

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

***LA IMPORTANCIA DEL BALANCEO DINÁMICO
EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO:
REPORTE DE ACTIVIDAD Y DESEMPEÑO PROFESIONAL***

QUE PARA OBTENER
EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTA
MAYOLO MEJÍA ZAVALA

ASESOR DE REPORTE PROFESIONAL
DR. EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA: JUAN ANZÚREZ MARÍN

MORELIA, MICHOACÁN, MAYO DE 2013

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mis padres, mi esposa y a mis hermanos y hermana por el apoyo y el cariño incondicionales que siempre me han brindado. También le doy las gracias a todas aquellas personas especiales en mi vida, sin las cuales no hubiera sido posible llegar a este momento.

Dedicatoria

Dedico esta memoria a mi hermano Eugenio Mejía Zavala, quien ha sido mi inspiración y apoyo en la realización de este proyecto.

Resumen

El presente reporte de experiencia laboral refleja una parte del desempeño profesional adquirido por espacio de más de veinte años laborados para la empresa de origen norteamericano IRD Mechanalysis, hoy en día IRD Balancing. Esta organización internacional ha sido pionera en la implantación de sistemas de mantenimiento predictivo y suministro de máquinas, técnicas e instrumentos de balanceo dinámico para la maquinaria rotativa en operación. Su filosofía y métodos desarrollados por sus especialistas me han permitido vislumbrar y entender el peso específico que tiene para la industria mexicana el poder convertir los departamentos de mantenimiento en verdaderos centros motores de la confiabilidad y eficiencia de los equipos dinámicos críticos que mueven la productividad de una empresa.

Algunas de las consideraciones básicas transmitidas por nuestra empresa a una gran cantidad de ingenieros de mantenimiento de la más variada industria se expresan así:

- ❖ La maquinaria rotativa, sin importar su tamaño o importancia crítica, toda emite un determinado nivel de vibración.
- ❖ Los niveles de vibración inherentes a la maquinaria rotativa pueden frecuentemente quedar fuera de sus límites normales de operación y causar estragos irreversibles en los componentes de la misma. La pronta detección, identificación y corrección de la variada índole de los problemas causantes de la alta vibración es de primordial importancia. Sus bondades se ven reflejadas tanto en la lógica extensión de la vida útil de la máquina, como en la reducción de tiempos caídos, reducción de inventarios de mantenimiento y el aumento en la productividad de la variedad de unidades dinámicas de proceso (motores, bombas, ventiladores, compresores, turbo-generadores, etc.).
- ❖ Es natural que las máquinas dinámicas vibren.

- ❖ El nivel de vibración de una máquina en operación dinámica es el reflejo de la salud de la misma.
- ❖ La cantidad de vibración presente en una máquina rotativa refleja la cantidad de fuerza o fuerzas generadas en su interior. Estas fuerzas afloran a la parte exterior de su carcasa y, transformadas en vibración, se perciben, se escuchan y se pueden palpar; pero requieren de una instrumentación orientada a la detección temprana y la medición precisa de estas fuerzas.
- ❖ La instrumentación orientada a medir estos niveles de vibración y asignarles un valor numérico no solamente sobrepasa las limitaciones de la falta de experiencia sino también aquéllas de percepción sensorial.
- ❖ Es posible incrementar los niveles de productividad de una empresa mediante el uso y la aplicación de las técnicas y procedimientos basados en la detección, el análisis y la corrección de las fallas más comunes que afectan a la maquinaria crítica; utilizando la vibración y sus características como base de su diagnóstico.

Algunos de los problemas más comunes en la maquinaria rotativa son:

- Desbalanceo dinámico
- Desalineamiento
- Soltura mecánica
- Problemas de índole eléctrica (desbalance de fuerzas magnéticas)
- Resonancia
- Rodamientos en deterioro
- Rozamiento
- Problemas hidráulicos y aerodinámicos

No obstante, la variedad y presencia de todos estos problemas de naturaleza mecánica y eléctrica, el **desbalanceo dinámico** permanece como una de las causas primordiales de alta vibración en la maquinaria rotativa. Sus efectos, agudizados al cuadrado de la velocidad de los equipos en operación, son de graves consecuencias para los rodamientos de soporte de un rotor, sellos mecánicos y coples, llegando a ocasionar fallas por fatiga de componentes dinámicos, como: flechas, aspas e impelentes, así como la propia estructura de soporte. Mi experiencia a lo largo de todos estos años en la aplicación de estas técnicas me ha permitido ver grandes resultados en las más variadas empresas en términos de reducción de gastos y mayor control efectivo de las actividades de mantenimiento, así también, conocer como una empresa puede tornarse productiva con el solo hecho de controlar la correcta operación de los equipos dinámicos críticos para su producción.¹

Palabras Clave: BALANCEO DINÁMICO, MANTENIMIENTO PREDICTIVO

¹ “Chapter 1”, en: *IRD Balancing Manual*, Louisville, Ky, 2004, p. 1.

Abstract

This report concerning my work experience reflects one aspect of the professional performance acquired for a span of over twenty years working for the American company, IRD Mechanalysis, now under the name of IRD Balancing. This international organization has been the pioneer in the setting up of predictive maintenance systems as well as the supply of machines, technics and instruments for use in dynamic balancing for the rotating machinery in operation. Its philosophy and methods developed by their specialists, have permitted me to visualize and understand the importance for the Mexican industry to convert maintenance departments into true motor centers of reliability and efficiency of the dynamic critical equipment that improves the productivity of a company.

Some of the basic considerations transmitted by our company to a great number of maintenance engineers for the most varied industries are expressed as follows:

Rotating machinery, without taking into account its size or critical importance, always emits a specific vibratory level.

The levels of inherent vibration to the rotating machinery may frequently remain outside of the normal limits of operation and cause irreversible damage in its components. Early detection, identification and correction of the various types problems caused by the high vibration is of primordial importance and its benefits are reflected, in the logical extension of the service life of the machine, as well as in the reduction of downtime, lessening of maintenance inventories and growth of productivity in the variety of dynamic processing units (motors, pumps, fans, compressors, turbo-generators, etc.).

- ❖ It is natural that all dynamic machines vibrate
- ❖ The level of vibration of a machine in dynamic operation is the reflection of its good condition

- ❖ The amount of vibration found in a rotating machine reflects the amount of force, or forces generated in its interior. These forces emerge to the exterior part of the surface, and transformed into perceptible vibration; it can be heard and it can be felt; however, instrumentation designed for early detection and precise measuring of these forces is required.
- ❖ The instruments designed to measure these levels of vibration, and to give them a numerical value not only surpasses the limitations of lack of experience, but also those of sensory perception.
- ❖ It is possible to extend the levels of productivity of a company by the use and application of the technics and procedures based on the detection, the analysis and the correction of the most common faults that affect the machinery critical to a plant, utilizing the vibration and its characteristics as the basis of the diagnosis.

Some of the most common problems found in rotating machinery are:

- Dynamic Unbalance
- Misalignment
- Looseness
- Electrical problems (Unbalance of magnetic forces)
- Resonance
- Bearings faults
- Rubbing
- Hydraulic and aerodynamic problems

Nevertheless the variety and presence of all these mechanical and electrical problems, the Dynamic Unbalance remains as one of the primordial causes of high vibration in rotating machinery. Its effects heightened to the square of the speed of the equipment in operation, are of grave consequence for the bearing supports of a rotor, its

mechanical seals and couplings, causing faults related to the fatigue of the dynamic components such as shafts, vanes and pallets, as well as the very support structure. My experience throughout all these years in the application of these technics have permitted me to see great results in a great variety of plants, related to the reduction of expenses and more effective control of maintenance activities. I have also been able to see how a company can begin to be productive only by controlling the correct operation of the critical dynamic equipment dedicated to its production.²

Key Words: DYNAMIC BALANCING, PREDICTIVE MAINTENANCE

² “Chapter 1”, en: *IRD Balancing Manual*, Louisville, Ky, 2004, p. 1.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	
La capacitación como herramienta clave	20
Figura 2.2.	
Balanceo de rotores herméticos	21
Figura 2.3.	
Máquinas de soportes flexibles vs. máquinas de soportes rígidos	22
Figura 2.4.	
Sistema de suspensión pendular	23
Figura 2.5.	
Balanceo de armaduras de motores eléctricos	24
Figura 2.6	
Balanceo de turbina a baja velocidad	25
Figura 3.1	
Lectura total de vibración y sus componentes	27
Figura. 3.2	
Formas de onda vs. tiempo	28
Figura 3.3	
Dominio del tiempo y la frecuencia	29
Figura 3.4	
Conversión al dominio de la frecuencia	29
Figura 3.4	
Expansión del dominio de la frecuencia	30
Figura 4.1	
La fase como característica de la vibración	34
Figura 4.2	
Modos de deflexión de un rotor flexible	34
Figura 4.3	
Rotores flexibles y sus consideraciones	35
Figura 4.4	

Maniobras anteriores al balanceo de grandes rotores	35
Figura 4.5	
El analizador de vibraciones	36
Figura 4.6	
Espectro de vibraciones en amplitud vs. frecuencia	36
Figura 4.7	
Despliegue de datos de desbalance en unidades de vibración.	37
Figura 4.8	
Despliegue de datos de corrección en gramos	37

CONTENIDO

Agradecimientos.....	2
Dedicatoria.....	3
Resumen	4
Abstract.....	7
Lista de Figuras	11
Contenido	12
Capítulo 1. Introducción	
1.1 Antecedentes.....	14
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Justificación	16
1.4 Metodología.....	16
1.5 Descripción de los capítulos	17
Capítulo 2. IRD Balancing México	
2.1 Descripción de la empresa.....	18
2.2 Labores desarrolladas	18
2.3 Capacitación	19
2.4 Principio de operación de las máquinas Balanceadoras	22
2.5 Técnicas y opciones de análisis y balanceo.....	23

Capítulo 3. Identificación y corrección del desbalance dinámico

3.1 Consideraciones técnicas.....	27
3.2 Diagnóstico y características de la vibración.....	28
3.3 El valor y la aplicación de la FFT.....	30

Capítulo 4. El desbalanceo dinámico: Causas, definición, diagnóstico y beneficios

4.1 Causas.....	31
4.2 Definición.....	32
4.3 Tipos de desbalance dinámico.....	33
4.4 Diagnóstico.....	36
4.5 Beneficios.....	35

Capítulo 5.

Conclusiones.....	39
Bibliografía.....	40

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

El poder llegar a la evaluación y entendimiento sobre la importancia de tener en operación (en cualquier planta productiva de nuestro país), maquinaria rotativa de alta velocidad con bajos niveles de vibración, requiere primero de la comprensión completa de lo que significa un mantenimiento basado en la condición dinámica de la maquinaria. Estos equipos se ven frecuentemente afectados por el efecto constante de las fuerzas causadas por diferentes problemas mecánicos, entre ellos el **desbalanceo dinámico**.

Este nivel de mantenimiento conlleva a trascender las etapas de los mantenimientos correctivos y programados para aplicar las técnicas que, mediante el uso de la vibración generada por estas máquinas, nos permitan penetrar en su comportamiento de operación dinámica y detectar la presencia de aquellos problemas que tanto afectan a la productividad de nuestra industria, mucho antes de que los mismos se salgan fuera de tolerancia.

De este importante salto nace el término ***mantenimiento predictivo***: el poder capturar la vibración, observar sus características de **amplitud**, **frecuencia** y **fase**, y analizarlas en completo control de la situación para beneficio de la confiabilidad y la continua operación de los activos de producción de una industria.

1.2 Objetivos

Objetivo general:

Poner de relieve el énfasis sobre la importancia que tiene adquirir la cultura del ***mantenimiento predictivo*** orientado hacia la búsqueda de la **confiabilidad** en los equipos dinámicos críticos, para que una planta sea productiva. Bajo esta misma cultura, es necesario aplicar la acción correctiva del **balanceo dinámico** como una práctica de rutina

en cada intervención de las máquinas críticas y estratégicas de una planta, siempre en completa coordinación con las áreas de producción.

Objetivos particulares:

- Transmitir la relevancia de entender las tres etapas fundamentales del mantenimiento predictivo de la maquinaria rotativa: **Detección, Análisis de fallas y Corrección.**
- Enfatizar la necesidad de ser constantes y metódicos además de entender que muchas de las fallas mecánicas y eléctricas de un equipo dinámico requieren de la capacidad de razonamiento lógico, observación, deducción, e interpretación de las gráficas de vibración capturadas.
- Concientizar a los ingenieros de las áreas de mantenimiento que no se requiere ser un experto en vibraciones para poder, mediante una cierta metodología y reordenamiento de nuestras actividades, pasar de la cultura del mantenimiento tradicional al conjunto de acciones predictivas que redundan en beneficio de la confiabilidad y productividad de los equipos dinámicos críticos de una planta.
- Enfatizar que una de las fallas más frecuentes encontradas en la maquinaria rotativa es el ***desbalanceo dinámico***.
- Detectar mediante el análisis FFT las características particulares del desbalanceo dinámico.
- Clarificar la identificación de los diferentes tipos de desbalance y las opciones que tenemos en cuanto a la decisión de balancear **in situ** o remitir el rotor desbalanceado a una máquina balanceadora fuera de su entorno de operación, así como las ventajas y desventajas de estas opciones.
- Mencionar que la presencia de diferentes normas, tanto de niveles de vibración como de niveles de balanceo dinámico, es esencial en la búsqueda y obtención de criterios firmes y sólidos que nos den la tranquilidad en la operación confiable y continua de la maquinaria crítica de una empresa.³

³ <http://www.irdbalancing.com/>: Balance Quality Requirements of Rigid Rotors: The Practical Application of ISO 1940/1.

1.3 Justificación

El transmitir la importancia de mantener con bajos niveles de vibración al conjunto de equipos dinámicos, críticos para la operación productiva y segura de una planta en México, representa una parte de nuestras actividades como empresa consultora y prestadora de los servicios. La otra parte de nuestra labor se cifra en prestar la asesoría técnica en la selección del sistema de balanceo dinámico más acorde a las necesidades de cada empresa, que permita la mejor solución de sus problemas de desbalanceo dinámico.

Las consecuencias que, por razones de un desbalanceo dinámico excesivo, pueden darse son variadas y en ocasiones catastróficas. El impacto causado por las fuerzas dinámicas fuera de tolerancia sobre los elementos de soporte reducen la vida de los mismos, ya que de acuerdo a datos de los fabricantes más prestigiados de rodamientos, la fuerza dinámica generada por un rotor desbalanceado puede reducir la vida útil del rodamiento significativamente. Esto sin tomar en cuenta el paro inesperado de la unidad con sus consecuencias en la producción, los tiempos caídos y el desvío del personal involucrado en la reparación no programada. Aunado a estos factores, está el hecho documentado de que los equipos dinámicos que operan con altos niveles de vibración generan un mayor consumo de energía eléctrica.⁴

1.4 Metodología

Como apoyo y columna vertebral, en la presentación de este reporte de las actividades que desempeño en mi ámbito profesional, es preciso mencionar que he recurrido a varias técnicas, razonamientos y procedimientos de análisis de vibración y de balanceo dinámico, desarrollados por las empresas IRD Mechanalysis (hoy en día IRD Balancing) y a la importante utilización de instrumentos de medición y análisis de la vibración; así como a los equipos y máquinas balanceadoras dedicados expofeso al diagnóstico y la corrección de las diferentes fallas dinámicas .

⁴ Véase: “Chapter Three”, en: *Introduction to Vibration Technology*, Columbus, Ohio, IRD Mechanalysis, 1994.

1.5 Descripción de los Capítulos

El capítulo 2 de este reporte describe la organización de la empresa IRD Balancing.

El capítulo 3 intenta describir la necesidad de comprensión del concepto de mantenimiento predictivo, utilizando las vibraciones emitidas por la maquinaria rotativa en la identificación del desbalanceo dinámico.

El capítulo 4 contiene las definiciones del desbalance dinámico, sus características de identificación, su naturaleza vectorial, los tipos de desbalance identificados por los instrumentos que usamos para su reconocimiento, las diferentes formas de corregirlo, así como la importancia que implica mantenerlo dentro de sus límites de tolerancia para beneficio de la productividad de una planta.

El capítulo 5 muestra las conclusiones obtenidas a partir de esta memoria técnica.

Capítulo 2

IRD Balancing México

2.1 Descripción de la Empresa

La empresa IRD Balancing, con más de cincuenta años de experiencia en la fabricación de instrumentos de análisis de vibraciones y máquinas de balanceo dinámico tiene su casa matriz en los Estados Unidos de Norteamérica y cuenta con sucursales en Inglaterra, Canadá y México.

2.2 Labores desarrolladas

Las labores que nuestra organización desempeña en México están orientadas al suministro para la industria de nuestro país con máquinas balanceadoras, instrumentos de vibración y cursos de capacitación; tanto en análisis de vibraciones como balanceo dinámico. Así como también en las labores de servicio en el campo de estas especialidades.

Entre las actividades que se han realizado en una diversidad de empresas instaladas en la República Mexicana, es el asesoramiento a departamentos de mantenimiento en el uso más adecuado de las herramientas de análisis de vibración y balanceo dinámico. Esto implica en ocasiones el evaluar e inventariar el equipo dinámico crítico para una planta productiva.

En relación a lo anterior, como parte de dichas tareas, sugerimos la importancia de seleccionar las unidades de vibración más adecuadas, que permitan detectar la mayoría de los problemas, tanto mecánicos como eléctricos, en un conjunto dinámico; el mejor manejo de los rangos de los espectros de vibración, de acuerdo al tipo de máquina. Los puntos donde se mide la vibración, las direcciones que se deben tomar en cuenta, así como el sensor más adecuado y la colocación del mismo, son también otras de nuestras variadas recomendaciones.

Cuando una empresa en México empieza a detectar que un considerable número de equipos rotativos en su planta sufre un desbalanceo dinámico nocivo para la integridad y operación de los mismos, se encuentra con dos alternativas: algunos de estos equipos, por su propia naturaleza de operación, pueden balancearse *in situ*, o en el mismo lugar donde estos operan; otros, sin embargo, por su naturaleza hermética requieren ser balanceados en una máquina de balanceo, fuera de su entorno de operación y en un ambiente de completo control del rotor. Ambas situaciones tienen ventajas y desventajas.

Mediante la evaluación, la aplicación y condiciones de servicio de cada equipo dinámico se procede a seleccionar cuáles de ellos conviene balancear su posición y cuáles requieren ser equilibrados dinámicamente en una máquina balanceadora, y en cuántos planos de corrección podrían ser balanceados.

Aquellos rotores que por sus características requieren ser balanceados en una máquina balanceadora se analizan en cuanto a su peso, su configuración geométrica, la velocidad de operación de los mismos, su comportamiento dinámico en relación con sus frecuencias naturales. Para lo anterior, se investiga si el rotor es dinámicamente *rígido* o *flexible* y de ser lo último, se mencionan su velocidades críticas; mientras que los primeros operan por debajo de su velocidad crítica.

Con toda esta información disponible, se selecciona la máquina de balanceo más acorde que cubra el más amplio rango de pesos y configuraciones geométricas sin perder de vista la sensibilidad para la que fue construida. Los rangos en peso para los que son diseñadas las máquinas balanceadoras van desde rotores que pesan unos cuantos gramos hasta aquéllos cuyo peso rebasa las cincuenta toneladas.

2.3 Capacitación

Una actividad que forma parte medular de la oficina sucursal en México es la capacitación teórico-práctica a diferentes niveles para el personal técnico que opera los

diferentes sistemas instalados a lo largo de la República Mexicana. Es nuestra misión el transmitir el conocimiento del comportamiento dinámico de un rotor desbalanceado, los diferentes tipos de desbalanceo y las técnicas para corregirlo; incluyéndose la operación adecuada de los instrumentos, tanto en su parte mecánica como en su parte electrónica, todo esto es crucial para el éxito de las acciones correctivas del balanceo dinámico.⁵ Véase figura 2.1.



Figura 2.1. La capacitación es una herramienta clave para la asimilación de los conceptos y técnicas del balanceo dinámico.

La empresa ha fabricado máquinas balanceadoras desde inicios de los años 50s, bajo el principio de máquinas balanceadoras de *soportes flexibles* (*soft bearing balancing machines*). Este diseño permite balancear rotores, que operan a alta velocidad, a revoluciones bajas, detectando el desbalanceo dinámico en términos de desplazamiento radial, sin involucrar la fuerza que genera el mismo.

⁵ “Chapter 1”, en: James Berry E., *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis II*, Charlotte, N. C., 1994, p. 2.

Cada máquina balanceadora o instrumento balanceador para balanceo en sitio suministra con una capacitación de varios días, permitiendo así transmitir las técnicas y procedimientos de análisis y balanceo dinámico para los diferentes rotores que la planta en específico tiene operando en sus instalaciones. El aprendizaje de las acciones a realizar, antes del balanceo de un rotor, implica el correcto montaje del mismo, la colocación adecuada, nivelación, selección de la mejor manera de accionar el rotor, selección de los planos de corrección del desbalance y el método de corrección del mismo. Así también, si removemos o agregamos peso de corrección, sumándose una variada gama de consideraciones que nos lleve al éxito del trabajo a realizar.⁶

Es de mucha importancia conocer las velocidades nominales de operación de los rotores a balancear, su naturaleza rígida o flexible y sus velocidades críticas; ya que estos datos conjuntamente con el peso de los mismos e información técnica adicional nos darán la respuesta de la calidad del balanceo que buscamos de acuerdo a la norma seleccionada.



Figura 2.2. Las armaduras de motores eléctricos son un caso típico de aquellos rotores que requieren ser balanceados fuera de su entorno de operación, dada su configuración hermética.

⁶ “Chapter 4”, en: Paul Baur, “Field Balancing of Rotating Machinery” in *Power Magazine*, New York, N. Y., 1983, pp. 1-16.

2.4 Principio de operación de las máquinas balanceadoras

El principio de operación característico de las máquinas de soportes flexibles, con un sistema pendular nos permite medir el desplazamiento generado por el desbalance, pero no la fuerza, nos da la valiosa posibilidad de balancear rotores de alta velocidad a revoluciones de sólo una fracción de su velocidad nominal. Véanse figuras 2.3 y 2.4.

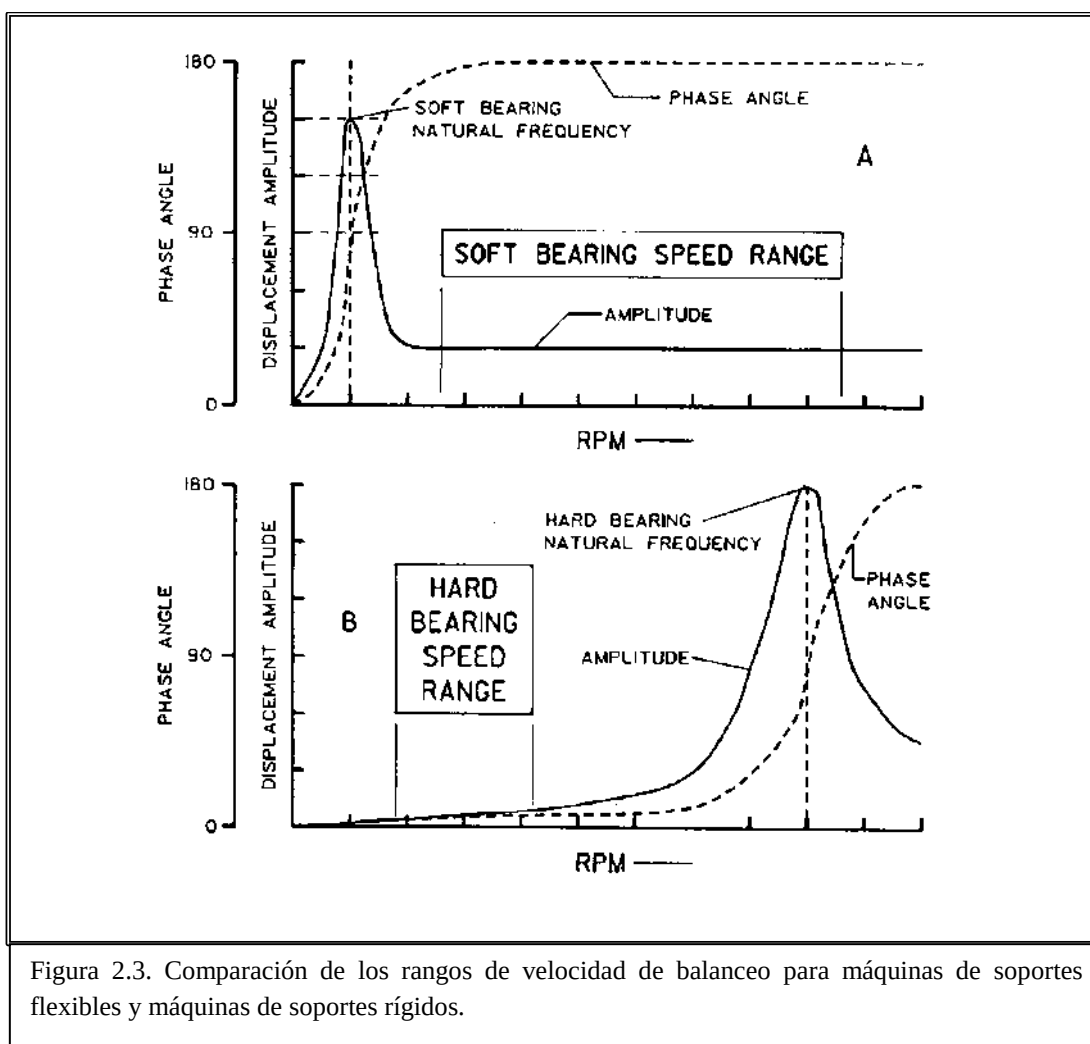
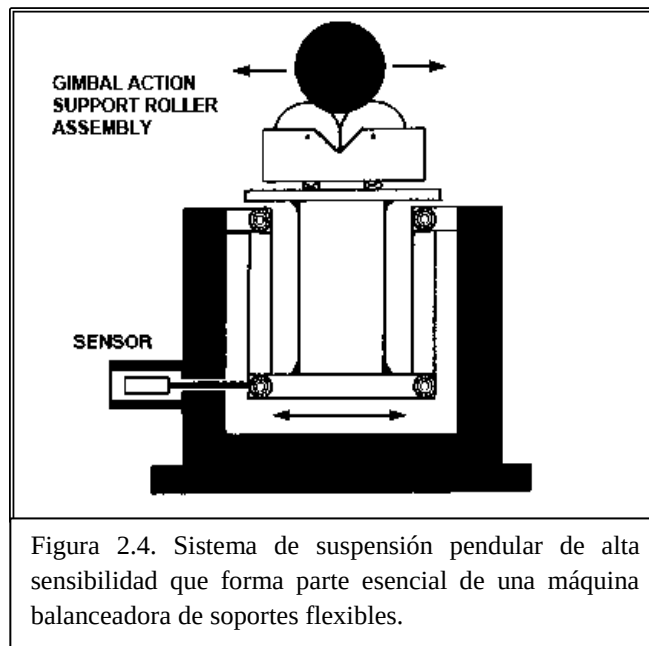


Figura 2.3. Comparación de los rangos de velocidad de balanceo para máquinas de soportes flexibles y máquinas de soportes rígidos.



Durante el entrenamiento al personal de una empresa que ha adquirido un sistema de balanceo, hacemos énfasis en todas aquellas actividades previas a la acción directa del equilibrio dinámico. La inspección visual de la pieza a balancear es de enorme importancia, pues debe contar con todos aquellos elementos que forman parte del conjunto dinámico. Véase figura 2.5. Es importante también considerar que las superficies de contacto con los apoyos, que soportaran la pieza al balacearla, deberán estar pulidas y libres de cualquier imperfección que interfiera y confunda la típica frecuencia de balanceo generada por las revoluciones de giro de la pieza. La identificación de los planos de corrección, el radio de corrección, la decisión de remover peso o agregar peso a la pieza, aunado a otras consideraciones de importancia, son parte de las acciones vitales y previas al buen éxito de un balanceo.

2.5 Técnicas y opciones de análisis y balanceo

La alternativa de agregar o remover peso para balancear un rotor, representa un aspecto importante para la persona designada en una empresa a corregir todos aquellos rotores que salen para ser intervenidos por mantenimiento. Este aspecto tiene que ver con el proceso para el que fue diseñado el rotor: al impulsor de una bomba se le remueve peso

para ser balanceado; mientras que a la armadura de un motor se le agrega peso para cumplir el mismo efecto. Éste y otros aspectos relacionados con la aplicación práctica de la labor de balanceo se imparten con cada una de nuestras instrucciones al personal encargado del balanceo dinámico de una empresa.



Figura 2.5. El balanceo de una armadura de motor eléctrico requiere el tomar en cuenta todos los componentes dinámicos que forman parte de la pieza, medio *cople*, ventilador de enfriamiento, porción de cuña pertinente.

Un aspecto de vital importancia para una empresa es el transporte de un rotor de grandes dimensiones para su balanceo y mantenimiento; pues bien puede representar un gran riesgo y, en muchas ocasiones, se opta por balancear la pieza en un sitio cercano a donde opera la unidad en el interior de su planta. Esta acción nos permite optimizar el tiempo de reparación y cuidar al máximo la integridad del rotor. Un ejemplo en México de los beneficios de una máquina balanceadora transportable es la empresa Altos Hornos de México (AHMSA), quienes cuentan con una máquina balanceadora para 52 toneladas; la cual ha sido transportada internamente entre sus acerías de Monclova, Coahuila, desde hace más de veinte años.⁷

⁷ Vic Ryan, *The Maintenance of Rotors Assemblies from Strategic Rotating Machines – On Site*, IRD Balancing, Chester, England, 1993, pp. 1-9.

Los talleres de reparación y reacondicionamiento de rotores de alta velocidad normalmente cuentan con una máquina balanceadora como parte del control de calidad al que se somete la pieza una vez reparada. La empresa SIEMENS en la ciudad de Querétaro cuenta con una máquina para el balanceo de rotores de hasta 25 toneladas de peso. Véase figura 2.6.



Figura 2.6. La velocidad nominal de esta turbina de 16 toneladas de peso, es 3600 RPM, su balanceo se llevó a cabo en los talleres de reparación de la empresa SIEMENS de Querétaro a una velocidad de sólo 360 RPM, con resultados muy satisfactorios.

Los ventiladores de tiro inducido y tiro forzado, los ventiladores extractores de humos y gases tóxicos y ventiladores de calderas son equipos que forman parte de la maquinaria dinámica crítica de industrias como: ingenios azucareros, plantas cementeras, plantas de generación, complejos petroquímicos, mineras, papeleras, etc.; en determinados momentos de su operación requieren ser balanceados con el mínimo tiempo posible, por las presiones de producción de cada planta. Bajo estas circunstancias, la opción que lleva a cabo nuestra empresa es el utilizar un instrumento analizador de vibraciones y balanceador dinámico que permita al ingeniero de mantenimiento o al analista de vibraciones, poder llegar hasta al sitio de operación del ventilador y efectuar un análisis de vibraciones sistemático para corroborar la presencia del desbalance dinámico en el rotor con alta vibración,

identificando además alguna falla dinámica y potencial que contribuya al total de la vibración.

Con el mismo instrumento que se efectuó el análisis se puede - una vez generada e interpretada la típica gráfica FFT de desbalance - proceder a la labor de balancear la unidad con la plena certeza de que esta acción, llevada a cabo con éxito, reducirá los niveles de vibración a lecturas dentro del rango permisible. El balancear un rotor en sus condiciones de operación locales, sin removerlo del entorno en que normalmente opera, requiere de una mayor experiencia, capacidad de análisis y observación de las variables del equipo. Con frecuencia las condiciones son adversas y el tiempo disponible es reducido, dadas las presiones de producción. La preparación con anterioridad de los pasos que componen el procedimiento de análisis y el consecuente balanceo es de gran ventaja y en muchas ocasiones determina el éxito o el fracaso de la corrección que se busca.⁸

⁸ “Chapter 6”, en: James Berry E., *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis II*, Charlotte, N. C., 1994.

Capítulo 3

Identificación y corrección del desbalance dinámico

3.1 Consideraciones técnicas

Como mencioné en capítulos anteriores, coexisten potencialmente muchos otros variados problemas en la maquinaria rotativa que requieren ser identificados y muchas veces proceder a su eliminación antes de continuar con el proceso correctivo del balanceo dinámico. Esta acción es válida tanto para un hecho aislado de corrección, como para el caso de un sistema ya implantado de mantenimiento predictivo. Un ejemplo ilustrativo es el caso de un ventilador que además de estar desbalanceado presenta problemas de soltura mecánica en su base de soporte. La carencia de rigidez en el sistema nos impide observar las características vectoriales del desbalance dinámico y por consecuencia el poder balancear. Es preciso corregir la soltura mecánica para aumentar la rigidez del sistema y luego proceder a balancear con éxito el rotor desbalanceado. Véase 3.1.

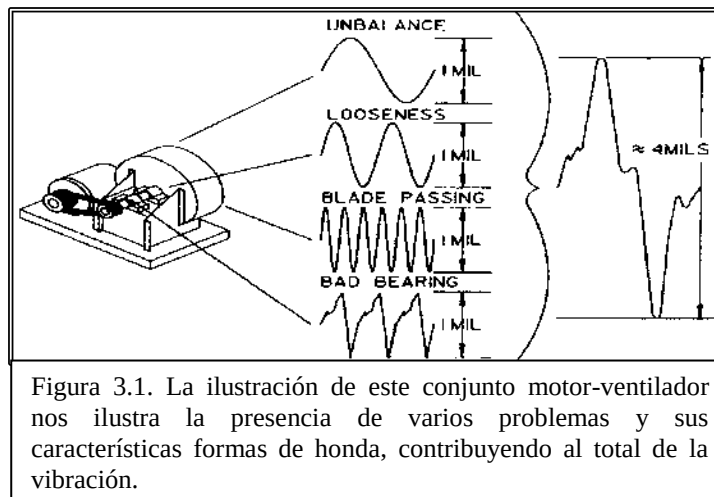


Figura 3.1. La ilustración de este conjunto motor-ventilador nos ilustra la presencia de varios problemas y sus características formas de honda, contribuyendo al total de la vibración.

Toda acción predictiva de mantenimiento, usando las características de la vibración emitida por los equipos dinámicos en operación, requiere de tres etapas que forman la parte medular: Detección, Análisis y Corrección.

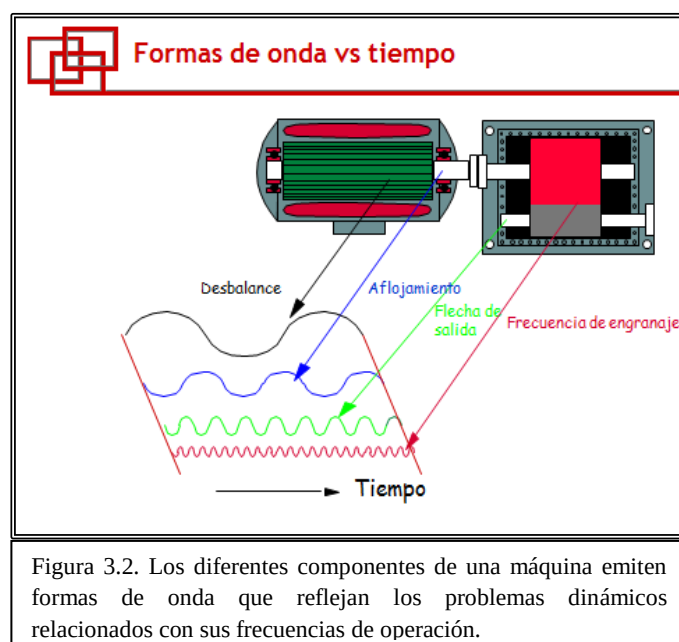
En la etapa de la detección nos damos a la tarea de recabar y considerar todos aquellos datos que son de gran importancia para el análisis de las fallas que se buscan:

- Velocidad de operación
- Tipo de rodamientos
- Características geométricas
- Unidades de medición
- Consideración de toma de lecturas radiales y axiales, etc.
- Rango del espectro de frecuencias a capturar

3.2 Diagnóstico y características de vibración

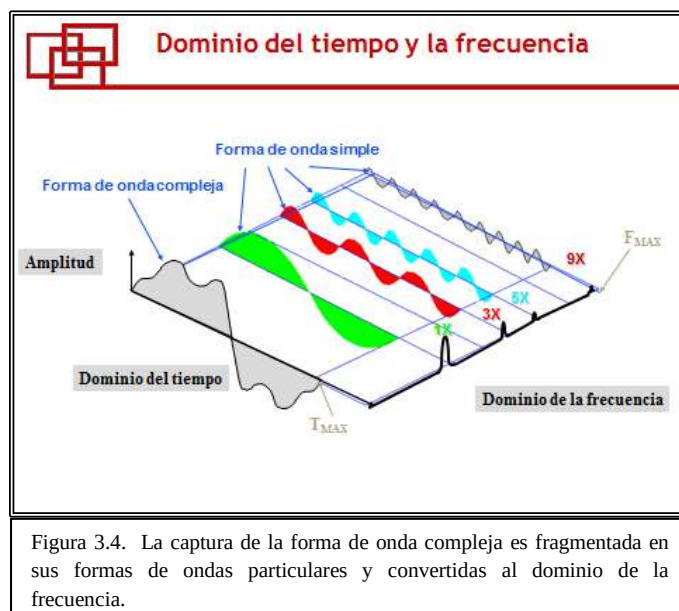
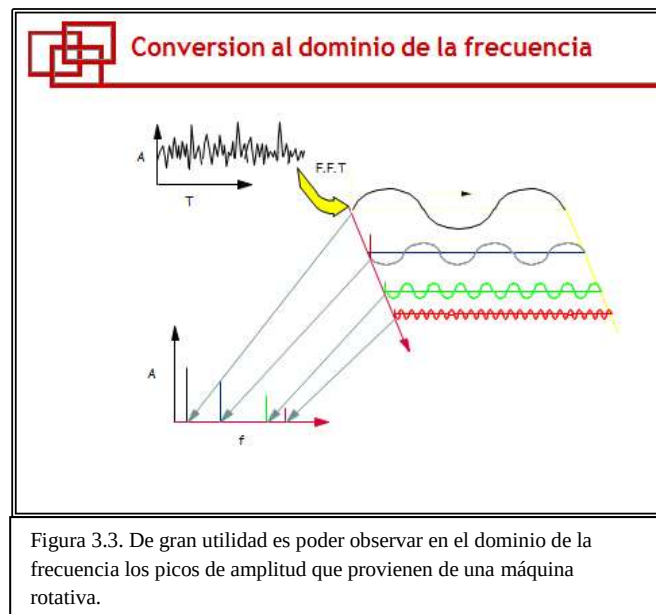
Es mediante el despliegue del espectro de amplitud *versus* frecuencia que podemos identificar la presencia de los diferentes picos de amplitud y relacionarlos con la velocidad de giro del equipo para así poder empezar a formar la figura de un diagnóstico. La comparación de lecturas radiales contra lecturas axiales y la incorporación en el análisis de la manera que se mueve el sistema nos lleva a considerar como herramientas vitales del diagnóstico a las características de la vibración: **amplitud, frecuencia y fase**.

El despliegue de la información de vibración es, utilizando el dominio del tiempo, un método muy preciso mediante el cual podemos observar el movimiento total de una máquina o algunos de sus componentes y analizar varios de sus parámetros; sin embargo, el analizar una forma de onda contra el tiempo puede ser muy laborioso cuando se trata de determinar una frecuencia. Véase figura 3.2.



Para simplificar este proceso, los instrumentos que usamos en nuestras labores de análisis tienen la capacidad de desarrollar lo que se conoce como “Transformada Rápida de Fourier (FFT)”. Una gráfica FFT es la transformación de la información del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante un microprocesador alojado en el instrumento.

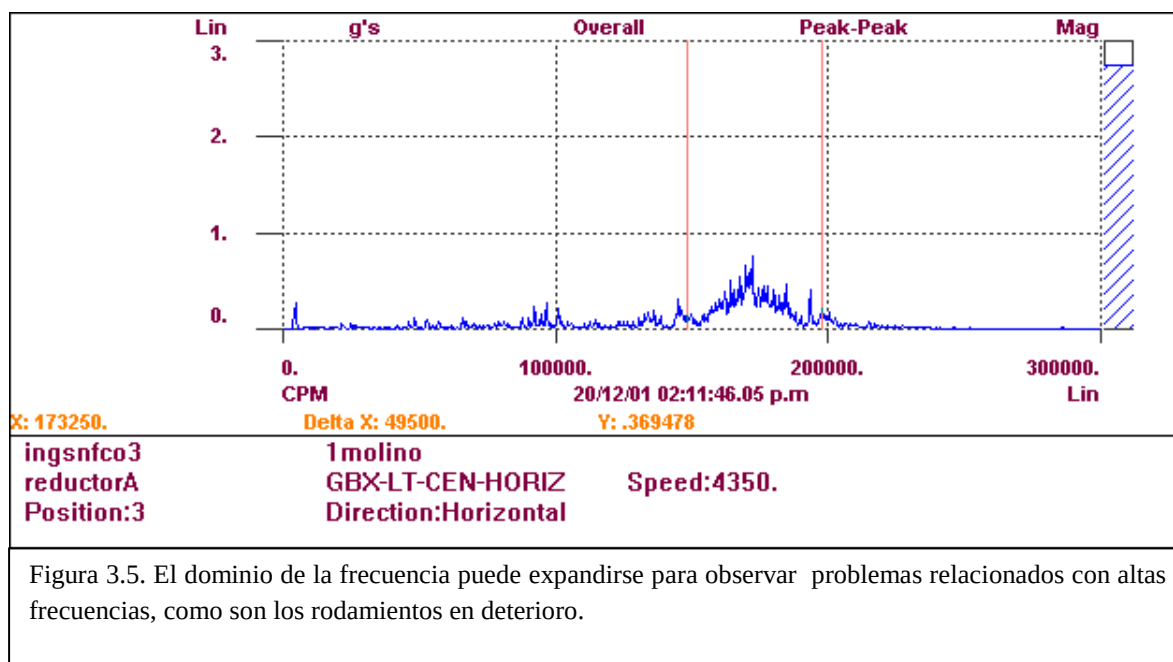
Esta técnica, desarrollada por el Barón Jean Baptiste Fourier hace más de cien años, establece que cualquier forma de onda compleja puede descomponerse en sus formas de onda sinusoidales y viceversa. Véanse figuras 3.3 y 3.4.



3.3 El valor y la aplicación de la FFT

El despliegue de la gráfica de amplitud en el dominio de la frecuencia, conocida como espectro de vibración o “FFT”, nos es de gran utilidad como herramienta para el analista de vibraciones para la interpretación cada uno de los picos de amplitud y sus frecuencias, al relacionarlos con la velocidad de giro de la máquina.⁹

La selección de los valores y parámetros en el eje de las Y (Amplitud) y el eje de las X (Frecuencia), normalmente se seleccionan de acuerdo al tipo de diagnóstico buscado. En términos de amplitud, el analista selecciona unidades relacionadas con el desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la vibración. En cuanto a la frecuencia (CPM o Hz), el espectro de la misma se expande o se reduce, normalmente de acuerdo al tipo de problema que se busca. Véase figura 3.5



⁹ “Chapter 2”, en: James Berry E., *Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis I*, Charlotte, N. C., 1994, pp. 7-10.

Capítulo 4

El desbalanceo dinámico: Causas, definición, diagnóstico y beneficios

4.1 Causas

De naturaleza variada y a veces confusa - en primera apariencia - son aquellas causas que contribuyen al desbalanceo dinámico en la maquinaria rotativa. Su presencia se ve relacionada con la fabricación, el montaje, la naturaleza del proceso, condiciones de operación y condiciones de ensamble. Todas contribuyen en mayor o menor proporción a la alta vibración de un rotor, afectando su balanceo dinámico. Podemos aquí mencionar algunas de ellas:

- Desgaste
- Acumulación de material ajeno
- Desprendimiento súbito de material acumulado
- Excentricidad
- Defectos de fabricación en piezas de fundición
- Distorsión por temperatura
- Acumulación de tolerancias de ensamblado

Podemos deducir de lo anterior que son varias las fuentes potenciales que pueden contribuir al desbalanceo dinámico de un rotor, y de la combinación vectorial de todas aquellas causas presentes tenemos la presencia de un “punto pesado” a cierta posición angular, el cual puede ser removido para balancear así al rotor. Podemos también deducir que si este “punto pesado” no puede ser removido, debemos agregar un peso

similar en la dirección opuesta denominada “punto ligero” para lograr el mismo objetivo.¹⁰

4.2 Definición

Una de las definiciones del desbalanceo dinámico nos dice que es “aquella condición en la cual la distribución de masa de un rotor alrededor de su línea central de rotación es desigual”¹¹. La otra definición nos dice que es “aquella condición que se da en un rotor cuando su fuerza o movimiento vibratorio es transmitido a sus rodamientos como resultado de fuerzas centrífugas”¹².

Hay una etapa en la labor de nuestra organización que tiene que ver con la importancia de mantener la maquinaria crítica de una planta con niveles de vibración dentro de cierta tolerancia; esta última definición ha sido de gran valía, al mostrar el impacto que causan unos cuantos gramos de desbalance, transformados en fuerza con el deterioro de los rodamientos de apoyo.

Esta condición se agrava cuando en lugar de atacar el problema raíz, causante de la alta vibración, se opta por efectuar cambios periódicos de rodamientos dañados que no contribuyen en lo más mínimo a la solución del desbalance, y en ocasiones se llega al extremo de adquirir piezas de repuesto en exceso, para solo aminorar los síntomas de la causa raíz.

En relación a lo anterior, a partir de la experiencia de una demostración al personal de mantenimiento con respecto al efecto continuo de una fuerza de desbalance dinámico, causada por solo unos cuantos gramos situados a una cierta distancia - mediante una sencilla formula – y que ha sido impactante; nos ha conducido a un momento de reflexión para tomar conciencia sobre la importancia de tener bajo control y balanceados los equipos dinámicos que se encuentran en estado crítico dentro de una planta:

$$F_{(lbs)} = 1.77 \times (RPM/1000)^2 \times W_{(onzas)} \times R_{(pulgadas)}$$

¹⁰ Consúltese Shreve, Dennis H., *Integrated Condition Monitoring Technologies*, Columbus, Ohio, IRD Balancing, 2003, pp. 43-44 en: <http://www.irdbalancing.com/>

¹¹ *Manual de balanceo dinámico en maquinaria rotativa*, IRD Balancing, 1981, p. 1.

¹² *Ibidem*, p. 2.

Para ilustrar tan incisivo efecto, partimos de un ejemplo: supongamos que un motor, que opera a 3600 RPM, tiene un desbalance de 2 onzas localizado a un radio de 18 pulgadas. La fuerza generada por dicho desbalance la calculamos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}F_{\text{(lbs)}} &= 1.77 \times (3600/1000)^2 \times 2 \text{ onzas} \times 18 \text{ pulgadas} \\&= 1.77 \times (3.6)^2 \times 2 \text{ onzas} \times 18 \text{ pulgadas} \\&= 1.77 \times (12.96) \times 2 \text{ onzas} \times 18 \text{ pulgadas} \\&= 826 \text{ lbs (fuerza)}\end{aligned}$$

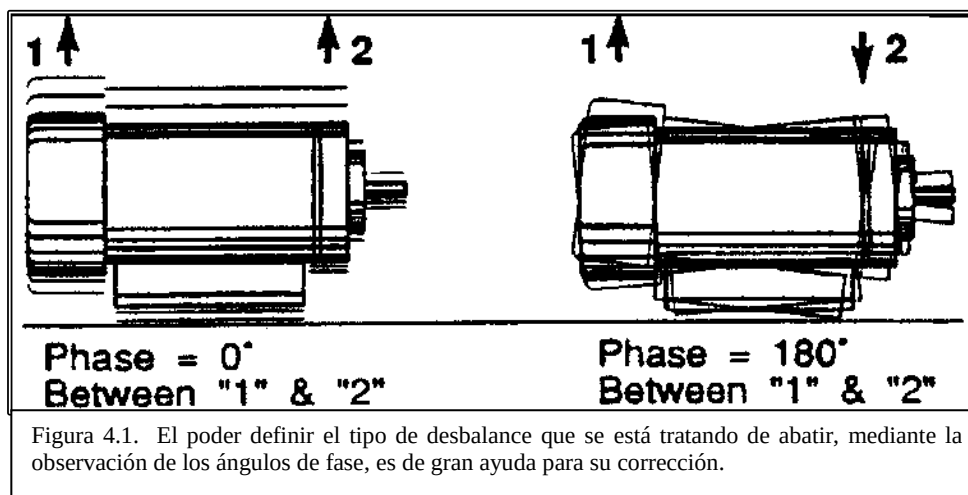
No obstante, el cálculo de la fuerza generada por un desbalance no se hace por lo regular como una práctica rutinaria de vibración y labor de análisis. Este ejemplo sirve para ilustrar cómo un peso relativamente pequeño de desbalance, puede producir una cantidad muy significativa de fuerza que impacta directamente sobre los rodamientos de soporte del motor.

4.3 Tipos de desbalanceo dinámico

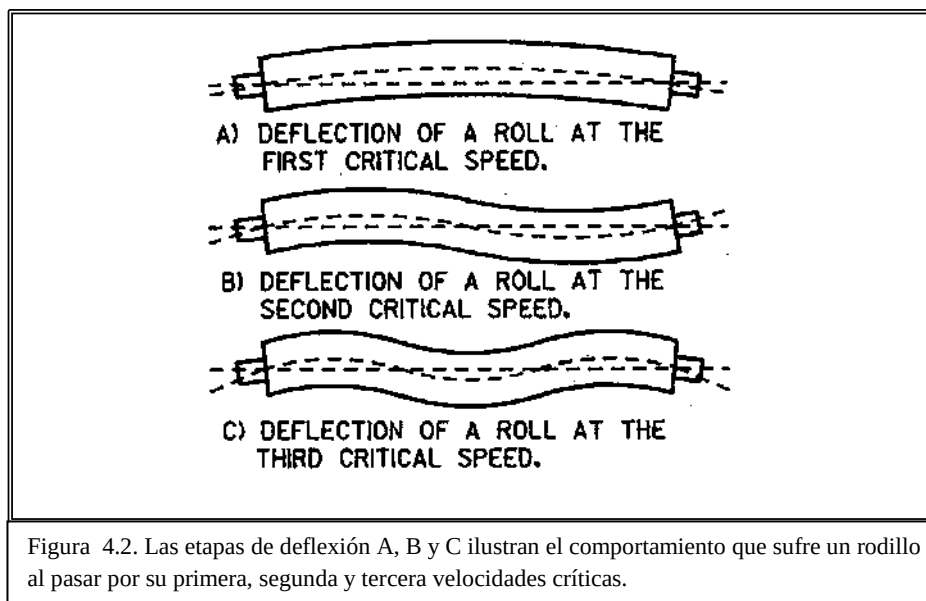
De gran importancia y, en ocasiones poco comprendido, es el tipo de desbalanceo al que se enfrenta la persona que lleva a cabo la acción de balancear un rotor. Es nuestra labor poder transmitir con claridad las definiciones y características que forman parte de cada uno de los diferentes tipos de desbalanceo, potencialmente presentes en un equipo dinámico; sin describir en detalle sus características, son tres los tipos que primordialmente están presentes en un rotor: Desbalanceo Dinámico, Desbalanceo Estático y Desbalanceo Par. Todos relacionados con las fuerzas vectoriales que se manifiestan a lo largo de la geometría del rotor en operación.¹³

No es imperativo que el ingeniero de mantenimiento reconozca el tipo de desbalance que tiene un rotor para resolver un problema de balanceo. Sin embargo, es importante que él sepa reconocer que no todos los problemas de equilibrio dinámico pueden ser resueltos en un plano de corrección. Véase figura 4.1.

¹³ Vic Ryan, *The Maintenance of Rotors...*, 1993, p. 9.



Durante la capacitación en el uso y manejo de la instrumentación de balanceo, transmitimos el hecho de que existen rotores *rígidos* y rotores *flexibles*. Los rotores catalogados como rígid¹⁴os operan por debajo de su resonancia de giro. Mientras que los rotores denominados flexibles operan por arriba de su primera velocidad crítica, en la cual el rotor vibra a su frecuencia natural. Estas velocidades críticas son también llamadas resonancias de balanceo; es a estas frecuencias cuando las fuerzas de desbalance en el rotor entran en resonancia, creando una máxima amplitud de vibración transitoria. Véanse figuras 4.2 y 4.3.¹⁴



¹⁴ J. P. Den Hartog, *Mecánica de las Vibraciones*, México, D. F., Compañía Editorial Continental, S. A., 1964, p. 323.



Figura 4.3. Los rotores flexibles, que operan por arriba de sus velocidades críticas requieren ser balanceados en varios planos de corrección, para asegurar su correcta operación.



Fig. 4.4 Las maniobras anteriores al balanceo de grandes rotores deben ser de gran cuidado y comúnmente toman la mayor parte del tiempo empleado en las labores de esta especialidad

4.4 Diagnóstico

Es mediante el uso de un instrumento con capacidad de análisis de vibración que se detecta la presencia del desbalance de un componente en la maquinaria rotativa. Sus características esenciales, mostradas en la gráfica de amplitud contra frecuencia FFT, son simples de identificar (véanse figuras 4.5 y 4.6):

- La vibración ocurre a una frecuencia igual a las RPM de giro del componente desbalanceado.
- La acción del desbalance dinámico es, convertida en vibración, una fuerza marcadamente vectorial con presencia de magnitud (amplitud de vibración) y dirección (ángulo de fase)
- La vibración se manifiesta en la dirección radial y la comparación de las lecturas horizontal y vertical del ángulo de fase, normalmente indican una diferencia de 90 grados entre ambas.

Es importante la realización de un análisis cuidadoso para reconocer cuando una vibración proviene de un desbalanceo dinámico y saber cuando otras fuerzas de excitación se manifiestan a la frecuencia de giro del rotor. Es normalmente nuestra labor efectuar un diagnóstico que identifique plenamente esta causa tan prevalente en la maquinaria rotativa.¹⁵

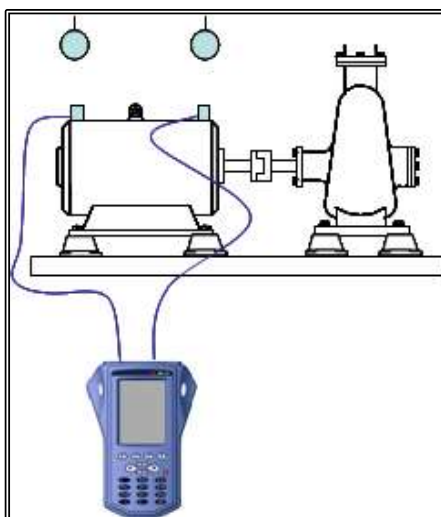


Figura 4.5. El analizador de vibraciones captura la información mediante el uso de acelerómetros cercanos a los rodamientos.

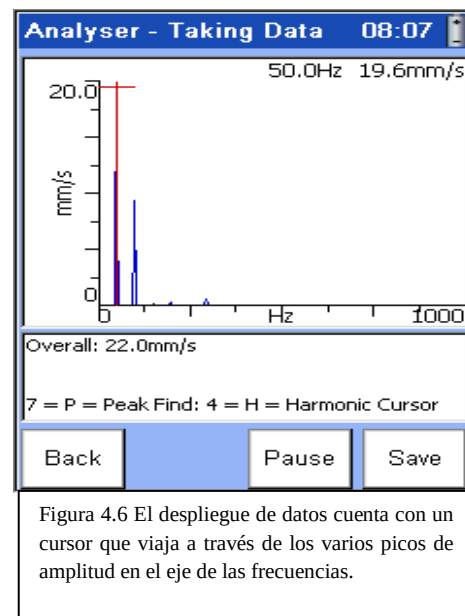


Figura 4.6 El despliegue de datos cuenta con un cursor que viaja a través de los varios picos de amplitud en el eje de las frecuencias.

¹⁵ Dennis H. Shreve, *Integrated Condition Monitoring Technologies*, Columbus, Ohio, IRD Balancing LLC, 2003, pp. 43-46.

Hoy en día se practican dos técnicas primordiales de balanceo: el método de coeficiente de influencias y el método modal. Para el propósito de esta trabajo, mencionaré únicamente al primero por ser la opción que tienen integrada todos nuestros balanceadores, tanto de campo como los instalados en las máquinas balanceadoras. Este método consiste en un algoritmo matemático alojado en el microprocesador del instrumento; el cual - después de efectuar las corridas de prueba que permiten registrar el comportamiento del rotor - se encarga de evaluar las variables de balanceo del rotor a balancear; arrojándonos el resultado – en fracciones de segundo - para uno, dos, o más planos de corrección, de acuerdo a la geometría del rotor y las características de desbalance del mismo. Véanse figuras 4.7 y 4.8.¹⁶

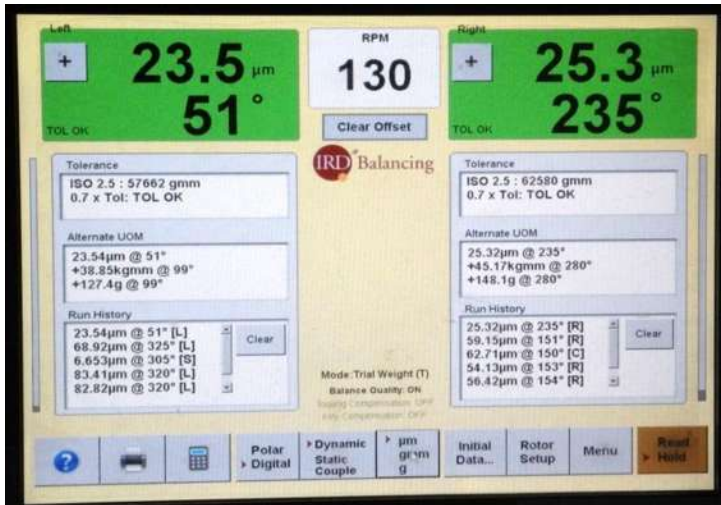


Figura 4.7. La instrumentación nos arroja primero las lecturas de desbalance en unidades de vibración (desplazamiento en micrones o mils)



Figura 4.8. Después de realizadas las corridas de calibración que involucran el algoritmo de coeficientes de influencia la instrumentación nos arroja las lecturas de corrección para ambos planos de corrección simultáneamente.

¹⁶ Paul Baur, "Field Balancing of Rotating Machinery" in *Power Magazine*, New York, N. Y., 1983, p. 11.

4.5 Beneficios

Son muchos los beneficios que se obtienen al mantener la maquinaria rotativa de una planta con niveles de vibración por desbalance dinámico dentro de su tolerancia. A continuación, mencionaré algunos de los más relevantes:

- Incremento de la vida útil de la máquina en operación: un equipo con bajos niveles de vibración permanecerá mucho más tiempo operando satisfactoriamente.
- Incremento de la vida útil de los rodamientos de soporte: una carga dinámica dentro de tolerancia permitirá extender en gran medida su operación, evitando el inútil reemplazo de los mismos al no atacar la causa raíz del problema.
- Reducción del esfuerzo al que se ve sometida la estructura de soporte de la maquinaria, al tener que absorber las fuerzas generadas por el desbalance dinámico.
- Aumento del nivel de seguridad del personal de la planta al evitar situaciones catastróficas ocasionadas por maquinaria sujeta a niveles de vibración peligrosos.
- El nivel de productividad de una planta se ve incrementado en gran medida al contar con maquinaria que permanece operando con altos niveles de confiabilidad.
- Los costos de las pólizas de seguros que protegen a los equipos críticos y estratégicos de una planta se ven reducidos al mostrar la evidencia de ser equipos operando con adecuados niveles de vibración.
- Reducción de los costos de operación al mantener en un mínimo los equipos de reemplazo (*standby equipment*), así como los inventarios de refacciones; el contar con equipos de alta confiabilidad reduce el *stock* de refacciones con un riesgo controlado. La energía consumida también se ve reducida.¹⁷

¹⁷ *Introduction to Vibration Technology*, p. 6.

Capítulo 5

Conclusiones

Ha sido mi firme intención a lo largo de esta memoria el describir todos y cada uno de los conceptos que forman parte de la cultura del mantenimiento predictivo, los cuales hemos transmitido a cada una de las empresas que forman parte de la base de clientes de la compañía para la que laboro. Durante muchos años he participado, a través de la experiencia de un gran número de empresas mexicanas, en la transformación de sus departamentos de mantenimiento hasta convertirlos en una pieza clave para el éxito de sus planes de producción.

Implantar un programa de mantenimiento predictivo basado en la detección, el análisis y la corrección, toma un gran esfuerzo que implica el sólido respaldo de los altos mandos gerenciales. La capacitación del personal involucrado forma también una base muy importante en el éxito de un proyecto como éste y llegar hasta las últimas consecuencias de este programa; lo cual implica - considerando la etapa de corrección – reducir la presencia del desbalance dinámico en la maquinaria rotativa; ya sea corregirlo en el mismo sitio de operación de los equipos con este problema; o bien, dadas las características herméticas de otros equipos (compresores, turbinas, motores eléctricos, bombas centrífugas, etc.), llevarlos para ser balanceados en una máquina balanceadora que permita reducir ese desbalanceo detectado mediante la labor de análisis de campo. Muchas veces no puede ser abatido cuando no se tiene acceso a los beneficios de una máquina balanceadora.¹⁸

Por lo demás, los beneficios a este considerable esfuerzo y las múltiples experiencias de incontables empresas mexicanas han demostrado que el tiempo y el empeño que se lleva para implementar un programa de esta naturaleza es redituable enormemente en términos de reducción de costos de mantenimiento, aumento de la confiabilidad de los equipos críticos, reducción del costo de las primas de seguros y, sobretodo el tan buscado, aumento de la productividad de la empresa que enfrenta los retos de la globalización y la competitividad.

¹⁸ Jim Lyons, *Primer on Dynamic Balancing: Causes, Corrections and Consequenses*, 11 pp.

Bibliografía

Balance Quality Requirements of Rigid Rotors: The Practical Application of ISO 1940/1, en: <http://www.irdbalancing.com/>

Baur, Paul. “Field Balancing of Rotating machinery” in *Power Magazine*, pp. 1-16. New York, N.Y., 1983.

Bernard, David I., *Machinery Balancing: A Practical Approach to Balancing, Vibration Measurement & Analysis*. Balancing USA, Inc. Houston, TX., 1998.

Berry, James E. Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis I. Technical Associates of Charlotte, P.C. Charlotte, N.C. 1994.

Berry, James E. Predictive Maintenance and Vibration Signature Analysis II. Technical Associates of Charlotte, P.C. Charlotte, N.C. 1994.

Den Hartog J. P., *Mecánica de las Vibraciones*, México D. F., Compañía Editorial Continental, S. A., 1964.

Dynamic Balancing Handbook, Columbus, Ohio, IRD Mechanalysis, 1990.

Introduction to Vibration Technology, Columbus, Ohio, IRD Mechanalysis, 1994.

IRD Balancing. Louisville, Ky. 2004.

Lyons, Jim. Primer on Dynamic Balancing: Causes, Corrections and Consequences, Columbus, Ohio, Entek IRD International, 1998.

Ryan, Vic, The Maintenance of Rotors Assemblies from Strategic Rotating Machines – On Site, Chester, England, IRD Balancing, 1993.

Shreve, Dennis H. Integrated Condition Monitoring Technologies, Columbus, Ohio, IRD Balancing LLC, 2003.

<http://www.irdbalancing.com/>