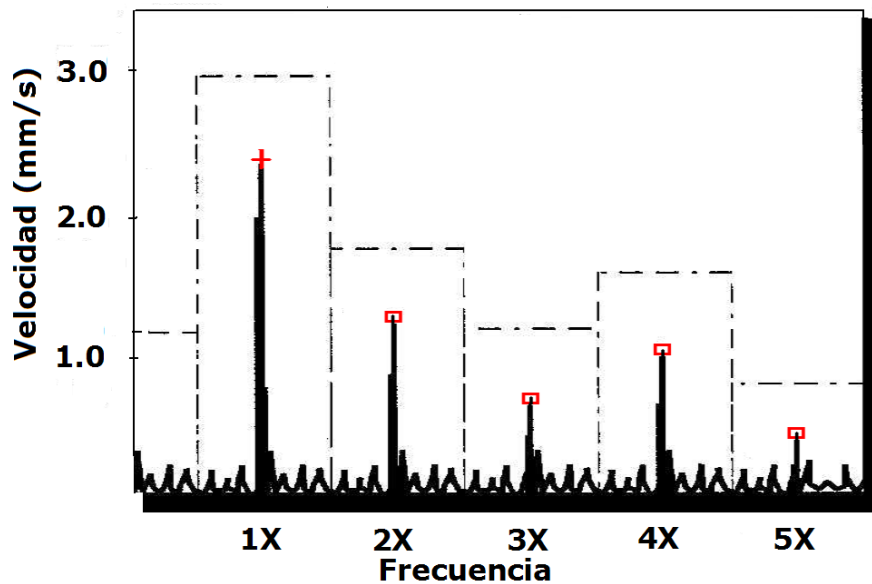


**LABORATORIO DE VIBRACIONES
MECANICAS**
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
<http://www.dim.udec.cl/lvm>



ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS



CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES, CATEGORÍA I, ISO 18436-2

Relator: Dr.-Ing. Pedro Saavedra González

OBJETIVOS

Este curso teórico-práctico está centrado en proveer un comprensivo conocimiento a sus participantes con el objeto que puedan obtener las siguientes capacidades:

- Evaluar la severidad vibratoria de las máquinas rotatorias más comunes utilizando normas internacionales.
- Aprender a diagnosticar, antes que una falla costosa ocurra, problemas mecánicos y eléctricos comunes en máquinas rotatorias, utilizando el análisis espectral y algunas técnicas complementarias
- Aprender a implementar un programa básico de mantenimiento predictivo

El curso, el libro de contenidos y el examen de certificación son genéricos a todos los equipos y programas de manejo de datos comerciales: CSI, SKF, IRD, DLI, COMMTEST, FAG.

EXAMEN DE CERTIFICACIÓN

Este curso incluye un examen escrito, sin apuntes y de dos horas de duración, para los participantes que quieran obtener una certificación de "Analista de vibraciones Categoría I", según ISO 18436-2 otorgado por la Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Los postulantes que aprueben este examen se les reconoce que están certificados para realizar rutas de mediciones de vibraciones pre-establecidas con instrumentos de un canal y diagnosticar a través del análisis espectral los problemas más comunes en máquinas rotatorias.

PRERREQUISITOS

El participante al curso debe tener experiencia previa en el mantenimiento de algunos tipos de máquinas como ser: bombas centrífugas, ventiladores, cajas de engranajes, motores de inducción, transmisiones por correa. Si desea aprobar el examen sin problema, es deseable que tenga alguna experiencia en la medición de vibraciones en máquinas.

CONTENIDOS

1. Introducción a los sistemas de mantenimiento.
Mantenimiento reactivo, preventivo, predictivo, proactivo.
Mantenimiento centrado o basado en confiabilidad. Como efectuar un adecuado balance entre los diferentes sistemas de mantenimiento.
2. Conceptos básicos de vibraciones mecánicas.
 - ¿Qué es la vibración mecánica y como puede ser usada para evaluar la condición mecánica de una máquina o estructura?

- ¿Qué es la forma de la vibración o de la onda? Período y frecuencia. Amplitud o magnitud de la vibración: valor pico, pico a pico, RMS. Unidades de medición y conversión de unidades.
 - Dominios tiempo y frecuencia. ¿Qué es el espectro de una vibración? ¿cómo se interpreta?
 - Definición de rigidez y su utilidad. ¿Qué son las frecuencias naturales de vibrar y las velocidades críticas? ¿Qué es la resonancia? ¿Cómo se evita?
 - Formas de ondas y espectros de vibraciones típicas que se generan en las máquinas y estructuras: Vibraciones periódicas, transientes, aleatorias, de impacto.
3. Adquisición de datos y procesamiento de la señal.
- Composición de una cadena de medición.
 - Tipo de transductores: de desplazamiento con y sin contacto, de velocidad, de aceleración. Diferentes tipos de acelerómetros: de uso general, de baja frecuencia, de altas frecuencias, de montaje permanente. Formas de montaje del sensor. Selección del sensor más adecuado a la aplicación.
 - Recolector-analizador digital de datos. Modo analizador: Criterios para seleccionar: el rango de frecuencias de análisis, la resolución en frecuencia, el número de promedios, el número de líneas ? Recolección de datos. Configuración de una base de datos. Evaluación de la línea base y tendencias.
4. Evaluación de la severidad vibratoria en diferentes tipos de máquinas.
- ¿Qué valor de la vibración es peligroso para una máquina o una estructura? ¿Qué significa un nivel vibratorio bueno, aceptable o inaceptable? ¿Se debe detener de inmediato la máquina o puede esperar a una fecha programada?
 - Aplicaciones de las normas internacionales ISO, VDI, ANSI, API para evaluar la severidad vibratoria en máquinas:
 - Series ISO 10816. A qué máquinas aplica y a cuales no aplica esta norma. Puntos donde se debe medir. ¿Qué magnitud medir?: desplazamiento, velocidad o aceleración. Criterios para establecer valores de alarma y peligro.
 - Series ISO 7919: A qué máquinas aplica y a cuales no aplica esta norma. Puntos donde medir. Qué magnitud medir. Cuando se debe utilizar esta norma
5. Descripción de las fallas más comunes en máquinas rotatorias y como diagnosticarlas en forma confiable utilizando el análisis espectral y otras técnicas complementarias
- Análisis de espectros. ¿Cómo se debe analizar un espectro vibratorio? Tres pasos básicos a seguir. ¿Qué cosas buscar en él? Definición de componentes sincrónicas, armónicas, sub-armónicas, no sincrónicas, bandas laterales y su utilidad para el diagnóstico.
 - Análisis de la forma de la vibración, análisis de la tendencia del valor global, y análisis de la fase de vibraciones medidas en diferentes

puntos son utilizadas para poder discriminar entre diferentes fallas que presentan el mismo espectro vibratorio.

- Desbalanceamiento de rotores. Que es el desbalanceamiento. ¿porqué se desbalancean los rotores? ¿Por qué el fabricante especifica mantener balanceado el rotor? ¿Cuáles son los síntomas vibratorios que permiten diagnosticar confiablemente que el problema es desbalanceamiento?
- Desalineamiento paralelo, angular y combinado. ¿Qué problema genera trabajar con máquinas desalineadas? Como determinar a través del análisis de las vibraciones medidas, si las máquinas mientras están trabajando están desalineadas? Como diferenciar este problema de otras fallas que presentan espectros vibratorios similares
- Distorsión o deformación de la carcasa. Causas más comunes que distorsionan las máquinas: "pata coja", dilataciones térmicas restringidas, esfuerzos generados por las cañerías. Como disminuye la vida operacional de la máquina con ello. Como diagnosticar si en el montaje de la máquina, o durante la operación de ella se han generado estos problemas
- Resonancia. ¿porqué una máquina que no estaba en resonancia puede llegar a esa condición? ¿Qué riesgos se corre si la máquina se deja trabajar en esa condición? Como diagnosticar este problema de otros que presentan el mismo espectro vibratorio. Formas de solucionarlo
- Vibraciones en correas. Como diagnosticar: daño en las correas, correas sueltas o no igualmente tensadas, desgaste de poleas, poleas desalineadas, resonancia de la correa, poleas excéntricas.
- Vibraciones generadas en turbo-máquinas: (bombas, ventiladores, compresores centrífugos, sopladores). Vibraciones inherentes al funcionamiento de ellas generadas por las pulsaciones de presión. Frecuencia de las pulsaciones de presión en bombas centrífugas y bombas de desplazamiento positivo (de pistones, de engranajes, de tornillo, de lóbulos, de paletas). Rango de caudal admisible y preferido según ANSI/ API 670/ ISO 13709. Problema que se generan por trabajar fuera de estos rangos de caudal. Síntomas para diagnosticar: cavitación en bombas, turbulencias, desprendimiento (stall) o hambruna de la bomba, desbalanceamiento hidráulico.

6. Introducción al balanceamiento de rotores rígidos

- ¿Qué es el desbalanceamiento?¿ Cómo se cuantifica de acuerdo a las normas. Porqué las normas limitan el desbalanceamiento residual de los rotores.
- Tipos de desbalanceamiento: desbalanceamiento estático, de cupla, y dinámico
- Clasificación de los rotores de acuerdo a normas ISO para definir el método de balanceamiento: rotores rígidos y rotores flexibles. ¿Cuándo si y cuando no se puede balancear un rotor a una velocidad menor que la que opera en terreno?
- Requerimiento del grado de calidad de balanceamiento para los rotores rígidos de acuerdo al tipo de rotor. Normas ISO 1940 y ANSI S2.19. Determinación del desbalanceamiento residual permitido.

- Determinación del número de planos requeridos en el balanceamiento
 - Métodos de balanceamiento en terreno: Método de los coeficientes de influencia y método sin medición de fase de la vibración.
 - Cuando es aceptable realizar un desbalanceamiento estático
 - Como interpretar un informe de balanceamiento
7. Determinación de la condición mecánica de los rodamientos.
- Funcionamiento de los rodamientos. Porque es fundamental que los elementos rodantes rueden y no deslicen.
 - Diferentes tipos de fallas que se generan en los rodamientos. Cuáles de ellas (fallas normales) no se pueden evitar y cuáles de ellas si se pueden evitar. Como aumentar la vida del rodamiento (mantenimiento proactivo). Cálculo de las frecuencias indicativas de falla.
 - Detección de daño en la jaula, pistas y elementos rodantes mediante el análisis espectral y el análisis de la aceleración en bandas espectrales a alta frecuencia.
 - Detección de otros tipos de fallas: carencia de lubricación, rodamiento suelto en su alojamiento, rodamiento suelto en el eje, desgaste de pistas y elementos rodantes, paso de corriente eléctrica a través de él, daño del canastillo.
8. Determinación de la condición mecánica de los engranajes.
- Funcionamiento de los engranajes. Porqué el engrane genera vibraciones inherentes o normales a su funcionamiento aunque esté en perfecto estado. Cuál es la causa que genera esas vibraciones. Cálculo de las frecuencias de engrane.
 - Técnicas utilizadas para determinar la condición de las ruedas dentadas: análisis de vibraciones, análisis de los residuos en la lubricación, análisis de temperatura, análisis de ruido, inspección visual.
 - Calidad de fabricación de los engranajes y su influencia en el valor vibratorio. Normas AGMA y DIN.
 - Análisis de las modulaciones en amplitud de la frecuencia de engrane. Bandas laterales y como analizarlas.
 - Detección de las fallas más comunes que se generan en los engranajes a través del análisis de las vibraciones y técnicas complementarias: Desgaste de los flancos de los dientes, dientes rotos o descascarados, dientes agrietados y picados, engranajes sueltos en el eje o montados excéntricos, engranajes con excesivo backlash, engranajes desalineados, engranajes con ejes flectados.
9. Determinación de la condición mecánica de motores eléctricos de inducción.
- Motores de corriente alterna y continua. Motores sincrónicos y asíncrónicos. Vibraciones normales en motores de inducción. Frecuencia de paso de las ranuras. Problemas que se presentan en los motores de jaula de ardilla.
 - Diagnóstico de problemas que se traspasan entre el personal mecánico y el eléctrico: excentricidad estática y excentricidad dinámica; incluyendo laminaciones y espiras en corto, barras y anillos extremos rotos o agrietados, corrientes desbalanceadas.

10. Análisis de casos históricos.

Los participantes analizan espectros tomados en máquinas reales para determinar su condición mecánica y diagnosticar las fallas que ellos puedan presentar.

METODOLOGÍA

Las clases teóricas se realizarán con exposición oral, con ayuda de Powerpoint. Se le proporcionará a cada participante un libro de los contenidos del curso y un conjunto de ejercicios que los participantes desarrollarán durante su desarrollo. Los ejemplos analizados son casos históricos tomados en máquinas reales.

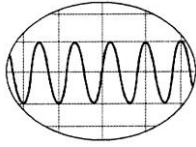
ORIENTADO A

Profesionales y técnicos mecánicos, eléctricos e instrumentistas relacionados con mantenimiento de máquinas, ingeniería y solución de problemas vibratorios.

RELATOR

DR-ING. PEDRO SAAVEDRA GONZÁLEZ

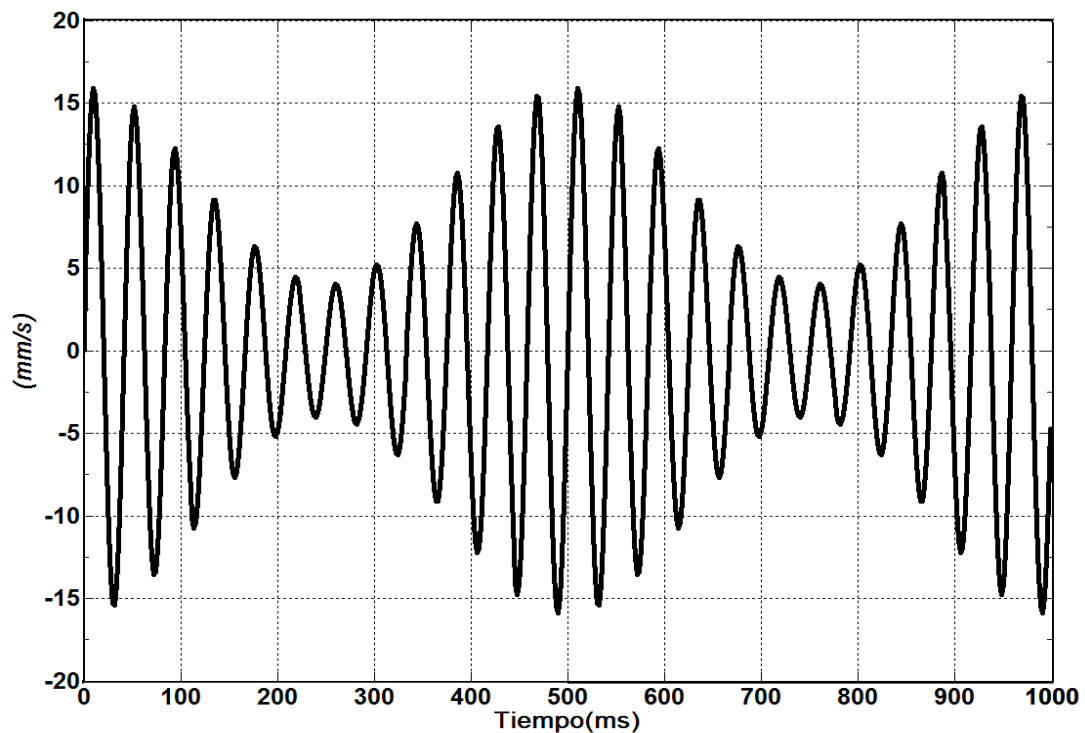
Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Concepción, Doctor- Ingeniero en ENSAM (Paris – Francia) en Ingeniería Mecánica con especialización en vibraciones mecánicas. Es el Director y creador del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, centro de excelencia en desarrollo, investigación y asesoría a las empresas sudamericanas en Mantenimiento Predictivo- Proactivo. Es autor de varias publicaciones internacionales y numerosos cursos de análisis de vibraciones de categoría I a Categoría IV según ISO 18436-2. Ha sido relator de Naciones Unidas. Consultor en diagnóstico de fallas y Mantenimiento Predictivo durante los últimos 30 años de numerosas empresas: ENAP, PETROX, CODELCO Chuquicamata, Celulosa Arauco y Constitución, Forestal e Industrial Santa Fe, Empresa Eléctrica Colbún Machicura, Empresa Colombiana de Petróleo, CODELCO Andina, Papeles Bío Bío, Fábrica Celulosa Laja, CODELCO El Teniente, ASMAR Talcahuano, EDYCE, INFORSA, Compañía de Acero del Pacífico, Compañía Minera Disputada Las Condes, EDELMAG, Cementos Avellaneda Argentina, Gas Atacama Argentina, Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Escondida, Compañía Minera Pelambres, ENDESA, Compañía Minera Candelaria, Armada de Chile, Compañía Minera El Abra, Compañía Minera Huasco, Metro-Cable Medellín Colombia, Compañía Minera Anglo-América, entre otras. Para mayor información ver página web: www.dim.udec.cl/lvm



**LABORATORIO DE VIBRACIONES
MECANICAS**
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
<http://www.dim.udec.cl/lvm>



ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS



**CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES, CATEGORÍA II,
ISO 18436-2**

Relator: Dr.-Ing. Pedro Saavedra González

OBJETIVOS

Este curso teórico-práctico está centrado en capacitar fundamentalmente a los participantes en la detección y diagnóstico de los problemas más comunes que se generan en una gran variedad de máquinas rotatorias, usando integralmente las capacidades de los analizadores de vibraciones comerciales de un canal (recolector de datos). El objetivo final es poder discriminar en forma confiable entre problemas que presentan síntomas similares.

El curso entrega además, conocimientos de cómo configurar y utilizar adecuadamente todas las capacidades de un recolector de datos (analizador de vibraciones de un canal). El curso profundiza en nuevos conocimientos sobre el funcionamiento de las máquinas y de los problemas que se presentan en ellas.

El curso, el libro de contenidos y el examen de certificación son genéricos a todos los equipos y programas de manejo de datos comerciales: CSI, SKF, IRD, DLI, COMMTEST, FAG.

EXAMEN DE CERTIFICACIÓN

Este curso incluye un examen escrito, sin apuntes y de dos horas de duración, para los participantes que quieran obtener una certificación de "Analista de vibraciones Categoría II", según ISO 18436-2 otorgado por la Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Los postulantes que aprueben este examen se les reconoce que están calificados para configurar mediciones con un analizador de un canal y para realizar análisis de vibraciones básicos de máquinas y componentes tales como ejes, rodamientos, engranajes, ventiladores, bombas centrífugas y motores de inducción.

PRERREQUISITOS

Para aprobar el examen de certificación, Analista de vibraciones categoría II, es conveniente, aunque no es prerequisite, haber aprobado el examen de Analista de Vibraciones categoría I. El candidato debe tener y proveer evidencia además, de una experiencia en terreno de al menos un año y medio.

CONTENIDOS

1. Principios de vibraciones mecánicas.

- Forma de onda y fase de la vibración. Formas de medir la fase de la vibración. ¿Cuándo utilizar desplazamiento, velocidad ó aceleración para el diagnóstico y/o para la evaluación de la severidad vibratoria?
- Calculo de la frecuencia natural en sistemas sencillos de un grado de libertad.
- Aplicación de la medición de frecuencias naturales para detectar algunos problemas en máquinas y estructuras (mantenimiento predictivo de equipos estáticos). Ejemplos históricos
- ¿Qué es amortiguamiento? Formas usuales de aumentar el amortiguamiento. Factor de amortiguamiento requerido. ¿Cómo se puede medir el amortiguamiento con un recolector de un canal? ¿Cuándo es necesario agregar amortiguamiento para disminuir las vibraciones?
- Vibraciones forzadas. Funciones respuestas. Zonas resonantes y zonas anti-resonantes.
- Criterios para determinar cuándo rigidizar, flexibilizar, agregar masa o amortiguamiento a una estructura con el objeto de disminuir sus vibraciones.

2. Configuración y Uso de Todas las Capacidades de un Recolector Analizador de Vibraciones de un Canal: CSI, SKF, DLI, Bently Nevada u otro.

- Criterios para seleccionar los parámetros básicos en el análisis espectral: Número de líneas, rango de frecuencias, resolución en frecuencias, zoom, tipo de escala (lineal, logarítmica, decibeles). Importancia de la resolución en frecuencias en el análisis espectral.
- Como funciona un analizador digital. Forma de digitalizar la señal. Transformada discreta de Fourier. Análisis en tiempo real. Problemas y soluciones en el análisis digital: Aliasing, fugas laterales, efecto rendija.
- Selección del tipo de ventana a utilizar: Uniforme, Hanning o Flat Top.
- Formas de promediar espectros: Lineal, exponencial, "peak hold", promedios sincrónicos en el tiempo. Como seleccionar la forma de promediar y el número de promedios.
- Modos de adquisición de datos: Modos "Free-run" o con "trigger" (disparo). Ejemplos de usos.
- Necesidad del traslapo (overlap) en la promediación de espectros. Selección del % de traslapo requerido.
- Rango dinámico de un recolector de datos o analizador de vibraciones. Importancia del número de bits de la tarjeta análogo digital del recolector de datos o del sistema de monitoreo continuo.
- Zoom real versus expansión de la escala de frecuencias.
- Diferentes maneras para determinar frecuencias naturales y velocidades críticas. Análisis de partidas/paradas, promediación peak-hold, "Bump Test".

3. Técnicas del Análisis Vibratorio.

Uso en forma integrada de las diferentes técnicas de un analizador de vibraciones de un canal (recolectores de datos de un canal) para diagnosticar diferentes tipos de problemas que se generan en las máquinas rotatorias.

3.1. Análisis frecuencial. ¿Cómo se debe analizar un espectro vibratorio? ¿Qué buscar en él?. Order, armónicos, sub-armónicos, bandas laterales, vibraciones sincrónicas y no sincrónicas, modulaciones en amplitud y frecuencia

3.2. Análisis de la forma de la onda o de la vibración en el tiempo. Como detectar modulaciones, pulsaciones, impactos, asimetrías, periodicidades. Ejemplo de problemas detectables en el dominio tiempo y ocultos en el análisis espectral. Ejemplos de problemas para los cuales el análisis de la forma de la onda o de la vibración ayuda a confirmar el diagnóstico realizado con el análisis frecuencial. Problemas para los cuales el análisis de la forma de la vibración permite discriminar entre problemas que presentan un espectro vibratorio similar. Ejemplos.

3.3. Análisis de la fase de componentes vibratorias.

Formas de medir la fase de la vibración. Como interpretar las diferencias de fase de componentes vibratorias medidas en diferentes puntos. Como el análisis de fase permite diferenciar entre fallas que presentan el mismo espectro vibratorio. Ejemplos.

- 3.4. Introducción al análisis de promedios sincrónicos en el tiempo.
Definición. En qué consisten y para qué sirven. Instrumentación requerida. Configuración del recolector de datos. Aplicaciones para: distinguir entre diferentes problemas en engranajes, para analizar vibraciones a la frecuencia del paso de álabes en turbo-máquinas, para analizar vibraciones en prensas de máquinas papeleras. Uso para separar vibraciones provenientes de diferentes ejes.
- 3.5. Análisis de demodulaciones. Análisis de los espectros de la envolvente.
Cuando se generan modulaciones en amplitud de componentes vibratorias. Cómo analizar las bandas laterales que se generan en torno a ciertas componentes en el espectro. Como configurar adecuadamente el espectro de la envolvente (como seleccionar el filtro a utilizar, la frecuencia máxima de análisis, el número de líneas y el número de promedios). Como interpretar los espectros de la envolvente para detectar pulsaciones de presión en turbo-máquinas, problemas en rodamientos, engranajes, lubricación. Uso de los espectros de la envolvente para detectar en forma incipiente algunos problemas en máquinas de baja velocidad. Características de los sensores requeridos.
- 3.6. Introducción al análisis de vibraciones en máquinas de baja velocidad.
- Diferencia en el comportamiento de vibraciones u ondas de baja frecuencia respecto a las vibraciones u ondas de alta frecuencia respecto a la difracción y la reflexión en las inter-fases de unión de superficies.
 - Factores a tomar en cuenta para tener éxito en los análisis de vibraciones de baja frecuencia. Razón valor señal vibratoria/ruido eléctrico del acelerómetro. Características de los sensores requeridos. Análisis de la forma de la onda. Como realizar el análisis.
 - Ejemplos históricos de detección de fallas de rodamientos en máquinas de muy baja velocidad.
- 3.7. Análisis de la corriente eléctrica.
- Instrumentación requerida para realizar un análisis de la corriente eléctrica en motores de inducción. Como interpretar el espectro de la corriente eléctrica. Cartas de evaluación de su severidad. Aplicación en la detección de problemas eléctricos en motores de inducción: evaluación del estado de las barras y anillos extremos en motores de jaula de ardilla. Ejemplos históricos de motores con barras rotas y agrietadas.
- 4 Monitoreo de la condición o estado de la máquina. Análisis en profundidad de normas serie ISO 10816 de severidad vibratoria.
- Sistemas de monitoreo en línea y con monitoreo periódico. Monitoreo en tiempo real. Protección de máquinas. Diferentes tipos de alarma: valor global, bandas espectrales, envolvente del espectro. Tendencias. Selección de los valores de alarma. Evaluación del estado de la máquina.
 - Normas de aceptación de máquinas y normas de monitoreo operacional. Series ISO 7919 y serie ISO 10816.
 - Análisis en profundidad de normas ISO 10816-3 para evaluar la

severidad vibratoria en máquinas rotatorias en general. ¿Qué magnitud medir para evaluar la severidad vibratoria: el desplazamiento y/o la velocidad y/o la aceleración vibratoria?

¿Donde medir? Rangos de frecuencia de la medición. Máquinas a las que aplica y no aplica esta norma. Especificación de valores de alarma y peligro para el desplazamiento, velocidad y aceleración vibratoria.

5. Análisis Integrado Para el Diagnóstico de Fallas.

- Como utilizar integradamente las técnicas analizadas en el punto 3, más el análisis de los residuos en el lubricante, para diagnosticar y discriminar entre diferentes tipos de fallas en máquinas rotatorias. Ejemplos históricos de aplicaciones a:
 - Problemas que pueden presentar espectros vibratorios similares (componentes a 1x, 2x y 3x rpm): Desalineamiento de ejes y de descansos, ejes flectados, ejes agrietados, carcasas distorsionadas, pata floja, rozamientos parciales del rotor/carcasa.
 - Problemas en rodamientos. Fallas normales y anormales en rodamientos. Detección de defectos en pistas de rodadura y elementos rodantes, falta o exceso de lubricación, juegos internos inadecuados, giro de la cubeta en el eje o alojamiento. Evaluación de la severidad del daño y criterios para determinar cuando deberían ser reemplazados.
 - Problemas en engranajes. Mediciones y análisis. Ejemplos históricos de desgaste de los flancos de dientes. Dientes rotos, picados o agrietados, backlash inadecuado, engranajes montados sueltos o excéntricos, engrane desalineado. Engranajes con ejes flectados. Problemas que crean componentes vibratorias a frecuencias múltiplos de una fracción de las frecuencias de engrane. Calidad de fabricación de los engranajes. Normas AGMA y DIN.
 - Vibraciones en turbo-máquinas generadas por el flujo: Fuerzas hidráulicas e hidrodinámicas. Cavitación. Llenado incompleto del impulsor (Starvation). Recirculación. Turbulencias. Impulsores desgastados o distorsionados. Pulsaciones de presión. Ejemplos históricos.
 - Problemas eléctricos en motores de inducción. Problemas en el estator (Excentricidad estática, laminaciones en corto, carcasas distorsionadas). Rotores excéntricos, con barras rotas o agrietadas o sueltas, desbalance de corriente entre las fases, espiras o laminaciones del estator en corto.

METODOLOGÍA

Las clases teóricas se realizarán con exposición oral, con ayuda de Powerpoint. Se le proporcionará a cada participante un libro de los contenidos del curso y un conjunto de ejercicios que los participantes desarrollarán durante su desarrollo. Los ejemplos analizados son casos históricos tomados en máquinas reales.

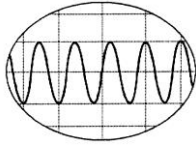
ORIENTADO A

Profesionales y técnicos mecánicos, eléctricos e instrumentistas relacionados con mantenimiento de máquinas, ingeniería y solución de problemas vibratorios.

RELATOR

DR-ING. PEDRO SAAVEDRA GONZÁLEZ

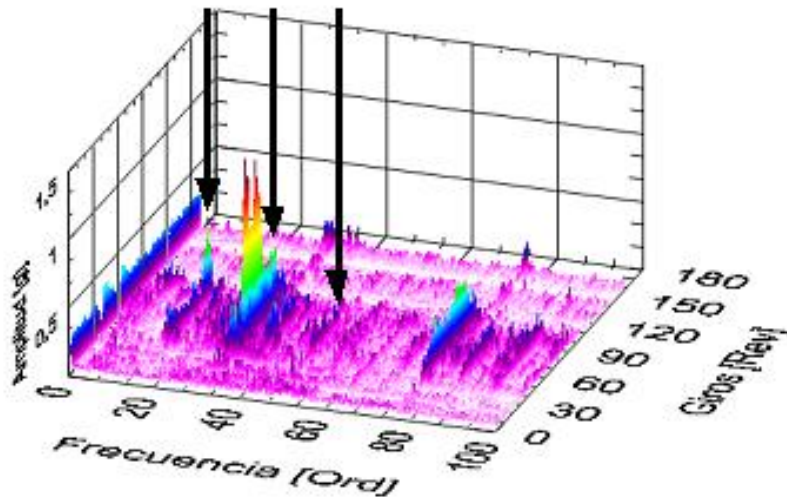
Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Concepción, Doctor- Ingeniero en ENSAM (Paris – Francia) en Ingeniería Mecánica con especialización en vibraciones mecánicas. Es el Director y creador del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, centro de excelencia en desarrollo, investigación y asesoría a las empresas sudamericanas en Mantenimiento Predictivo- Proactivo. Es autor de varias publicaciones internacionales y numerosos cursos de análisis de vibraciones de categoría I a Categoría IV según ISO 18436-2. Ha sido relator de Naciones Unidas. Consultor en diagnóstico de fallas y Mantenimiento Predictivo durante los últimos 30 años de numerosas empresas: ENAP, PETROX, CODELCO Chuquicamata, Celulosa Arauco y Constitución, Forestal e Industrial Santa Fe, Empresa Eléctrica Colbún Machicura, Empresa Colombiana de Petróleo, CODELCO Andina, Papeles Bío Bío, Fábrica Celulosa Laja, CODELCO El Teniente, ASMAR Talcahuano, EDYCE, INFORSA, Compañía de Acero del Pacífico, Compañía Minera Disputada Las Condes, EDELMAG, Cementos Avellaneda Argentina, Gas Atacama Argentina, Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Escondida, Compañía Minera Pelambres, ENDESA, Compañía Minera Candelaria, Armada de Chile, Compañía Minera El Abra, Compañía Minera Huasco, Metro-Cable Medellín Colombia, Compañía Minera Anglo-América, entre otras. Para mayor información ver página web: www.dim.udec.cl/lvm



**LABORATORIO DE VIBRACIONES
MECANICAS**
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
<http://www.dim.udec.cl/lvm>



ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS



CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES, CATEGORÍA III, ISO 18436-2

Relator: Dr.-Ing. Pedro Saavedra González

OBJETIVOS

Este curso teórico-práctico está centrado fundamentalmente en capacitar en profundidad a los participantes en el diagnóstico de la condición de las máquinas rotatorias y sus soportes, usando integradamente las diferentes técnicas de análisis de vibraciones y técnicas complementarias (análisis de aceites, ultrasonido, análisis de corriente, análisis de presión).

El curso entrega además, conocimientos de cómo configurar y utilizar adecuadamente las capacidades de un recolector de datos de varios canales (analizador de vibraciones de dos o más canales)). El curso profundiza en nuevos conocimientos sobre el funcionamiento de las máquinas y de los problemas que se presentan en ellas.

El curso, el libro de contenidos y el examen de certificación son genéricos a todos los equipos y programas de manejo de datos comerciales: CSI, SKF, IRD, DLI, COMMTEST, FAG.

EXAMEN DE CERTIFICACIÓN

Este curso incluye un examen escrito, sin apuntes y de dos horas de duración, para los participantes que quieran obtener una certificación de "Analista de vibraciones Categoría III", según ISO 18436-2 otorgado por la Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Los postulantes que aprueben este examen se les reconoce que están capacitados para realizar y analizar mediciones de vibraciones en máquinas utilizando integradamente las técnicas que traen los analizadores de vibraciones comerciales, establecer programas de monitoreo de vibraciones, entender y dirigir el uso de técnicas complementarias a las vibraciones (ultrasonido, análisis de aceite, termografía), y recomendar acciones correctivas básicas para disminuir el nivel de vibraciones de máquinas y estructuras.

PRERREQUISITOS

Para aprobar el examen de certificación de analista de vibraciones categoría III es conveniente haber aprobado el examen de categoría II y tener experiencia práctica en el análisis de vibraciones al menos de 3 años.

CONTENIDOS

1. Fundamentos de dinámica vibratoria

- ¿Cuándo un sistema máquina/soporte puede ser modelado como un sistema de un grado de libertad? Rigidez equivalente del sistema máquina/soporte. En qué casos para solucionar un problema de resonancia se puede lograr solo rigidizando o flexibilizando la estructura y cuando para solucionar el problema es necesario considerar las rigideces del eje y de la carcasa de la máquina. Ejemplos
- Que es el amortiguamiento. Diferentes formas de generar amortiguamiento. Definición del factor de amortiguamiento. Cuando es necesario aumentar el amortiguamiento del sistema máquina/soporte. Valores del factor de amortiguamiento mínimo especificado por las normas. ¿Cómo determinar experimentalmente el factor de amortiguamiento de una máquina/soporte para ver si

cumple o no con las normas o con el especificado por el fabricante?
Ejemplos

- Vibraciones paramétricas generadas i) por ejes desalineados acoplados mediante acoplamientos flexibles, ii) ejes agrietados iii) cambios de rigidez de rodamientos cargados
- Vibraciones auto-excitadas o inestabilidades: i) Vibraciones generadas en intercambiadores de calor por el paso del fluido a través de los tubos. Velocidad crítica del fluido de acuerdo a normas TEMA, ii) Vibraciones en descansos hidrodinámicos: i) Oil Whirl o giro del aceite, ii) Oil Whip o latigazo de aceite. Diferentes formas de descansos para disminuir este efecto.

2. Analizadores de vibraciones de dos canales

- Forma en que los analizadores determinan el valor RMS: forma analógica o desde la forma de onda y forma digital o desde el espectro vibratorio. Ejemplos. ¿Porqué estos valores son generalmente diferentes? ¿Cuál debe usarse para la aplicación de las normas ISO 10816?
- Como establecer alarmas por bandas de frecuencias
- Espectro de potencia o espectrograma. Cuál es su utilidad
- Cuando se debe medir la densidad espectral de potencia, PSD (Power Spectral Density). Ejemplos
- Ventajas de un analizador de vibraciones de dos canales respecto al de un canal en el diagnóstico de fallas y en la corrección de problemas. Ejemplos
- Funciones de correlación y su utilidad. Casos históricos
- Función de coherencia y su utilidad práctica. Ejemplos de aplicación en la determinación del origen que causa altas vibraciones en máquinas y estructuras
- Medición de funciones respuestas. Excitadores (shakers) y martillos de impacto. Transductores de fuerza. Ejemplos donde no es posible solucionar problemas de roturas de elementos de máquinas sin conocer las funciones respuesta.

3. Técnicas de diagnóstico vistas con mayor profundidad

- 3.1. Introducción al análisis de la forma de deflexión. (Deflection Shape Analysis, ODS). Definición del análisis de la forma de deflexión. Instrumentos y transductores requeridos si usa un analizador de uno o dos canales. Como ODS ayuda a detectar problemas que con las otras técnicas pueden pasar desapercibidos. Casos históricos usando ODS.
- 3.2. Análisis espectral avanzado. Como determinar las componentes espectrales que son normales en una máquina cualesquiera. Aplicación a rodamientos, bombas de lóbulos, compresores alternativos, motores Diesel, turbomáquinas con impulsores asimétricos. Ejemplos de casos históricos.
- 3.3. Análisis avanzado de la forma de onda. ¿Cómo analizar una forma de onda o vibración? Problemas que son detectados en el análisis

de la forma de onda y no son aparentes en el espectro. Análisis de la forma de onda por bandas de frecuencia. Ventajas y desventajas de la integración analógica versus la integración digital, cuando utilizar una u otra. Casos históricos.

- 3.4 Análisis de vibraciones en máquinas de muy baja velocidad. Instrumentación y técnicas requeridas. ¿Cuándo y por qué utilizar un acelerómetro de 500mv/g en vez de uno de 100mv/g? Técnicas para rescatar en el espectro componentes de pequeño valor respecto al ruido de fondo: aumento del número de promedios, mejorar resolución en frecuencias. Ejemplos históricos. Errores frecuentemente cometidos en el análisis espectral de las vibraciones en este tipo de máquinas. Ejemplos ilustrativos. Cuando sí y cuando no es ventajoso utilizar los análisis Peak-Vue y SST (Slow Speed Technologie) de CSI y análisis de la envolvente y ULS (Ultra Low Speed) de SKF.
- 3.5 Introducción al análisis de órbitas y de la posición del eje en el descanso. Descansos hidrodinámicos. Instrumentación requerida para estos análisis. ¿Qué es la órbita? Interpretación de algunos tipos de órbitas. Órbita filtrada y no filtrada. Como se determina la posición del eje en el descanso. Cuál es su utilidad. Aplicación al control del desgaste y de la inestabilidad en un descanso hidrodinámico. Ejemplos donde el análisis de órbitas presenta ventajas respecto a otros análisis: descansos precargados, rozamientos. Casos históricos de análisis de órbitas en máquinas con descansos hidrodinámicos y con rodamientos.
- 3.6 Análisis de vibraciones de máquinas de alta velocidad. Instrumentación requerida. Evaluación de la severidad vibratoria. Errores frecuentemente cometidos en el análisis de este tipo de máquinas debido al montaje del acelerómetro. Caso histórico ilustrativo.
- 3.7 Técnicas para determinar las frecuencias naturales de vibrar de máquinas y estructuras.
 - Ensayos de golpe (bump test). Como determinar los parámetros de configuración del equipo de medición. Errores frecuentemente cometidos.
 - Uso del "peak-hold". Configuración del equipo de medición
 - Análisis de vibraciones en partidas y paradas de máquinas. Interpretación de las mediciones. Como configurar el equipo de medición
 - Medición experimental de las funciones respuesta.
- 3.8 Introducción al Análisis de vibraciones en máquinas de velocidad variable. Análisis espectral con seguimiento de orden (order tracking Spectral analysis). Instrumentación requerida. Alternativas que ofrece el mercado. Como computarizar estas mediciones. Ejemplo ilustrativo aplicado a una transmisión de levante de una pala.

4. Introducción a las técnicas de reducción de vibraciones

- Amortiguamiento como técnica para reducir las vibraciones. Diferentes formas de amortiguamiento. Cuando y como el amortiguamiento es efectivo para reducir las vibraciones. Casos históricos. Como medir experimentalmente el factor de amortiguamiento en un conjunto máquina/estructura.
- Aislamiento de vibraciones y choques. Diferentes tipos de aisladores de vibraciones y como ellos funcionan. Como seleccionar un sistema aislador de vibraciones para evitar que se transmitan fuerzas dinámicas de una máquina a una estructura, o se transmitan vibraciones desde su base de sustentación a un instrumento, computador, o máquina. Ejemplos.
- Absorbedores de vibraciones. Como funcionan y cuando son efectivos. Ejemplo histórico de cómo diseñar un absorbedor de vibraciones.

5. Análisis de vibraciones avanzado y principio de funcionamiento en diferentes tipos de máquinas. Diagnóstico de los problemas específicos que ellas presentan y sus soluciones.

- Bombas centrífugas horizontales. Principios de funcionamiento. Fuerzas radiales y axiales sobre el rodete y formas de equilibrarlas. Operación a flujo reducido. Problemas que se generan por trabajar fuera de las condiciones nominales de operación y los síntomas que permiten diagnosticar el problema: Cavitación, recirculación, "stall" o desprendimiento del fluido en el impulsor, pulsaciones de presión. Problemas de origen hidráulico. Calidad de fabricación de los impulsores desbalanceamiento hidráulico. Ejemplos históricos.
- Motores eléctricos de corriente continua. Rectificación de la corriente. Problemas y soluciones. Vibraciones normales en el motor. Problemas frecuentes. Ejemplos históricos.
- Engranajes. Teoría de funcionamiento. Superficies conjugadas. Tipos y usos de engranajes. Principales fallas en los dientes: Picado, "scoring", ruptura, desgaste, lubricación. Corrección del perfil de los dientes para disminuir el desgaste. Otros tipos de problemas y sus soluciones. Ejemplos históricos. Engranajes planetarios y cálculo de las frecuencias de engrane.
- Sistemas de transmisión de potencia. Funcionamiento y tipos de correas, cadenas, juntas universales. Condiciones de montaje que deben respetarse para que una doble junta cardánica trabaje adecuadamente sin generar vibraciones. Configuraciones Z y W de montaje. Ejemplo histórico de altas vibraciones generadas por mal montaje de una doble junta cardánica

METODOLOGÍA

Las clases teóricas se realizarán con exposición oral, con ayuda de Powerpoint. Se le proporcionará a cada participante un libro de los contenidos del curso y un conjunto de ejercicios que los participantes desarrollarán durante su desarrollo. Los ejemplos analizados son casos históricos tomados en máquinas reales.

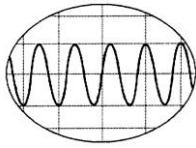
ORIENTADO A

Profesionales y técnicos mecánicos, eléctricos e instrumentistas relacionados con mantenimiento de máquinas, ingeniería y solución de problemas vibratorios.

RELATOR

DR-ING. PEDRO SAAVEDRA GONZÁLEZ

Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Concepción, Doctor- Ingeniero en ENSAM (Paris – Francia) en Ingeniería Mecánica con especialización en vibraciones mecánicas. Es el Director y creador del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, centro de excelencia en desarrollo, investigación y asesoría a las empresas sudamericanas en Mantenimiento Predictivo- Proactivo. Es autor de varias publicaciones internacionales y numerosos cursos de análisis de vibraciones de categoría I a Categoría IV según ISO 18436-2. Ha sido relator de Naciones Unidas. Consultor en diagnóstico de fallas y Mantenimiento Predictivo durante los últimos 30 años de numerosas empresas: ENAP, PETROX, CODELCO Chuquicamata, Celulosa Arauco y Constitución, Forestal e Industrial Santa Fe, Empresa Eléctrica Colbún Machicura, Empresa Colombiana de Petróleo, CODELCO Andina, Papeles Bío Bío, Fábrica Celulosa Laja, CODELCO El Teniente, ASMAR Talcahuano, EDYCE, INFORSA, Compañía de Acero del Pacífico, Compañía Minera Disputada Las Condes, EDELMAG, Cementos Avellaneda Argentina, Gas Atacama Argentina, Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Escondida, Compañía Minera Pelambres, ENDESA, Compañía Minera Candelaria, Armada de Chile, Compañía Minera El Abra, Compañía Minera Huasco, Metro-Cable Medellín Colombia, Compañía Minera Anglo-América, entre otras. Para mayor información ver página web: www.dim.udec.cl/lvm



**LABORATORIO DE VIBRACIONES
MECANICAS**
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
<http://www.dim.udec.cl/lvm>



ANÁLISIS DE VIBRACIONES DE MÁQUINAS



CURSO ANÁLISIS DE VIBRACIONES, CATEGORÍA IV, ISO 18436-2

Relator: Dr.-Ing. Pedro Saavedra González

OBJETIVOS

Este curso teórico-práctico está centrado fundamentalmente en capacitar en profundidad a los participantes en las técnicas actuales de diagnóstico y monitoreo de vibraciones y en las técnicas de reducción de vibraciones. Con este objeto el curso entrega una síntesis de todas las técnicas de diagnóstico. El participante quedará capacitado para decidir fundamentadamente en cada caso cuál técnica aplicar. Se analizan además en profundidad, las diferentes normas de severidad vibratoria, de aceptación de máquinas y de balanceamiento de rotores rígidos y flexibles.

El curso, el libro de contenidos y el examen de certificación son genéricos a todos los equipos y programas de manejo de datos comerciales: CSI, SKF, IRD, DLI, COMMTEST

EXAMEN DE CERTIFICACIÓN

Este curso incluye un examen escrito, sin apuntes, para los participantes que quieran obtener una certificación de "Analista de vibraciones Categoría IV", según ISO 18436-2 otorgado por la Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción. Los postulantes que aprueben este examen se les reconoce que están certificados para realizar y dirigir con un alto grado de confiabilidad todo tipo de mediciones y análisis de vibraciones en cualquier tipo de máquina ; para proponer y cuantificar soluciones que disminuyan el nivel de vibraciones de máquinas y estructuras; y para definir fundamentadamente procedimientos de aceptación y monitoreo de máquinas.

PRERREQUISITOS

Para aprobar el examen de certificación de analista de vibraciones categoría IV es conveniente haber aprobado el examen de categoría III y tener experiencia práctica en el análisis de vibraciones al menos de 5 años.

CONTENIDOS

1. Conceptos de dinámica vibratoria.

- ¿Cuando un sistema máquina/soporte puede ser modelado como un sistema de un grado de libertad? Cálculo de la primera velocidad crítica de rotores de geometría sencilla. Ejemplo de aplicación al rotor de una celda de flotación
- Diferentes ejemplos donde para solucionar un problema de resonancia es necesario en algunos casos rigidizar el soporte de la máquina o rigidizar el eje, o aumentar la masa , o aumentar el amortiguamiento.
- ¿Cuando un sistema máquina/soporte debe ser modelado como un sistema de varios grados de libertad? Sistemas discretos de dos grados de libertad. Cálculo de frecuencias naturales y modos de vibrar de estructuras sencillas.

- ¿Qué son los modos de vibrar? ¿Qué es el análisis modal? Frecuencias naturales y modos de vibrar de sistemas rígidos con seis grados de libertad y de sistemas continuos simples.
- Método de los elementos finitos. En qué consiste. ¿Cuándo usted recomendaría, y con qué objetivos, solicitar una modelación por elementos finitos? ¿Qué información espera obtener de esta modelación y como ella le va a servir para solucionar el problema que está analizando?
- Casos históricos de máquinas con comportamiento no-lineal.
- Vibraciones en redes de tuberías debido a excitaciones mecánicas, hidráulicas o aerodinámicas.
- Introducción a la dinámica rotor/descanso. Características del rotor y de los descansos. Tipos de descansos. Coeficientes de rigidez y amortiguamiento. Velocidades críticas. Efectos giroscópicos del rotor. Diagrama de Campbell. Giro del rotor hacia delante y hacia atrás.

2. Técnicas procesamiento de datos vistas en profundidad.

- Revisión de la transformada discreta de Fourier, TDF. Cálculo de la TDF. Procedimiento para mejorar la exactitud de la amplitud y la resolución en frecuencia obtenida en un espectro estándar.
- ¿Qué es la auto-correlación? Ejemplo histórico de aplicación en la detección y posterior monitoreo de un diente agrietado en un reductor crítico.
- ¿Cuál es la utilidad de las funciones respuesta y la función de coherencia? Ejemplos de cuando es imprescindible utilizarlas para diagnosticar el origen del problema

3 Técnicas de diagnóstico avanzadas vistas en profundidad.

Análisis espectral avanzado

- Resumen de los espectros normales de diferentes tipos de máquinas:
- Como determinar el espectro que es normal en cualquier otro tipo de máquina.
- Como analizar un espectro. Análisis de componentes sincrónicas, sub-sincrónicas, no sincrónicas. Resumen de las diferentes fallas que pueden generar estas componentes. Ejemplos
- Como analizar las bandas laterales. Determinar el origen de la modulación de la vibración. Ejemplos de aplicación en la detección de rodamientos con daño: en las pistas de rodadura, en la jaula, en los elementos rodantes o en la lubricación.
- Ejemplos históricos de espectros difíciles de analizar en reductores de engranajes. Resumen de los problemas que se espera encontrar en las cajas de engranajes. Normas de calidad de fabricación de los engranajes. Normas AGMA 390.3 y DIN 3692. Ejemplo de altas vibraciones generadas: por engranajes de mala calidad de fabricación, por engranaje con diente agrietado, por engranajes que tienen un factor común en el número de sus dientes

3.2. Análisis de la forma de onda. Análisis de la diferencia de fase entre componentes vibratorias

- Resumen de casos donde solo el análisis integrado entre espectros, formas de onda y desfase entre componentes vibratorias permite

discriminar entre fallas que presentan el mismo espectro. Ejemplos históricos de desbalanceamiento, pulsaciones de presión en ventiladores, resonancias, polea montada excéntrica.

- Ejemplo histórico donde a través del análisis integrado de estas técnicas permitió detectar que las altas vibraciones generadas en el engrane provenían del motor por trabajar fuera de su centro magnético.

3.3. Análisis de vibraciones en las alta frecuencia

- Resumen del análisis de la envolvente de SKF, del análisis Peak-vue de CSI, de HFD (High Frequency Detection). En qué consisten y como se configuran: selección del filtro adecuado, número de líneas, número de promedios, frecuencia máxima de análisis, valores de alarma y peligro.
- Utilidad para la detección incipiente en algunos tipos de problemas: Daño en las pistas, jaula porta-elementos y elementos rodantes de los rodamientos, fallas locales en los engranajes (dientes agrietados, picados o desastillados); falta de lubricación en rodamientos y engranajes. Ejemplos históricos.
- Como interpretar un espectro o forma de onda de la envolvente o peak-vue. Ilustración a través de varios casos históricos.

3.4. Análisis en máquinas de muy baja velocidad

- Instrumentación y técnicas requeridas. ¿Cuándo y por qué utilizar un acelerómetro de 500mv/g en vez de uno de 100mv/g?
- Uso del análisis de la forma de onda como única técnica eficaz para la detección de rodamientos dañados en máquinas de muy baja velocidad, que mientras se realiza la medición varía su velocidad de rotación, resultando ineficaz el análisis de espectros y el análisis de la envolvente o peak-vue. Ejemplos históricos.

3.5. Análisis de orbitas y de la posición radial del eje en el descanso

- Instrumentación requerida para estos análisis.
- Run-out de las mediciones con los sensores de desplazamientos sin contacto. Valores admisibles de acuerdo a API 670. Técnicas para la sustracción del run-out. Importancia de la sustracción del run-out para una interpretación confiable de las mediciones. Ejemplos históricos.
- Orbita filtrada y no filtrada. Como se determina la posición del eje en el descanso.Cuál es su utilidad. Aplicación al control del desgaste y de la inestabilidad en un descanso hidrodinámico. Ejemplos donde el análisis de órbitas presenta ventajas respecto a otros análisis: descansos precargados, rozamientos.
- Formas de las órbitas que generan varias fallas en las máquinas.
- Casos históricos de análisis de órbitas y de la posición radial del eje en el descanso en máquinas con descansos hidrodinámicos.
- Casos históricos de análisis de órbitas en máquinas con rodamientos
- Aplicación del análisis de órbitas a cribas(harneros o zarandas) vibratorias

3.6. Análisis en máquinas de muy baja velocidad

- Instrumentación y técnicas requeridas. ¿Cuándo y por qué utilizar un acelerómetro de 500mv/g en vez de uno de 100mv/g?
- Uso del análisis de la forma de onda como única técnica eficaz para la detección de rodamientos dañados en máquinas de muy baja velocidad, que mientras se realiza la medición varía su velocidad de rotación, resultando ineficaz el análisis de espectros y el análisis de la envolvente o peak-vue. Ejemplos históricos.

3.7. Análisis de vibraciones en la partida y parada de máquinas.

- Fundamentos de rotodinámica. Diferencia entre frecuencias naturales de vibrar, velocidades críticas y resonancias.
- Interpretación de gráficos de Bodé y Nyquist medidos en la partida/parada de una máquina. Velocidades críticas, resonancias, anti-resonancias, resonancias locales. Ejemplos de aplicación.
- Interpretación de mediciones realizadas durante la partida y parada de una máquina con descansos hidrodinámicos. Diagramas compensados y no compensados.
- Ejemplos de análisis de partidas/paradas usados para el diagnóstico de fallas en máquinas con rodamientos.

3.8 Análisis ODS (Operating Deflection Shape).

- Definiciones y terminología.
- Requerimientos de transductores, instrumentos y software.
- Uso de analizadores de uno o varios canales. Problema de "aliasing"
- Forma de vibrar en operación con animación utilizando programas computacionales.
- Ejemplos históricos donde se justifica realizar un análisis ODS para determinar la causa de las altas vibraciones

3.9 Análisis modal experimental.

- ¿Qué es el análisis modal?. ¿Cuál es su utilidad? Instrumental, sensores y software requerido.
- Tipos de FRF (rigidez, flexibilidad, movilidad mecánica, impedancia mecánica, masa efectiva, acelerancia)
- Aplicación de las FRF para relacionar las vibraciones medidas en los descansos de la máquina con las fuerzas dinámicas que actúan sobre ella.
- Aplicación de las FRF para determinar experimentalmente los modos de vibrar de rotores y estructuras. Determinación del amortiguamiento modal.
- Comparación entre el análisis modal experimental y el análisis ODS.
- Capacidades de algunos programas comerciales.
- Presentación de casos históricos donde el análisis modal experimental era la única técnica que permitió determinar, y reducir posteriormente, las altas vibraciones medidas en la máquina.

3.10 Análisis de máquinas con velocidad de rotación y carga variables.

- Análisis de espectro con seguimiento de orders (Order Tracking Spectral Analysis) OTSA, en todo el espectro. Diferencia con las técnicas que usan los equipos para el seguimiento de componentes

- 1x, 2x, 3x en los análisis de partida y/o parada de una máquina. Interpretación. Cuando es útil realizar este tipo de análisis.
- Software y equipamiento requerido. Diferentes métodos para realizar el análisis OTSA: Método utilizando hardware, método del re-muestreo utilizando software, método híbrido.
- Aplicación a máquinas que mientras se realizan las mediciones cambian significativamente su velocidad de rotación: palas, camiones, perforadoras y máquinas de muy baja velocidad de rotación. Ejemplos históricos.
- ¿Qué son las Transformadas Tiempo Frecuencia, TTF?. Transformadas lineales: "Short Time Fourier Transform", Gabor, Wavelettes. Transformadas cuadráticas: Pseudo Vigner-Ville, ZAM. Comparación entre ellas.
- Cuál es su utilidad en el análisis de máquinas con velocidad y carga variable, o con ciclos de carga variable (compresores alternativos, motores diesel)
- Utilidad y limitaciones. Ejemplos.

4. Técnicas de reducción de vibraciones

- Amortiguamiento de máquinas y estructuras. Cuando es necesario aumentar el amortiguamiento de una máquina y/o estructura. Formas de determinar el factor de amortiguamiento existente. Factor de amortiguamiento requerido por normas ISO, API, ANSI. Diferentes tipos de amortiguadores existentes. Amortiguamiento de vibraciones torsionales.
- Aislamiento de vibraciones y choques. Definición del aislamiento de vibraciones. Características y tipos de aisladores comerciales. Diferencias entre aislamiento y amortiguamiento cálculo de aisladores para sistemas de un grado de libertad y varios grados de libertad. Que son fuerzas de choque.
- Aislamiento de choques. Cálculo de aisladores de choques. Ejemplos.
- Absorbedores de vibraciones. Como funcionan y cuando son efectivos. Diseño de un absorbedor para disminuir las vibraciones transversales en máquinas y estructuras (bases, fundaciones, cañerías). Analogía para disminuir las pulsaciones de presión en redes de tuberías. Ejemplos.
- Balanceamiento de rotores rígidos y flexibles. ¿Cuándo un rotor es considerado tener comportamiento de rotor rígido y puede balancearse como tal en uno o dos planos, utilizando los programas que traen los recolectores de datos? ¿Por qué es necesario balancear un rotor rígido? Desbalanceamiento admisible para rotores rígidos según ISO 1940. Cálculo del desbalanceamiento residual de un rotor rígido después de balancearlo en terreno.
- Balanceamiento de rotores flexibles según ISO 11342. Clasificación en 5 clases para efecto de balancearlos. Método de balanceamiento a usar para cada clase. Rotores flexibles de clase 2 que a pesar de ser flexibles pueden ser balanceados como rotores rígidos a más baja velocidad utilizando consideraciones especiales Ejemplos.
- Alineamiento de rotores. Características de diferentes tipos de acoplamientos. Criterios de desalineamiento permisible.

5. Análisis en profundidad de las normas de severidad vibratoria y de las normas de aceptación de máquinas

- Fuerzas dinámicas que generan las fallas en las máquinas. Relación entre estas fuerzas y las vibraciones que se miden en los descansos de la máquina. Normas de severidad vibratoria ISO. Serie ISO 10816(7 partes): "Evaluación de la vibración de máquinas en base a su medición en partes no rotatoria de ella". Serie ISO 7919(5 partes): Evaluación de la vibración de máquinas en base a mediciones realizadas en los ejes rotatorios. ¿A qué máquinas se aplica estas normas? ¿Dónde medir y que magnitud medir y en que rango de frecuencias medir? Criterios para la configuración de valores de alarma y peligro. Ejemplos.
- Normas para evaluar la severidad vibratoria en máquinas con movimiento recíproco (motores diesel, compresores alternativos)
- Normas para la aceptación de diferentes tipos de máquinas: ANSI /AGMA 6000-B96, ISO 8579-2 para cajas de engranajes, ISO 13709 /API 610 para bombas centrífugas, ISO 14694 para ventiladores, otras.

METODOLOGÍA

Las clases teóricas se realizarán con exposición oral, con ayuda de Powerpoint. Se le proporcionará a cada participante un libro de los contenidos del curso y un conjunto de ejercicios que los participantes desarrollarán durante su desarrollo. Los ejemplos analizados son casos históricos tomados en máquinas reales.

ORIENTADO A

Profesionales y técnicos mecánicos, eléctricos e instrumentistas relacionados con mantenimiento de máquinas, ingeniería y solución de problemas vibratorios.

RELATOR

DR-ING. PEDRO SAAVEDRA GONZÁLEZ

Ingeniero Civil Mecánico de la Universidad de Concepción, Doctor- Ingeniero en ENSAM (Paris – Francia) en Ingeniería Mecánica con especialización en vibraciones mecánicas. Es el Director y creador del Laboratorio de Vibraciones Mecánicas de La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, centro de excelencia en desarrollo, investigación y asesoría a las empresas sudamericanas en Mantenimiento Predictivo- Proactivo. Es autor de varias publicaciones internacionales y numerosos cursos de análisis de vibraciones de categoría I a Categoría IV según ISO 18436-2. Ha sido relator de Naciones Unidas. Consultor en diagnóstico de fallas y Mantenimiento Predictivo durante los últimos 30 años de numerosas empresas: ENAP, PETROX, CODELCO Chuquicamata, Celulosa Arauco y Constitución, Forestal e Industrial Santa Fe, Empresa Eléctrica Colbún Machicura, Empresa Colombiana de Petróleo, CODELCO Andina, Papeles Bío Bío, Fábrica Celulosa Laja, CODELCO El Teniente, ASMAR Talcahuano, EDYCE, INFORSA, Compañía de Acero del Pacífico, Compañía Minera Disputada Las Condes, EDELMAG, Cementos Avellaneda Argentina, Gas Atacama Argentina, Doña Inés de Collahuasi, Compañía Minera Escondida, Compañía Minera Pelambres, ENDESA, Compañía Minera Candelaria, Armada de Chile, Compañía Minera El Abra, Compañía Minera Huasco, Metro-Cable Medellín Colombia, Compañía Minera Anglo-América, entre otras. Para mayor información ver página web: www.dim.udec.cl/lvm

