico por vibraciones son las siguientes, ISO 2041,(2041 2008) la que hace recoge el vocabulario sobre vibraciones y choque.

La norma ISO 3046 (3046 2001) establece los requisitos generales y definiciones para las vibraciones torsionales en los sistemas de ejes de los módulos movidos por motores alternativos de combustión interna (ACI) o en inglés (RIC).

La norma ISO 10326-1 (5007 2003) especifica un método de laboratorio para medir y evaluar la efectividad de la suspensión del asiento del operario en los tractores agrícolas con neumáticos. También especifica criterio de aceptación basado en los resultados del ensayo, mientras define las clases espectrales de potencia absorbida (o de entrada) requerida para los tres clases de tractores agrícolas, cada uno de los grupos de máquinas definidos tienen similares características de vibración.

La norma ISO 7919-1 (7919-1 1996) establece las directrices generales para medir y evaluar las vibraciones de la maquinaria, a través de las mediciones realizadas directamente sobre ejes rotatorios con el propósito de determinar la vibración de los ejes en cuanto a:

- cambios en el comportamiento vibratorio.
- cargas cinéticas excesivas.
- el monitoreado de las holguras radiales.

La norma ISO 7919-2 (7919-2 2007) ofrece directrices para aplicar los criterios de evaluación para las vibraciones en ejes, medidas en la dirección radial sobre o cerca de los cojinetes de las turbinas de vapor y los generadores. Estas directrices se presentan en términos de:

- Vibraciones bajo condiciones de operación en estado estacionario.
- Vibración durante la operación transitoria, incluyendo el paso por las velocidades de resonancia, durante la arrancada o la parada.
- Cambios en las vibraciones, los que pueden ocurrir durante la operación normal en estado estacionario.

La norma ISO 18436-2 (18436-2 2003) especifica los requisitos generales para el personal de análisis de vibraciones que ejecuta el monitoreado de estado y el diagnóstico de las máquinas. La certificación de acuerdo a la norma, proporcionará reconocimiento a la calificación y las competencias de los individuos para ejecutar mediciones y análisis de vibraciones en máquinas, empleando instrumentación y sensores portátiles o instalados permanentemente.

La norma NC 26 del 2007 (26 2007) establece el método de medición del nivel sonoro utilizado como indicador del ruido ambiental junto a posibles modelos de pronóstico y niveles máximos admisibles y tolerables en zonas habitables, tanto en el interior de la vivienda como en las áreas urbanizadas aledañas. Los niveles tolerables de ruido que se establecen en la norma sólo se aplicarán en las zonas habitables construidas antes de la puesta en vigor de la misma. En todas aquellas zonas habitables, construidas y puestas en funcionamiento, después de dicha fecha deberán cumplirse los niveles máximos admisibles de ruido.

La norma NC 435 del 2006 (435 2006) establece las condiciones acústicas mínimas exigibles a los edificios y áreas exteriores colindantes, adecuadas al uso y actividad de sus ocupantes.

Conclusiones parciales.

1. Para el estudio de las vibraciones, según la revisión bibliográfica realizada, estas se pueden dividir en tres tipos, según la forma de excitación, en vibración libre y vibración forzada, según la disipación de energía, en amortiguada y no amortiguada y según el comportamiento de sus componentes, en vibración lineal y no lineal.
2. Se constata en la revisión bibliográfica realizada la existencia de varias normas para el estudio y análisis de las vibraciones para diferentes condiciones industriales y de los servicios.
3. El estudio de las vibraciones, sus conceptos, clasificación y definiciones se pueden estudiar con mayor profundidad otros fenómenos, como por ejemplo, el mantenimiento predictivo.

Capítulo 2



2.1 Empleo de las vibraciones en el mantenimiento

Para diagnosticar problemas en máquinas mediante análisis de vibraciones, se debe medir con cierta frecuencia su nivel de vibración, pues las medidas y la tendencia de los cambios brindaran a qué nivel es la severidad del problema y pueden ser de información para planificar el mantenimiento. (Aguilar 2004)

Los análisis de la vibración también brindan información que ayuda a saber la raíz del problema de tal forma que sea posible corregirlo (desbalance, desalineamientos, etc.), y así no enfocar el mantenimiento tan sólo al remplazo de los componentes dañados o con síntomas de desgaste o fatiga. Quizás hasta sea posible descubrir que realizando pequeños cambios en la instalación, operación, mantenimiento o incluso en el diseño, la máquina pueda requerir menos mantenimiento y ser más fiable en un futuro.(Aguilar 2004)

Los departamentos de mantenimiento en todo el mundo se han preocupado en crear e implementar nuevas técnicas para mejorar la utilización de los recursos que maneja, como son el personal de mantenimiento, los inventarios de repuestos, etc., y para poder ser ellos quienes tengan el control de la planta gracias a un conocimiento, en todo momento, sobre el estado de cada una de las máquinas.(Castelli 2007)

Debemos decir que una gran parte de las empresas utiliza el mantenimiento correctivo o de emergencia como su principal herramienta para eliminar fallas en la maquinaria, pero esta es una técnica muy poco económica cuando la producción de la planta depende directamente de la disponibilidad de esta maquinaria. Con este tipo de mantenimiento la empresa dedica mucho dinero para poder tener inventarios de repuestos con la suficiente cantidad de ellos para responder a cualquier situación, además, el personal involucrado trabaja en el momento que ocurre la falla, lo que también implica costos extras muy elevados.(Olmedo 2006)

Otra parte importante de las empresas utiliza el mantenimiento preventivo, el cual, por medio de estadísticas y los historiales de fallas de cada máquina o cada tipo de máquinas, realiza sustituciones o reacondicionamientos periódicos. Pero aquí todavía

se está cometido un costoso error al interferir con máquinas sin tomar en cuenta su estado en ese momento. Este tipo de mantenimiento es muy importante para realizar los reacondicionamientos. (Olmedo 2006)

El mantenimiento predictivo se basa en la técnica de aplicación de tecnología en el proceso de detección temprana, para detectar y verificar cambios de condiciones, lo que permite intervenciones más oportunas y precisas. Una de las muchas herramientas utilizadas por el mantenimiento predictivo, pero la que informa de mejor manera el estado de una máquina en funcionamiento es el análisis de vibraciones mecánicas, que forman una herramienta de planeación de mantenimiento usada para determinar la necesidad de realizar acciones preventivas y correctivas. Los datos obtenidos en un programa de mantenimiento predictivo, proporcionan información que permite aumentar la capacidad de producción y efectividad de los equipos.(Olmedo 2006)

2.1.1 Diagnóstico usando mediciones de vibraciones

Los diagnósticos basados en la medida de vibraciones pueden ser divididos entre métodos genéricos y analíticos.(2006)

Los métodos genéricos se emplean para evaluar rápidamente la condición general de las máquinas con una cantidad limitada de mediciones globales. Podría compararse a la práctica médica de tomar la temperatura, presión y pulso, y otros síntomas perceptibles en la superficie del organismo.(Estupiñan 2008)

Mediante los métodos analíticos se evalúa la condición de componentes individuales de una máquina para identificar daños en proceso en forma incipiente, así como determinar sus causas y adoptar medidas correctivas. Podrían trasladarse en el sentido médico a las tomografías, ensayos radiográficos, ultrasonido, etc.(Estupiñan 2008)

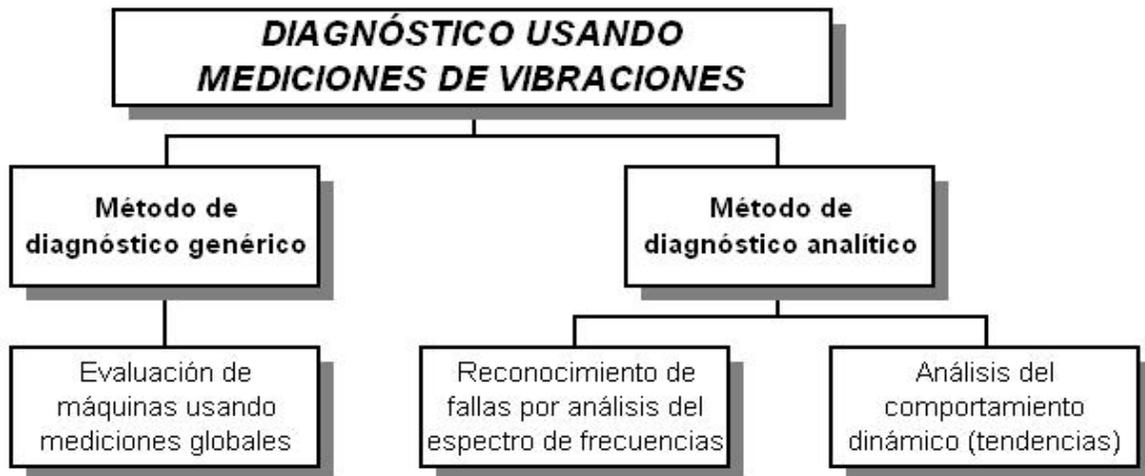


Figura 2. 1. Diagrama para el uso de las vibraciones(2008)

2.1.2 Evaluación del estado de la máquina usando valores globales de vibración

Cuando se evalúa el estado general de las máquinas, normalmente se empieza por tomar medidas de la vibración global presente en la máquina, siendo tales un parámetro que puede determinar la severidad de la vibración mediante la evaluación de los valores globales de la vibración tomados. Los resultados de esta evaluación preliminar determinarán si:(Estupiñan 2008)

1. La máquina puede continuar en operación sin tomar acción alguna.
2. Debería tomarse alguna acción de mantenimiento, y en qué momento en el tiempo.
3. Deberá ejecutarse un estudio analítico para definir las causas de un daño en progreso.
4. La máquina debe ser sacada de operación de inmediato para evitar un daño inminente.

2.1.3 Identificación de problemas usando análisis de frecuencias de vibración

El análisis de frecuencias es la forma analítica más frecuentemente usada para la identificación de fallas o fuentes de problemas en las máquinas en operación, ya sea esta una operación normal, arranques o paradas, o durante ensayos y pruebas de

funcionamiento, por ejemplo, durante un balanceo o luego de un mantenimiento completo a la máquina. (Estupiñan 2008)

El análisis de frecuencias proporciona las bases de juicio necesarias para realizar el diagnóstico de la máquina.

Como regla, las máquinas son unidades complejas que consisten de componentes rotativos, resiprocantes y estacionarios. Cuando están en operación, las partes en movimiento crean fuerzas dinámicas, y como resultado vibraciones mecánicas. A mayor cantidad de componentes rotativos y resiprocantes en una máquina, mayor será la complejidad de la mezcla de vibraciones resultante en la onda de vibración.

Las vibraciones mecánicas se propagan por toda la estructura de la máquina. Esas vibraciones deben ser preferiblemente medidas en los puntos de la máquina o de su estructura en que mejor se manifiesten. Estos puntos son predominantemente los cojinetes y rodamientos, y sus carcasas.

Luego de la toma de vibración global y haber decidido sobre el estado o condición de la máquina, se realizará el análisis de frecuencias (si así lo requiere la condición de la máquina). De esa forma es posible un examen discreto, permitiendo asociar las frecuencias componentes con los elementos de la máquina y los mecanismos de excitación que las originan (fuentes de los problemas).

2.1.4 Uso del espectro de frecuencias de vibración en el mantenimiento

Probablemente, el éxito en los programas de mantenimiento predictivo radica en la habilidad de diagnosticar problemas mecánicos y eléctricos dentro de la máquina, a partir de las evidencias o condiciones de operación que exterioriza, tales como vibración, temperaturas, etc. (Olmedo 2006)

En el campo del análisis de vibraciones, el espectro de frecuencias es la herramienta que ayuda a desarrollar la habilidad para diagnosticar problemas en las máquinas.

Lo que ocurre es que cuando una máquina presenta síntomas de falla, ésta vibrará de una manera característica y si el nivel de vibración sobrepasa los niveles de alarma establecidos por el fabricante o mediante el uso de alguna norma o guía, el analista

debe obtener información acerca de la onda de vibración, ya que en ella está contenida información valiosa acerca de los problemas que tiene.

Sin embargo, intentar estudiar la onda de vibración y tratar de separar esta onda en las ondas primarias para encontrar la onda dominante y determinar la causa de la vibración excesiva en la máquina, es una tarea muy difícil. Es este punto el que le da un invaluable valor al espectro de frecuencias para el analista de vibraciones.

Por lo tanto, el espectro de frecuencias encuentra una utilidad bastante alta cuando el analista necesita diagnosticar problemas en las máquinas, como parte del programa de mantenimiento predictivo.

2.2 Técnicas generales de detección de fallos en máquinas rotatorias.

Para la detección de fallos en máquinas rotatorias se hace necesario realizar un análisis preliminar de las posibles causas que los generan y un estudio de las principales técnicas que se emplean para su detección. Luego del análisis a varios artículos relacionados con el tema se definieron las siguientes técnicas generales: (ConstruSur 2008)

1. *Análisis de la vibración:* El análisis de la vibración es la técnica del monitoreo de la condición utilizada con mayor frecuencia y ofrece un panorama más completo y amplio de la condición de las máquinas que cualquier otra tecnología particular. Se puede utilizar para detectar muchos tipos diferentes de fallas en una amplia gama de máquinas y componentes rotativos; también es útil para detectar condiciones que ocasionan fallas y desperfectos como problemas de mala alineación, resonancia, desequilibrio y lubricación.
2. *Ondas de estrés:* Estas se generan con el contacto e impacto de metal con metal cuando fallan las películas de lubricación y se produce daño en el equipo como los cojinetes de elementos rotatorios y los sistemas de engranaje.
3. *Termografía:* Es una potente técnica de monitoreo de la condición que ya se aplica ampliamente con buenos resultados en el mantenimiento; es muy efectiva para el monitoreo de sistemas eléctricos como tableros de distribución,

transformadores y motores donde pueda detectar fallas en componentes y conexiones, sobrecargas y problemas de aislación. También se puede utilizar esta técnica en máquinas rotativas donde puede detectar condiciones tales como una lubricación no adecuada, desgaste mecánico, mala alineación y fricción.

4. *Análisis de aceite*: el análisis de aceite consiste en establecer la condición de los aceites y sus aditivos en cajas de engranaje y motores industriales, también se puede usar en aceites hidráulicos y transformadores y a veces en grasas. Existen dos razones principales para realizar el análisis del aceite:
 - Puede prolongar el tiempo entre cambios de aceite, a veces incluso durante varios años.
 - Puede detectar los productos de la corrosión o desgaste mecánico que se arrastren en el aceite permitiendo el monitoreo de la condición mecánica de la máquina además de la condición del lubricante.
5. *Ultra-acústica*: No es la más utilizada para el monitoreo al compararla con los otros métodos de descripción. Los instrumentos de ultra-acústica son excelentes para la detección de fisura y filtraciones en sistemas presurizados o de vacío, y también se utiliza ampliamente en máquina rotatoria para detectar roces mecánicos y problemas de lubricación, así como daños a los cojinetes y engranajes.
6. *Estroboscopia*: es un elemento útil para la inspección y resolución de problemas en general en una amplia gama de máquinas rotatorias incluyendo cintas, cadena, engranaje, ejes, acoples, pales ventilador etc.

2.2.1 Técnicas de balanceo.

Balanceo en un plano:

Cuando se habla de balancear en un plano, se está haciendo referencia a la acción de efectuar las correcciones solo en una cara del rotor. Para llevar a cabo el balanceo en

un plano se pueden emplear diferentes técnicas, de acuerdo con la instrumentación disponible en la planta. (Marin 2001)

Balanceo en un plano sin medición de fase:

Como quiera que no siempre se disponga de un instrumento para medir fase o por determinadas razones se hace prácticamente imposible la medición de este parámetro, resulta de inestimable valor práctico poder disponer de una técnica para balancear sin contar con la información de fase. (Marin 2001)

De manera que, solo será necesario medir la amplitud de las vibraciones preferiblemente a la frecuencia de rotación. De igual forma, será necesario marcar en el rotor las posiciones 1, 2 y 3 a 90° entre sí, según se ilustra en la figura 2.1

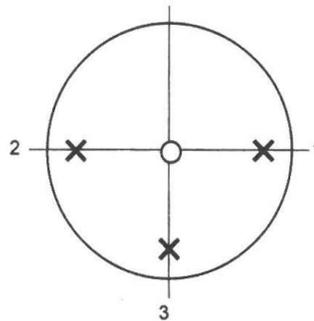


Figura 2. 2. Señalizaciones rotor para el balanceo en un plano sin medición de fase (Marin 2001)

El método consiste en realizar cuatro corridas de prueba. En la primera de ellas se medirá la amplitud de las vibraciones o sea, se tomará la lectura original V_0 .

Para la segunda corrida de pruebas se fijará una masa de prueba de valor conocido M_T en la posición 1 y nuevamente se medirá la amplitud de las vibraciones, ahora identificadas como V_1 . Esta lectura será proporcional al efecto de la acción conjunta del desbalance original más el provocado por la masa de pruebas ubicada en la posición 1.

Posteriormente la masa de pruebas se moverá desde la posición 1 hacia la posición 2 conservando igual radio de fijación que el empleado para la prueba anterior. Nuevamente se medirá la amplitud de las vibraciones y la lectura V_2 será proporcional

al efecto de la acción conjunta del desbalance original más el provocado por la masa de pruebas en la posición 2.

Del tratamiento vectorial de estas magnitudes medidas se podrá obtener como resultado la amplitud de las vibraciones V_T provocadas por el efecto único de la masa de pruebas así como el ángulo de posición del desbalance original V_0 respecto a la posición 1, según se muestra a continuación.

$$V_T = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2*V_0^2/2} \quad (2.1)$$

$$\alpha_0 = \cos^{-1} \frac{V_1^2 - V_2^2}{4*V_T*V_0} \quad (2.2)$$

El problema radica en analizar en qué sentido, horario ó anti horario se deberá recorrer α_0 para identificar la posición del desbalance original, representado por V_0 .

Para ello será necesario ejecutar la cuarta prueba, moviendo la masa de pruebas desde la posición 2 hasta la posición 3. Según la nueva lectura V_3 se evidenciará en qué sentido recorrer el ángulo α_0 .

Las lecturas de vibraciones debidas a problemas de desbalance guardan igual proporción que las masas desbalanceadas que los provocan por lo cual se puede calcular la masa de corrección M_c a partir de:

$$M_c = M_t \frac{V_0}{V_t} \quad (2.3)$$

Balanceo en un plano con medición de fase:

Realmente, en la actualidad no es difícil encontrar en la industria algunos modelos de instrumentos para la medición de vibraciones que permitan medir también la fase. Por ello es que se ha decidido incluir también la descripción de los aspectos terminales de la tecnología de balanceo en un plano, empleando además de la lectura de amplitud de las vibraciones, la lectura de fase de estas. Para efectuar la medición de fases es muy frecuente emplear un instrumento dotado de una lámpara estroboscópica, la cual

emite un destello por cada vuelta del rotor, lo que a la vez produce una ilusión óptica que permite observar "detenida" una marca de referencia. De esta forma la primera medición se ejecutará con el rotor en condiciones normales, obteniéndose la lectura original de amplitud y fase del desbalance, V_0 y α_0 respectivamente. (Marin 2001)

Posteriormente se fija una masa de pruebas en la misma posición de la marca de referencia que fuera realizada previamente en el rotor y se mide nuevamente, obteniéndose las lecturas de amplitud y fase V_1 y α_1 respectivamente, asociadas al efecto conjunto de la masa desbalanceada y de la masa de pruebas.

Vectorialmente el problema se resuelve de la siguiente manera.

$$A = (V_1 \cos \alpha_1 - V_0 \cos \alpha_0) \quad (2.4)$$

$$B = (V_1 \sin \alpha_1 - V_0 \sin \alpha_0) \quad (2.5)$$

$$V_t = \sqrt{A^2 + B^2} \quad (2.6)$$

$$\alpha_t = \tan^{-1} \frac{B}{A} \text{ si } A > 0 \quad (2.7)$$

$$\alpha_t = 180^\circ + \tan^{-1} \frac{B}{A} \text{ si } A < 0 \quad (2.8)$$

El ángulo de ubicación α_c de la masa de corrección, será medido respecto a la posición en la que fue fijada la masa de pruebas y calculado según:

$$\alpha_c = -\alpha_t + \alpha_0 + 180^\circ \quad (2.9)$$

Efecto cruzado:

El balanceo en dos planos exige de una atención especial debido al llamado efecto cruzado, identificado como la interferencia mutua de los planos de corrección que puede ser explicada a partir del efecto de uno de los planos de balanceo en las mediciones que se efectúen en el plano opuesto. Ver figura 2.3

Balanceo en dos planos:

La técnica de balanceo en dos planos es similar al ejecutado cuando se balancea en un plano. Para balancear en dos planos pueden emplearse diferentes procedimientos de acuerdo con varios factores tales como, la configuración del desbalance, la razón longitud/diámetro, la relación entre la velocidad a la cual se balanceara el rotor y la velocidad de operación de este así como la flexibilidad del rotor la magnitud del efecto cruzado.

El procedimiento que será descrito a continuación requiere de 3 corridas de prueba por lo cual será necesario definir en los planos de balanceo I y II tal y como se observa en la figura 2.4

1. Mida los niveles de vibraciones en los puntos 1 y 2 (planos I y II) obteniendo las lecturas originales

$$V_{1,0} < \alpha_{1,0} \text{ y } V_{2,0} < \alpha_{2,0} \quad (2.10)$$

2. Detenga el rotor y fije la masa de prueba d valor conocido M_T en un radio conocido r en el plano I y ponga en marcha el rotor. Mida los nieles vibraciones provocados por la acción simultánea de los desbalances originales en cada plano y la masa de pruebas en el plano I, obteniendo

$$V_{1,1} < \alpha_{1,1} \text{ y } V_{2,1} < \alpha_{2,1} \quad (2.11)$$

3. Detenga el rotor, retire la masa de pruebas del plano I y fíjelas en el plano II con un radio r igual al que pasó para el plano I. Ponga en marcha el rotor y mida los niveles provocados por la acción simultánea de los desbalances originales en cada plano y la masa de prueba en el plano II, obteniendo

$$V_{1,2} < \alpha_{1,2} \text{ y } V_{2,2} < \alpha_{2,2} \quad (2.12)$$

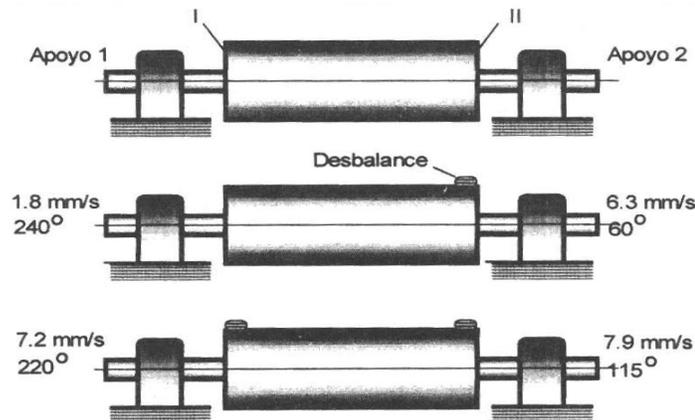


Figura 2. 3. Ilustración del efecto cruzado (Marín 2001)

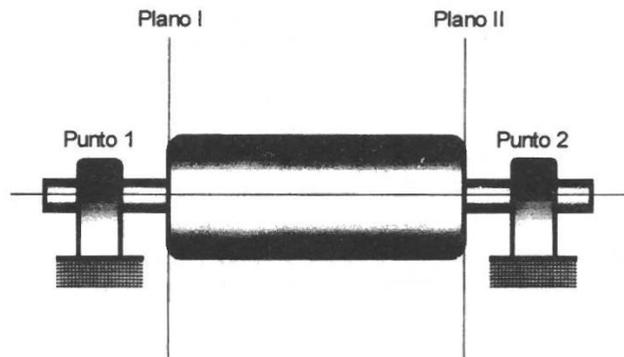


Figura 2. 4. Planos de balanceo y puntos de medición (Marín 2001)

Caracterización de la vibración provocada por defectos en máquinas rotatorias.

Según Marín Palomino (2001) 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 estas se deberán tener en cuenta al abordar los cálculos de diseño y/o comprobación así como los controles periódicos del estado técnico de las mismas, conociéndose como vibración a toda variación en el tiempo, de la 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.

2.3 Defectos más frecuentes en máquinas rotatorias

Los defectos más frecuentes en máquinas rotatorias se definen según (Marín 2001) como:

- Desbalance de rotores.

El Desbalance se manifiesta durante el giro de los rotores debido a la distribución no uniforme de su masa, alrededor de su eje principal de inercia, que produce una desviación con respecto al eje de rotación. Ver figuras 2.5 y 2.6

$$F_{\text{desbalance}} = m d \omega^2$$

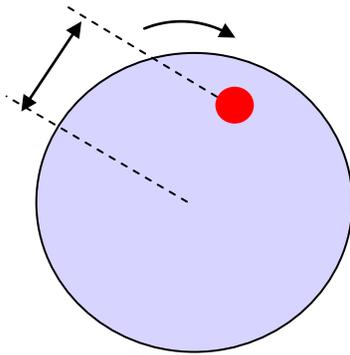


Figura 2.5: Desbalance

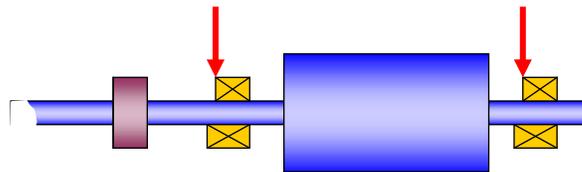


Figura 2.6: Puntos de vista del rotor

Un desbalance puro genera una señal dominante en la frecuencia de rotación del rotor 1X, será predominante en las mediciones radiales. Ver figura 2.7

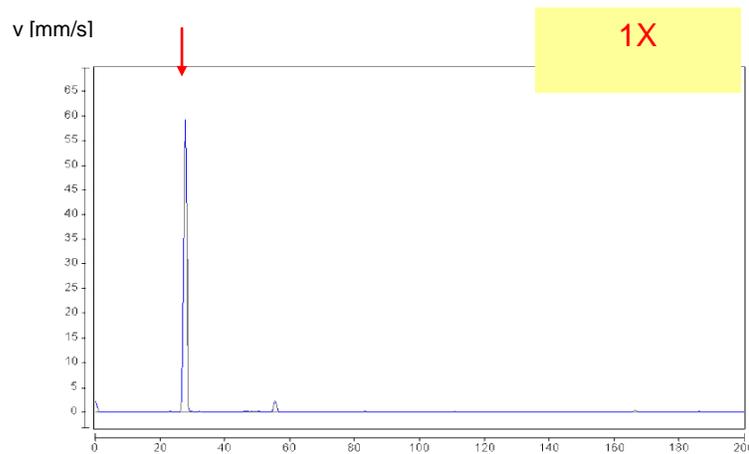


Figura 2.7: Espectro del desbalance

Características fundamentales que nos permiten reconocer el desbalance en un rotor.

1. Se manifiesta siempre a la frecuencia de rotación, generalmente dominando el espectro con su amplitud.
2. La amplitud en 1xrpm será mayor o igual al 80 % del valor global.
3. La amplitud de la vibración es proporcional a la distancia que esté desplazado el eje de masa del eje de rotación.
4. El desbalance genera una fuerza de rotación uniforme que está continuamente cambiando de dirección, pero es siempre aplicada en las direcciones radiales.
5. Cuando el desbalance es el que domina sobre otros defectos la diferencia de fase entre la dirección vertical y horizontal en un mismo soporte es de $90^\circ (\pm 30^\circ)$.
6. El mayor indicador de desbalance es comparar la diferencia de fase en la dirección horizontal en ambos soportes de la máquina y en la dirección vertical. Si el desbalance es significativo la diferencia de fase horizontal debe ser igual a la diferencia de fase vertical entre ambos soportes ($\pm 30^\circ$).
7. Las vibraciones en las direcciones radiales serán mucho más altas que en la dirección axial, excepto en rotores en voladizo.
8. Los rotores desbalanceados normalmente evidencian fases estables y repetitivas en las direcciones radiales.

9. Los efectos del desbalance pueden ser amplificados por las resonancias y la falta de rigidez

- Desbalance estático

El desbalance estático se visualiza cuando la máquina no está en operación, el rotor gira desplazando la masa de desbalance a su punto más bajo, si la fricción lo permite. Ver figura 2.8, 2.9 y 2.10

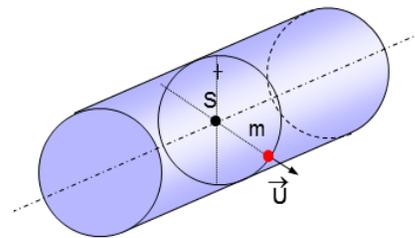
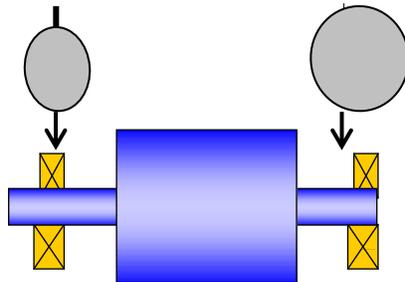


Figura 2.8: Puntos de medición del desbalance Figura 2.9: Punto del desbalance

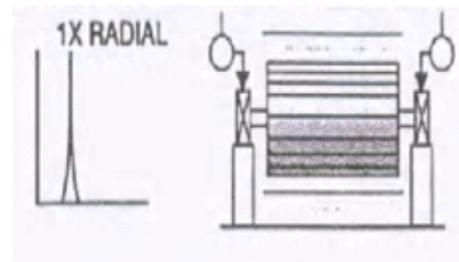
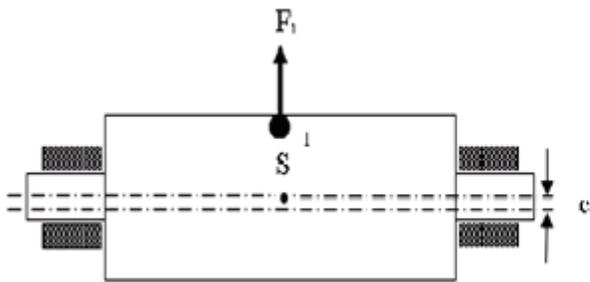


Figura 2.10: Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor puntos de medición y su espectro(Marin 2001)

S-Centro de gravedad

F1-Fuerza dinámica generada por el desbalance

1-Masa del desbalance

d- Desplazamiento del centro de gravedad

- Desbalance de par

El desbalance de momento es causado por la presencia de dos masas de desbalance idénticas localizadas a 180° del área transversal en una posición axial diferente. El desbalance de momento es estáticamente balanceado, solo se puede detectar con la máquina en operación.

En rotación, el desbalance de momento genera una alta vibración a 1X, predominante en la dirección radial y con una diferencia de fase de 180° en los extremos del rotor. Ver figura 2.11

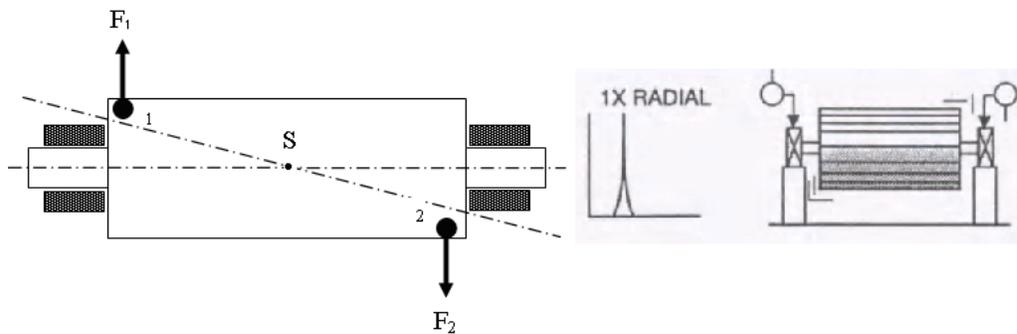


Figura 2.11 Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor, puntos de medición y su espectro (Marin 2001)

1=2: Masas de desbalance

- Desbalance dinámico.

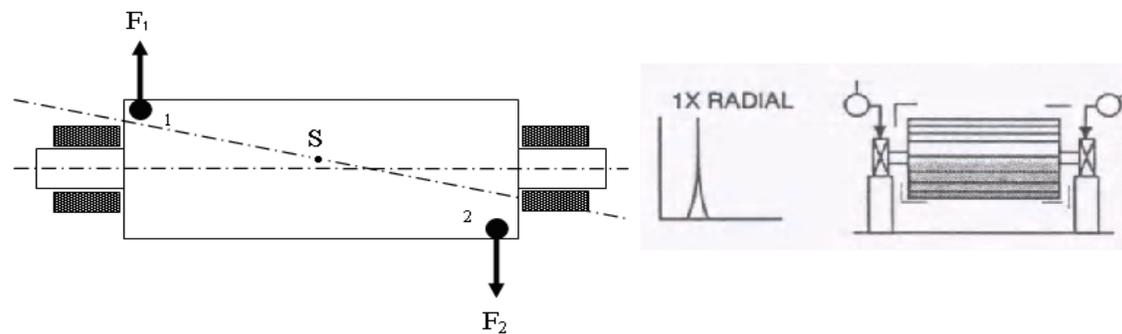


Figura 2.12 Muestra de las fuerzas que actúan en un rotor, puntos de medición y su espectro (Marin 2001)

1y2: Son distintas las masas de desbalance

El desbalance dinámico es una combinación del desbalance estático y el de momento al mismo tiempo. En la práctica, el desbalance dinámico es el más común. Al rotar, el desbalance dinámico produce una vibración a 1X, predominante en su dirección radial. La diferencia de fase en los extremos del rotor depende de la distribución de masas de desbalance. Ver figura 2.12

- Rotores en voladizo.

Los rotores en voladizo pueden generar fuerzas axiales fuertes a la velocidad de rotación que producen altas vibraciones iguales o mayores que las radiales. Se genera desbalance de par y adicionalmente desbalance estático, es necesario corregir ambos. Si lo que predomina es el desbalance, la fase axial en un soporte debe ser aproximadamente igual al del otro soporte ($\pm 30^\circ$). Ver figura 2.13 y 2.14

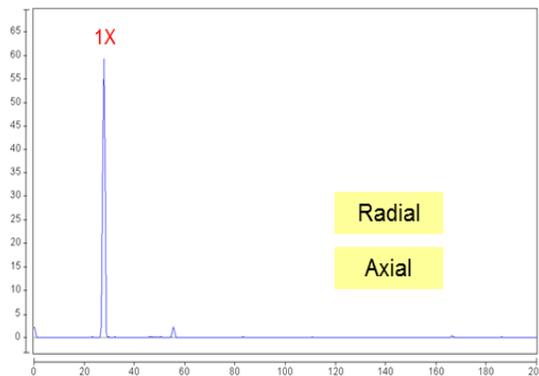


Figura 2.13: Espectro para rotores en voladizo

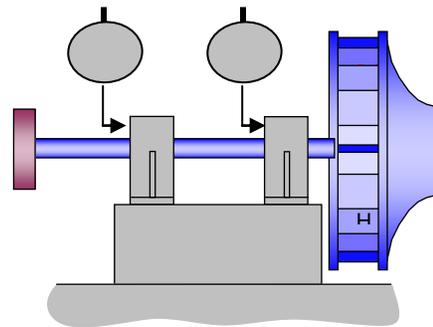


Figura 2.14: Puntos de medición

- Ejes flexados

La causa de la flexión de un eje puede ser tanto por asimetría axial como por la presencia de fuerzas externas sobre el eje produciendo una deformación. Un eje flexado causa fuerzas axiales opuestas sobre el rodamiento, identificables en el espectro de vibración como 1X predominante en las lecturas axiales. La 2X y componentes radiales también pueden ser visibles. Ver figura 2.15 y 2.16

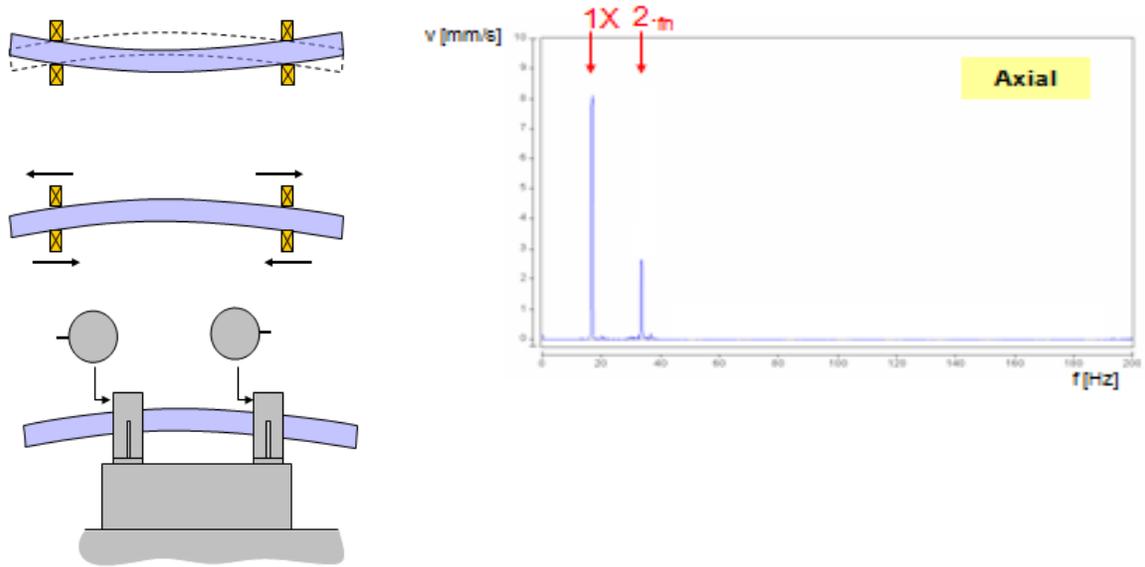


Figura 2.16: Espectro para los ejes flexados

Figura 2.15: Puntos de medición

- Desalineamientos de ejes

Desalineamientos es cuando el eje central de dos ejes acoplados no coincide en su línea axial. Ver figura 2.17 y 2.18

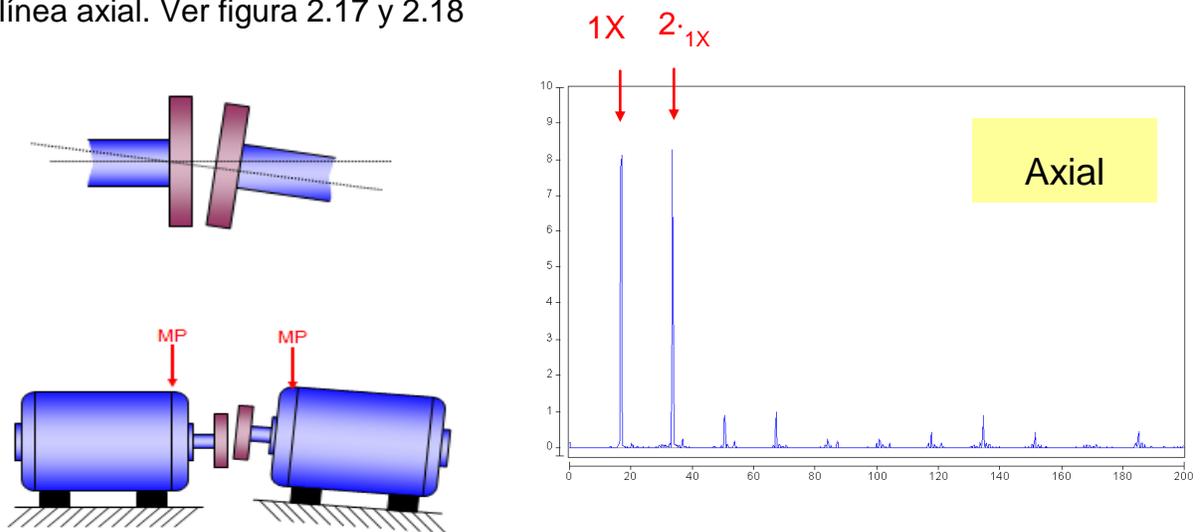


Figura 2.17: Puntos de medición

Figura 2.18: Espectro para el desalineamientos

El desalineamientos es el segundo defecto de mayor presencia en la industria. Culpable de casi otro 40 % de la indisponibilidad técnica de las máquinas.

1. Incrementa las cargas en el acoplamiento.
2. Provoca el desgaste prematuro de cojinetes y empaquetaduras, altas temperaturas, vibraciones excesivas, aflojamiento del anclaje de la máquina y altos consumos de electricidad.

Tipos de desalineamientos

- *Desalineamientos paralelo:* El desalineamientos paralelo se da cuando los ejes centrales son paralelos. El espectro de vibración presenta una alta vibración radial predominante a 2X y con una señal a 1X menor. La diferencia de fases axiales en los dos extremos del acople es de 180° en su dirección radial. Las señales son también visibles en los espectros axiales pero en menor amplitud, se observa igualmente una diferencia de fase de 180° en los dos extremos del acople en su dirección axial. Ver

figura 2.19 y 2.20

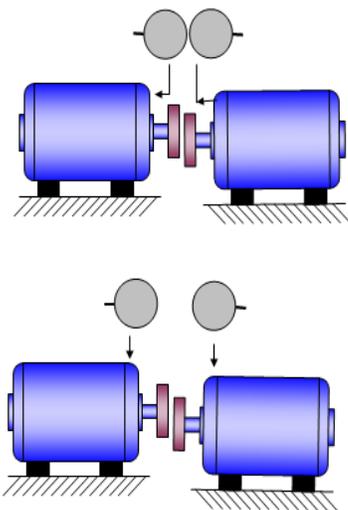


Figura 2.19: Puntos de medición

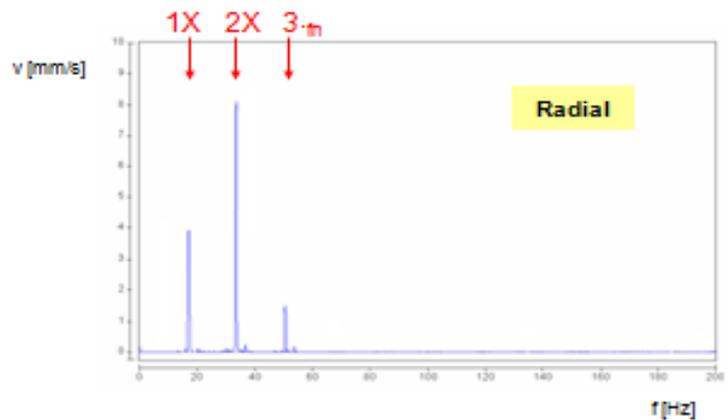


Figura 2.20: Espectro caso de paralelo

- *Desalineamientos angular:* El desalineamientos angular se da cuando las líneas centrales coinciden en un punto. El espectro de vibraciones presenta un valor alto de vibración axial con 1X, 2X y 3X f_n son predominantes con un desfase de 180° entre las dos medidas axiales en los extremos del acople. Estas componentes también pueden

ser observadas en sus mediciones radiales pero en menor magnitud y en fase. Ver figura 2.21 y 2.22

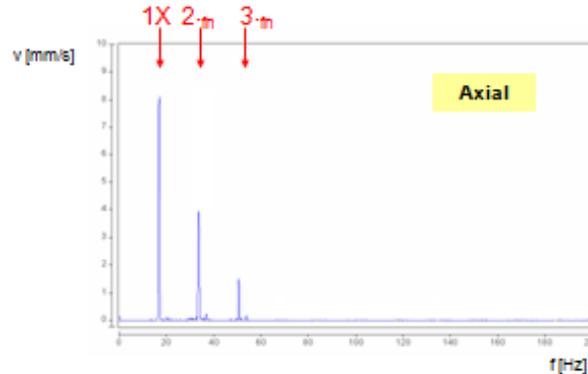
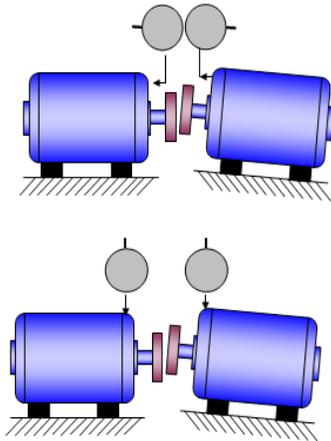


Figura 2.21: Puntos de medición

Figura 2.22: Espectro para angular

- Fallos en rodamientos

Los rodamientos son partes de la máquina que soportan la mayor parte de los esfuerzos que se producen durante los movimientos rotatorios y recíprocos. Son los elementos más reemplazados, unas veces de forma prematura provocando pérdidas de tiempo, de producción y de dinero y otras pueden llegar a la avería catastrófica provocándole a la máquina graves daños. Ver figura 2.23 y 2.24

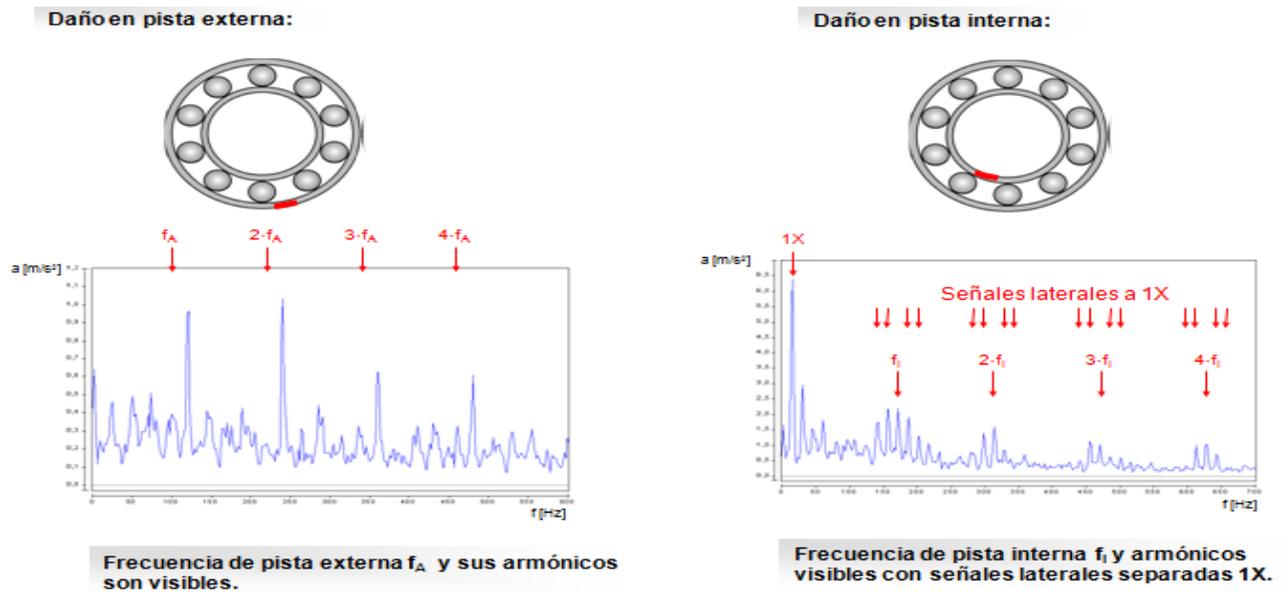


Figura 2.23: Ejemplo de diferentes espectros en rodamientos para diferentes pistas

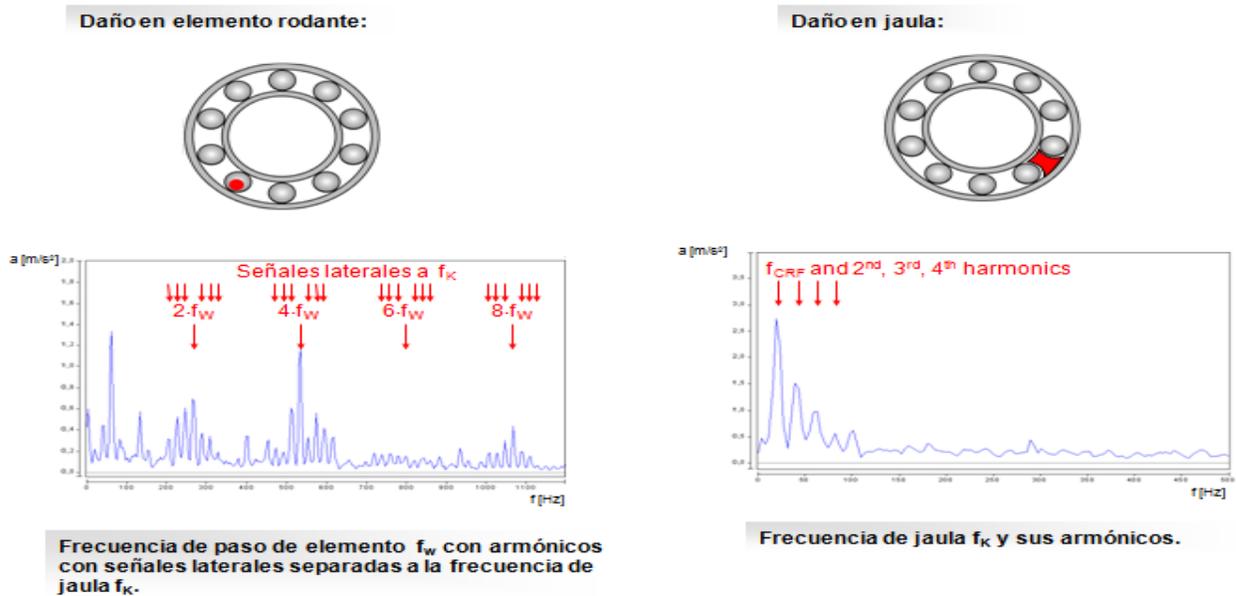


Figura 2.24: Ejemplo de diferentes espectros en rodamientos para diferentes pistas

2.4 Consejos para diagnosticar desalineamientos

En la práctica se encuentra una combinación de desalineamientos angular y paralelo. Generalmente, la presencia de una alta señal a 2X con un incremento de la 1X predominante en dirección axial, denota desalineamientos. Los síntomas de

desalineamientos varían dependiendo del tipo de máquina y sus condiciones de operación. Muchas veces se debe distinguir desalineamientos de desbalance y/o flojedad mecánica:

- Pruebas a diferentes RPM.
- Pruebas con el motor desacoplado.

Se debe de tomar en cuenta los efectos de la temperatura.

2.5 Características generales y especificaciones técnicas de los colectores de vibraciones

Las prácticas industriales modernas, especialmente las de mantenimiento, requieren decisiones autónomas basadas en hechos contrastados tales como lecturas de vibraciones, mediciones de las rpm y temperatura. El colector analizador de vibraciones TV110 y el colector TV320 son una solución racional para la medición, visualización y almacenamiento de muchos de los indicadores más imprescindibles para los equipos rotativos. Los mismos miden el nivel de vibraciones, el estado de los rodamientos, la velocidad, desplazamiento, aceleración y muestra los espectros de trabajo para cada punto de medición.

Características de trabajo del colector analizador de vibraciones TV110

Detección rápida de fallas de motores, ventiladores eléctricos, bombas, compresores de aire, máquinas herramienta, etc. Puede realizarse el análisis de aceleración, velocidad, y desplazamientos. Posee una gran memoria para almacenar 100 resultados y 10 espectrogramas de frecuencias. Sensor manual del acelerómetro disponible con base magnética removible para montaje sobre las piezas a medir. Indicación de batería baja. Batería recargable. Gran display LCD. Impresora integrada, permite imprimir las lecturas y patrones de vibración. Ajuste de los límites superior e inferior con alarma sonora. (Claros Instrumental)

Especificaciones técnicas:

Intervalo de pruebas aceleración 0,1 m/s² a 199,9 m/s² (valor máximo)

Velocidad 0,01 cm/s a 19,99 cm/s (valor virtual) desplazamiento 0,001 mm a 1,999 mm (valor máximo)

Intervalos de frecuencias

Aceleración 10 Hz a 500 Hz, 10 Hz a 1 kHz, 10 Hz a 10 kHz velocidad 10 Hz a 500 Hz, 10 Hz a 1 kHz

Desplazamiento 10 Hz a 500 Hz, tolerancia 5 %

Temperatura de operación 0 c a 40 c dimensiones 270 x 86 x 47 mm

Peso 650 g alimentación batería níquel-hidrógeno

Mantenimiento:

Estrictamente evitar la colisión, mucho polvo, humedad, campos magnéticos intensos, aceite, grasa y suciedad

Se debe cargar la unidad principal con regularidad: Se debe cargar la batería de nuevo después de cada operación de 8-24 horas. El tiempo de carga para cada carga es de 8 horas.

Características de trabajo del colector analizador de vibraciones TV320

El medidor de vibración presenta una pantalla LCD de matriz 300x200 con luz de fondo, para que los usuarios puedan apreciar los resultados de los exámenes incluso en el medio ambiente oscuro. El medidor de vibración ofrece dos modos de exhibición, incluyendo el modo de valor digital y el modo de espectro. La visualización en tiempo real de la carta del espectro está disponible. Además, el medidor de vibración está diseñado con la función de diagnóstico de fallas simples. Cuando la vibración sobrepasa el valor límite, la alarma suena y el instrumento pasa automáticamente al modo de espectro. Además, el medidor de vibración tiene una función de memoria

excelente, la cual puede almacenar 100 cartas de espectro y 100x100 resultados de pruebas. Estos gráficos de espectro y resultados de prueba también pueden ser impresos cuando se conecta la impresora.

El medidor de vibración TV310 está equipado con una sonda de sensibilidad baja, la cual es apta para comprobar la señal de vibración fuerte. Nuestro medidor de vibración TV320 está equipado con una sonda de alta sensibilidad, la cual es ideal para probar la señal de vibración débil. Los resultados de las pruebas de nuestros instrumentos son muy precisos y estables especialmente en poca frecuencia.

Especificaciones técnicas

Modelo		TV310	TV320
Rango de medición	Aceleración	1m/s ² ~392 m/s ² (Pico)	0.1m/s ² ~20 m/s ² (Pico)
	Velocidad	0.1 cm /s ~80cm/s(RMS)	0.01 cm /s ~4cm/s(RMS)
	Desplazamiento	0.01mm ~18.1mm(pico a pico)	0.001mm ~0.8mm(pico a pico)
Rango de frecuencia	Aceleración	10Hz~200Hz, 10Hz~500Hz, 10Hz~1KHz, 10Hz~10KHz	
	Velocidad	10Hz~200Hz, 10Hz~500Hz, 10Hz~1KHz	
	Desplazamiento	10Hz~500Hz	
Precisión		± 5%	
Temperatura		0°C ~ 40°C	
Humedad relativa		≤ 80%	
Dimensión		171 × 78.5 × 28 (mm)	
Potencia		Batería de Litio-iones (trabajo continuo para 20 horas)	

Mantenimiento:

Estrictamente evitar la colisión, mucho polvo, humedad, campos magnéticos intensos, aceite, grasa y suciedad

Cómo limpiar el cuerpo principal del medidor: Dado que el alcohol y el líquido químico pueden erosionar el cuerpo principal del analizador de vibraciones TV 320, especial cuidado debe tenerse al limpiar la ventana de visualización.

Calibración: el medidor de vibraciones es un instrumento de alta precisión y el medio ambiente influyen en él. Por lo tanto, deben ser calibrados periódicamente (medio año o un año). Si la sensibilidad ha cambiado, se puede ajustar girando el botón que se utiliza para ajustar la sensibilidad

Conclusiones parciales.

1. Para la detección de fallos en máquinas rotatorias se emplean una serie de técnicas, las cuales detectan los fallos sin necesidad de detener el funcionamiento del equipo y se utilizan para el diagnóstico del mantenimiento predictivo.
2. Todos los equipos industriales presentan un rango normal de vibraciones, cuando estas sobrepasan los límites establecidos, de factores tales como: desbalance, rotores en voladizo, ejes flexados, desalineamientos de ejes, fallos en rodamientos y otros son los más frecuentes.
3. Con el estudio de los colectores analizadores de vibraciones y examinando su funcionamiento y características de trabajo, se puede realizar el diagnóstico del estado de los equipos industriales como parte del mantenimiento predictivo, tomando como base los valores de las vibraciones.

Capítulo 3

Capítulo III: Caso de estudio para la caracterización de la vibración

3.1 Estudio funcional y constructivo de la maquinaria seleccionada del sector industrial de la construcción

El sector industrial de la construcción MICONS junto a otros organismos son fundamentales en la industria de la construcción en nuestro país, el mismo contribuye a la comunidad cubana y extranjera con la construcción de viviendas y hoteles, además de tener un papel fundamental en la economía cubana. Algunos de los equipos que realizan este papel son: la concretera (mezcladora o trompo), la máquina de fabricar bloques y el molino de bolas, ver figura 3.1 y 3.2. En el caso a estudio se seleccionó el molino de bolas por las características y las condiciones de trabajo a que está expuesto.



Figura 3. 1. Máquina de fabricar bloques

El molino de bolas se utiliza para la moler arcillas y otros productos para la obtención de cementos el mismo está ubicado en la nave de fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica y consta de un motor reductor de 220v, con una potencia de 3Kw y una velocidad de 1430 rpm, se encuentra acoplado al árbol del tambor por un couplin de brida que rota a 48 rpm, la misma posee dos pedestales, una carcasa fija y un tambor móvil, la estructura para fijarla al piso es de 6 patas, posee una pizarra eléctrica y dos cojinetes de fricción. Las condiciones de trabajo a la que se enfrenta son severas

ya que la misma produce altas vibraciones y polvo de arcilla siendo un perfecto abrasivo. Teniendo en cuenta el modo de instalación del equipo se le debe aplicar una correcta fijación al cimiento, la pizarra debe estar alejada del equipo, la maquina debe tener una adecuada ventilación e iluminación. (Ver figura 3.2)

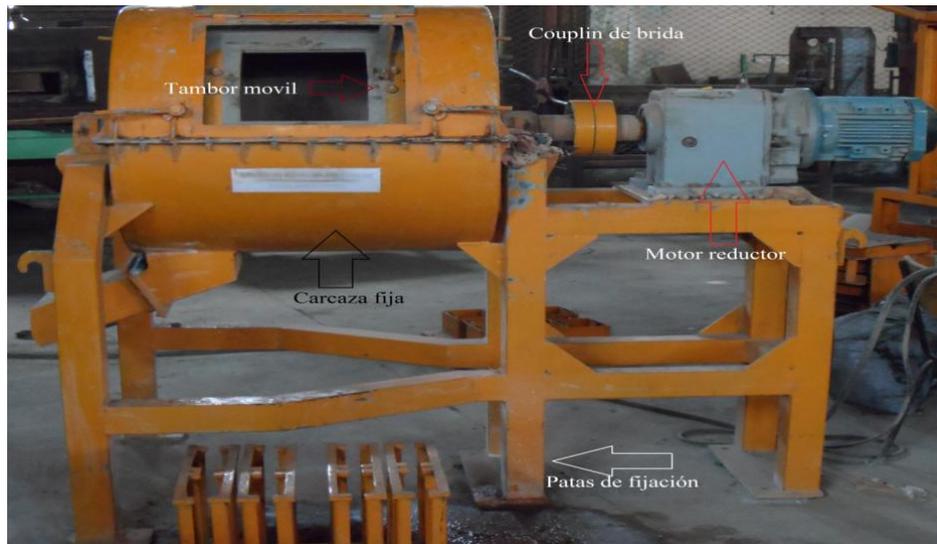


Figura 3. 2 Molino de bolas

3.2 Defectos más frecuentes en la maquina seleccionada y puntos de medición para el caso de desalineamientos

En la maquinaria se observaron y se analizaron distintos tipos de problemas como son el desalineamientos, desbalance, presencia de desgaste abrasivo en los rodamientos, debido al polvo de cemento que se genera en el equipo, otros de los problemas que se observaron es la cercanía de la pizarra de control al equipo lo cual es perjudicial ya que el alto contenido de polvo y las elevadas vibraciones pueden producir un mal funcionamiento en el sistema eléctrico, otro de los problemas es que la máquina no se encuentra anclada al cimiento lo que es una de las causas de las elevadas vibraciones.

Puntos de medición para el caso de desalineamientos en la maquinaria seleccionada y espectros relacionados con el fenómeno. (Ver figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6)

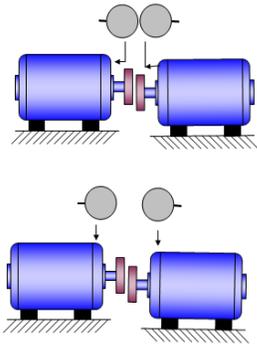


Figura 3.3: Desalineamientos en paralelo

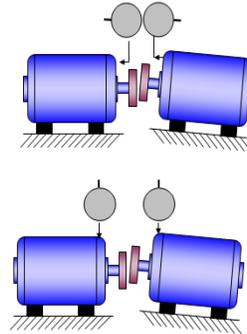


Figura 3.4: Desalineamientos angular

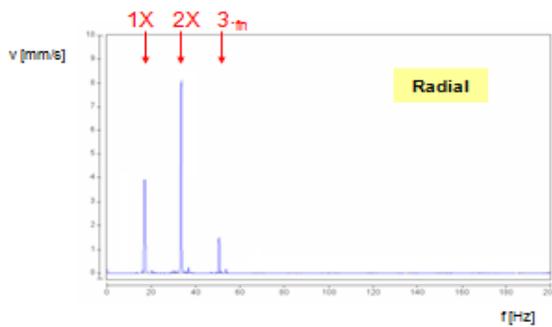


Figura 3.5:
Espectro del desalineamientos paralelo

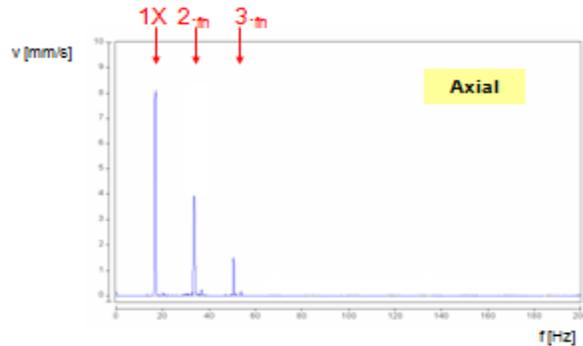


Figura 3.6:
Espectro del desalineamientos angular

Puntos de medición para el caso de desbalance en la maquinaria seleccionada. (Ver figura 3.7, 3.8, 3.9)

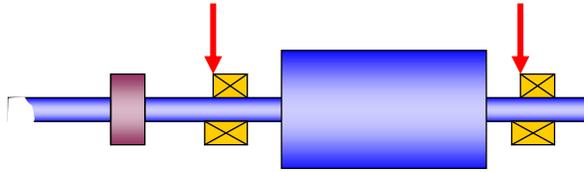


Figura 3.7: Medición para el desbalance

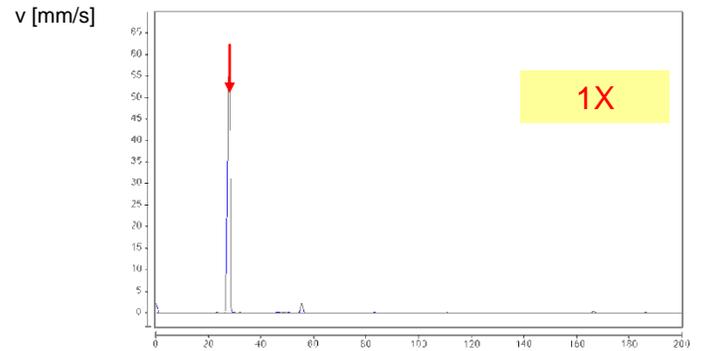


Figura 3.8: Espectro del desbalance

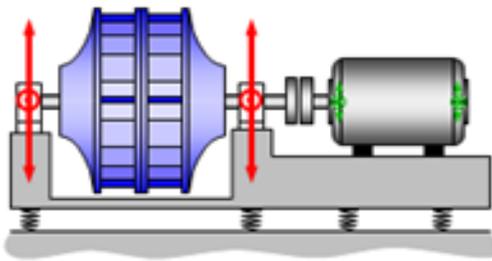


Figura 3.9: Puntos de medición en el caso de nuestro equipo

3.3 Cálculo de velocidad crítica del molino de bolas utilizando el sistema de cuerpo libre escogido por el autor (Rao 2009)

$$W_n = \sqrt{K/M} = \sqrt{\frac{27926.7}{492.09}} = 7.53 \text{ rad/s} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \pi * \frac{90^4}{64} = 3220623.3 \text{ mm}^4 \quad (3.2)$$

$$K_{eq} = \frac{48EI}{L^3} = \frac{48 * 2 * 10^5 * 3220623.3}{1034.5^3} = 27926.7 \text{ N/mm} \quad (3.3)$$

$$M_{eq} = M + 0.5 * m = 486.9 + 0.5 * 10.38 = 492.09 \text{ Kg} \quad (3.4)$$

$M_{tambor} = 486 \text{ kg}$ Masa del tambor

$M_{arbol} = 10.38 \text{ kg}$ Masa del árbol

W_n - Frecuencia natural del sistema (rad/s)

I- Momento de inercia de sistema (mm⁴)

Meq -Masa equivalente (Kg)

Calculo para determinar la flexión del tambor (ver anexo cuatro) (Rao 2009)

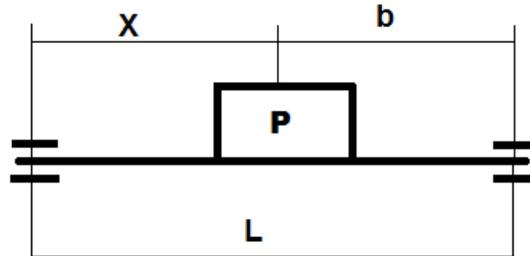


Figura 3.10 Esquema del cuerpo libre escogido por el autor

$$Y_x = \frac{Pbx}{6EIL} (L^2 - x^2 - b^2)$$

$$= \frac{486.9 \cdot 517.25^2}{6 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3220623.3 \cdot 1034.5} (1034.5^2 - 517.2^2 - 517.2^2) = 0.0036 \text{ cm} \quad (3.5)$$

Yx-Flexion del tambor (cm)

P-peso del tambor (Kg)

b- distancia del centro del tambor al rodamiento (mm)

x- distancia del centro del tambor al otro rodamiento (mm)

L-longitud de rodamiento a rodamiento (mm)

E-modo de elasticidad del material (Mpa)

I- momento de inercia (mm⁴)

Cálculo de las frecuencias en el molino de bolas:

$$T = \frac{2\pi}{W_n} = \frac{2\pi}{7.39} = 0.84 \text{ s} \quad \text{Periodo del sistema} \quad (3.6)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.84} = 1.19 \text{ 1/s} \quad \text{Frecuencia del sistema} \quad (3.7)$$

Con la realización de los cálculos anteriores se puede decir que el cálculo de la frecuencia de trabajo a que está sometido el molino es fundamental ya que el mismo debe trabajar por debajo o por encima de la misma para no provocar que el equipo entre en resonancia.

3.4 Modelación del comportamiento del tambor

El uso para la modelación de Software para la obtención de los modos de frecuencia es fundamental ya que el mismo se muestra las diferentes deformaciones obtenidas para los distintos valores de frecuencias en el equipo seleccionado teniendo en cuenta que se usó el Software ANSYS. Para realizar este análisis se realizó un mallado tetraédrico que constó de 5768 nodos, una cantidad de elementos en el modelo de 25927, el elemento usado es sólido y dentro de sólido y se usó el Brick8 nodos 185.

En la tabla se muestran los diferentes valores de frecuencias obtenidas para el molino de bolas:

Tabla 3 1. Resultados de los valores de frecuencia obtenidos por el ANSYS

S ET	TIME/F REQ	LOAD.SE TP	SUBT EP.	CUMULATITI VE
1	0.4230	1	1	1
2	0.2741	1	2	2
3	0.3084	1	3	3
4	0.3083	1	4	4
5	0.3586	1	5	5

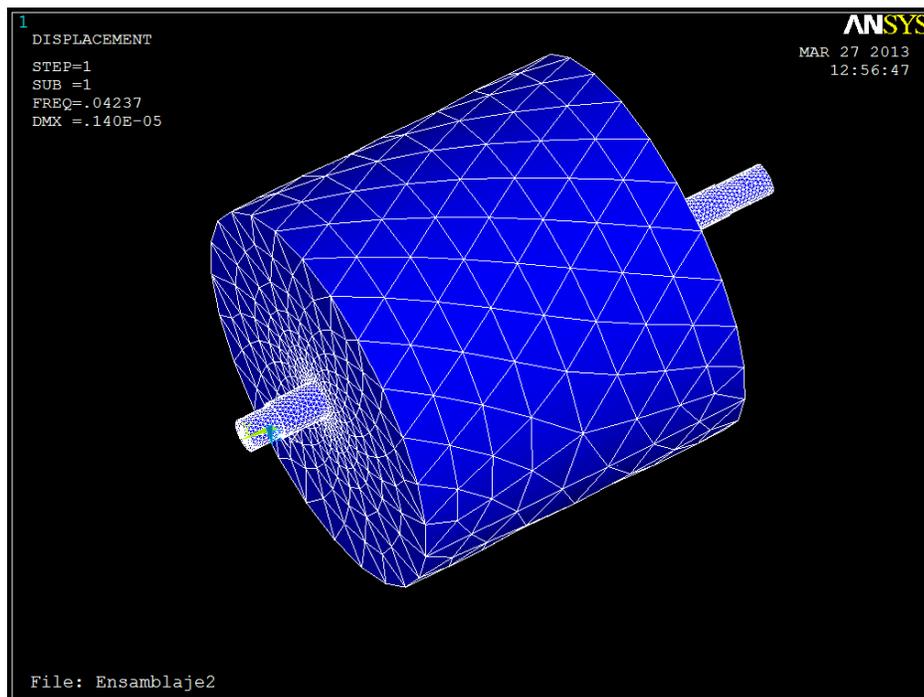


Figura 3.11. Primer modo de frecuencia

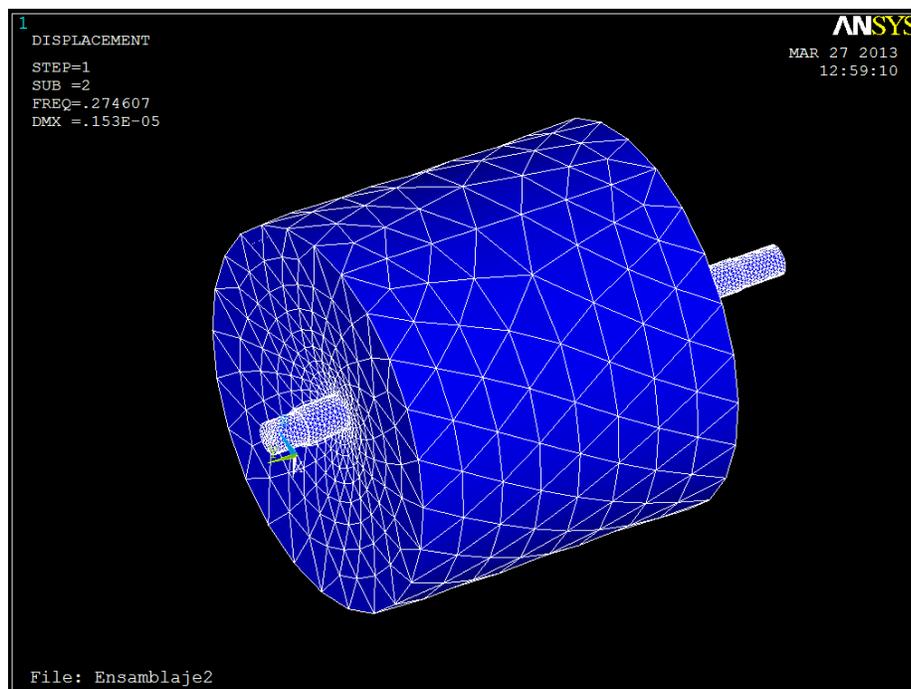


Figura 3.12. Segundo modo de frecuencia

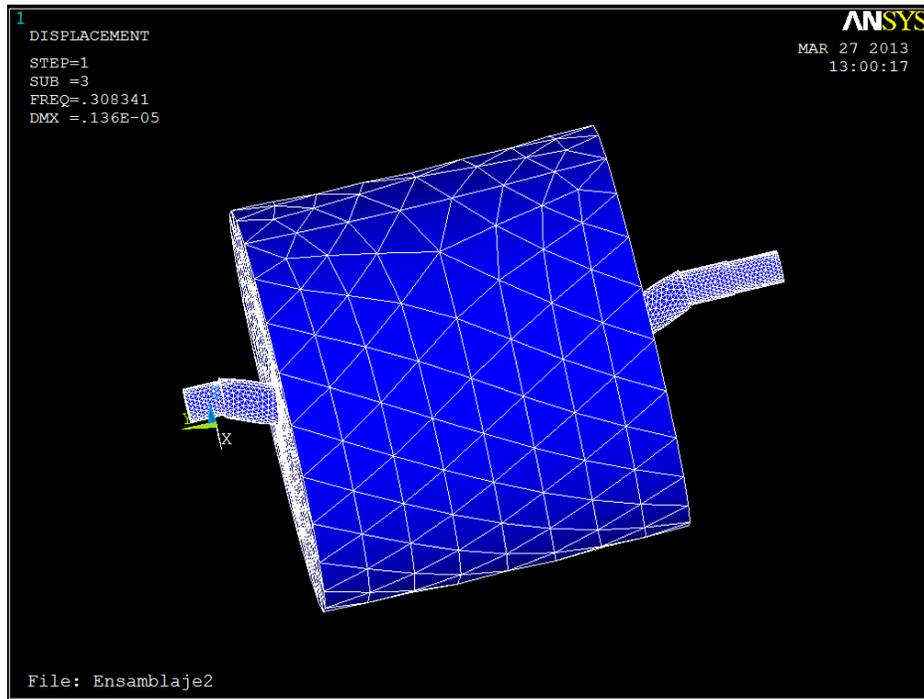


Figura 3.13. Tercer modo de frecuencia

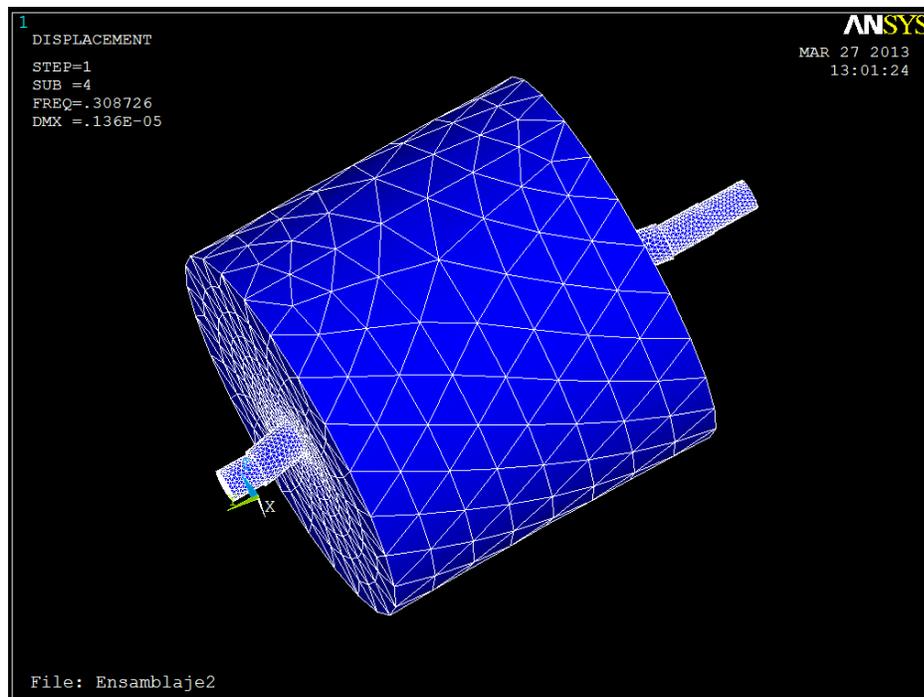


Figura 3.14. Cuarto modo de frecuencia

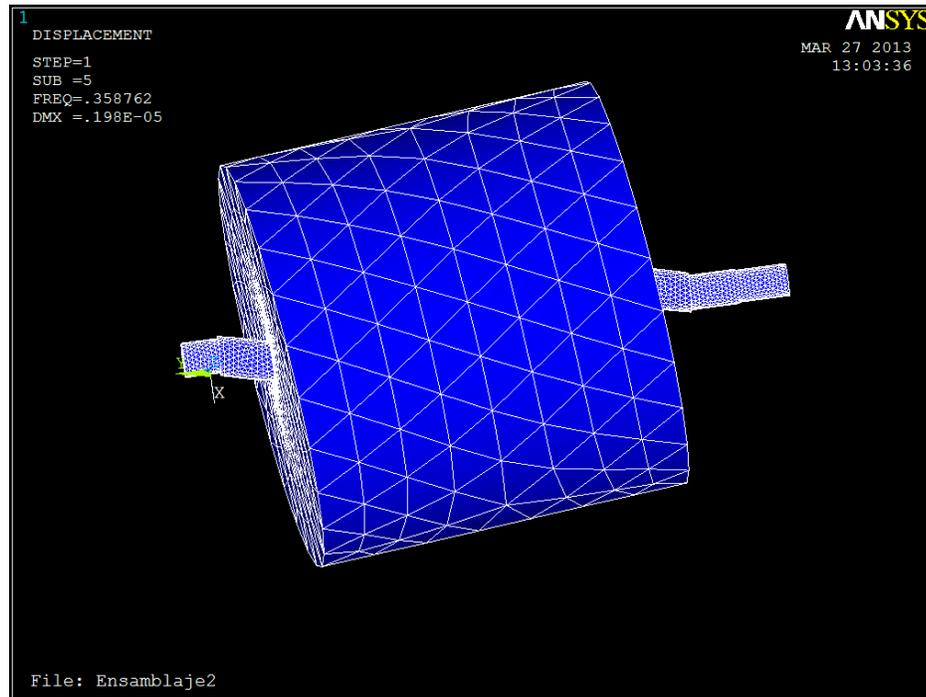


Figura 3.15. Quinto modo de frecuencia

Se puede decir que con el uso del software ANSYS se obtuvieron valores de frecuencias bajos para la maquina lo que implica que la misma se encuentra por debajo de los valor de frecuencia a que puede resonar y mantener un perfecto funcionamiento.

Conclusiones parciales.

1. Se puede decir que con el estudio funcional y constructivo de los equipos analizadores de vibraciones se puede realizar un excelente diagnostico en las mediciones.
2. Con el estudio funcional y constructivo del equipo y con los estudios realizados se pudieron determinar los diferentes puntos de medición, con el objetivo de obtener mediciones al comprobar su estado técnico usando este método.
3. Se debe arribar que con los diferentes cálculos realizados se pudo determinar la frecuencia crítica, la deflexión del árbol del tambor, el periodo y la frecuencia de trabajo a que el mismo puede fallar.

Conclusiones



- 1 En esta investigación se tuvo en cuenta el principio de funcionamiento, condiciones de trabajo y aspectos a tener en cuenta en la instalación tanto de la máquina en estudio como de los colectores, ya que son aspectos fundamentales que determinan una correcta medición en el equipo
- 2 En este trabajo se puede decir que las vibraciones cumplen un factor fundamental en la detección de fallos en máquinas rotatorias sin tener que afectar el funcionamiento de la misma.
- 3 Con el estudio funcional y constructivo se pudieron analizar diferentes defectos que afectaban a la maquinaria mediante su uso y los puntos fundamentales para medir el desbalance y desalineamientos.
- 4 Se debe decir que con las técnicas de detección de fallos es uno de los factores más importantes para diagnosticar el mantenimiento predictivo en las maquinarias de la industria de la construcción
- 5 El exceso de vibraciones o los niveles altos de las mismas en la maquinaria rotativa es un indicador de las fallas más importantes que se debe tener en cuenta para tener una planificación efectiva del mantenimiento
- 6 Se debe concluir afirmando que con los resultados obtenidos analíticamente y mediante el software ANSYS y en comparación de los mismos nuestra maquinaria va a tener un perfecto funcionamiento ya que los niveles de vibración están por debajo del valor a que el equipo entra en resonancia

Recomendaciones



Facultad de Ingeniería Mecánica

1. Este trabajo deja sentadas las bases, sirviendo de guía para la posterior implementación de la técnica de vibraciones mecánicas, lo que el autor recomienda dar seguimiento por la importancia que esta brinda a la industria.
2. Se recomienda incluir en el estudio otros equipos del sector de la construcción ya mencionados antes para ver si su comportamiento es aceptable según la investigación
3. Se pueden utilizar los colectores analizadores de vibraciones para el desarrollo del mantenimiento predictivo.

Bibliografía



Facultad de Ingeniería Mecánica

1. (2000). "AUTOCAD."
2. (2006). Vibraciones mecanicas Simón Bolívar
3. (2006). Analisis de vibraciones en grupos electrojenos Filial Lago Agrio Distito Amazonico
4. (2008). Teoria de las vibraciones
5. (2010). Clasificacion de las vibraciones 1.
6. 26, N. (2007). Ruido en zonas habitables ,requisitos higienicos sanitarios
7. 435, N. (2006). Requisitos acusticos para edificios
8. 2041, I. (2008). Vibraciones y choque,vocabulario
9. 3046, I. (2001). Motores alternativos de combustion interna
- 10.5007, I. (2003). Maquinas agricolas y forestales
- 11.7919-1, I. (1996). Vibraciones mecanicas de maquinas no resiprocantes mediciones sobre ejes rotatorios y criterios de evaluacion parte 1
- 12.7919-2, I. (2007). Vibracionas mecanicas -evaluacion de las vibraciones en las maquinas a traves de mediciones sobre ejes rotatorios parte 2:turbinas de vapor y generadores instalados sobre base fija con potencias superiores a 50Kw.
- 13.18436-2, I. (2003). Monitorado de estado y diagnostico de maquinas -requisitos para el adiestramiento y la certificacion del personal -parte 2:monitorado de estado y diagnostico por vibraciones
- 14.Aguilar, L. A. (2004). Diagnostico de probleenas mediante vibraciones Facultad de ingenieria San Carlo Guatemala
- 15.Autores and Colectivo (2006). "Importancia del estudio de las vibraciones."
Vibraciones Mecánicas **Vibraciones Mecánicas.**
- 16.Castelli, M. (2007). Metodologia de monitoreo, deteccion de fallos en motores asincronicos de induccion Montevideo-Uruguay
- 17.ConstruSur (2008) Mantenimiento predictivo, herramientas y técnicas para la detección de fallos.

18. Cruz, J. D., J. Barillas, et al. (2007). *Vibraciones Mecánicas*, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
19. Estupiñan, E. (2008). *Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos* Departamento ingeniería mecánica Concepción -Chile
20. Internet (2011). Retrieved 27 junio 2012, from <http://www.monografias.com/trabajos/vibramec/vibramec.shtml>.
21. Marín, E. P. (2001). Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias.
22. Marín, E. P. (2001). *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Ciudad de La Habana. Cuba.
23. Olmedo, F. (2006). *Análisis de vibraciones mecánicas como base para la ejecución de un plan de mantenimiento* Departamento de ingeniería mecánica Sangolquí
24. Rao, S. S. (2009). Mechanical Vibration Habana
25. Rao, S. S. (2009). Mechanical Vibration.

Anexos



Facultad de Ingeniería Mecánica



Anexo I. Vibrómetro Modelo TV110



Anexo II. Vibrómetro Modelo Modelo TV320



Anexo III. Molino de bolas

