

DESARROLLO DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL PARA EL BALANCEAMIENTO DINÁMICO DE ROTORES

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL INSTRUMENT FOR ROTOR DYNAMICS BALANCING

Edgar Estupiñán P.¹ César San Martín ² Luis Canales M.¹

Recibido 31 de agosto de 2005, aceptado 1 de junio de 2006

Received: August 31, 2005 Accepted: June 1, 2006

RESUMEN

El presente trabajo resalta la importancia del balanceamiento de rotores como principal herramienta dentro de las tareas correctivas del mantenimiento predictivo, con el fin de que se reduzcan las vibraciones y sus efectos secundarios en las máquinas rotatorias. Se ha desarrollado un instrumento virtual para el balanceamiento dinámico de rotores, basado en un sistema de adquisición de datos (*SAD*). El instrumento tiene incluidos todos los cálculos necesarios para balancear rotores en un plano y en dos planos, a partir de la medición de los datos de vibración, utilizando el procedimiento de los coeficientes de influencia o utilizando un procedimiento de medición sin fase. También se ha incluido un módulo para determinar la severidad vibratoria del rotor y un módulo de análisis de vibraciones, que incluye análisis espectral y de la forma de onda. Este instrumento virtual es una herramienta útil para el balanceamiento de rotores en laboratorio así como también en la industria.

Palabras clave: Rotor, balanceamiento, mantenimiento predictivo, instrumento virtual, vibraciones mecánicas.

ABSTRACT

This article highlights the importance of rotor balancing like the most important corrective action included in a predictive maintenance program, whose main objective is reducing the vibrations level and its secondary effect in rotary machines.

A virtual instrument, based in a data acquisition system has been developed for rotor balancing. With this instrument it is possible to balance rotors in a single or in two-plane, using either the influence coefficient method or a no phase method. Also the instrument includes a function to determine the vibration severity and a function of vibration analysis with spectral and waveform analysis included. This virtual instrument is useful for rotor balancing in the laboratory as well as in the industry.

Keywords: Rotor, balancing, predictive maintenance, virtual instrument, mechanical vibrations.

INTRODUCCIÓN

Debido a los crecientes avances tecnológicos, las industrias han debido hacer modificaciones e innovaciones a sus procesos productivos, con el fin de ser altamente competitivos. Como una consecuencia de ello, cada vez mayor número de equipos rotatorios giran a velocidades más altas y son diseñados con nuevos materiales que los hacen más livianos y con alta flexibilidad mecánica. Es, por tanto, que se ha hecho necesario controlar más estrictamente los incrementos

en las fuerzas dinámicas y estáticas en los equipos, produciendo fatiga y desgaste en sus componentes y aumentando la posibilidad de que aparezcan fallas anticipadas e imprevistas prematuramente.

En todas las máquinas rotatorias se presentan vibraciones originadas por las causas más diversas y su intensidad depende principalmente de la interacción entre las fuerzas dinámicas que ocurren dentro del equipo y su flexibilidad (o movilidad) mecánica.

¹ Escuela Universitaria de Ingeniería Mecánica, Universidad de Tarapacá. Casilla 6-D, Arica - Chile. eestupin@uta.cl, lcanalesm@hotmail.com

² Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Frontera. Casilla 54-D, Temuco - Chile. csmarti@ufro.cl

Varios estudios realizados en máquinas rotatorias han identificado el desbalanceamiento como la causa fundamental de las vibraciones producidas en ellas; algunos estudios han establecido que cerca del 40% de los problemas de vibraciones son atribuidos al desbalanceamiento y 30% al desalineamiento [1].

Se define el desbalanceamiento como la condición donde el eje de inercia del rotor no coincide con su eje de rotación, provocando que el giro no sea concéntrico y produciéndose, por lo tanto, fuerzas y/o momentos dinámicos que producen vibraciones. La cantidad de desbalanceamiento se calcula como:

$$U = m \cdot r_0 \quad (1)$$

Donde

U = cantidad de desbalanceamiento [g.mm]
 m = masa desbalanceada. [g]
 r_0 = distancia de m al eje de rotación [mm]

La norma ISO 1925 [2] clasifica el desbalanceamiento según la distribución de masas desbalanceadoras en:

- *Desbalanceo estático*, cuando el eje principal de inercia es paralelo al eje de rotación.
- *Desbalanceamiento de cupla*, cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en el centro de gravedad del rotor.
- *Desbalanceamiento cuasi-estático*, cuando el eje principal de inercia intercepta al eje de rotación en un punto distinto al centro de gravedad del rotor.
- *Desbalanceamiento dinámico*, cuando el eje principal de inercia no intercepta al eje de rotación.

El desbalanceamiento puede ser producido por diversas causas [3], [4], entre las cuales se encuentran:

- Desgaste de partes rotativas de las máquinas.
- Montaje defectuoso de componentes.
- Falta de simetría en las partes rotativas de las máquinas, debidas a la fundición, forjado, maquinado, a carga o a dilataciones no homogéneas.
- Falta de homogeneidad causada por soldaduras.
- Variaciones en la estructura química y cristalina del material, causadas por el vaciado o tratamiento térmico.
- Variaciones en el tamaño de tornillos, tuercas, y otros sujetadores.


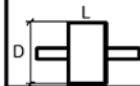
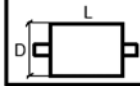
En un equipo con su rotor desbalanceado se pueden producir problemas tales como excesivo desgaste y/o fallas prematuras en los descansos, aumento del nivel

de ruido durante la operación de los equipos, desajuste de los sistemas de fijación, fallas por fatiga y aumento del consumo de energía.

Para balancear un rotor se requieren instrumentos capaces de medir la vibración y de cálculos que permitan encontrar una relación directa entre la vibración y la magnitud y posición del desbalanceamiento del rotor. En este trabajo se ha desarrollado un instrumento para balancear rotores basado en sistema de adquisición de datos (SAD). Estos instrumentos son comúnmente llamados instrumentos virtuales, desarrollados combinando un hardware de operación no exclusiva con un poderoso software, obteniendo como resultado un instrumento de una arquitectura abierta [5], [6], es decir, con posibilidad de ser modificado cuando así se requiera.

Dependiendo de la geometría, la distribución de masas y la velocidad de funcionamiento del rotor, el balanceamiento se puede realizar corrigiendo en un plano (balanceamiento estático), en dos planos (balanceamiento dinámico) y en tres o más planos, como se indica en la tabla 1, por ejemplo, en rotores cuyo largo sea mucho menor que su diámetro como volantes, ventiladores, engranajes, etc.; las masas balanceadoras pueden ser consideradas como concentradas en un solo plano, sin gran error. Rotores que no tienen forma de disco y el desbalanceamiento tienden a darle un movimiento “de vaivén” cuando éste gira; sólo puede corregirse agregando o quitando masas a lo menos en dos planos, y rotores con varias inercias concentradas o con desbalanceamientos puntuales pronunciados (como en cigüeñales, turbinas, etc.), rotores flexibles o en rotores donde es necesario minimizar los momentos flectores deben ser balanceados en tres o más planos (ver tabla 1). Algunos rotores flexibles se pueden balancear con métodos de balanceamiento de rotores rígidos, tal como lo establece la norma ISO 5406.

Tabla 1. Modelos para balanceo [7].

| MODELO ROTOR | RELACIÓN $\frac{L}{D}$ | MODELO DE BALANCEO | | |
|--|-----------------------------|--------------------|---|--|
| | | UN PLANO | DOS PLANOS | MÚLTIPLES PLANOS |
|  | Menor que 0.5 | Hasta 1000 RPM | Superior a 1000 RPM | NO |
|  | Mayor que 0.5 y Menor que 2 | Hasta 150 RPM | 150 - 2000 RPM Superior a 70% Vel. Crítica | Superior a 2000 RPM Superior a 70% Vel. Crítica |
|  | Mayor que 2 | Hasta 100 RPM | Superior a 100 RPM y Hasta el 70% Vel. Crítica | Superior a 70% Vel. Crítica |

En la tabla 2 se puede ver cuál es el grado de calidad mínimo con el que deben ser balanceados diferentes tipos de rotores de acuerdo con lo establecido por la

norma ISO 1940 [8] (aunque los fabricantes de equipos pudiesen también establecer sus propios límites). Conociendo el grado de calidad se puede calcular el desbalanceamiento admisible para un tipo de máquina en particular, de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$G = e \cdot \omega \quad (2)$$

$$e = U/M \quad (3)$$

Donde:

G = grado de calidad del balanceamiento [mm/s]

e = desbalanceamiento específico [mm]

M = masa del rotor [g]

ω = velocidad de rotación del rotor [rad/s]

Tabla 2. Grado de calidad del balanceo según ISO 1940. [8].

| Calidad Del Balanceo | TIPO DE ROTOR |
|----------------------|---|
| G4000 | Cigüeñales de motores (diesel) marítimos de bajas revoluciones, montados sobre soportes rígidos y con un número de cilindros impar. |
| G1600 | Cigüeñales de motores de dos tiempos montados sobre soportes rígidos. |
| G630 | Cigüeñales de motores de cuatro tiempos montados sobre soportes rígidos. Cigüeñales de motores (diesel) marítimos montados sobre soportes elásticos. |
| G250 | Cigüeñales de motores (diesel) de cuatro cilindros y de alta velocidad, montados sobre soportes rígidos. |
| G100 | Cigüeñales de motores (diesel) de seis o más cilindros y de alta velocidad. Cigüeñales de motores de combustión interna (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles. |
| G40 | Ruedas y llantas de carros. Cigüeñales de motores de cuatro tiempos de alta velocidad (gasolina, diesel) sobre soportes elásticos y con seis o más cilindros. |
| G16 | Ejes de propelas, ejes de transmisiones cardánicas. Elementos de máquinas agrícolas. Componentes individuales de motores (gasolina, diesel) para carros y ferrocarriles. Cigüeñales de motores de seis o más cilindros bajo requerimientos especiales. |
| G6.3 | Elementos de máquinas procesadoras en general. Engranajes para turbinas de uso marítimo. Rodillos para máquinas papeleras. Ventiladores. Rotores de turbinas para la aviación. Impelentes para bombas. Máquinas herramienta. Rotores de motores eléctricos. |
| G2.5 | Turbinas de gas y de vapor. Rotores rígidos para turbogeneradores. Discos para computadoras. Turbocompresores. Bombas operadas por turbinas. |
| G1 | Grabadoras de cinta magnética y tocadiscos convencionales. Máquinas trituradoras. |
| G0.4 | Discos compactos, brocas, barrenas. Giróscopos. |

DESARROLLO DEL INSTRUMENTO PARA BALANCEAMIENTO DE ROTORES

El instrumento virtual para balanceo de rotores se ha desarrollado utilizando un sistema de adquisición de datos (SAD), bajo la plataforma del software LabVIEW. El instrumento está basado en un SAD, constituido por la tarjeta de adquisición de DAQPAD-6020E con conexión vía USB a un computador portátil y un sistema de acondicionamiento de señales para un acelerómetro piezoeléctrico, como se puede ver en la figura 1.

El instrumento ha sido diseñado principalmente para el balanceamiento dinámico y estático de rotores; sin embargo, puede también ser utilizado para evaluar la severidad vibratoria, según la norma ISO-10816 [9] y para analizar vibraciones, mediante el análisis espectral y de forma de onda.



Figura 1. Sistema portátil de adquisición de datos.

Este programa tiene una estructura modular que permite ejecutar distintos subprogramas desde una interfaz principal. La estructura modular permite que al instrumento se le puedan incluir nuevos módulos sin tener que modificar todo el código del programa. El instrumento de balanceo de rotores posee los siguientes módulos o subprogramas:

- Módulo de inicio o interfaz principal.
- Módulo de balanceo dinámico en dos planos.
- Módulo de balanceo en un plano.
- Módulo de balanceo sin medición de fase.
- Módulo de evaluación de la severidad vibratoria.
- Módulo analizador básico de vibraciones.
- Módulo de lectura de datos de evaluación de la severidad vibratoria.
- Módulo de lectura de datos de análisis de vibraciones.

- Módulo de lectura de datos de balanceo dinámico en dos planos.
- Módulo de lectura de datos de balanceo en un plano.
- Módulo de lectura de datos de balanceo sin fase.

Módulo de inicio o interfaz principal

Este módulo contiene el programa que controla todos los subprogramas y es la interfaz gráfica principal del instrumento. Posee una pantalla estructurada en varios bloques de ingreso de datos en los cuales se pide la información relevante para realizar los procedimientos evaluación, análisis y corrección del desbalanceo (ver figura 2). En este módulo el instrumento entrega recomendaciones respecto al tipo de balanceo más apropiado a efectuar, de acuerdo con las características principales del rotor (ver tabla 1). Además, se puede seleccionar el grado de calidad del balanceamiento para que el instrumento calcule el desbalanceamiento admisible del rotor.

Módulo de balanceo en un plano

Este módulo permite balancear rotores que se pueden balancear estáticamente, para lo cual la corrección se realiza en un solo plano. El método de balanceamiento

utilizado es el de los coeficientes de influencia, el cual es un método que relaciona la vibración con la cantidad de desbalanceamiento [10]. Para ello, se registra la vibración inicial del rotor y luego se le adiciona un desbalanceamiento de prueba, midiendo nuevamente la vibración del rotor, de tal manera que es posible obtener una relación \vec{A} , llamada coeficiente de influencia, entre el incremento de vibración y la cantidad de desbalanceamiento y de esta manera calcular la masa correctora y su ubicación, como se ve en las siguientes expresiones:

$$\vec{A} = \frac{\vec{V}_1 - \vec{V}_0}{\vec{U}_P}$$

$$\vec{U}_C = \frac{\vec{V}_0}{\vec{A}} = -\frac{\vec{V}_0}{\vec{V}_1 - \vec{V}_0} \vec{U}_P$$

Donde:

\vec{A} = coeficiente de influencia.

\vec{V}_0 = vibración inicial.

\vec{V}_1 = vibración con masa de prueba.

\vec{U}_P = desbalanceamiento de prueba.

\vec{U}_C = desbalanceamiento corrector.



Figura 2. Interfaz gráfica principal.

Este método puede ser adaptado para el cálculo de los pesos correctores en el balanceamiento de rotores en dos o más planos, teniéndose que calcular coeficientes de influencia cruzados y resolviéndose matemáticamente de manera sencilla mediante operaciones matriciales [10], [11]. Puesto que el cálculo está basado en magnitudes vectoriales, es necesario medir la magnitud y fase de la componente sincrónica al giro del rotor, es decir, se debe utilizar un filtro digital que permita extraer la componente vibratoria a la velocidad de rotación y a su vez medir la fase de la señal, utilizando para ello una señal de referencia (trigger), que en este caso se obtiene por medio de un fototacómetro óptico conectado al SAD.

La interfaz gráfica de este módulo se muestra en la figura 3. El programa calcula los valores de desbalanceamiento inicial, desbalanceamiento residual y desbalanceamiento admisible, para compararlos y poder afinar el balanceo hasta el grado de calidad requerido; también se calcula la razón de reducción del desbalanceamiento RRD que es un indicador de cuán efectivo ha sido el procedimiento de balanceo.

$$RRD = \frac{|V_0| - |V_f|}{|V_0|} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

V_f = vibración final con la que queda el rotor



Figura 3. Interfaz gráfica del módulo de balanceo en un plano.

Módulo de balanceo dinámico en dos planos

Este módulo permite balancear en terreno rotores rígidos que, debido a sus dimensiones y/o velocidad de funcionamiento, se deben balancear en dos planos de corrección (ver figura 4); el método de balanceamiento utilizado es el de los coeficientes de influencia para dos planos.

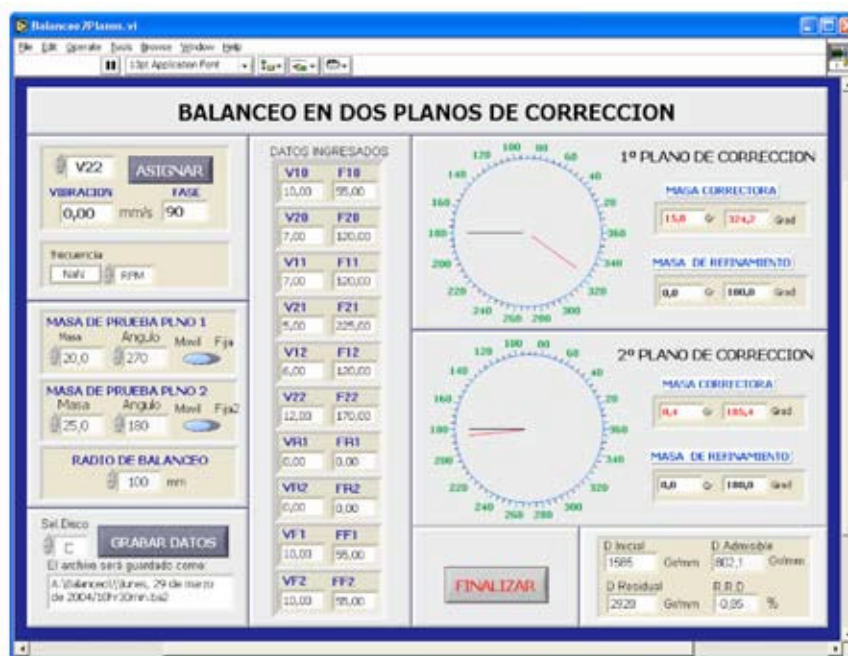


Figura 4. Interfaz gráfica del módulo de balanceo dinámico en dos planos.

Este programa permite calcular el peso y la posición en que se deben instalar las masas correctoras. Los resultados son mostrados en forma gráfica y numérica en la pantalla del programa. El programa calcula los valores de desbalanceo inicial, desbalanceo residual y desbalanceo admisible, para compararlos y poder afinar el balanceo hasta el grado de calidad requerido; también se calcula la razón de reducción del desbalanceo RRD .

Módulo de balanceo sin fase

Este módulo permite realizar balanceo de rotores en un plano, cuando no es posible medir la fase de la vibración (ver figura 5). Para esto se utiliza un método vectorial que es una adecuación del método de Siebert; este método es más lento y engorroso que el de los coeficientes de influencia, ya que es necesario utilizar una masa de prueba, colocándola en tres posiciones distintas del rotor para poder calcular la masa correctora [4], [10].



Figura 5. Interfaz gráfica del módulo de balanceo sin medición de fase.

Para cualquiera de los tres módulos de balanceo del instrumento, se permite registrar todos los datos de entrada y resultados obtenidos, los cuales se pueden recuperar posteriormente mediante el módulo de lectura correspondiente.

Módulo de evaluación de la severidad vibratoria

Este módulo permite realizar una evaluación de la severidad de la vibración en máquinas rotatorias utilizando la norma ISO 10816 (ver figura 6); para esto se mide el valor RMS de la señal global de vibración en

unidades de velocidad en los descansos de la máquina, lo que permite tener un indicador sobre el estado de salud de la máquina estableciendo si el nivel de severidad vibratoria es bueno, satisfactorio, insatisfactorio o inaceptable [9]. Este módulo permite grabar los datos y resultados obtenidos y recuperarlos con el módulo de lectura de datos de severidad vibratoria.

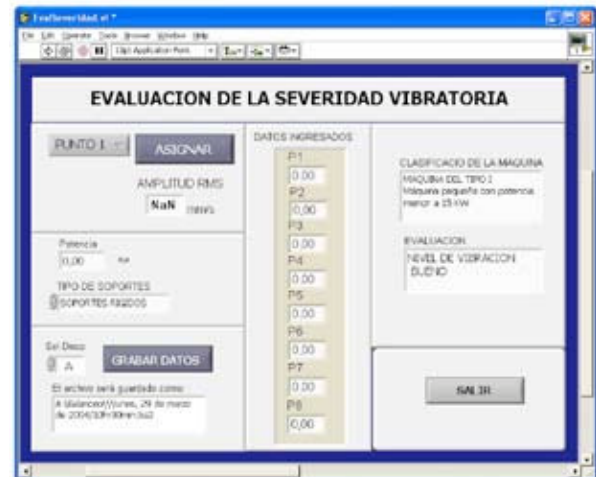


Figura 6. Interfaz gráfica del módulo de evaluación de la severidad vibratoria.

Módulo analizador básico de vibraciones

Es un módulo de análisis de vibraciones orientado a determinar si el problema que genera vibraciones excesivas en la máquina es realmente el desbalanceo del rotor. Con este módulo se puede realizar análisis espectral y medir la fase de la vibración con respecto a un pulso de referencia (ver figura 7).

Para el análisis se pueden obtener valores de amplitud pico, pico a pico o RMS, filtrar la vibración proveniente del desbalanceo y cuantificar qué porcentaje de la energía total del espectro aporta esta componente. Además, permite visualizar la forma de la onda, el espectro y la señal filtrada en unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración utilizando integración analógica y digital.

Este analizador permite, entre otras cosas, detener la adquisición para ver la señal en forma estática, elegir la frecuencia máxima de análisis configurándose automáticamente el sistema para evitar problemas de aliasing, mejorar la resolución en frecuencia aumentando el número de líneas y disminuir el nivel de ruido utilizando promediación. Las herramientas de visualización gráfica permiten realizar zoom y medir con gran exactitud la frecuencia y amplitud de

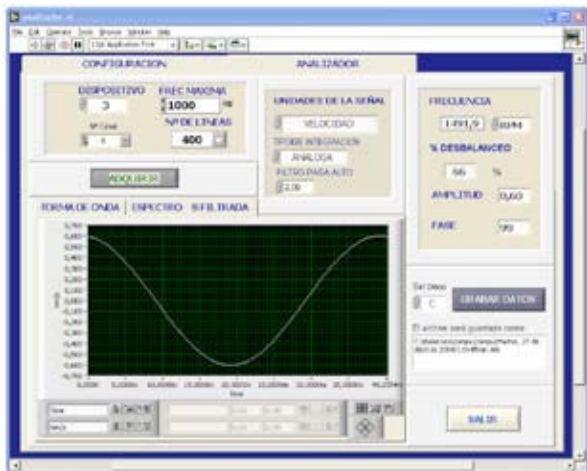


Figura 7. Interfaz gráfica del módulo analizador básico de vibraciones.

cualquier componente espectral. También se pueden grabar los datos, espectros y formas de onda, en forma ordenada y recuperarlos con el módulo de lectura de datos del analizador.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un instrumento virtual para el balanceamiento de rotores. Es un instrumento de arquitectura abierta, con posibilidad de modificar su interfaz gráfica y de incluir nuevas funciones como, por ejemplo, algoritmos, que permitan balancear rotores en múltiples planos o rotores flexibles de altas velocidades de giro.

El conjunto de todos los módulos de este instrumento hacen de él una herramienta de gran utilidad para tareas de balanceamiento de rotores en la industria, así como también para el uso en docencia e investigación.

REFERENCIAS

[1] G.A. Joshi and C.C. CHEN. "Vibration Condition and Energy Loss Monitoring: A case Study". Proceedings of Vibration Institute. Vol. 17. N° 20. St Louis. USA. June 2000.

[2] ISO 1925. "Mechanical vibration - Balancing - Vocabulary". Switzerland. 1990.

[3] E. Palomino y A. Sánchez. "Consumo Energético vs. Mantenimiento". Taller de Mantenimiento en la Industria. Mantenerg 2003. La Habana-Cuba. Julio 2003.

[4] P. Saavedra. "Análisis de vibraciones en Máquinas Rotatorias". Universidad de Concepción. Chile. 1998.

[5] G. D'Ans, P. Ripak, P. Cerckel, D. Degrève, M. Katz, P. Fontana, A. Xheneumont y F. Vanseven. "Some Applications of Virtual Instrumentation in NDT". Laborelec. University of Brussels. Citado 1 de marzo de 2005. Disponible en: <http://www.ulb.ac.be/polytech/laborulb/athens/papere.pdf>

[6] S. Booksh. "Virtual Instrumentation". Proceedings of National Technical Training Symposium and 26th Annual Meeting. Pittsburgh. Pennsylvania. USA. June 2002.

[7] E. Palomino. "La medición y el Análisis de Vibraciones en el Diagnóstico de Máquinas Rotatorias". Centro de Innovación en Mantenimiento. CIEM. CUJAE La Habana-Cuba. 1997.

[8] ANSI S2.19-1989. "Mechanical Vibration - Balance Quality Requirements of Rigid Rotors, Part 1: Determination of Permissible Residual Unbalance". Acoustical Society of America (ASA). 1990.

[9] ISO 10816-3. "Mechanical Vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts". ISO. Switzerland. 1998.

[10] Ehrich, Fredric. "Handbook of rotordynamics". McGraw-Hill. USA, pp. 3.31-3.35. 1992.

[11] Robert Eisenmann. "Machinery Malfunction Diagnosis and Correction". Prentice Hall. USA, pp. 535-629. 1998.