

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA

**DISEÑO DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZANDO
EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA MÁQUINAS ROTATIVAS EN
PLANTA CRACKING DE ENAP REFINERIAS ACONCAGUA**

Trabajo de Titulación para optar al
Título de Técnico Universitario en
MECÁNICA INDUSTRIAL

Alumno:

Sr. David Aarón Millai Molina

Profesor Guía:

Sr. Claudio Olguín Bermúdez

RESUMEN

KEYWORDS: MANTENIMIENTO PREDICTIVO – ANÁLISIS DE VIBRACIONES.

Este trabajo estudiará 4 capítulos en los cuales explorara y desarrollara una metodología para la planificación del mantenimiento predictivo para equipos rotativos que están en servicio, con la técnica de análisis de vibraciones.

Capítulo 1 – Da a conocer los antecedentes generales del lugar en que se realizara el diseño del plan de mantenimiento. Incluye su perfil y estructura como empresa, su constitución y parte de su historia, y también como esta subdividido por diferentes áreas el mantenimiento en la sucursal destinada para el trabajo.

Capítulo 2 – Como el capítulo primero describe y da a conocer la empresa y sucursal destinada para el trabajo, este capítulo se enfoca específicamente en el área de procesos y los equipos a intervenir en el diseño del plan de mantenimiento. Se dará a conocer los tipos de equipos y las fallas más comunes, junto con un análisis de Ishikawa enfocado en la problemática de “detención de maquinaria” para determinar el tipo de mantenimiento a utilizar.

Capítulo 3 – Va a estar enfocado en definir los tipos de mantenimiento para luego dar una descripción más amplia (con las técnicas asociadas a cada tipo, ventajas e inconvenientes que posee cada uno) del tipo de mantenimiento a utilizar y describir la técnica asociada, que es la medición y análisis de vibraciones mecánicas.

Capítulo 4 – El objetivo de este capítulo es generar el diseño de un plan de mantenimiento predictivo aplicando la técnica de análisis de vibraciones en el cual de acuerdo a factores tales como la cantidad y criticidad de los equipos a intervenir o controlar, se planificarán una serie de tareas o actividades en determinados lapsos de tiempo, siguiendo un procedimiento de trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

OBJETIVO GENERAL

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

CAPITULO 1: ANTECEDENTES

- 1.1. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA
 - 1.1.1. Perfil y estructura de ENAP
 - 1.1.2. Constitución legal
 - 1.1.3. Síntesis histórica
 - 1.1.4. Organigrama general de directorio
 - 1.1.5. Refinería Aconcagua
- 1.2. MANTENIMIENTO DE REFINERIA ACONCAGUA

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL AREA A INTERVENIR

- 2.1. ÁREA A INTERVENIR
 - 2.1.1. Equipos a intervenir
 - 2.1.2. Problemas frecuentes
 - 2.1.3. Análisis de Ishikawa
 - 2.1.4. Lluvia de ideas
 - 2.1.5. Análisis para descarte de ideas
 - 2.1.6. Conclusión del análisis
- 2.2. MANTENIMIENTO REQUERIDO

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

- 3.1. MANTENIMIENTO INDUSTRIAL
 - 3.1.1. Mantenimiento predictivo
- 3.2.1. ¿Qué es una vibración?
- 3.2.2. Vibraciones en equipos rotatorios
- 3.2.3. Análisis espectral
- 4.1. OBJETIVO A LOGRAR
- 4.2. PLAN DE MANTENIMIENTO
 - 4.2.1. Listado de equipos

- 4.2.2. Actividades a desarrollar
- 4.2.3. Procedimiento de trabajo
- 4.2.4. Norma ISO 10816

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXO A: PUNTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1. Logo actual de ENAP
- Figura 1-2. Logo de Primax
- Figura 1-3. Productos de ENAP
- Figura 1-4. Proceso del petróleo
- Figura 1-5. Descubrimiento del primer pozo
- Figura 1-6. Proceso del petróleo
- Figura 1-7. Organigrama general de directorio año 2013
- Figura 1-8. Ubicación de Enap Refinería Aconcagua
- Figura 1-9. Enap Refinería Aconcagua
- Figura 1-10. Organigrama Departamento Mantenimiento Enap Refinería Aconcagua
- Figura 2-1. Bomba centrífuga TAG “J-712”
- Figura 2-2. Motor compresor centrífugo TAG “JML-721”
- Figura 2-3. Compresor centrífugo TAG “JML-721”
- Figura 2-4. Ilustración de unidad de tiro forzado
- Figura 2-5. Motor conductor de aspas de aero enfriador
- Figura 2-6. Ventilador JBU-751M
- Figura 2-7. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Lluvia de ideas)
- Figura 2-8. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Descarte de posibles causas)
- Figura 2-9. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Posibles causas a solucionar)
- Figura 3-1. Masa suspendida en un muelle
- Figura 3-2. Movimiento armónico simple
- Figura 3-3. Conceptos onda
- Figura 3-4. Medidas de amplitud

Figura 3-5.	Desfase entre dos seno
Figura 3-6.	Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo
Figura 3-7.	Vibración aleatoria
Figura 3-8.	Golpeteos intermitentes
Figura 3-9.	Procesado FFT de una onda vibratoria compleja
Figura 3-10.	Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia
Figura 3-11.	Esquema de captura de la información desde una máquina para luego ser analizada
Figura 4-1.	Pantalla de las comunicaciones de la PC que demuestra el estado conectado
Figura 4-2.	Pantalla de la ruta de la carga
Figura 4-3.	Pantalla de selección de las Bases de Datos
Figura 4-4.	Inspector tomando mediciones en un punto en sentido horizontal
Figura 4-5.	Pantalla de ingreso al sistema
Figura 4-6.	Documentos de texto (.txt)
Figura 4-7.	Selección del equipo y punto específico de la base de datos del software
Figura 4-8.	Selección de espectro a analizar
Figura4-9.	Análisis del espectro en frecuencia
Figura 4-10.	Análisis del espectro en frecuencia por fechas
Figura 4-11.	Diagrama de tendencia global de punto M1H
Figura 4-12.	Puntos de medición en motor conectado a hélice de Aero-Enfriador
Figura 4-13.	Espectro en frecuencia M1V lado libre vertical
Figura 4-14.	Formato para informe diario de monitoreo
Figura 4-15.	Formato para informar equipo con observaciones
Figura 4-16.	Formato para informe mensual de monitoreo
Figura 4-17.	Sentidos de medición

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1.	Listado de equipos de la planta (codificación, tipo, sistema funcional, cantidad y criticidad).
Tabla 4-2.	Criterios para definir Criticidad en equipos
Tabla 4-3.	Cronograma o ruta por semanas para la medición de equipos
Tabla 4-4.	Severidad de la vibración según la norma ISO 10816.
Tabla 4-5.	Puntos de medición en motor conectado a hélice de Aero-Enfriador

- Tabla 4-6. Grupo 1; Máquinas grandes con potencia nominal sobre 300kW; máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315\text{mm}$
- Tabla 4-7. Grupo 2; Máquinas tamaño mediano con potencia entre 15 kW y 300kw, máquinas eléctricas con altura de eje $160\text{mm} \leq H \leq 315\text{mm}$.
- Tabla 4-8. Grupo 3; Bombas con impulsor multipaletas, motor separado (centrífugo de flujo mixto o axial) con potencia sobre 15kW.
- Tabla 4-9. Grupo 4; Bombas con impulsor multipaletas y con impulsor integrado (centrifugo, flujo mixto o axial) con potencia superior a 15kW

INTRODUCCIÓN

Petróleo es una mezcla homogénea de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua. También es conocido como petróleo crudo o simplemente crudo. Se produce en el interior de la Tierra, por transformación de la materia orgánica acumulada en sedimentos del pasado geológico y puede acumularse en trampas geológicas naturales, de donde se extrae mediante la perforación de pozos.

En condiciones normales es un líquido bituminoso que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos como la gasolina hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen), densidad (entre 0,66 g/ml y 0,95 g/ml), capacidad calorífica, etc. Estas variaciones se deben a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla.

Es un recurso natural no renovable y actualmente también es la principal fuente de energía en los países desarrollados. El petróleo líquido puede presentarse asociado a capas de gas natural, en yacimientos que han estado enterrados durante millones de años, cubiertos por los estratos superiores de la corteza terrestre.

Debido a la importancia fundamental para la industria manufacturera y el transporte, el incremento del precio del petróleo puede ser responsable de grandes variaciones en las economías locales y provoca un fuerte impacto en la economía global.

Para la producción de los derivados del petróleo las empresas hoy en día se enfrentan a una frágil economía debido a la gran competencia existente, el aumento de los costos de energía, la variación del valor de la materia prima y la incertidumbre en los mercados. Logrando la “Reducción de Pérdidas” se puede encontrar la mejora de las operaciones y el éxito a largo plazo. La optimización de costos y la mejora de la calidad con la productividad se han convertido en factores clave para obtener una buena ventaja competitiva. Trabajando con un correcto mantenimiento es posible lograr la optimización de los costos y la correcta ejecución de las operaciones en la industria.

El trabajo consiste en diseñar un plan de mantenimiento predictivo para la mantención de los equipos rotativos que se utilizan en el proceso de refinación del petróleo crudo en Enap refinarias Aconcagua, específicamente en la planta de Cracking. En dicho protocolo de acciones predictivas se empleara el método de análisis de vibraciones.

La instrumentación moderna de diagnóstico de vibraciones, en conjunto al conocimiento de la operación de los equipos, junto con los principios básicos del análisis de vibración son las herramientas adecuadas para poder resolver adecuadamente la

mayoría de los problemas de vibración existentes en la maquinaria industrial, y prácticamente en cualquier pieza o estructura que presente este tipo de problemas. Es por este motivo que se tomó como opción el análisis de vibraciones para realizar el plan de mantenimiento predictivo.

OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un plan de mantenimiento para efectuar mantenimiento a una de las plantas que participan en el proceso de refinación de petróleo crudo en ENAP REFINERÍA ACONCAGUA, "Cracking" con el fin de "Maximizar la confiabilidad" de los equipos en dicha planta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar el estado de la empresa para identificar problemas en la gestión de mantenimiento.
- Investigar el área a intervenir para desarrollar el uso de técnicas predictivas y seleccionar las técnicas y metodologías predictivas más atinentes al tipo de proceso.
- Desarrollar el diseño de un Plan de mantenimiento basado en técnicas y metodologías predictivas a través de vibraciones mecánicas.

CAPITULO 1: ANTECEDENTES

1. **ANTECEDENTES**

1.1. **ANTECEDENTES DE LA EMPRESA**

La Empresa Nacional del Petróleo es una empresa del Estado de Chile, cuyo giro comercial es la exploración, producción y comercialización de hidrocarburos y sus derivados. Desarrolla actividades en toda la cadena de valor de la industria petrolera, desde la exploración de hidrocarburos, hasta la comercialización de combustibles, en este último caso con la marca Primax, que opera en Perú y Ecuador.



Fuente: <http://www.enap.cl>.

Figura 1-1. Logo actual de ENAP

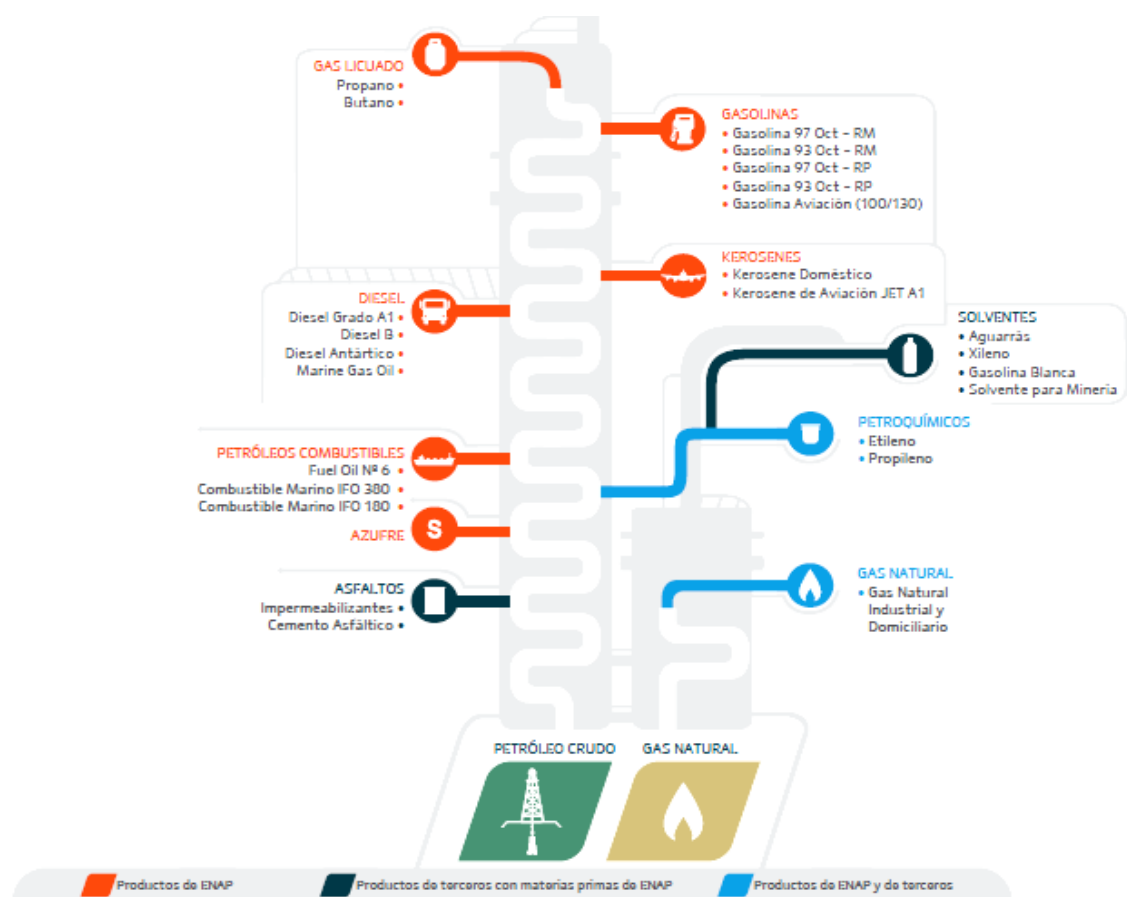


Fuente: <http://www.enap.cl>.

Figura 1-2. Logo de Primax

1.1.1. Perfil y estructura de ENAP

La Empresa Nacional del Petróleo, ENAP, es una empresa líder en Chile, que opera de manera integrada en la producción, refinación y comercialización de hidrocarburos y sus derivados. Propiedad en un 100% del Estado chileno, la compañía cumple un rol estratégico en el abastecimiento de combustibles.



Fuente: ENAP REFINERÍAS S.A. - Memoria Anual 2012

Figura 1-3. Productos de ENAP

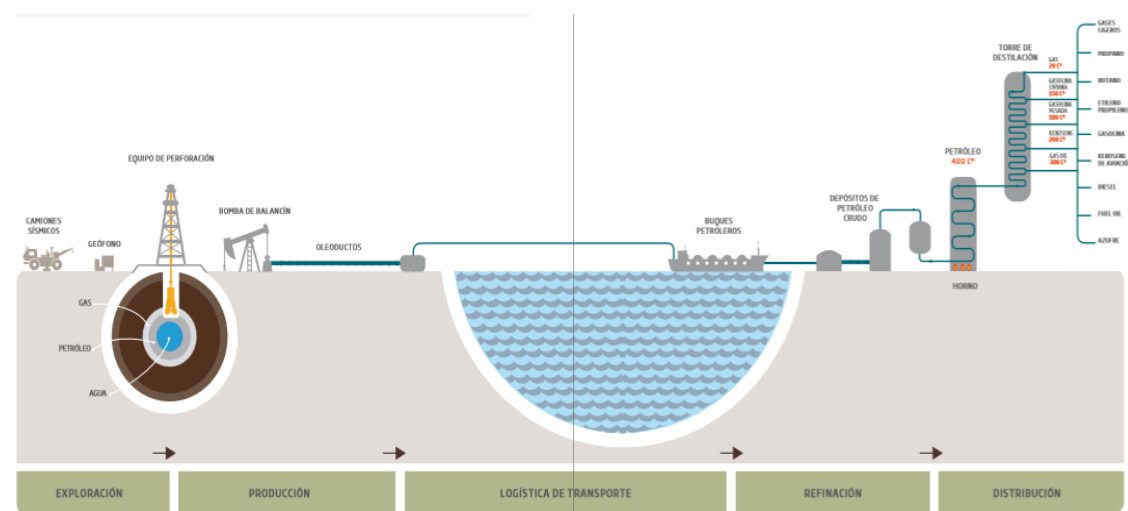
Gracias a la venta de Gas Natural Licuado, que llega desde distintos mercados al terminal de Quintero, su papel se ha vuelto clave en el respaldo de la matriz energética del país.

Sus operaciones en el extranjero incluyen la producción de crudo y gas en Ecuador, Egipto y Argentina, todas a través de alianzas con empresas líderes en el rubro petrolero.

En Chile, ENAP opera a través de dos Líneas de Negocios: Exploración y Producción (E&P), que se encarga de gestionar la búsqueda y producción de

hidrocarburos. La Línea de Exploración y Producción, además, tiene a su cargo la licitación y suscripción de Contratos Especiales de Operación Petrolera, (CEOP), que permiten a firmas del rubro asociarse con ENAP para la exploración de bloques ubicados en la Región de Magallanes. De esta Línea dependen, asimismo, las operaciones de la filial internacional, Sipetrol, que desarrolla todas las operaciones de esta Línea de Negocios de ENAP en el exterior.

En tanto, la Línea de Refinación opera las Refinerías Aconcagua, Bío Bío y Gregorio, donde se procesa el crudo para transformarlo en combustible. Esta Línea, además, participa en la distribución de combustibles en Perú y Ecuador.



Fuente: ENAP REFINERÍAS S.A. - Memoria Anual 2012

Figura 1-4. Proceso del petroleo

La administración central de ENAP se realiza desde la Casa Matriz, ubicada en Santiago de Chile.

1.1.2. Constitución legal

La Empresa Nacional del Petróleo es de propiedad del Estado de Chile. Fue constituida conforme a la Ley N° 9.618, promulgada el 19 de junio de 1950. Sus estatutos fueron aprobados por Decreto 1.208, dictado el 10 de octubre de 1950, por el entonces Ministerio de Economía y Comercio.

Opera como empresa comercial, con un régimen jurídico de derecho público y se administra en forma autónoma. Para ello, cuenta con patrimonio y personalidad

jurídica propia, y se relaciona con el Gobierno a través del Ministerio de Energía y del Ministerio de Hacienda, con este último para efectos presupuestarios.

La Ley 9.618 ha sido modificada por diversas leyes posteriores. Su texto actualizado fue aprobado por el Decreto con Fuerza de Ley N° 1, de 1986, del Ministerio de Minería.

La administración superior de ENAP radica en un Directorio compuesto por ocho miembros, encabezado por el Ministro de Energía, quien ocupa la Presidencia de éste. La Vicepresidencia es ejercida por el Vicepresidente Ejecutivo de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), entidad que designa a tres Directores. Los otros tres miembros del Directorio representan a las siguientes entidades privadas: Sociedad de Fomento Fabril, Sociedad Nacional de Minería y el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

1.1.3. Síntesis histórica

La historia de la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) se encuentra estrechamente ligada al desarrollo de Chile y a su particular geografía.

Si bien fue oficialmente creada por el Estado el 19 de junio de 1950, mucho antes ya auguraba convertirse en un activo estratégico para nuestro país.

Antes de existir como Empresa, un grupo de heroicos trabajadores de CORFO - liderados por el ingeniero Eduardo Simián- hizo brotar el primer chorro de crudo en Springhill, Tierra del Fuego, el 29 de diciembre de 1945. Fue el mismo equipo que encabezaba Simián, el que recomendaría la creación de una empresa que explotase comercialmente los pozos petroleros descubiertos en la zona austral.



Fuente: <http://www.enap.cl/pag/100/776/historia>

Figura 1-5. Descubrimiento del primer pozo

Así, desde sus comienzos, los trabajadores de una naciente ENAP darían cuenta de que su contribución al desarrollo de Chile sería más que la sola entrega de hidrocarburos. Con el paso de los años y habiéndose conformado un polo de desarrollo estratégico en Magallanes, que incluía el proceso de producción de combustibles líquidos y tratamiento del gas en pequeños volúmenes, en el área de Manantiales, la Empresa estaba lista para su siguiente paso.

El 12 de noviembre de 1955, bajo la Presidencia de Carlos Ibáñez del Campo, se inauguró la Refinería de Petróleo de Concón, hoy Refinería Aconcagua. ¿Su objetivo? Producir combustibles a gran escala y comenzar a competir en el negocio de Refinación de tipo comercial e industrial. Una vez lograda una masa crítica de clientes en la zona central de Chile, se levantó una Planta de Almacenamiento en Maipú (1959), que se conectó a un poliducto para llevar los derivados del crudo hasta la Región Metropolitana.



Fuente: <http://www.enap.cl/historia>

Figura 1-6. Proceso del petróleo

El 29 de julio de 1966, con la puesta en marcha de la segunda Refinería de Petróleo en Talcahuano, hoy Refinería Bío Bío, y la construcción de dos terminales de almacenamiento, ENAP declaró su mayoría de edad y se definió como una empresa dedicada a la exploración y explotación petrolera, además de refinación, almacenamiento y comercialización de combustibles.

A partir de allí se sucedieron la creación del negocio de Logística y la transformación en un holding de empresas, en 1981. Una vez consolidadas sus distintas

áreas de negocios, ENAP concretó su salida al exterior, con la creación de la Sociedad Internacional Petrolera S.A., en mayo de 1990, que años más tarde se denominó Sipetrol y que ha mostrado éxitos exploratorios en Ecuador, Argentina y Egipto. En 2004, las Refinerías de la Quinta y Octava regiones, junto a la filial encargada del almacenamiento de combustibles, Emalco, se fusionaron en una sola empresa: Enap Refinerías S.A.

En octubre de 2009, se inauguró el terminal de Gas Natural Licuado, GNL, en Quintero, fruto de la alianza con British Gas (BG), Endesa y Metrogas, lo que marcó un hito en el desarrollo de ENAP como una empresa integrada en el rubro energético. Hoy, el GNL que llega a Quintero ha ido ganando espacio en la matriz energética nacional, dando cuenta del rol de ENAP como una empresa clave en todas las etapas del negocio de la energía.

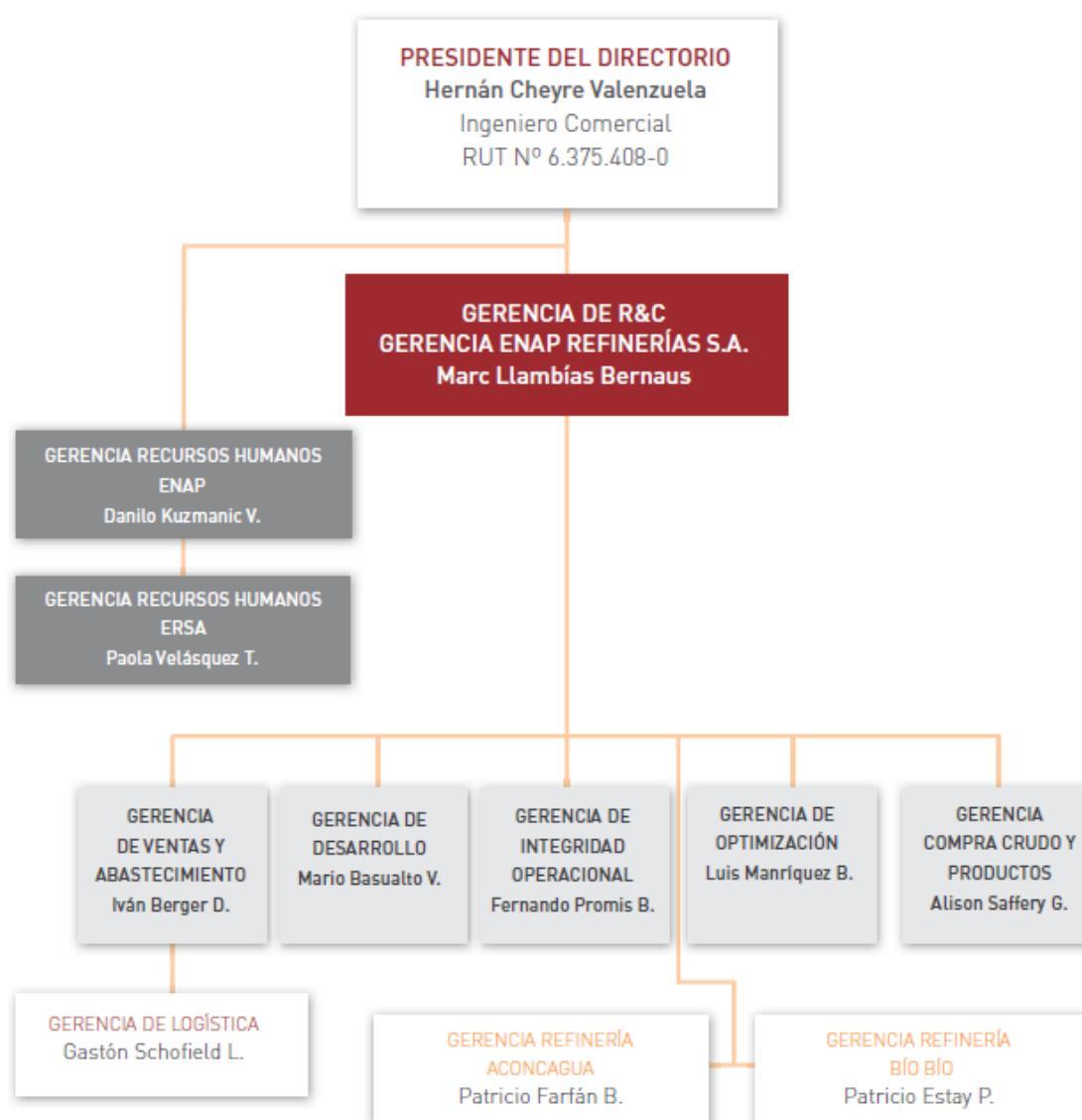
En los últimos años, esta compañía ha emprendido una fuerte campaña exploratoria en busca de nuevas reservas de petróleo y gas en Magallanes, a través de una política de alianzas denominada Contratos Especiales de Explotación Petrolera (CEOP), que se inició en 2007.

En 2011, se cumplió una nueva etapa en la utilización de este mecanismo: junto a Geopark, Wintershall e YPF, ENAP presentó solicitudes al Ministerio de Energía para cinco bloques, dos de los cuales se formalizaron y entraron en vigencia en noviembre de 2012.

La inversión comprometida en los CEOP aumentará la actividad de exploración y producción de hidrocarburos en Magallanes. A su vez, mejorará el conocimiento del potencial exploratorio de la cuenca de esta parte del país, sumado a la generación de nuevos empleos, con todos los beneficios asociados para la Duodécima Región.

1.1.4. Organigrama general de directorio

A continuación en la figura 1-1, se puede apreciar el organigrama de directorio de Enap.



Fuente: ENAP REFINERÍAS S.A. - Memoria Anual 2013

Figura 1-7. Organigrama general de directorio año 2013

1.1.5. Refinería Aconcagua

En esta refinería, las principales plantas de procesamiento de petróleo crudo y cargas complementarias son: Topping y Vacío I, Topping y Vacío II, Visbreaking, Cracking Catalítico, Reformación Catalítica Continua, Hidrocracking, MildHidrocracking (MHC), Desulfurizadora de Gasolina de Cracking (HDG), Hidrotratamiento de Diésel, Isomerización, Complejo de Alquilación, Planta de DIPE, Plantas de Azufre y Complejo de Coquización Retardada.

Además, existen plantas de Regeneración de Ácido Sulfúrico, Fijación de Azufre, Tratamiento de Kerosene, de Gas Licuado y de Gases Combustibles, tratamiento de efluentes y otros; sistema cerrado de agua de refrigeración; oleoducto de la refinería al terminal marítimo de Quintero; instalaciones de tuberías internas de zonas de

estanques a plantas procesadoras y de estas plantas a estanques de productos intermedios y finales; zona de bombas para enviar productos desde la refinería a la Región Metropolitana, a través de oleoducto de propiedad de Sonacol; zona de bombas y terminales marítimas, incluyendo una de tipo mono boya en Quintero; laboratorio químico; cuartel para el Cuerpo de Bomberos para turnos de 24 horas; carros bombas, equipos y elementos para combatir incendios; talleres especializados de mantenimiento y reparación de todas las plantas; equipos eléctricos de emergencia a base de combustible diésel y gas; sistema de interconexión de gas natural para ser utilizado como combustible en calderas y generar vapor e instalaciones para los contratistas.



Fuente: Google Maps

Figura 1-8. Ubicación de Enap Refinería Aconcagua



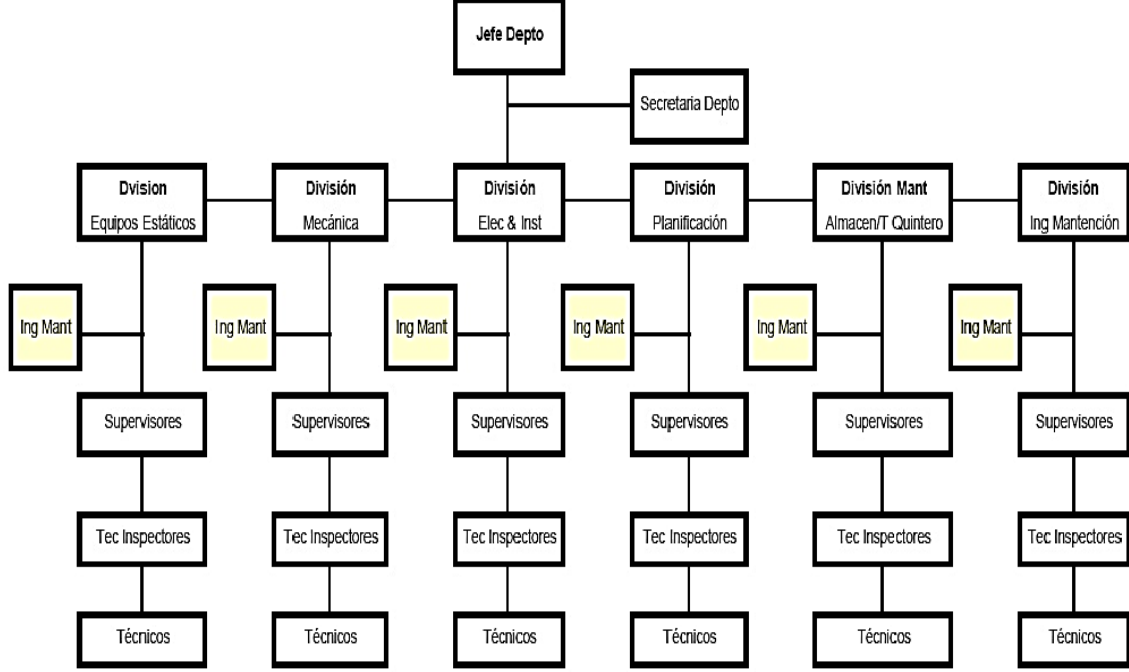
Fuente: www.emol.com

Figura 1-9. Enap Refinería Aconcagua

1.2. MANTENIMIENTO DE REFINERIA ACONCAGUA

Ya que el trabajo está relacionado al mantenimiento, es necesario entregar la composición de este, aunque la información no es mucha, sirve para mostrar lo que busca establecer el diseño del plan de mantenimiento en con respecto al mantenimiento en la empresa. El departamento de Mantención de Enap Refinería Aconcagua (E.R.A.) se compone de 1 jefe de departamento y secretaria, 6 divisiones; Equipos estáticos, Mecánica, Electricidad e Instrumentos, Planificación, Almacenamiento en Terminal Quintero y la división de Ingeniería de Mantenimiento. Cada división cuenta con, Ingeniero de Mantención, Supervisor, Técnico Inspector y Técnico, tal como se muestra en la siguiente gráfica (e figura 1-4 se desglosa el organigrama del departamento de mantención de Enap Refinería Aconcagua).

Con el diseño del plan de mantenimiento se establecería una división para equipos en movimiento (dinámicos), de esta manera quedarían 7 divisiones en el departamento de mantención.



Fuente: Elaboración propia, basado en datos de la empresa

Figura 1-10. Productos de ENAP

CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DEL AREA A INTERVENIR

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA A INTERVENIR

2.1. ÁREA A INTERVENIR

El lugar que se intervendrá para el trabajo es la planta de procesos Cracking, específicamente el "Área 700" cómo se le denomina en Enap Refinería Aconcagua.

Las modernas unidades de craqueo catalítico tipo fluido, han reemplazado al antiguo proceso de cracking térmico, resultando más eficiente ya que permite una mayor obtención de productos valiosos y todo esto a un menor costo.

Este tipo de proceso lo constituye básicamente una zona de reacción, una zona de regeneración y una de separación de productos

El proceso de cracking fluidizado fue desarrollado a comienzos de los años 40 habiendo sufrido desde ese momento a la fecha una serie de modificaciones tendientes a minimizar los problemas operativos, y a hacer este proceso cada vez más eficiente.

En relación a las modificaciones de mayor relevancia, se destaca la relativa a la regeneración del catalizador en que se ha llegado a diseñar lo que se denomina "Regenerador de alta eficiencia" o "Combustor", que al mejorar la mezcla aire-catalizador, y al aumentar su tiempo de contacto permite obtener óptimos niveles de regeneración.

Esta planta recibe parte del gas oil de las columnas de vacío para transformarlo en gasolina base para la preparación de gasolina de 93 octanos. También en esta planta se obtienen gases livianos que se usan como combustible en el proceso de refinación, gas licuado, propileno, diésel y algo de fuel oil.

2.1.1. Equipos a intervenir

De los equipos rotativos que participan en el proceso de producción de la planta cracking, para trasladar productos de una parte a otra, para almacenar, generar o retirar energía, o introducir fluidos a los procesos, se utilizan alrededor de 90 equipos rotativos que son los siguientes:

➤ Bombas:

Desplazamiento positivo: Estas bombas guían al fluido que se desplaza a lo largo de toda su trayectoria, el cual siempre está contenido entre el elemento impulsor, que puede ser un embolo, un diente de engranaje, un aspa, un tornillo, etc., y la carcasa o

el cilindro. “El movimiento del desplazamiento positivo” consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por consiguiente, en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (émbolo), sino que puede tener movimiento rotatorio (rotor).

Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo, tanto reciprocantes como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye volumen (impulsión), por esto a éstas máquinas también se les denomina Volumétricas.

Centrifugas: intercambian el movimiento entre la máquina y el fluido aplicado utilizando la hidrodinámica. El movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.



Fuente: Elaboración propia, fotografía en terreno

Figura 2-1. Bomba centrífuga TAG “J-712”

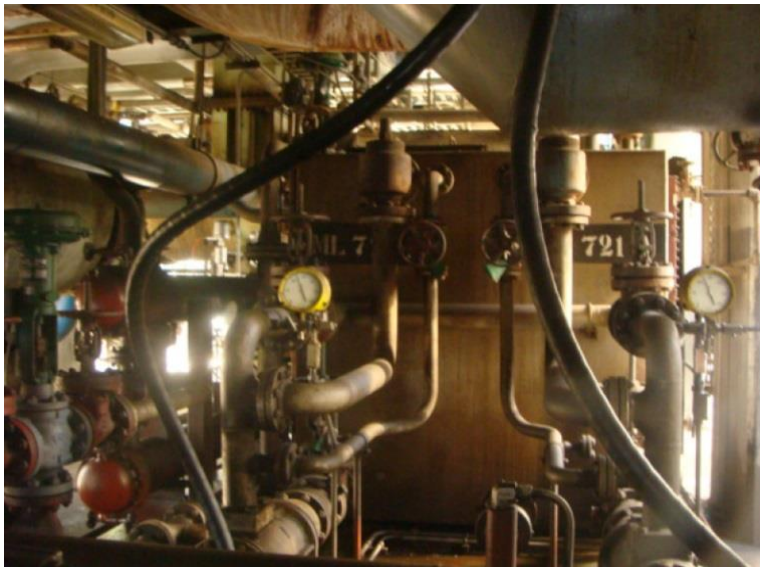
➤ Compresor Alternativo:

Compresor de gas que logra comprimir un volumen de gas en un cilindro cerrado (por ejemplo: tanques de almacenamiento), ver figura 2-2 y figura 2-3.



Fuente: Elaboración propia, fotografía en terreno

Figura 2-2. Motor compresor centrífugo TAG “JML-721”

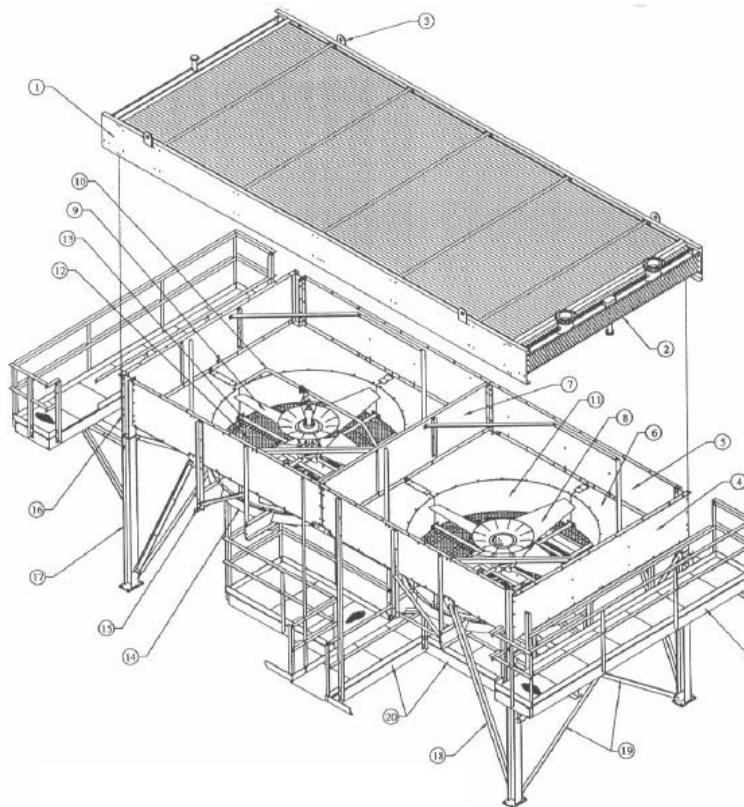


Fuente: Elaboración propia, fotografía en terreno

Figura 2-3. Compresor centrífugo TAG “JML-721”

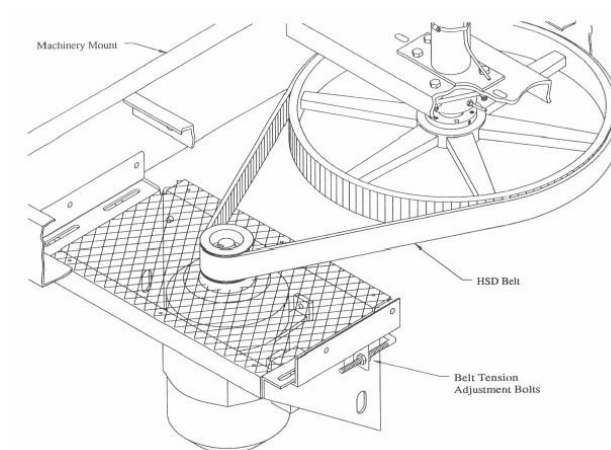
➤ Aero Enfriadores:

Los Aero enfriadores son equipos en los cuales se retira calor de una corriente de proceso (en una operación de enfriamiento y/o condensación) usando aire como medio refrigerante, el cual es impulsado por unas aspas giratorias.



Fuente: Carpeta de equipo archivo técnico DIM.

Figura 2-4. Ilustración de unidad de tiro forzado



Fuente: Carpeta de equipo archivo técnico DIM.

Figura 2-5. Motor conductor de aspas de aero enfriador

➤ Ventiladores de Tiro Forzado:

Maquina rotativa que transmite energía al fluido que circula por ella, bajo la forma de aumento de presión. Estos equipos toman aire de la atmosfera para introducirlo en el proceso de la combustión.



Fuente: Elaboración propia, fotografía en terreno

Figura 2-6. Ventilador JBU-751M

2.1.2. Problemas frecuentes

En todo proceso industrial siempre habrá problemas o situaciones no deseadas que pueden entorpecer o detener dicho proceso, causando pérdidas monetarias (averías de maquinaria y sus componentes, por ejemplo) como también en el peor de los casos hasta pérdidas humanas (accidentes fatales, por ejemplo).

Ya sea por fallas ocasionadas durante el proceso o en los trabajos previos como de construcción e instalación de componentes, siempre es y seguirá siendo importante identificar estos problemas para solucionarlos en el momento adecuado.

De acuerdo a la información disponible, en el proceso de la planta Cracking los problemas más frecuentes que afectan a los equipos rotativos son los siguientes:

➤ Falla en los rodamientos, por:

- Desalineamiento
- Desbalanceo

➤ Falla de los sellos mecánicos

En las fallas de los equipos existen muchas causas, directas y/o indirectas que pueden afectar el funcionamiento normal, por lo que resulta de vital importancia identificar las posibles causas a tiempo. Para garantizar confiabilidad en el funcionamiento de los equipos en la planta es necesario realizar un análisis previo y luego determinar un mantenimiento apropiado para los equipos.

2.1.3. Análisis de Ishikawa

El diagrama de Ishikawa, también llamado diagrama de espina de pescado, diagrama de causa-efecto, diagrama de Grandal o diagrama causal, se trata de un diagrama que por su estructura ha venido a llamarse también: diagrama de espina de pez. Consiste en una representación gráfica sencilla en la que puede verse de manera relacional una especie de espina central, que es una línea en el plano horizontal, representando el problema a analizar, que se escribe a su derecha. Es una de las diversas herramientas surgidas a lo largo del siglo XX en ámbitos de la industria y posteriormente en el de los servicios, para facilitar el análisis de problemas y sus soluciones en esferas como lo son; calidad de los procesos, los productos y servicios. Fue concebido por el licenciado en química japonés Dr. Kaoru Ishikawa en el año 1943.

El problema analizado puede provenir de diversos ámbitos como la salud, calidad de productos y servicios, fenómenos sociales, organización, etc. A este eje horizontal van llegando líneas oblicuas -como las espinas de un pez- que representan las causas valoradas como tales por las personas participantes en el análisis del problema. A su vez, cada una de estas líneas que representa una posible causa, recibe otras líneas perpendiculares que representan las causas secundarias. Cada grupo formado por una posible causa primaria y las causas secundarias que se le relacionan forman un grupo de causas con naturaleza común. Este tipo de herramienta permite un análisis participativo mediante grupos de mejora o grupos de análisis, que mediante técnicas como por ejemplo la lluvia de ideas, sesiones de creatividad, y otras, facilita un resultado óptimo en el entendimiento de las causas que originan un problema, con lo que puede ser posible la solución del mismo.

A continuación se muestra un análisis para la detención de la maquinaria, partiendo con un diagrama efectuado con una lluvia de ideas de posibles causas, las cuales se analizarán para determinar las causas que más tengan influencia en la detención, para luego llegar a una conclusión más concreta con respecto al tipo de mantenimiento que se ajuste a las necesidades de los problemas detectados.

2.1.4. Lluvia de ideas

Posibles causas de la detención de acuerdo a:

➤ **Método**

1. El sistema de gestión de calidad no se está cumpliendo, o no es el adecuado, y por ende no está dando resultados más positivos.

2. Si hubiesen controles en periodos manejables no solo a los equipos que se encuentren en marcha, sino que a todos los equipos que se puedan o que estén en condiciones de ser controlados. La información adquirida facilitaría decisiones a futuro en operación como en mantención.
3. Los métodos correctivos y preventivos no solucionan los problemas en su totalidad.
4. La empresa no cuenta con un control total y actualizado del estado de todas sus máquinas.

➤ **Personal**

1. El personal, ya sea del área mantenimiento, operaciones y administrativa, no es el adecuado para los trabajos que se encuentran realizando.
2. El personal contratado es insuficiente para atender todas las necesidades o situaciones inoportunas que sucedan en la planta.
3. Algunos trabajadores no toman en cuenta las normas y protocolos de trabajo, y por ende realizan un mal trabajo afectando la maquinaria y el proceso.
4. El trabajador esta desconforme por alguna razón, ya sea monetaria, diferencias con sus compañeros de trabajo, se encuentre pasando por un mal momento familiar. Por lo cual no puede desarrollar su trabajo como corresponde.

➤ **Material**

1. Algunos elementos que se encuentran funcionando en mal estado afecten a otros, ocasionando más problemas.
2. No se cuenta con los recursos suficientes para realizar un proceso sin complicaciones, por ejemplo algo que permita poder anticipar fallos.
3. Los componentes que se encuentran funcionando no son los adecuados.

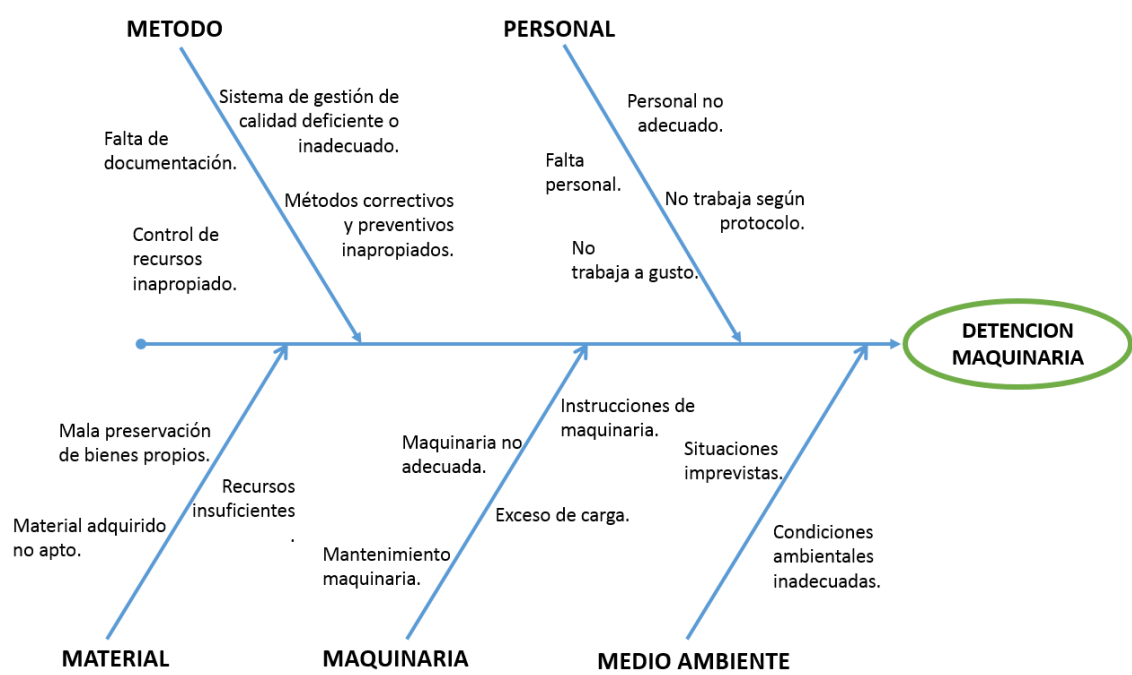
➤ **Maquinaria**

1. Las instrucciones de la maquinaria no se están ocupando como corresponde o no son las adecuadas.
2. La maquinaria usada no es la adecuada.
3. Puede ser que se realice el proceso con más carga de producto de la que pueden soportar las máquinas.
4. El mantenimiento que se realiza no es el apropiado y falta, o es necesario modificarlo un poco.

➤ **Medio Ambiente**

- 1. Una situación imprevista de carácter natural es un hecho que puede ocurrir en cualquier momento y dejar grandes pérdidas, ya sean humanas y de material, de acuerdo a la magnitud que ésta presente. Estas no se pueden predecir, por ende es un factor que no se puede controlar.
- 2. La ubicación de la empresa no es la adecuada para las maquinas que funcionan en ella, un ejemplo es que la vaguada costera pueda afectaren la corrosión de las máquinas y los elementos que las conectan en el circuito.

De acuerdo a todas estas posibles causas que podrían de alguna manera afectar a la maquinaria e influir en su detención, podemos realizar un diagrama ordenando todas estas ideas, para luego analizar bien y buscar cuales podrían ser o no, las verdaderas o más influyentes causas de la detención. Para de esta manera dar soluciones a dichas causas y poder definir el mantenimiento que se adecue más a la situación.



Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 2-7. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Lluvia de ideas)

2.1.5. Análisis para descarte de ideas

Una vez expuestas las ideas se realiza un descarte de las causas poco probables o que no tienen ninguna influencia potencial de la detención de la maquinaria.

➤ **Método**

Los métodos correctivos y preventivos pueden no ser una causa de la cual preocuparse, ya que el problema es que falta otro tipo de método como el predictivo, el cual permitiría tener control de acuerdo a la condición de la maquinaria y así poder realizar intervenciones oportunamente sin la necesidad de tener que corregir y realizar gastos excesivos ni detenciones prolongadas porque una maquina falle inesperadamente o se le haga algún cambio de piezas innecesario.

➤ **Personal**

Se descarta el problema sea por "Personal No Adecuado", ya que ENAP cuenta con procesos minuciosos para la selección de su personal, el cual postula por departamentos y para puestos especificados y una vez que ya hayan ingresado a la empresa estos son capacitados.

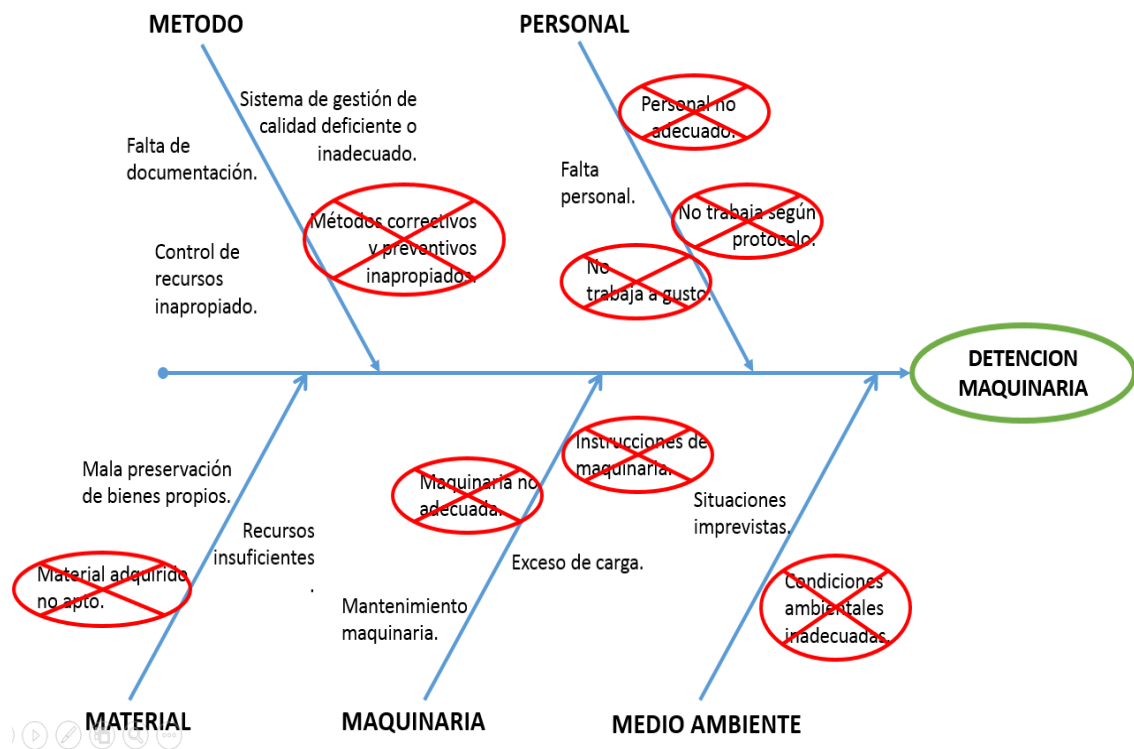
Se descarta "No trabaja según Protocolo", ya que todos los trabajos son supervisados y se cuenta con procedimiento para cada uno de ellos y como se ha mencionado antes el personal tiene que estar capacitado para realizar las maniobras, ya sean de operación o de mantención.

Se descarta "Personal No trabaja a Gusto", ya que como se mencionó ya ENAP contrata a su personal de acuerdo a sus competencias y ofrece buenos sueldos, los que descarta un disgusto monetario y también tiene beneficios en el área de salud y recreación para sus trabajadores.

De acuerdo a lo anterior se puede deducir que tal vez es necesario un protocolo para analizar las máquinas y monitorear su condición en función del tiempo, en el cual se incorporen personas extras para dicho monitoreo.

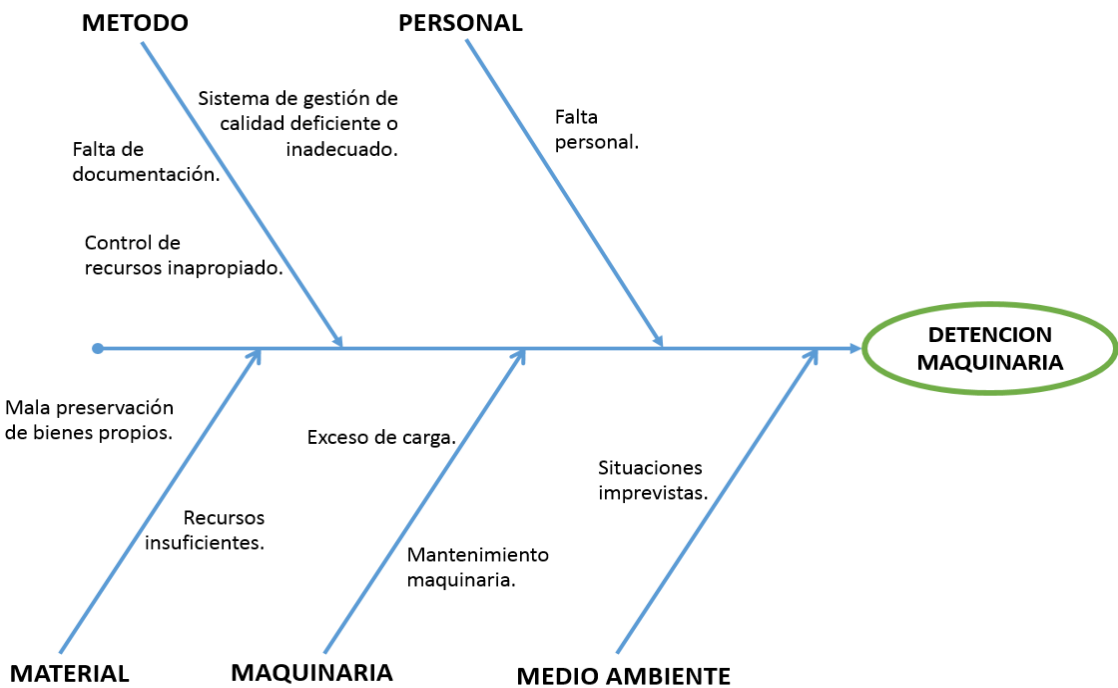
➤ **Materia, Maquinaria y Medio Ambiente**

Se descarta que sea por "Material Adquirido No Apto", "Maquinaria No Adecuada" y "Condiciones Ambientales No Adecuadas", ya que ENAP trabaja según normas, y de acuerdo a los requerimientos en los procesos, la empresa se abastece de lo necesario para obtener buenos resultados (maquinaria, insumos, personal, material, etc.). Una vez descartando algunas posibles causas nos queda un esquema más reducido y fácil de analizar para determinar de qué manera podemos dar solución al problema a solucionar, atacando las causas que más puedan influir en él.



Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 2-8. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Descarte de posibles causas)



Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 2-9. Análisis de Ishikawa para la detención de maquinaria (Posibles causas a solucionar)

2.1.6. Conclusión del análisis

Una vez determinadas las posibles causas podemos dar solución a estas y de esa manera definir una estrategia de mantenimiento.

Una solución para gran cantidad de los problemas planteados sería incorporar un departamento que realice un control periódico a los equipos mediante el análisis de vibraciones, y de esta manera se lograría tener un control de ellos de acuerdo a su condición. De esta manera se alteraría el sistema de gestión de calidad, se tendría un control apropiado de los recursos (maquinaria y sus accesorios) y se generaría una documentación del estado de los equipos para en un futuro lograr predecir de acuerdo a patrones de comportamiento con anterioridad alguna falla no deseada. Con esto se preservarían de buena manera los bienes materiales de la empresa, y por ende cambiaría el mantenimiento que se efectúa en la maquinaria.

2.2. MANTENIMIENTO REQUERIDO

De acuerdo al proceso que realiza la planta de cracking, y en la forma que lo realiza, como un proceso continuo en el cual se debe impedir de cualquier manera la detención de los equipos que se encuentran operando en el proceso de producción, el tipo de mantenimiento requerido y más apropiado para tener un control continuo que nos permita establecer la condición de los equipos y determinar cuándo estarán cerca de las fallas para evitarlas es el mantenimiento predictivo.

CAPÍTULO 3: PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

3. PROPUESTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

3.1. MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El mantenimiento es el control constante tanto de las instalaciones como de componentes, así como del conjunto de trabajos de reparación y revisión necesarios para garantizar el funcionamiento regular y el buen estado de conservación de un sistema. Tiene como objetivos evitar, reducir y en su caso reparar las fallas, disminuir la gravedad de las fallas que no se puedan evitar, evitar detenciones inútiles o paros de máquina y evitar accidentes, además de conservar los bienes productivos en condiciones seguras de operación, reducir los costos de producción y prolongar la vida útil de los bienes.

En el proceso de mantenimiento se destacan varios tipos de mantenimiento aplicables en los procesos de producción de una empresa:

El Mantenimiento Correctivo, el cual consta de la reparación y sustitución de elementos deteriorados que se realiza cuando aparece la falla.

El Mantenimiento Preventivo, son las actividades programadas para evitar las fallas.

El Mantenimiento Predictivo, que corresponde a las actividades de seguimiento y diagnóstico que permiten intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de falla.

El Mantenimiento Proactivo, es el mantenimiento que al momento de realizar alguna reparación o sustitución, se realiza desde la raíz del problema.

El Mantenimiento Productivo Total (TPM), donde el operario realiza las tareas de mantenimiento en su puesto de trabajo.

3.1.1. Mantenimiento predictivo

Es la medida e interpretación periódica o continua de un componente para determinar las condiciones de funcionamiento y la necesidad de mantenimiento de los equipos. El control del nivel de condición de los equipos puede ser subjetivo, es decir, basado en los sentidos, y objetivo, es decir, mediante medidas periódicas o continuas de uno o varios parámetros. Entre estas últimas, se destaca el análisis vibraciones que se utiliza en equipos rotativos, análisis de aceites para la detección de partículas metálicas residuales, medidas de pulsos de choque que se hace en rodamientos (vibraciones),

termografía para la detección de zonas calientes en planta, y varias técnicas de ensayos no destructivos como ultrasonido o rayos X para ubicar fisuras y fallas.

En pocas palabras es un Mantenimiento que realiza un conjunto de actividades de seguimiento y diagnóstico continuo que permiten una intervención correctora inmediata como consecuencia de la detección de algún síntoma de falla.

Sus ventajas son las siguientes:

- Determinación óptima del tiempo para realizar el mantenimiento preventivo.
- Ejecución sin interrumpir el funcionamiento normal de equipos e instalaciones.
- Mejora el conocimiento y el control del estado de los equipos.

Sus inconvenientes son los siguientes:

- Requiere personal mejor formado e instrumentación de análisis costosa.
- No es viable una monitorización de todos los parámetros funcionales significativos, por lo que pueden presentarse averías no detectadas por el programa de vigilancia.
- Se pueden presentar averías en el intervalo de tiempo comprendido entre dos medidas consecutivas.

3.2. **VIBRACIONES MECÁNICAS**

El movimiento o vibración existente en la maquinaria se debe primordialmente a la interacción de fuerzas existentes en la maquinaria. Partiendo de este precepto, el analista debe tener claro el concepto de cuáles fuerzas son las que pueden originar el movimiento y tenerlo presente siempre al momento de efectuar un análisis de vibración. Algunos ejemplos típicos son: desequilibrio, Desalineamiento, ejes flexionados, excentricidades, solturas en bases, holguras en componentes, lubricación inadecuada, etc. El objetivo del analista es identificar las fuerzas indeseables que interactúan dentro de la maquinaria y recomendar las acciones necesarias para disminuirlas al mínimo.

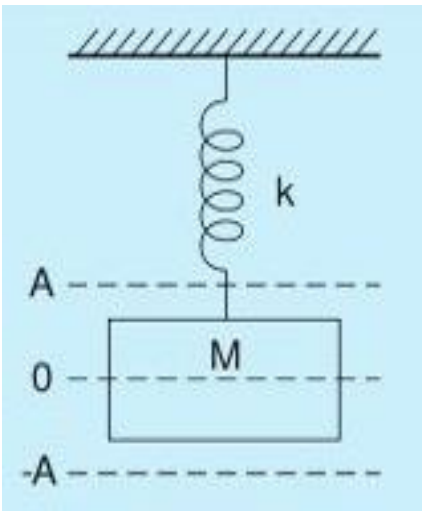
3.2.1. ¿Qué es una vibración?

En términos muy simples una vibración es un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud. Todos los cuerpos presentan una señal de vibración en la cual plasman cada una de sus características. De acuerdo a esto, las máquinas presentan su

propia señal de vibración y en ella se encuentra la información de cada uno de sus componentes. Por tanto, una señal de vibración capturada de

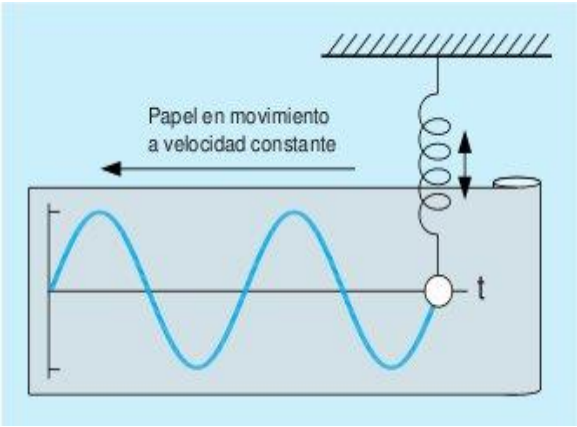
3.2.1.1. Vibración simple

La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras. Una oscilación pura puede representarse físicamente con el siguiente experimento: imagínese una masa suspendida de un muelle como el de la Figura 3-1. Si esta masa es soltada desde una distancia A , en condiciones ideales, se efectuará un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud A . Ahora a la masa vibrante le añadimos un lápiz, y una hoja de papel en su parte posterior, de manera que pueda marcar su posición. Si desplazamos el papel con velocidad constante hacia el lado izquierdo se dibujará una onda como la representada en la Figura 3-2. A continuación se describen los parámetros que definen este tipo de vibración.



Fuente: www.sinais.es/cursos-vibraciones.html

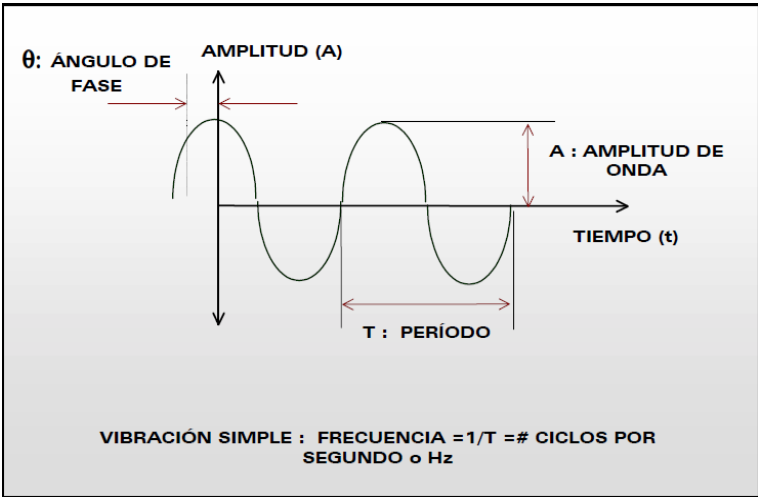
Figura 3-1. Masa suspendida en un muelle



Fuente: www.sinais.es/curso-vibraciones.html

Figura 3-2. Movimiento armónico simple

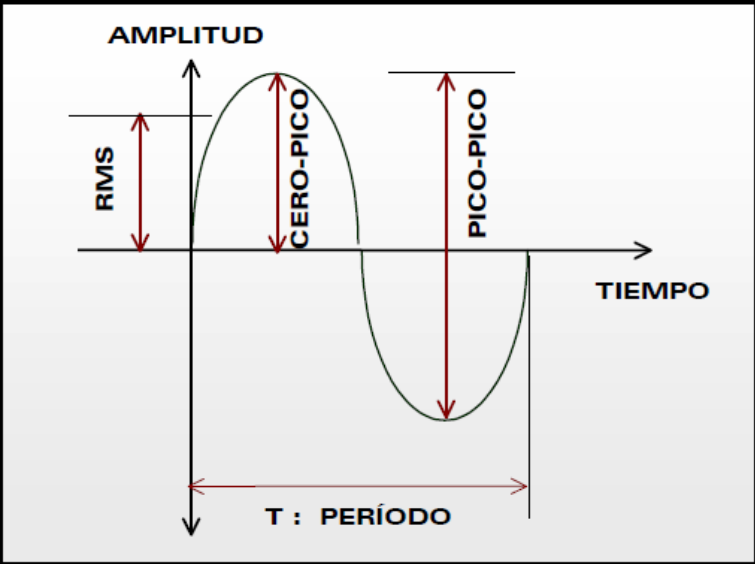
El recíproco del período es la frecuencia (es decir $F=1/P$) la cual generalmente es dada en Hz (Ciclos por segundo) o también Ciclos por minuto (CPM). Estos conceptos pueden verse más claramente en la figura 3-3. De esta onda sinusoidal también es importante definir la amplitud y la fase.



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-3. Conceptos onda

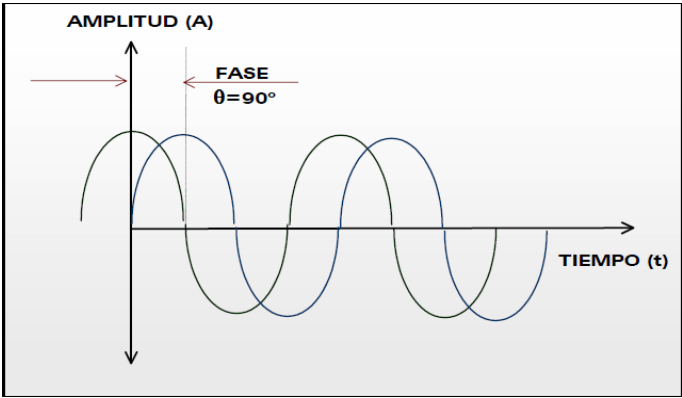
La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es cuanta cantidad de movimiento puede tener una masa desde una posición neutral. La amplitud se mide generalmente en valores pico-pico para desplazamiento y valores cero-pico y RMS para velocidad y aceleración.



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-4. Medidas de amplitud

La fase realmente es una medida de tiempo entre la separación de dos señales, la cual puede ser relativa o absoluta. Generalmente es encontrada en grados. La figura 3-5 muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y período, pero separadas 90 grados, lo cual indica que ambas curvas están desfasadas 90 grados.



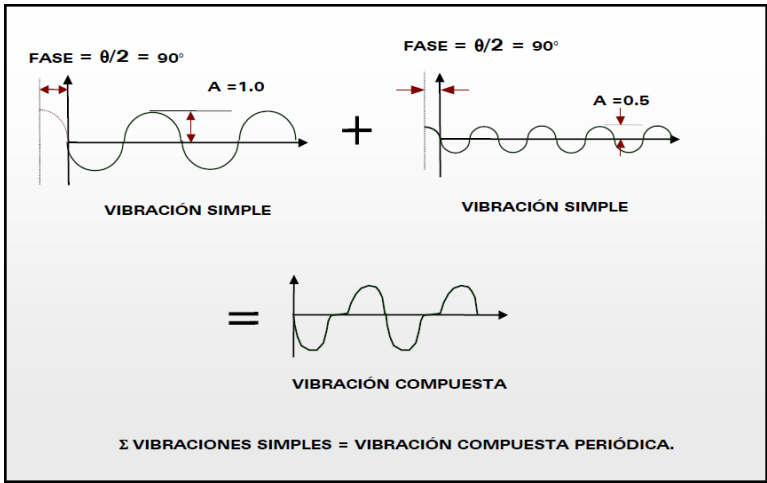
Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-5. Desfase entre dos seno

3.2.1.2. Vibración compuesta

Una señal compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos

los golpeteos y vibraciones aleatorias. El resultado es una señal como la ilustrada en la figura 3-6.

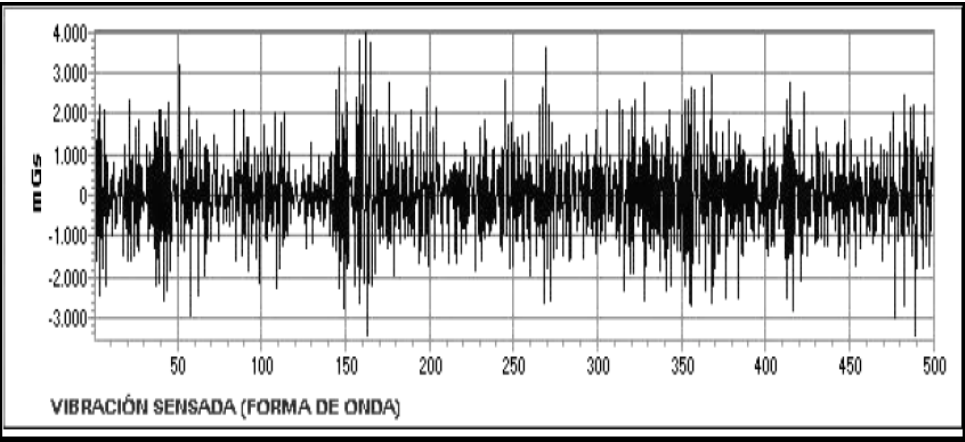


Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-6. Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo

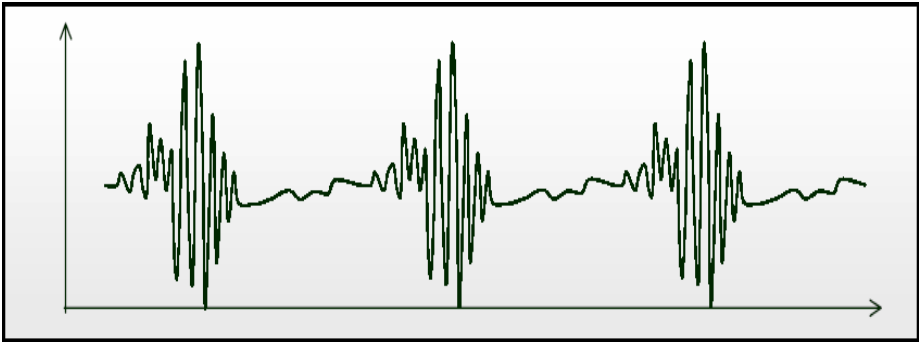
3.2.1.3. Vibración aleatoria y golpeteos intermitentes

Además de las vibraciones simples, también existen otros tipos de vibraciones como son la vibración aleatoria y los golpeteos intermitentes. La vibración aleatoria no cumple con patrones especiales que se repiten constantemente o es demasiado difícil detectar donde comienza un ciclo y donde termina. Estas vibraciones están asociadas generalmente turbulencia en blowers y bombas, a problemas de lubricación y contacto metal-metal en elementos rodantes o a cavitación en bombas (**Ver Fig. 3-7**). Este tipo de patrones es mejor interpretarlos en el espectro y no en la onda en el tiempo. Los golpeteos intermitentes están asociados a golpes continuos que crean una señal repetitiva. Estas se encuentran más comúnmente en los engranajes, en el paso de las aspas de un impulsor o ventilador, etc. Este tipo de señales tiende a morir debido a la amortiguación del medio. En la **figura 3-8** se muestra claramente este fenómeno: un golpe intermitente que se amortigua con el medio.



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-7. Vibración aleatoria



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-8. Golpeteos intermitentes

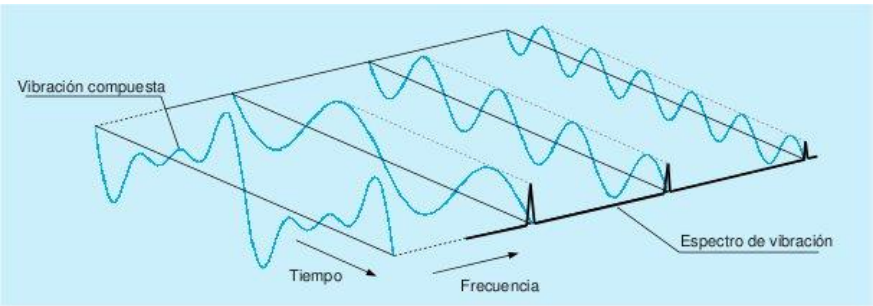
3.2.1.4. Transformación de Fourier

En las vibraciones en el dominio del tiempo, que son las señales capturadas directamente de la máquina. Como ya se vio antes, en estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Sin embargo, existe un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente resulta imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos.

Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra analizar las señales en el dominio de la frecuencia. Para ello se emplea la

gráfica de amplitud frente a frecuencia que es conocida con el nombre de espectro. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria.

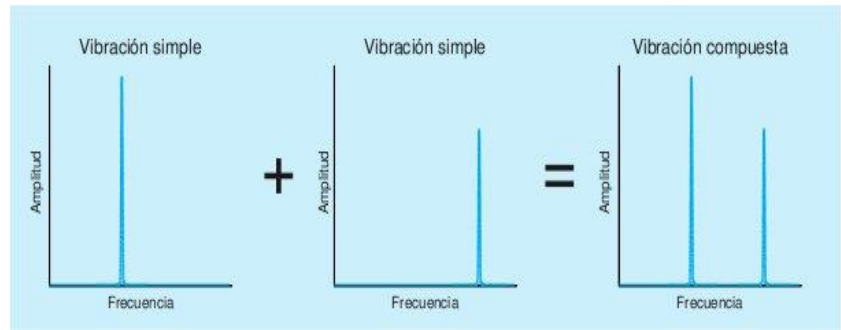
Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal de una máquina, calcular todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectro.



Fuente: www.sinais.es/cursos-vibraciones.html

Figura 3-9. Procesado FFT de una onda vibratoria compleja

En la Figura 3-9 de tres dimensiones puede verse claramente la señal de vibración compuesta, capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las señales sinusoidales en el dominio del tiempo que la componen y por último se muestra cada una de ellas en el dominio de la frecuencia. Por tanto, empleando la transformada de Fourier, podemos retomar la suma de vibraciones simples de la Figura 3-6 y representar exactamente la misma operación en el dominio de la frecuencia como se muestra en la Figura 3-10, con la particularidad de que en este caso resulta obvio obtener las frecuencias y amplitudes de las dos componentes originales a partir del espectro resultante.



Fuente: www.sinais.es/curso-vibraciones.html

Figura 3-10. Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia

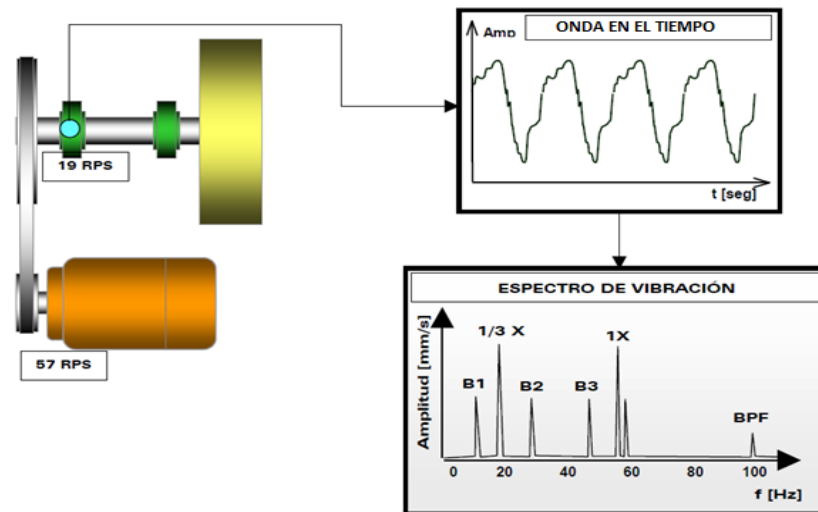
En el conjunto de categorías clasificadas se presentarán los espectros característicos de las fallas más comunes. Estos espectros han sido el fruto de muchos estudios y se convierten en “recetas de cocina” que ayudan a descubrir los problemas que pueden suceder en una máquina, aunque en muchos casos es necesario realizar un análisis físico de la máquina.

3.2.2. Vibraciones en equipos rotatorios

Si bien las vibraciones están presentes en equipos o elementos estáticos y dinámicos, el lugar donde tienen mayor presencia y magnitudes es en los equipos rotativos, estas se generan por diversas situaciones. Independiente de cómo se generen estas vibraciones, pueden ser determinantes en el funcionamiento de la máquina. Por lo que es muy importante conocer la naturaleza de la vibración y como identificarla de acuerdo al análisis espectral.

3.2.3. Análisis espectral

Cuando se mide una máquina, se genera una información muy valiosa que es necesario analizar. El éxito de este análisis depende de la correcta interpretación que se le dé a los espectros capturados con respecto a las condiciones de operación en que se encuentra la máquina.



Fuente: Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005.

Figura 3-11. Esquema de captura de la información desde una máquina para luego ser analizada

Los pasos típicos en el análisis de vibración son:

- **Identificación de los picos de vibración en el espectro:** lo primero es identificar la pulsación de presión de primer orden (1x), correspondiente a la velocidad de rotación del eje. En máquinas con múltiples ejes, cada eje tendrá su frecuencia de rotación característica 1x. En muchas ocasiones, las pulsaciones de presión 1x del eje van acompañados de una serie de armónicos o múltiplos enteros de 1x. Existen armónicos de especial interés, por ejemplo, si se trata de una bomba de seis álabes, normalmente, habrá una pulsación de presión fuerte espectral en 6x.
- **Severidad Vibracional:** determinación de la gravedad de problemas de máquina basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración. Toda máquina está sujeta a ciertos niveles de vibración, sin embargo es importante reconocer si se encuentra dentro de los límites permisibles. Una buena base de partida es utilizar los límites de severidad contenidos en la norma ISO 10816-1 1995. Esta norma reemplaza la norma ISO 2372 y la ISO 3945. En estas normas se estipulan las posiciones de medición así como los límites máximos permisibles por clase de equipo. Así pues, esta norma servirá como base para determinar la integridad de la maquinaria así como un criterio de aceptación en el caso de maquinaria nueva o reconstruida.

- **Recomendaciones** apropiadas para las reparaciones, basadas en la gravedad de los problemas de máquinas.

Para ver los ejemplos de cómo se analizan las distintas anomalías que presentan los por vibración de equipos rotatorios ver anexo.

CAPITULO 4: ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

4. ESTRATEGIA DE MANTENIMIENTO

4.1. OBJETIVO A LOGRAR

Realizar el diseño de un plan de mantenimiento para una de las plantas que participan en el proceso de refinación de petróleo crudo en ENAP REFINERÍA ACONCAGUA, “**Cracking**” con ello se busca poder “Maximizar la disponibilidad” de los equipos rotativos de dicha planta.

4.2. PLAN DE MANTENIMIENTO

El plan de mantenimiento es un documento que contiene el conjunto de tareas de mantenimiento programado que debemos realizar en una planta para asegurar los niveles de disponibilidad que se hayan establecido. Es un documento vivo, pues sufre de continuas modificaciones, fruto del análisis de las incidencias que se van produciendo en la planta y del análisis de los diversos indicadores de gestión. (MANTENIBILIDAD, CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD)

La elaboración del plan de mantenimiento atraviesa una serie de fases. Las primeras son: Descomposición de la planta en áreas, elaboración de la lista de equipos, descomposición de cada uno de ellos, codificación, asignación del modelo de mantenimiento que mejor se adapta a las características de equipo y su función en el sistema productivo de la planta. Una vez este trabajo esté finalizado, estamos en disposición de comenzar a elaborar la lista de tareas que incluirá el plan de mantenimiento.

De acuerdo a la descomposición de la planta en áreas, el área está definida como Área 700 correspondiente a la planta Cracking, por lo que el código de los equipos se designan con números 700, por ejemplo la bomba centrífuga que se utiliza para la carga de gasolina se denomina J-703.

Con respecto a la asignación del modelo de mantenimiento que mejor se adapta a las características de equipo y su función en el sistema productivo de la planta. Este ya se ha definido anteriormente considerando lo importante que es el funcionamiento continuo de la planta y de acuerdo a los equipos un análisis de Ishikawa, el modelo sería programado utilizando mantenimiento predictivo.

4.2.1. Listado de equipos

La siguiente tabla contiene información sobre código, tipo, sistema funcional y la cantidad de cada uno de ellos (N°). También contiene la criticidad de los equipos (Cr), la cual se explica más adelante.

Tabla 4-1. Listado de equipos de la planta (codificación, tipo, sistema funcional, cantidad y criticidad)

Código Equipo	Equipo	Sistema Funcional	N°
JCM 712	Aero Enfriador	Nafta pesada CIRCULANTE	2
JCM 713	Aero Enfriador	Nafta pesada CIRCULANTE	2
JCM 715	Aero Enfriador	Fractionator Overhead Condenser	8
JCM 721	Aero Enfriador	Compressor interstage cooler	2
JCM 723	Aero Enfriador	Condensado de Alta Temperatura	2
JCM 734	Aero Enfriador	Debutanizer Overhead Condenser	4
JCM 759	Aero Enfriador	SPONGE OIL AIR COOLER	2
J 702	Bomba	Condensado	2
J 703	Bomba Centrifuga H.	Carga gasolina	4
J 704	Bomba Centrifuga H.	Fondos de Fraccionamiento	3
J 705	Bomba Centrifuga H.	Decantado estanque	2
J 706	Bomba Centrifuga H.	Ciclo de Circulación de Aceite pesado	2
J 708	Bomba Centrifuga H.	Cooler a estanque	2
J 709	Bomba Centrifuga H.	Circulación de Nafta Pesada	2
710	Bomba Centrifuga H.	Nafta a estanque	2
J 712	Bomba Centrifuga H.	Reflujo Fraccionador	2
J 714	Bomba Centrifuga H.	Nafta	3
J 721	Bomba Centrifuga H.	Lubricación	2
J 722	Bomba Dosificadora	Aspiración del Tambor del Compresor	1
J 723	Bomba Centrifuga H.	Inyección de Condensado	2
J 724	Bomba Centrifuga V.	Condensado entre etapas	2
J 725 A	Bomba Centrifuga H.	Separador de Alta Presión	2
J 726	Bomba Centrifuga H.	Absorbedor primario	3
J 727	Bomba Centrifuga H.	Recirculación Nafta	2
J 728 A	Bomba Centrifuga H.	Recirculación Nafta	2
J 729	Bomba Centrifuga H.	Desbutanizador Reflujo	3
J 730	Bomba Centrifuga H.	Recirculación fondo	2
J 731	Bomba Centrifuga H.	Cooler absorbedor	2
J 732	Bomba Centrifuga V.	Condensado	2
J 733	Bomba Centrifuga V.	Producto Tope Debutanizadora	3

Tabla 4-1. Listado de equipos de la planta ((codificación, tipo, sistema funcional, cantidad y criticidad)(continuación))

Código Equipo	Equipo	Sistema Funcional	Nº
J 751 A	Bomba Centrifuga H.	Circulación de aceite pesado	1
J 752	Bomba	Lubricación	1
J 754	Bomba Centrifuga V.	Condensado	2
J 755	Bomba Centrifuga H.	Aguas acidas	2
J 756	Bomba Centrifuga H.	Ciclo de Aceite Ligero	2
J 761	Bomba Centrifuga H.	Agua a Caldera	2
JML 721	Compresor Centrifugo	Proceso de Vapor	2
JML 753	Compresor Centrifugo	Aire secundario del Ventilador	1
JBU 751 M	Ventilador T.F.M.	AIRE PARA HORNO	1
JBU 751 T	Ventilador T.F.T.	AIRE PARA HORNO	1

Fuente: Elaboración propia, basado en datos la empresa

Nota: el campo de criticidad de los equipos no se encuentra por falta de información (producción, costos mantenimiento y calidad).

En resumen se cuenta con 42 tipos de equipos y un total de 92 los cuales no se encuentran funcionando en su totalidad, esto se debe a que la mayoría funciona con uno o más SPARE (equipo de repuesto).

4.2.1.1. Análisis de criticidad para los equipos

No todos los equipos tienen la misma importancia en una planta industrial. Es un hecho que unos equipos son más importantes que otros. Como los recursos de una empresa para mantener una planta son limitados, debemos destinar la mayor parte de los recursos a los equipos más importantes, dejando una pequeña porción del reparto a los equipos que menos pueden influir en los resultados de la empresa.

Pero, ¿Cómo se diferencian los equipos que tienen una gran influencia en los resultados de los equipos que no la tienen? Cuando tratamos de hacer esta diferenciación, estamos realizando el Análisis de Criticidad de los equipos de la planta. A continuación se presentan una serie de niveles de importancia o Criticidad;

- A) *Equipos críticos:* Son aquellos equipos que parada o mal funcionamiento afecta significativamente a los resultados de la empresa.
- B) *Equipos importantes:* Son aquellos equipos cuya parada, avería o mal funcionamiento afecta a la empresa, pero las consecuencias son asumibles.

C) *Equipos prescindibles*: Son aquellos con una incidencia escasa en los resultados. Como mucho, supondrían una pequeña incomodidad, algún pequeño cambio de escasa trascendencia, o un pequeño coste adicional.

En segundo lugar, ¿Qué criterios se pueden utilizar para clasificar cada uno de los equipos en alguna de las categorías anteriores? Debemos considerar la influencia que una anomalía tiene en cuatro aspectos: seguridad, producción, calidad y mantenimiento.

Seguridad y medio ambiente: Un fallo del equipo puede suponer un accidente muy grave, bien para el medio ambiente o para las personas; es posible también que un fallo del equipo pueda ocasionar un accidente, pero la probabilidad de que eso ocurra puede ser baja; o, por último, puede ser un equipo que no tenga ninguna influencia en seguridad.

Producción: Cuando valoramos la influencia que un equipo tiene en producción, nos preguntamos Cómo afecta a ésta un posible fallo. Dependiendo de que suponga una parada total de la instalación, una parada de una zona de producción preferente, paralice equipos productivos pero con pérdidas de producción asumible o no tenga influencia en producción, clasificaremos el equipo como A, B o C.

Calidad: El equipo puede tener una influencia decisiva en la calidad del producto o servicio final, una influencia relativa que no acostumbre a ser problemática o una influencia nula.

Mantenimiento: El equipo puede ser muy problemático, con averías caras y frecuentes; o bien un equipo con un coste medio de mantenimiento; o, por último, un equipo con muy bajo coste, que normalmente o de problemas.

Para valorar la Criticidad de un equipo de acuerdo a la información anterior se puede utilizar la siguiente tabla:

Tabla 4-2. Criterios para definir criticidad en equipos

Tipo de Equipo	Seguridad y Medio Ambiente	Producción	Calidad	Mantenimiento
A CRÍTICO	Puede originar accidente muy grave.	Su parada afecta al Plan de Producción.	Es clave para la calidad del producto.	Alto coste de reparación en caso de avería.
	Necesita revisiones periódicas (mensuales).		Es el causante de un alto porcentaje de rechazos.	Averías muy frecuentes.
	Ha producido accidentes en el pasado.			Consume una parte importante de los recursos de mantenimiento (mano de obra y/o materiales).
B IMPORTANTE	Necesita revisiones periódicas (mensuales).	Afecta a la producción, pero es recuperable (no llega a afectar a clientes o al Plan de Producción).	Afecta la calidad, pero habitualmente no es problemático.	Coste medio en Mantenimiento.
	Puede ocasionar un accidente grave, pero las posibilidades son remotas.			
C PRESCINDIBLE	Poca influencia en seguridad.	Poca influencia en producción.	No afecta a la calidad.	Bajo coste de Mantenimiento.

Fuente: Organización y gestión integral de mantenimiento – Santiago García Garrido

4.2.2. Actividades a desarrollar

Una vez determinada la criticidad de los equipos, se pueden establecer los intervalos para realizar medición de vibraciones y registrar data operativa en todos los equipos rotatorios, según una ruta establecida.

El siguiente cuadro anterior muestra la disposición de los trabajos de inspección a realizar en los equipos de la planta dando prioridad de acuerdo a su criticidad.

Tabla 4-3. Cronograma o ruta por semanas para la medición de equipos

Críticidad	Semana 1							Semana 2						
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
A	X			X				X			X			
B		X							X					
C			X											

Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Los trabajos se realizaran de la siguiente manera:

- En una semana los días Lunes y Jueves se inspeccionaran solo los equipos críticos de la planta, el día Martes se inspeccionaran los equipos importantes, y, el día Miércoles de realizaran las inspecciones en los equipos prescindibles.
- Luego en la semana siguiente se harán inspecciones de la misma manera, pero los equipos prescindibles no se consideraran. Dejando un seguimiento de la siguiente manera; para equipos críticos (A) se inspeccionaran dos veces a la semana todas las semanas, para los equipos importantes (B) se realizaran sus inspecciones solo los días martes de cada semana, y, por ultimo a los equipos prescindibles (C) se les realizaran sus respectivas inspecciones los días miércoles semana por medio.

Los trabajos diarios deberán contemplar las siguientes actividades:

- ✓ Se realizaran todas las mediciones de vibraciones y datos que el colector le solicite, por cada uno de los equipos de acuerdo a la ruta establecida (se utilizará la variable velocidad en unidades $\frac{mm}{seg}$ RMS y todos los puntos medidos. en velocidad global y FFT).
- ✓ Se realizara una inspección visual de oportunidad, registrando los niveles de aceite, reportando de manera inmediata anomalías operacionales como por ejemplo ruidos, temperaturas, pérdidas por sellos mecánicos o prensas, fugas de productos, solturas de elementos de máquinas, etc. Cuando corresponda se realizaran tomas de fotografías digitales.
- ✓ Se reportara diariamente los equipos que han transgredido alarmas, de acuerdo a los settings que están establecidos previamente en la configuración de cada equipo, en el software, reportar diariamente equipos que no fueron medidos y las razones de este efecto.
- ✓ Realizar informes mensuales que indiquen un listado de equipos medidos y equipos con mediciones pendientes y relación con la periodicidad de medición.

4.2.2.1. Recursos

Para la realización de las actividades señaladas se requiere contar con los recursos humanos y materiales que se indica a continuación:

Recursos Humanos:

Técnico analista: encargado de realizar la inspección en terreno (captura de datos, inspección visual, etc.), analizar los datos obtenidos de los colectores de datos, verificación de parámetros de acuerdo a criterios de evaluación, y confección de informe diario.

Ingeniero analista: Realizar planteo de conclusiones y recomendaciones para equipos en malas condiciones, realizar recopilación de datos estadísticos de los equipos monitoreados, tabular datos y elaborar informe mensual.

Recursos Materiales (hardware y software):

Para realizar los trabajos es necesario contar con los instrumentos adecuados, como un colector analizador y un software compatible con el colector para realizar las cargas y descargas de la información necesaria (equipos a medir, estado del equipo, etc.).

Analizador de vibraciones CSI 2130: Analizador y recolector de vibraciones de un canal, con entrada de señal tacométrica. Rango dinámico de medición mayor de 96dB. Modo de pro-mediación: normal, peak hold, order tracking, negative tracking, synchronous. Permite lecturas de muy baja frecuencia. Permite detallar frecuencias específicas. Permite análisis detallado de fallas de rodamientos, engranajes, etc.

Software AMS Machinery Manager: Permite crear las rutas de medición con los equipos a intervenir en dichas rutas y almacenar sus datos. El programa proporciona:

- Diagnóstico de salud de la máquina de múltiples tecnologías de mantenimiento predictivo integradas para la imagen completa de la situación de sus activos mecánicos.
- Las herramientas de análisis para el diagnóstico y pronóstico de la salud maquinaria.
- AMS Suite: Gestión del Rendimiento de Activos y otros sistemas empresariales para difundir información sobre la salud de maquinaria en toda la empresa.
- En tiempo real la integración de la salud de los activos con los sistemas de automatización, control.

4.2.3. Procedimiento de trabajo

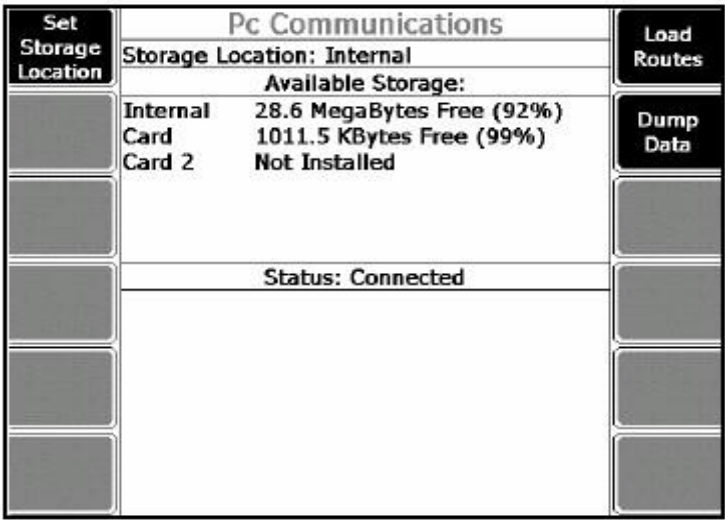
Para obtener buenos resultados y realizar un trabajo que garantice confianza, es necesario establecer directrices para la realización de la inspección a realizar en los equipos.

4.2.3.1. Descarga de ruta al instrumento de medición desde computador

Antes de cada monitoreo el inspector deberá cargar los equipos ya ingresados anteriormente en el software AMS Machinery en el instrumento de medición CSI 2130, de acuerdo a los equipos correspondientes del día. Para realizar esto tiene que seguir los siguientes pasos:

Una vez que se establezca la conexión USB, Puerto Serial o Ethernet:

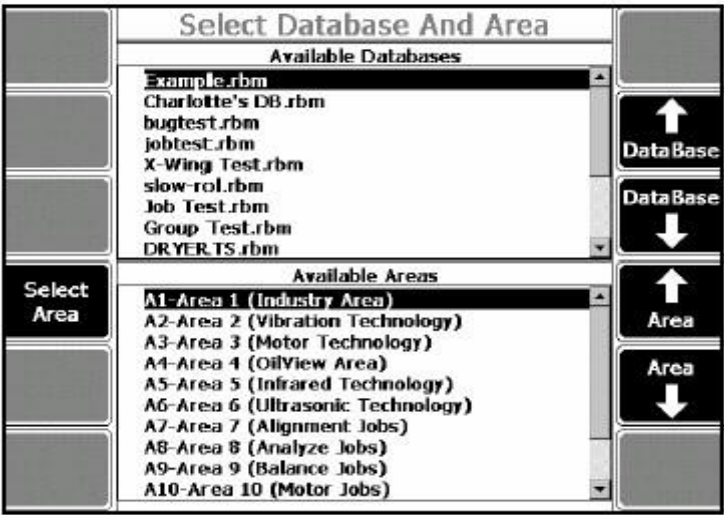
- 1- Presione el botón Home para regresar a la pantalla de inicio.
- 2- Presione la tecla Route.
- 3- Presione ALT.
- 4- Presione Route Mgnt.
- 5- Presione la llave Conectar. El analizador procurará hacer la conexión. Cuando ha logrado conectarse aparecerá en la pantalla del analizador: ‘Conectado’.



Fuente: CSI 2130 Manual de Operación

Figura 4-1. Pantalla de las comunicaciones de la PC que demuestra el estado conectado

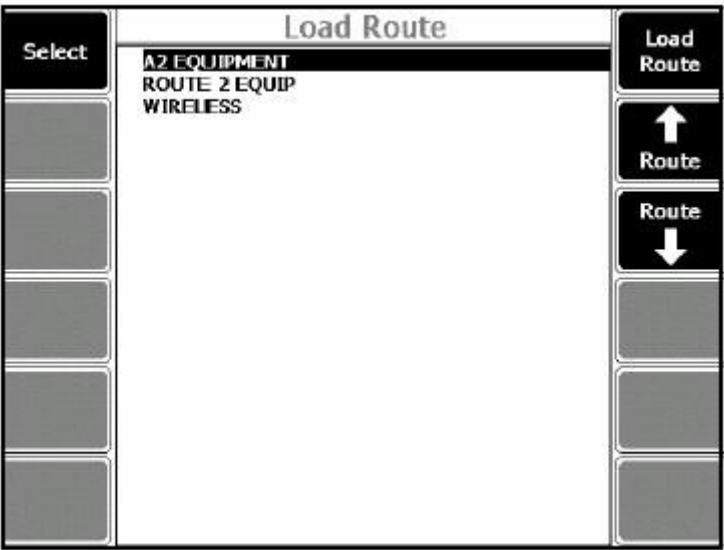
- 6- Presione la tecla de la carga de la ruta. La pantalla cambia para demostrar la pantalla de la conexión.



Fuente: CSI 2130 Manual de Operación

Figura 4-2. Pantalla de la ruta de la carga

- 7- Presione las flechas para seleccionar la base de datos. Después, seleccione con las flechas el área correcta. Entonces, presione la llave **Select** del área para activar el área. Allí seleccione las rutas con las flechas.



Fuente: CSI 2130 Manual de Operación

Figura 4-3. Pantalla de selección de las Bases de Datos

- 8- Presione las flechas para seleccionar la localización del área y las rutas donde desea descargar. Presione la llave select.

- 9- La pantalla cambia para demostrar las rutas bajo esa área.
- 10- Presione las flechas para destacar la ruta que usted desea seleccionar.
- 11- Presione la tecla select. Esto pone una marca por la ruta que usted desea descargar.
- 12- Repita los pasos 11 y 12 para marcar y seleccionar todas las rutas que usted desea descargar.
- 13- Presione la tecla de carga de rutas.

Nota: Se podrán encontrar más detalles en el capítulo de Rutas del manual del equipo.

4.2.3.2. Captura de datos en terreno

El inspector se dirigirá al lugar físico donde se encuentran los equipos a inspeccionar (de acuerdo a la ruta que se está siguiendo), tomara las mediciones en cada equipo en los puntos correspondientes establecidos por la norma de referencia (ISO 10816-3).

Como muestra la imagen figura 4-4.



Fuente: http://www.tecnicaspredictivas.com/pag/ser/analisis_de_vibraciones_mecanicas.html

Figura 4-4. Inspector tomando mediciones en un punto en sentido horizontal.

4.2.3.3. Descarga de datos

Una vez realizadas las mediciones de los equipos en terreno, el inspector deberá cargar la información obtenida producto de la medición en terreno en software AMS Machinery de la siguiente manera:

Una vez que el USB o el Ethernet han sido establecidos:

Presione el botón Home para regresar a la pantalla de inicio del analizador.

- 1- Presione la tecla de función Route.
- 2- Presionar ALT.
- 3- Presione la tecla Route Mgnt. El analizador intentará establecer la conexión. Y una vez que lo logre, las palabras: "Status: Connected" aparecerán en pantalla.
- 4- Presione la función Dump Data. La pantalla de acceso aparecerá:



Fuente: CSI 2130 Manual de Operación

Figura 4-5. Pantalla de ingreso al sistema

- 5- Seleccione Recall Login para ingresar un código PIN y extraer la información, si es que esta ha sido almacenada en la memoria del analizador. Una vez que se haya cumplido con esto, será regresado a la pantalla Dump Data.
- 6- Usa las flechas para resaltar en la pantalla los datos que desea cargar. Esto marcará la información que usted quiere descargar.
- 7- Repita los pasos 6 y 7 hasta que toda la información que usted desea cargar haya sido destacada y seleccionada.
- 8- Presione la función de inicio de Data Dump.
- 9- De la pantalla Dump Data, seleccione la información que desee cargar, entonces presione el botón de inicio Dump Data. Entonces la información será cargada a una base de datos.
- 10- Cuando finalice de cargar la información (o cuando las rutas no puedan ser localizadas), presione Reset o el botón de retroceso para desconectarse.

4.2.3.4. Análisis de la información

Una vez cuando se disponga de toda la información deseada en el software AMS Machinery, el inspector revisara los datos de las mediciones por equipo (solo la magnitud de la ampliación de la vibración en velocidad ($\frac{mm}{s}$)), para determinar su estado de acuerdo a la siguiente tabla.

Tabla 4-4. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816.

velocidad (mm/s, rms)	Tipos de máquinas				
	clase I	clase II	clase III	clase IV	
0,18 a 0,28			A		
0,28 a 0,45					
0,45 a 0,71					
0,71 a 1,12					
1,12 a 1,8			B		
1,8 a 2,8					
2,8 a 4,5			C		
4,5 a 7,1					
7,1 a 11,2			D		
11,2 a 18					
18 a 28					

A Buena

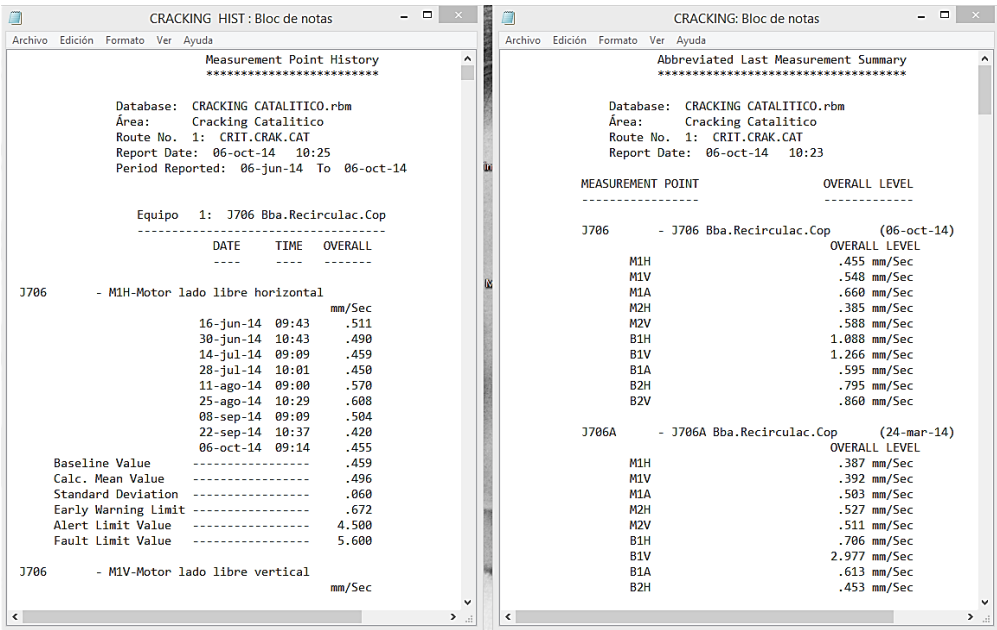
B Satisfactoria

C Inatisfactoria

D Inaceptable

Fuente: <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso10816.html>.

El software crea archivos del tipo Documento de texto (.txt), con la información de cada equipo medido por el inspector en terreno, entregando información sobre la medición actual y de mediciones históricas, lo que permite evaluar los resultados.

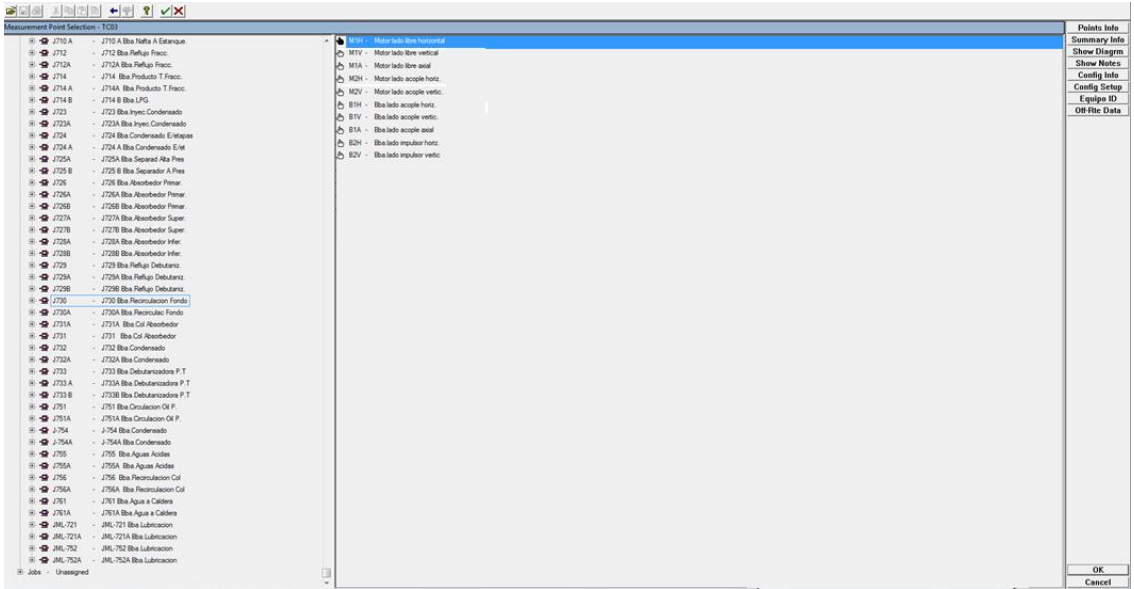


Fuente: Captura de pantalla a documentos de texto creados por software con mediciones

Figura 4-6. Documentos de texto (.txt)

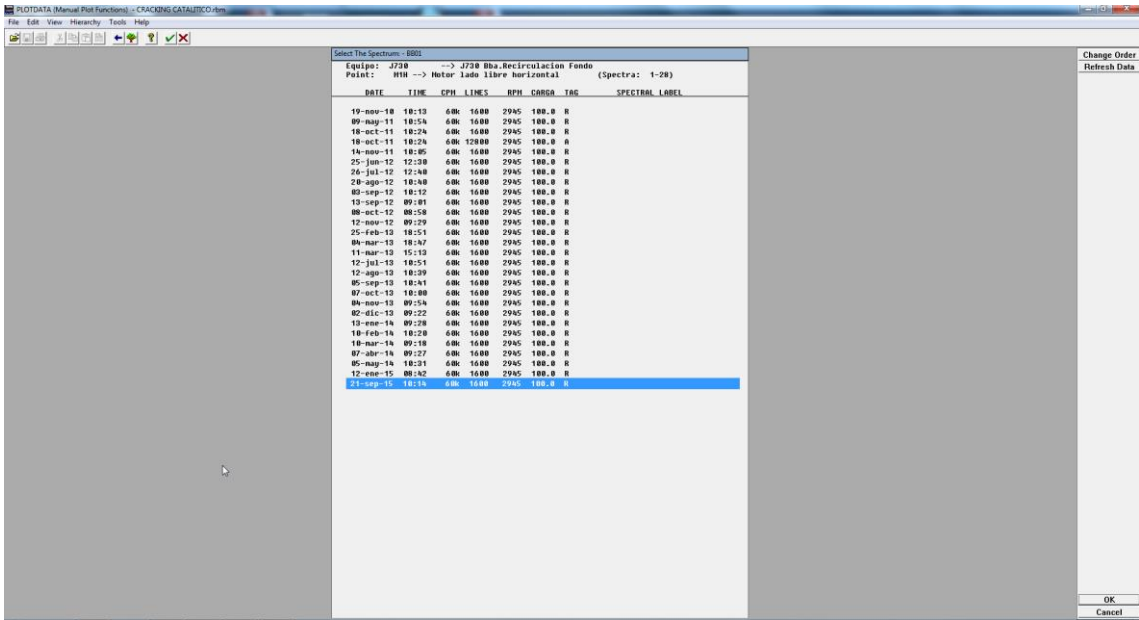
En caso de detectar vibraciones en equipos que excedan los criterios de aceptación, estos deberán ser analizados más a fondo por el ingeniero utilizando el software, para dar un diagnóstico sobre las fallas que están afectando el funcionamiento del equipo, y posteriormente informar la situación oportunamente(en un plazo no mayor a 24horas).

El software almacena la información sobre los monitoreos que se realizan, de manera que el analista pueda buscar por equipo y punto en específico como muestra figura 4-7, donde es necesario realizar una evaluación más a fondo. En la figura 4-8 aparece un cuadro que muestra la selección del espectro de acuerdo a fecha de medición. En la figura4-9 se muestra el espectro en frecuencia, donde es posible analizarlo para poder distinguir la fuente de vibración, a través del patrón de espectro saber qué tipo de falla puede ser. En las figuras 4-10 y 4-11 se pueden apreciar cuadros en los que se puede comparar el espectro en función del tiempo para analizar su comportamiento.



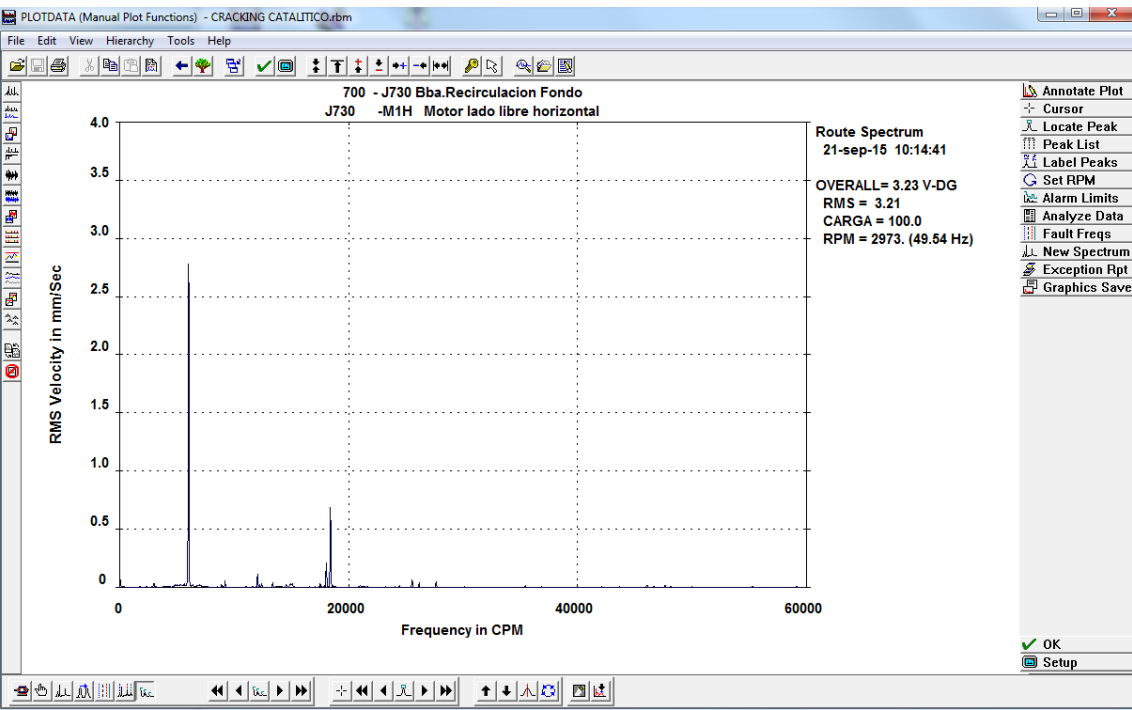
Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura 4-7. Selección del equipo y punto específico de la base de datos del software



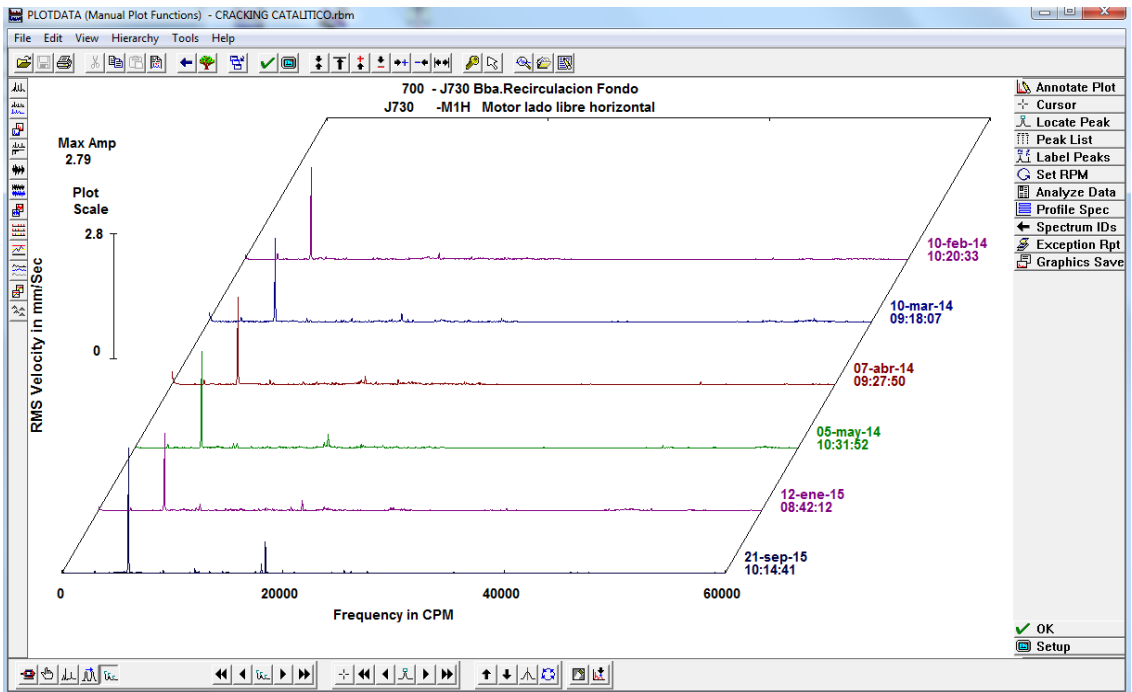
Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura 4-8. Selección de espectro a analizar



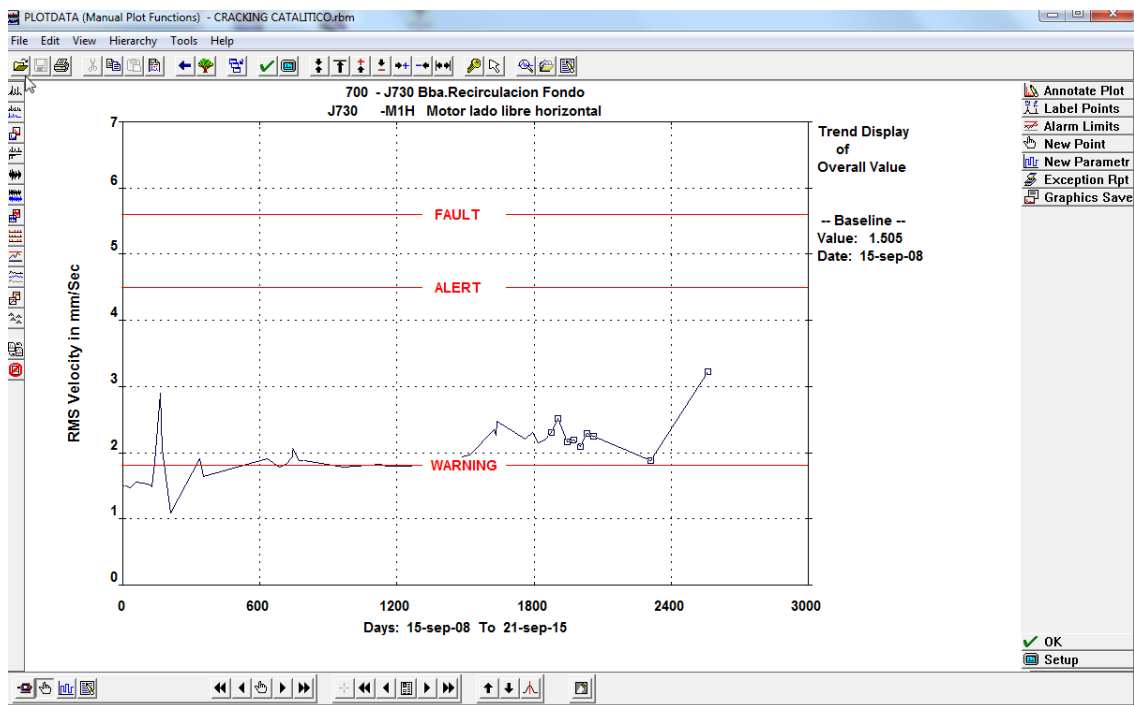
Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura4-9. Análisis del espectro en frecuencia



Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura 4-10. Análisis del espectro en frecuencia por fechas

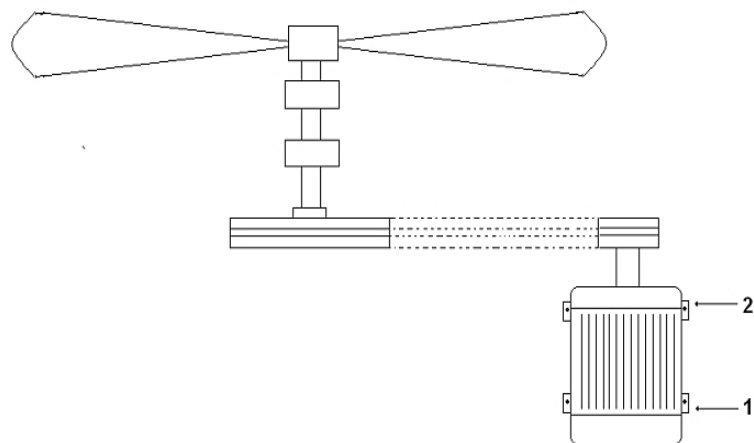


Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura 4-11. Diagrama de tendencia global de punto M1H

➤ Ejemplo práctico de una inspección con indicación

Se realizan las mediciones diarias y en la ruta un equipo se encuentra con problemas el Aero-Enfriador JCM 715-E. De acuerdo a disposición las mediciones son realizadas en 2 sectores del motor, las cuales se denominan 1 y 2.



Fuente: Elaboración propia, basado en datos de la inspección

Figura 4-12. Puntos de medición en motor conectado a hélice de Aero-Enfriador

- Datos obtenidos:

Tabla 4-5. Puntos de medición en motor conectado a hélice de Aero-Enfriador

PUNTO	Sentido H-V-A	Valor mm/s
M1	Horizontal (H)	1.4
	Vertical (V)	8.1
	Axial (A)	5.5
M2	Horizontal (H)	1.8
	Vertical (V)	5.2

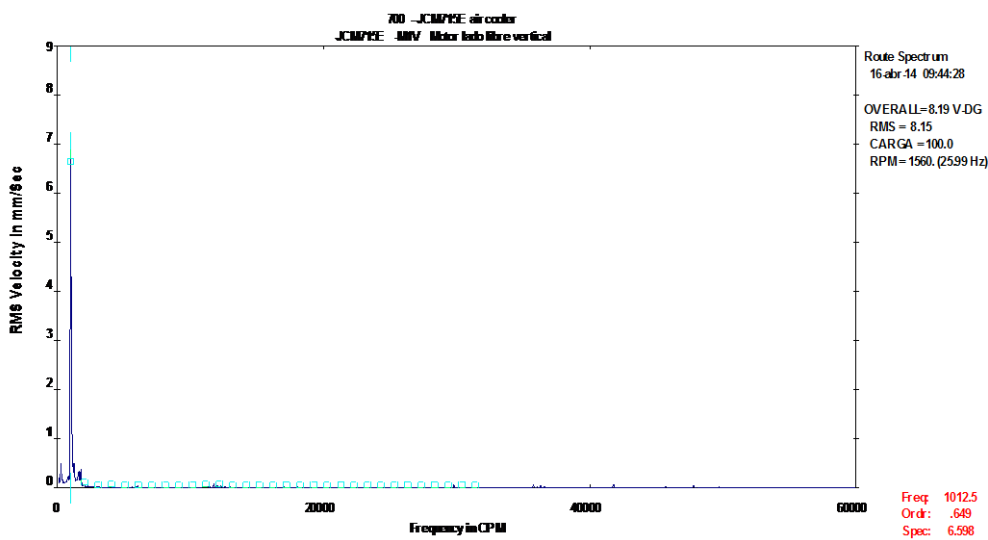
Fuente: Elaboración propia, basado en datos de la inspección

En el punto **M2** sentido **axial** no es posible realizar la medición porque la disposición en terreno no lo permite. Por ende la evaluación se realiza solo con los datos obtenidos.

- De acuerdo a Norma ISO 10816-3 Máquinas tamaño mediano con potencia entre 15 kW y 300 kW, máquinas eléctricas con altura de eje $160\text{mm} \leq H \leq 315\text{mm}$.

Comparando con la tabla de severidad el equipo se encuentra INACEPTABLE.

Se analizan los datos capturados con el software para poder determinar la naturaleza del problema y realizar un diagnóstico.



Fuente: Captura de pantalla software AMS Machinery Manager

Figura 4-13. Espectro en frecuencia M1V lado libre vertical

Síntomas: La frecuencia que predomina es la frecuencia del paso de las aspas.

Diagnóstico: Flujo turbulento, frecuencia de las aspas del ventilador y síntoma de rodamiento dañado.

Recomendaciones:

- Verificar la salida del aire por las celdas de enfriamiento, además verificar que el GAP sea equidistante entre extremos de las palas y la tobera.
- Efectuar medición de la fleximetria del eje del ventilador, corregir de ser necesario.
- Cambiar rodamientos en el motor eléctrico

Se genera un informe para reportar a la brevedad el estado del equipo.

4.2.3.5. Confección de informes

Todo el trabajo que se realice tiene que ser informado, por lo que el ingeniero analista se encargara de informar diariamente los trabajos que se realizan, los trabajos realizados al término de cada mes, y también informar los equipos que presenten alguna condición inusual de funcionamiento (el mismo día del monitoreo).

Para realizar el informe diario se deberá considerar lo siguiente:

Antecedentes generales: este ítem deberá contener información como el número de reporte, la fecha de emisión, el inspector que realiza el monitoreo, cantidad de equipos monitoreados, el instrumento que se utiliza y la norma de referencia.

Resultado del monitoreo: este ítem deberá contener información sobre resultados obtenidos con el monitoreo a los equipos. Para cada equipo tiene que indicar su TAG, la criticidad del equipo, su estado de medición (medido o no medido), el nivel Vibracional en que se encuentra y alguna observación relevante.

En la parte final del informe se tiene que informar de todas maneras el total de equipos medidos y no medidos, el criterio utilizado para definir su estado Vibracional, y los responsables.

INFORME DIARIO DE MONITOREO DE VIBRACIONES EQUIPOS ROTATORIOS					INF DIA
Reporte N° XXX			FECHA: DIA-MES-AÑO		
INSPECTOR: XXX			EQUIPOS MONITOREADOS: XX		
Instrumento Utilizado: CSI 2130			Norma: ISO10816-3		
RESULTADOS DEL MONITOREO DE VIBRACIONES					
TAG	CRITICIDAD	ESTADO MEDICION	NIVEL VIBRACIONAL	Observaciones	REPORTE
OBSERVACIONES:					
Total Equipos li		0		Total Eq Medidos: 0	
				EQUIPOS NO MEDIDOS: 0	
Criterios		De 0-1,4 mm/s		Entre 3,5-4,5 mm/s	
		Aceptable		Insatisfactorio	
		0		0	
NOMBRE Y CARGO		Inspector Vibraciones		Ingeniero Analista	
FECHA					
FIRMA					

Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 4-14. Formato para informe diario de monitoreo

Informe para equipo. En caso de informar algún equipo con altos niveles de vibración, o alguna condición anormal se deberá considerar lo siguiente:

Antecedentes de servicio: ítem que deberá indicar la planta, área, tag del equipo, el número de informe correspondiente, su fecha, la norma de referencia y la clasificación del equipo según la norma, el instrumento utilizado y las RPM de funcionamiento del motor del equipo.

Antecedentes de medición: este ítem contiene los valores de la medición, se indica los síntomas detectados y se entrega un diagnóstico del equipo y alguna recomendación concluyendo con el estado Vibracional en que se encuentra el equipo.

Esquema de puntos de medición: en este ítem se muestra un esquema indicando los puntos donde se toman las mediciones.

Espectro de vibración: en este ítem se muestra un dibujo o figura del espectro producto de la medición.

Para finalizar el informe se indica nuevamente la norma de referencia con los criterios de evaluación, observaciones generales de ser necesaria alguna otra, y los responsables del trabajo.

1. ANTECEDENTES SERVICIO.				
Area : 700		Equipo: XXX		Fecha: Dia-Mes-Año
Planta: CRACKING		Informe N°: AÑO.XX		
Norma: ISO 10816-3		Clasificación Equipo : Categoría X		
Instrumento : CSI 2130		Datos motor: XX RPM		
2. Antecedentes de medición				
VALORES MEDIDOS				COMENTARIOS
PTO.	SENT H-V-A	VEL mm/s anterior	VEL mm/s actual	Sintomas:
M1	H			Diagnóstico:
	V			Recomendaciones:
	A			1. xxxx.
M2	H			2. xxxxx.
	V			3. Etc.
	A			CONCLUSION: Severidad Vibracional según Norma:
B1	H			Bueno. ☐
	V			Satisfactorio. ☐
	A			Insatisfactorio. ☐
B2	H			Inaceptable ☐
	V			
	A			
	H			
	V			
	A			
3. ESQUEMA DE PUNTOS DE MEDICION				
4. ESPECTRO DE VIBRACIONES				
5. NORMA DE REFERENCIA				
DE 0.71 - 1.4 mm/s		BUENO	ENTRE 3.5 - 4.5 mm/s	INSATISFACTORIO
DE 1.4 - 3.5 mm/s		SATISFACTORIO	MAJOR A 4.5 mm/s	INACEPTABLE
OBSERVACIONES GENERALES				
Firmas Responsable				
NOMBRE				
FECHA				
FIRMA				

Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 4-15. Formato para informar equipo con observaciones

Informe mensual. Este informe deberá contener un resumen de todo el trabajo que se realizó durante el mes, conteniendo mediciones anteriores y actuales.

Antecedentes generales: este ítem deberá contener información como el la fecha de emisión para identificar el mes correspondiente, el responsable, cantidad de equipos monitoreados, el instrumento que se utiliza y la norma de referencia.

Resultados del monitoreo: este ítem debe indicar la información sobre las mediciones o monitoreo, cuando, donde, a que equipos? Estado Vibracional del equipo, medición actual y anterior de cada punto, y también indicar si fue reportado en alguna instancia exponiendo el número de reporte correspondiente.

En la parte final del informe se indica un total de los equipos de acuerdo a su estado Vibracional y observaciones generales de ser necesario.

INFORME MENSUAL DE MONITOREO DE VIBRACIONES EQUIPOS ROTATORIOS									INF MES
INFORME N°:					FECHA:				
INSPECTOR:					EQUIPOS MONITOREADOS:				
Equipo Utilizado: CSI 2130					Norma: ISO10816-3				
RESULTADOS DEL MONITOREO DE VIBRACIONES									
TAG	Fecha Medición de Ruta	NIVEL VIBRACIONAL	RUTA	Fecha Ultima Medición Equipo	Valor global actual punto mas alto	Valor global anterior punto mas alto	Identificación Punto Anterior mas alto	Identificación Punto mas alto	REPORTES
OBSERVACIONES GENERALES:									
TOTAL DE ACUERDO A CRITERIOS		Normal	0		Satisfactorio	0			
		Insatisfactorio	0		Inaceptable	0			

Fuente: Elaboración propia, basado en requerimientos del proyecto

Figura 4-16. Formato para informe mensual de monitoreo

Nota: como los colores que indica la norma en la tabla 4-4 para la condición “Insatisfactorio” y “Satisfactorio” son similares, para efecto de evaluación en estos informes se utiliza el color blanco para la condición Satisfactorio y color amarillo para Insatisfactorio.

4.2.4. Norma ISO 10816

“Evaluación de Máquinas- Vibraciones y Medición de partes no rotativas”

Esta norma entrega las guías específicas para la evaluación de severidad de vibración medidas en apoyos, montajes o soportes de máquinas industriales cuando estas medidas se realizan In situ.

Consta de 6 partes:

- **ISO 10816- 1:** Reglas generales.
- **ISO 10816- 2:** Turbina de gas y Generadores sobre 50 MW con velocidades de operación de: 1500 rpm, 1800 rpm, 3000 rpm y 3600 rpm.
- **ISO 10816- 3:** Máquinas industriales con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 rpm y 15000 rpm, medidas In Situ.
- **ISO 10816- 4:** para Turbinas a Gas.
- **ISO 10816- 5:** Máquinas con potencia hidráulica, plantas generadoras y de bombeo.

- **ISO 10816- 6:** Corresponden a máquinas recíprocas con potencia por sobre a 100 kW.

Usaremos la norma ISO 10816 en su parte 3, pues está dentro del rango que nosotros necesitamos evaluar. Las máquinas que entran en esta clasificación de la norma incluyen lo siguiente:

- Turbinas a vapor con potencia sobre los 50 MW;
- Partes de turbinas a vapor con potencia mayor que 50MW y velocidades debajo de 1500 r/min o sobre 3600 r/min (no incluidas en ISO 10816-2);
- Compresores.
- Bombas centrífugas, con flujo mixto o axial.
- Motores eléctricos de cualquier tipo.
- Turbinas y Ventiladores.
- Máquinas acopladas a máquinas recíprocas.
- Compresores de desplazamiento rotatorio positivo.
- Bombas recíprocas.

Son excluidas de esta parte de la norma:

- Apoyos de Generadores de turbinas a vapor con potencias mayores que 50 MW y velocidades de 1500 r/min, 1800 r/min, 3000 r/min, o 3600 r/min.
- Máquinas de turbinas a vapor con potencia mayor a 3 MW.
- Partes de máquinas plantas generadoras y bombas con potencia hidráulica.
- Motobombas sumergidas.
- Turbinas de viento.
- Turbina a gas industrial con potencia hasta 3MW.
- Generadores, excepto cuando se usa un generador de potencia hidráulica y bombas.

4.2.4.1. Procedimiento de medición y condiciones de operación

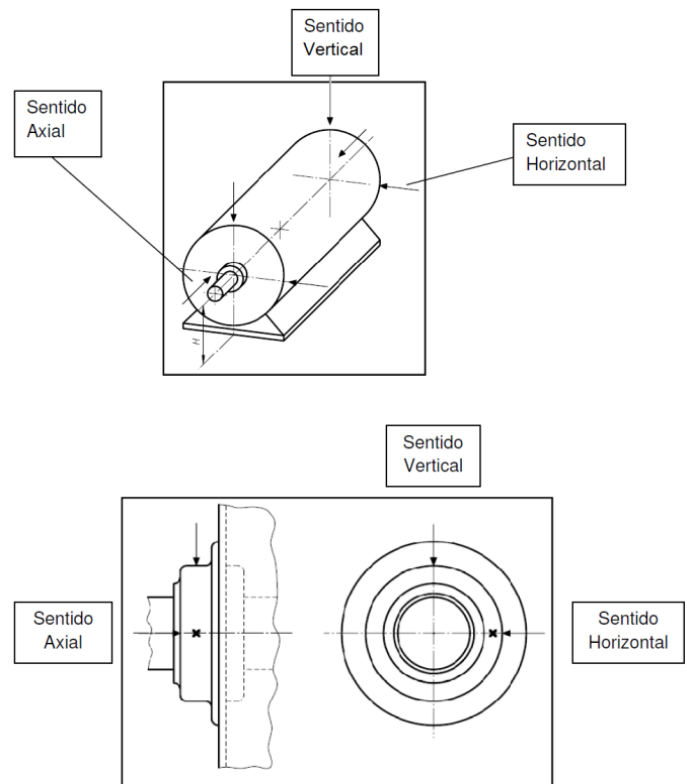
El equipo de medición debe ser capaz de medir una amplitud de banda entre 10 - 1000 Hz, dependiendo del criterio de la vibración.

Debe precaverse que agentes o factores externos o ambientales, influyan en la medición, como por ejemplo:

- Campos magnéticos.
- Campos sonoros.
- Variaciones de potencia.

- Largo del cable del transductor.
- Orientación del transductor.

4.2.4.2. Puntos de medición



Fuente: Norma ISO 10816-3.

Figura 4-17. Sentidos de medición

Los sentidos se toman en cuenta de acuerdo al eje de rotación de la maquina.

4.2.4.3. Clasificación de máquinas

La Severidad Vibratoria será clasificada de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Tipo de máquina;
- Potencia o altura del eje;
- Sistema de soporte.

- Clasificación de acuerdo al tipo de máquina, régimen de potencia, y altura del eje.

- **Grupo 1:** Máquinas grandes con potencia nominal sobre 300kW; máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315\text{mm}$.
Estas máquinas normalmente tienen bases en sus apoyos. El rango de operación o velocidades nominales es amplio y está en rangos de 120 r/min – 15000 r/min.
- **Grupo 2:** Máquinas tamaño mediano con potencia entre 15 kW y 300 kW, máquinas eléctricas con altura de eje $160\text{mm} \leq H \leq 315\text{mm}$.
Estas máquinas normalmente tienen elementos de apoyo rodante y velocidades de operación sobre 600 r /min.
- **Grupo 3:** Bombas con impulsor multipaletas, motor separado (centrífugo de flujo mixto o axial) con potencia sobre 15kW.
Las máquinas de este grupo pueden tener elemento de apoyo rodante.
- **Grupo 4:** Bombas con impulsor multipaletas y con impulsor integrado (centrífugo, flujo mixto o axial) con potencia sobre 15kW.
Las máquinas de este grupo en su mayoría podrían tener elementos de eslabón o rodantes en sus apoyos.

➤ Clasificación de acuerdo al tipo de soporte

Estos pueden ser:

a) Flexibles

b) Rígidos

Esto dependerá de la relación entre la máquina y los soportes o montajes que la alojan, se determina a través de análisis; si la frecuencia natural del sistema maquina-soporte es mayor que la frecuencia de excitación en esa dirección entonces el sistema se considerará rígido, de lo contrario es flexible.

$F_{\text{Natural}} > F_{\text{Excitación}} \longrightarrow \text{Rígido.}$

$F_{\text{Natural}} < F_{\text{Excitación}} \longrightarrow \text{Flexible.}$

Para determinar a cual tipo de soporte corresponde, deberá calcularse o realizarse algún test para medirlo.

4.2.4.4. Evaluación

Existen 2 criterios de evaluación para la severidad de vibración.

I) Criterio I: Magnitud de Vibración.

Este criterio define los límites de magnitud de vibración, a través de zonas.

Zonas de Evaluación

Permite evaluar cualitativamente la vibración según el tipo de máquina. Estas son:

Zona A: Máquinas recién puestas en marcha.

Zona B: Máquinas con vibración en una zona que normalmente considerada aceptable pero no tienen restricciones para máquinas con operaciones de larga duración.

Zona C: Las máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas insatisfactorias para operaciones continuas. Generalmente, la máquina podría estar operando por periodos limitados en estas condiciones hasta que surja la oportunidad de aplicar una acción correctiva.

Zona D: Los valores de vibración en esta zona son normalmente considerados suficientemente severos, lo que podría causar peligro a la máquina.

II) Criterio II: Cambio en la Magnitud de Vibración.

Este criterio especifica las bases del cambio de amplitud de vibración que ocurre en condiciones de operación rígido, estas variaciones podrían interpretar pequeños cambios que incluyen variaciones en la potencia de la máquina o condiciones de operaciones.

En resumen se vería como sigue:

Tabla 4-6. Grupo 1; Máquinas grandes con potencia nominal sobre 300kW; máquinas eléctricas con altura de eje $H \geq 315\text{mm}$

Tipo de Soporte	Zona limite	RMS Desplazamiento (μm)	RMS Velocidad (mm/s)
Rígido	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Flexible	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

Fuente: Norma ISO 10816-3

Tabla 4-7. Grupo 2; Máquinas tamaño mediano con potencia entre 15 kW y 300kw, máquinas eléctricas con altura de eje $160\text{mm} \leq H \leq 315\text{mm}$

Tipo de Soporte	Zona limite	Desplazamiento RMS- μm	Velocidad RMS- mm/s
Rígido	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
Flexible	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1

Fuente: Norma ISO 10816-3

Tabla 4-8. Grupo 3; Bombas con impulsor multipaletas, motor separado (centrífugo de flujo mixto o axial) con potencia sobre 15kW.

Tipo de Soporte	Zona limite	RMS Desplazamiento (μm)	RMS Velocidad (mm/s)
Rígido	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1
Flexible	A/B	28	3,5
	B/C	56	7,1
	C/D	90	11,0

Fuente: Norma ISO 10816-3

Tabla 4-9. Grupo 4; Bombas con impulsor multipaletas y con impulsor integrado (centrifugo, flujo mixto o axial) con potencia superior a 15kW

Tipo de Soporte	Zona limite	RMS Desplazamiento (μm)	RMS Velocidad (mm/s)
Rígido	A/B	11	1,4
	B/C	22	2,8
	C/D	36	4,5
Flexible	A/B	18	2,3
	B/C	36	4,5
	C/D	56	7,1

Fuente: Norma ISO 10816-3

Nota: Los valores entregados corresponden a valores RMS.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La confiabilidad y la disponibilidad de una planta industrial o de un edificio dependen, en primer lugar, de su diseño y de la calidad de su montaje. Si se trata de un diseño robusto y fiable, y la planta ha sido construida siguiendo fielmente su diseño y utilizando las mejores técnicas disponibles para la ejecución, depende en segundo lugar de la forma y buenas costumbres del personal de producción, el personal que opera las instalaciones.

En tercer y último lugar, fiabilidad y disponibilidad dependen del mantenimiento que se realice. Si el mantenimiento es básicamente predictivo, atendiendo sobre todo los problemas antes que se presenten, es muy posible que a corto plazo esta política sea rentable. Debemos imaginar el mantenimiento como un gran depósito. Si realizamos un buen mantenimiento preventivo, tendremos el depósito siempre lleno. Si no hacemos nada, el depósito se va vaciando, y puede llegar un momento en el que el depósito, la reserva de mantenimiento, se haya agotado por completo, siendo más rentable adquirir un nuevo equipo o incluso construir una nueva planta que atender todas las reparaciones que van surgiendo.

Debemos tener en cuenta que lo que hagamos en mantenimiento no tiene su consecuencia de manera inmediata, sino que los efectos de las acciones que tomamos se revelan con seis meses o con un año de retraso. Hoy pagamos los errores de ayer, o disfrutamos de los aciertos.

La ocasión perfecta para diseñar un buen mantenimiento programado que haga que la disponibilidad y la fiabilidad de una planta industrial sea muy alta, es durante la construcción de ésta. Cuando la construcción ha finalizado y la planta es entregada al propietario para su explotación comercial, el plan de mantenimiento debe estar ya diseñado, y debe ponerse en marcha desde el primer día que la planta entra en operación. Perder esa oportunidad significa renunciar a que la mayor parte del mantenimiento sea programado, y caer en el error (un grave error de consecuencias económicas nefastas) de que sean las averías las que dirijan la actividad del departamento de mantenimiento.

Es muy normal prestar mucha importancia al mantenimiento de los equipos principales, y no preocuparse en la misma medida de todos los equipos adicionales o auxiliares. Desde luego es otro grave error, pues una simple bomba de refrigeración o un simple transmisor de presión pueden parar una planta y ocasionar un problema tan grave como un fallo en el equipo de producción más costoso que tenga la instalación. Conviene, pues, prestar la atención debida no sólo a los equipos más costosos económicamente, sino a todos aquellos capaces de provocar fallos críticos.

BIBLIOGRAFIA

Norma ISO 10816 – Vibración mecánica. - Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas. 2009.

SINAIS Ingeniería – Curso de Vibraciones. [en línea][Consulta: agosto de 2014]. Disponible en: <http://www.sinais.es/>

MILLAI M., David. Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico A-MAQ2005. +56986993853, email: millai.d92@gmail.com

ENAP REFINERÍAS S.A Memoria Anual 2013. [en línea][Consulta: agosto de 2013]. Disponible en: <http://www.enap.cl/>

GARCÍA Garrido, Santiago. Organización y gestión integral de mantenimiento –. Editor Ediciones Díaz de Santos, 2010. ISBN 9788479785772 N.º de páginas 320 páginas.

EMERSON Process Management. Manual de Operación - CSI 2130. en línea][Consulta: agosto de 2014]. Disponible en: <http://www.emerson.com/en-us/automation-solutions>

ANEXO A: PUNTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN

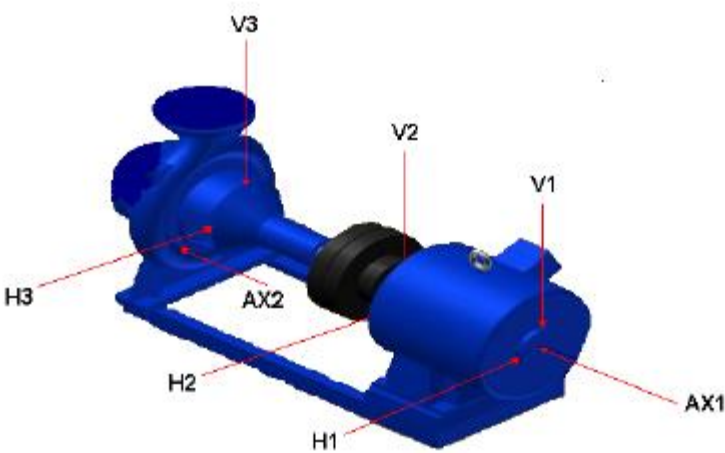


Figura A-1

CATEGORÍAS DE PATOLOGÍAS CLASIFICADAS

DESBALANCEO

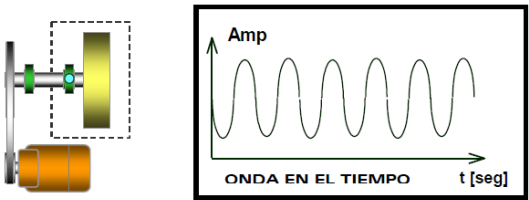


Figura A-2

Estático: Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro.

El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1 X RPS del rotor.

Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en un sólo plano (en el centro de gravedad del rotor) con la masa adecuada y en la posición angular calculada con un equipo de balanceo. Debe consultar a un experto en balanceo de máquinas.

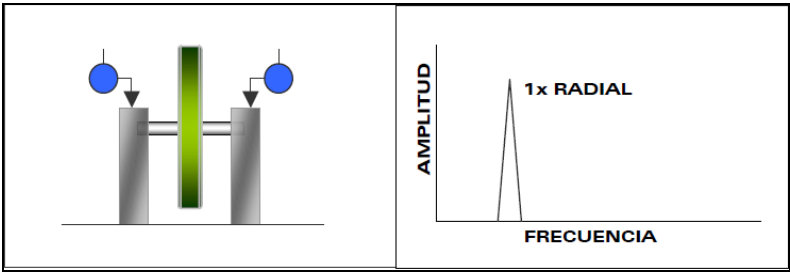


Figura A-3

Dinámico: El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor.

El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1 X RPS del rotor.

Se recomienda para corregir la falla balancear el rotor en DOS PLANOS con las masas adecuadas y en las posiciones angulares calculadas con un equipo de balanceo dinámico. Consulte a un experto en balanceo de rotores.

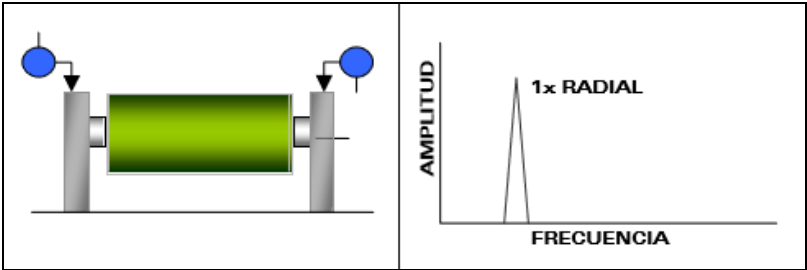


Figura A-4

Rotor colgante: Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje

El espectro presenta vibración dominante a 1X RPS del rotor, muy notoria en dirección AXIAL y RADIAL.

Para corregir la falla, primero debe verificarse que el rotor NO TENGA EXCENRICIDAD NI QUE EL EJE ESTÉ DOBLADO. Luego debe realizarse el balanceo adecuado. Consulte a un experto en balanceo de máquinas.

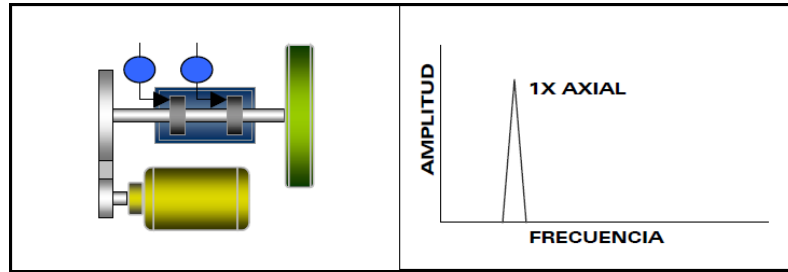


Figura A-5

DESALINEACIÓN

Angular: Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos.

Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1X RPS y 2X RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople. También se presenta 3X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople.

Para corregirlo, el conjunto motor-rotor deben alinearse. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

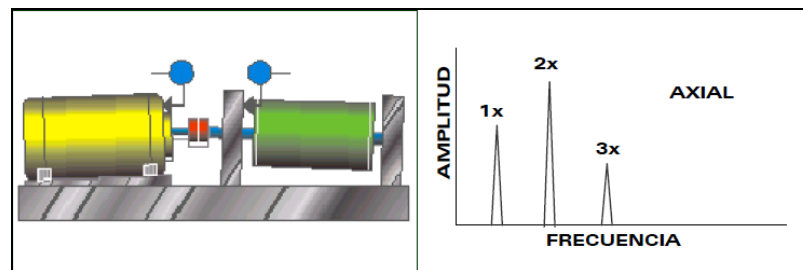


Figura A-6

Paralela: Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales.

Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2X RPS, predominante, y a 1X RPS, con desfase de 180 grados a través del acople. Cuando aumenta la severidad, genera picos en armónicos superiores (4X, 8X).

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño. Debe emplearse un equipo de alineación adecuado.

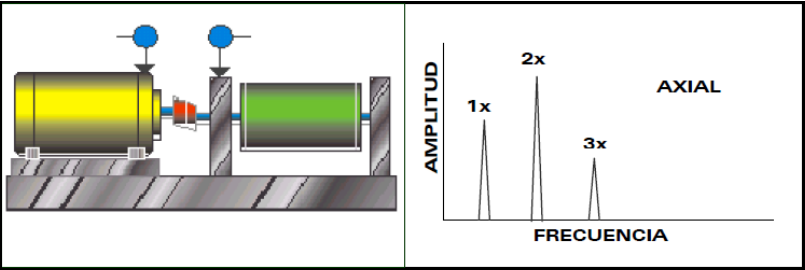


Figura A-7

Entre chumaceras: En una máquina con transmisión de poleas, la mala posición de las chumaceras puede evitar que el eje se acomode correctamente, lo cual genera vibraciones anormales en sentido axial y radial.

Excitación del pico representativo de la velocidad (1X RPS), especialmente en sentido axial.

Es necesario hacer una verificación de que las chumaceras queden completamente paralelas entre sí.

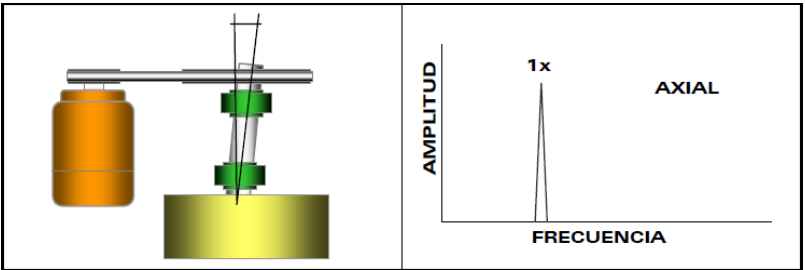


Figura A-8

HOLGURA MECÁNICA EJE-AGUJERO

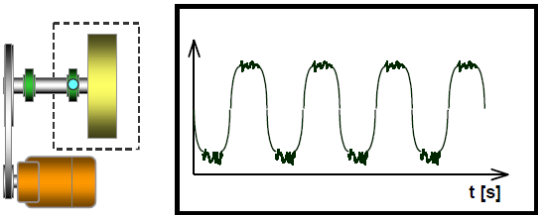


Figura A-9

Holgura eje-agujero: Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo.

La falla genera múltiples armónicos y sub-armónicos de 1X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X,... Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre sí.

Se recomienda verificar la colocación de los manguitos y los juegos eje-agujero cercanos al punto de medición. Igualmente, los ajustes de rotor-eje.

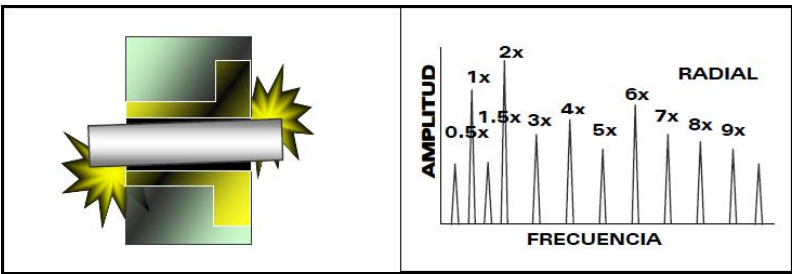


Figura A-10

SOLTURA ESTRUCTURAL

Soltura estructural: Ablandamiento o desplazamiento del pié de la máquina, por holgura en los pernos de la base o por deterioro de los componentes de la sujeción.

El espectro presenta vibración a 1X RPS en la base de la máquina con desfase a 180 grados entre los elementos sujetos en el anclaje. Altamente direccional en la dirección de la sujeción.

Se recomienda primero revisar el estado de fatiga del pié de máquina (rajaduras, corrosión). Luego debe verificarse el estado de los sujetadores y por último el estado de la cimentación.

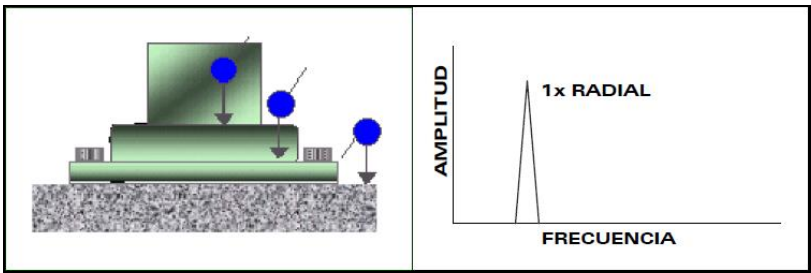


Figura A-11

EXCENTRICIDAD

Rotor excéntrico: Fácilmente confundible con desbalanceo. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje.

La mayor vibración ocurre a 1 X RPS del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores.

Para corregir la falla, el rotor debe ser re ensamblado o reemplazado. (Tratar de balancear el rotor excéntrico resulta en una disminución del nivel de vibración, en una dirección, y un aumento considerable en la otra).

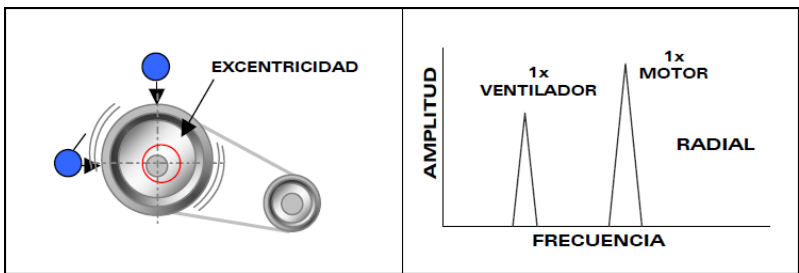


Figura A-12

ROTOR O EJE PANDEADO

Pandeo: Más común en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje. Genera Vibración AXIAL alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1X RPS si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2X RPS si el pandeo está cerca del rodamiento. Para corregir la falla, el eje debe rectificarse o cambiarse.

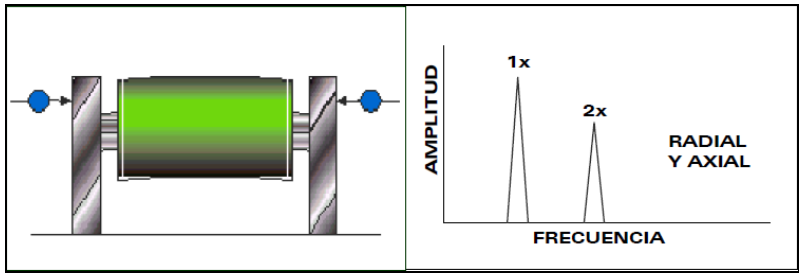


Figura A-13

RESONANCIAS Y PULSACIONES

Resonancia: Ocurre cuando la velocidad de una fuerza conducida iguala la frecuencia natural de una estructura o una parte de ella.

Puede causar dramáticas amplificaciones de la amplitud lo que puede terminar en fallas prematuras y posiblemente catastróficas. Presenta un cambio de fase de 90° por resonancia y 180° cuando lo sobrepasa.

Se requieren cambios periódicos de localización de la frecuencia natural.

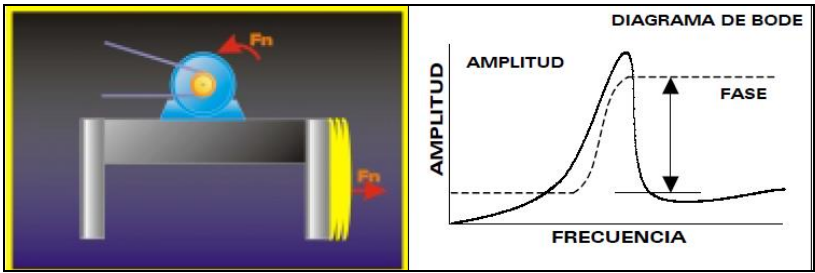


Figura A-14

Pulsaciones: Sucede cuando una fuente de vibración interfiere con otra. Generalmente se produce por dos máquinas cercanas que trabajan casi a la misma velocidad.

El espectro muestra dos picos con frecuencias similares. La diferencia de estas da como resultado una pulsación. La ilustración izquierda representa estas frecuencias en el dominio del tiempo y la suma de ambas.

Para solucionar el problema se deben aislar estructuralmente las máquinas en conflicto.

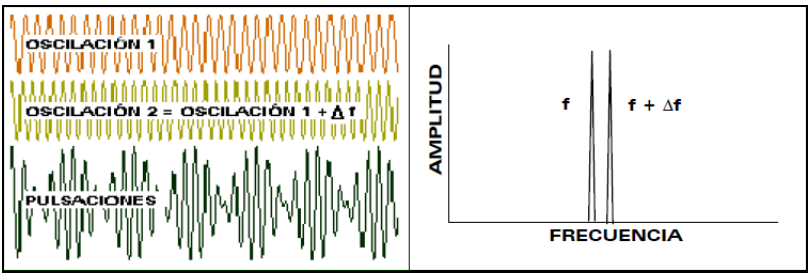


Figura A-15

FALLAS EN ENGRANAJES

Estado normal: Espectro característico de un engranaje en estado normal (esta no es una patología).

Espectro característico del engrane: El espectro mostrará armónicos 1 X y 2 X RPS del piñón conductor y de la rueda conducida. Adicionalmente, mostrará bandas laterales alrededor de la Frecuencia de Engrane GMF (Gear Mesh Frequency).

El engranaje se encuentra en buen estado si estos picos de vibración se encuentran en niveles relativamente bajos.

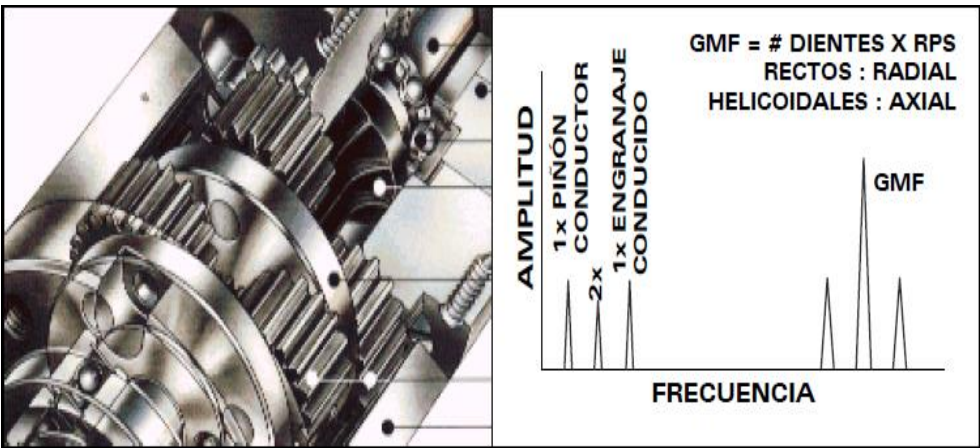


Figura A-16

Desgaste en diente: Ocurre por operación más allá del tiempo de vida del engranaje, contaminación de la grasa lubricante, elementos extraños circulando en la caja del engrane o montaje erróneo.

Su espectro se caracteriza por la aparición de bandeamiento lateral alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engrane defectuoso. El espaciado de las bandas laterales es 1 X RPS del engrane defectuoso. Si el desgaste es avanzado, hay sobreexcitación de la GMF.

Para solucionar el problema debe cambiar o rectificar el engranaje (sólo si este no está sometido a grandes cargas y la urgencia lo amerita). Si el desgaste es prematuro inspeccione desalineación en el eje o excentricidad en el engranaje.

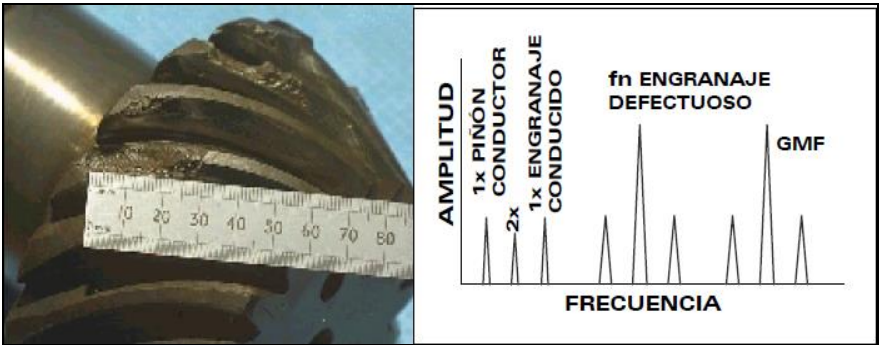


Figura A-17

Sobrecarga en engrane: Todos los dientes están recibiendo sobrecarga continúa.

La amplitud de la GMF es altamente excitada, pero esto no suele representar un problema si las bandas a su alrededor se mantienen bajas. Este análisis es efectivo si se realiza siempre a la máxima carga de operación de la máquina.

Debe buscarse algún elemento que esté aumentando el torque transmitido más allá de lo normal (rodamiento o buje defectuoso, fallas en lubricación y anomalías en general en el rotor conducido que dificulten el movimiento).

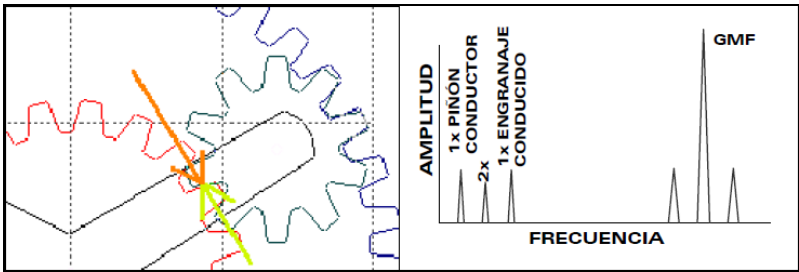


Figura A-18

Excentricidad y/o backlash: La excentricidad ocurre cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación. El backlash se produce cuando, al terminar el contacto entre dos dientes, los dos siguientes no entran inmediatamente en contacto.

El espectro muestra aumento considerable de las bandas laterales alrededor de la GMF y fn. El engranaje con problemas es indicado por el espaciado de las bandas laterales. Si el problema es backlash, la GMF debe disminuir con el aumento de la carga.

Para corregir el problema, el engranaje debe ser re ensamblado o reemplazado si se encuentran problemas de manufactura.

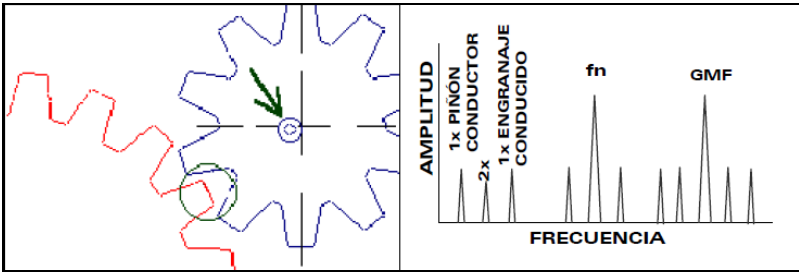


Figura A-19

Engrane desalineado: Se presenta cuando las ruedas dentadas fueron ensambladas con errores de alineación o cuando sus ejes no están paralelos.

Casi siempre se excitan los armónicos de 2do o mayor orden de la GMF, con bandeamientos laterales a la 1 X RPS del piñón o la rueda. 2 X GMF y 3 X GMF dominan el espectro.

El conjunto debe ser realineado para corregir el problema.

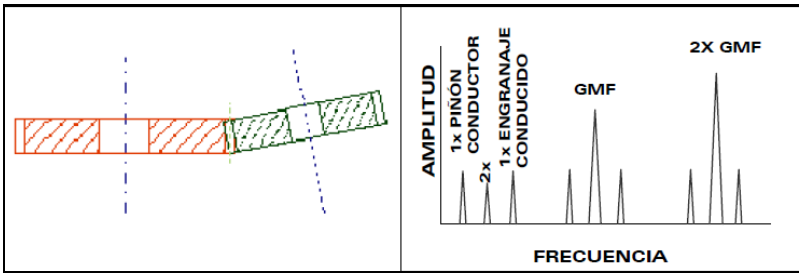


Figura A-20

Problemas de hunting: Problemas leves en la manufactura o manipulación indebida producen que, cuando dos dientes específicos del piñón y el engranaje conducido se encuentren, generen vibraciones de choque.

Esta falla genera altas vibraciones a bajas frecuencias por debajo de los 10Hz. La máxima vibración ocurre cada 10 o 20 revoluciones del piñón dependiendo de la fórmula de fHT (y suele escucharse como un gruñido).

Si se determina que el problema es severo, deben reemplazarse el par de engranajes y debe tenerse más precaución en la manipulación.

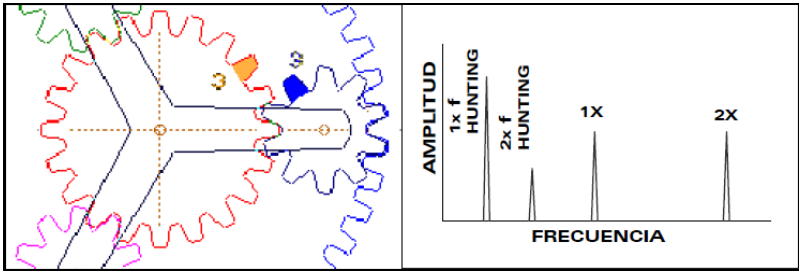


Figura A-21

BANDAS

Distensión: Ocurre por sobrepaso de la vida útil de la banda, o por desgaste excesivo de la misma.

Las frecuencias de bandas siempre están por debajo de la frecuencia del motor o máquina conducida. Normalmente se encuentran cuatro picos y generalmente predomina el de 2x frecuencia de banda. Tienen amplitudes inestables.

Para corregir el problema, si la banda no presenta demasiado desgaste intente tensionarla, de lo contrario reemplácela.

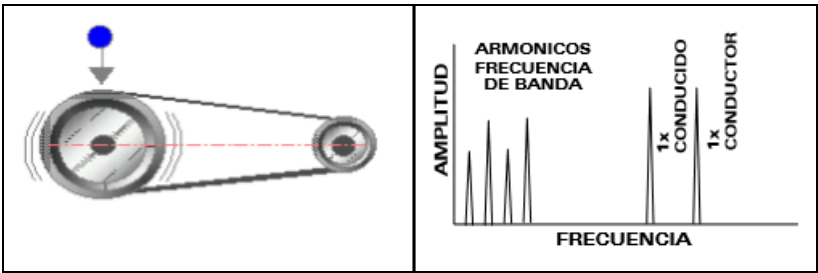


Figura A-22

Desalineación en poleas: Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente.

Produce alta vibración axial a 1x RPS de la conductora o la conducida, generalmente la conducida. La buena medida de las amplitudes de las vibraciones depende de donde sean tomados los datos.

Para solucionar el problema deben alinearse las poleas tanto angular como paralelamente.

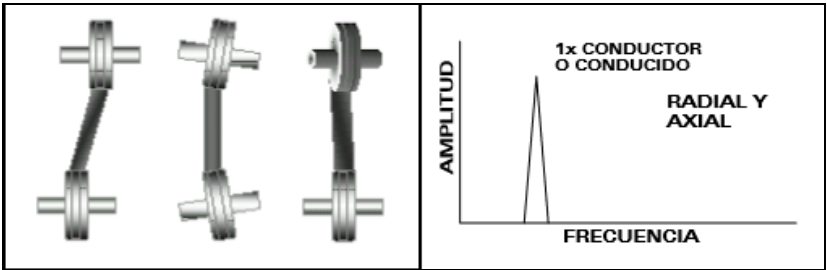


Figura A-23

Excentricidad de poleas: Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea.

Produce alta vibración a 1x RPS de la polea excéntrica. Su amplitud está por encima de las amplitudes de las frecuencias de las bandas.

Aunque es posible balancear poleas gracias a la adición de pesas, la excentricidad seguirá induciendo vibración y esfuerzos de fatiga reversible. Se recomienda cambiarse la polea excéntrica.

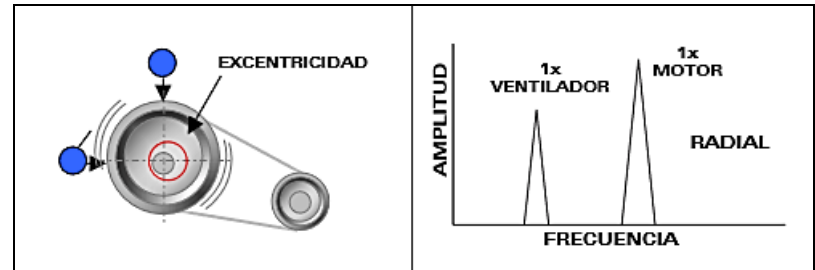


Figura A-24

Resonancia banda: Sucede si la frecuencia natural de la banda coincide o se aproxima a las RPS del motor o de la máquina conducida.

El espectro muestra altas amplitudes de la frecuencia de resonancia y la frecuencia de excitación de banda, siendo la frecuencia de resonancia la predominante.

La frecuencia natural puede ser alterada cambiando la tensión de la banda o su longitud.

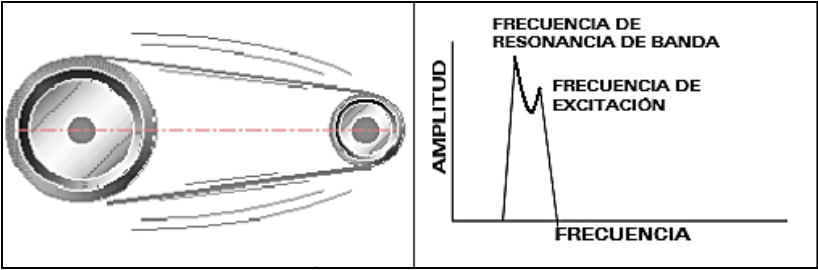


Figura A-25

FLUJO DE LÍQUIDOS

Frecuencia de aspas (L): Frecuencia a la cual, cada aspa pasa por un punto de la carcasa. Producida por obstrucciones, cambios abruptos de direcciones o desgastes de juntas. La BPF (frecuencia de paso de aspas) es excitada en sus primeros dos armónicos con bandeamientos laterales. La BPF es igual al número de aspas por la frecuencia. La BPF algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones. En caso de aumentos en la BFP deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales en la descarga de la bomba.

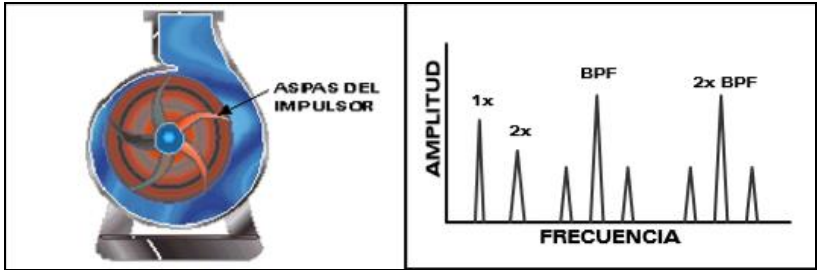


Figura A-26

Cavitación: Es la entrada de aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba. Ocurre cuando la presión de fluido es menor que la presión de vapor a esta temperatura. La cavitación causará erosión a las partes internas de la bomba. El espectro muestra una vibración caótica que se presenta a altas frecuencias (del orden de 2000 Hz). Para solucionar el problema debe controlarse con más rigor la presión de succión y tenerse cuidado con el proceso para cebar la bomba.

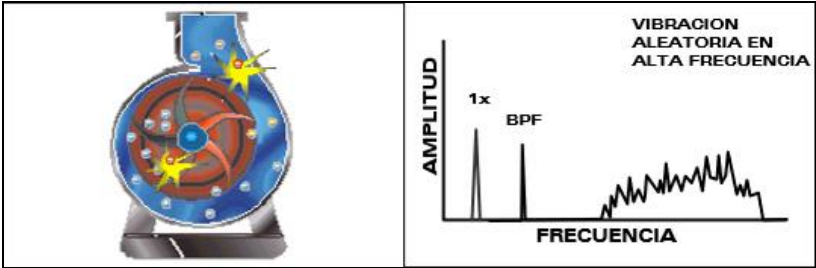


Figura A-27

FLUJO DE GASES

Frecuencia de aspas (G): Frecuencia a la cual, cada aspa pasa por un punto de la cubierta. Producida por obstrucciones o cambios abruptos de direcciones.

La BPF (frecuencia de paso de aspas) es excitada en sus primeros dos armónicos con bandeamientos laterales. La BPF es igual al número de aspas por la frecuencia. La BPF algunas veces coincide con la frecuencia natural lo cual causa altas vibraciones

En caso de aumentos en la BFP deben revisarse cambios abruptos de dirección del fluido y posibles obstrucciones parciales cerca del ventilador.

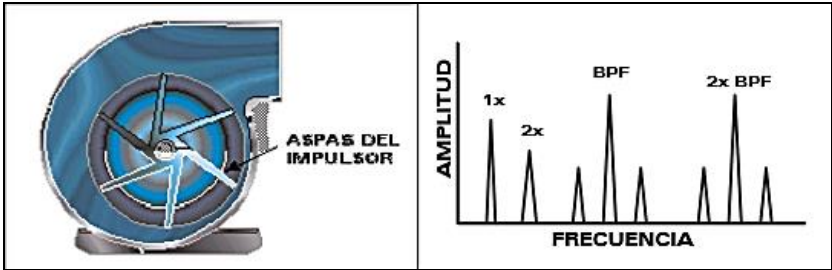


Figura A-28

Turbulencia anómala (G): Se crea por las variaciones de velocidad o presión del aire pasando a través de un ventilador o red de ventilación.

El espectro muestra una vibración anómala a baja frecuencia que generalmente está entre 0.3 y 30 Hz, siempre por debajo de la velocidad nominal.

Debe revisarse la construcción y el ensamble de los ductos. Puede ser necesaria la instalación de rejillas o cambios de área o geometría de sección.

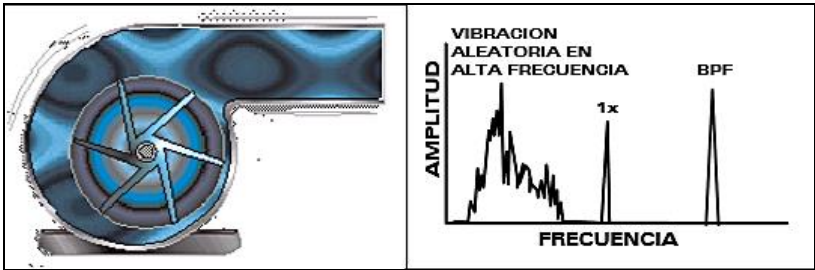


Figura A-29

FALLAS EN RODAMIENTOS

Falla en pista interna: Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

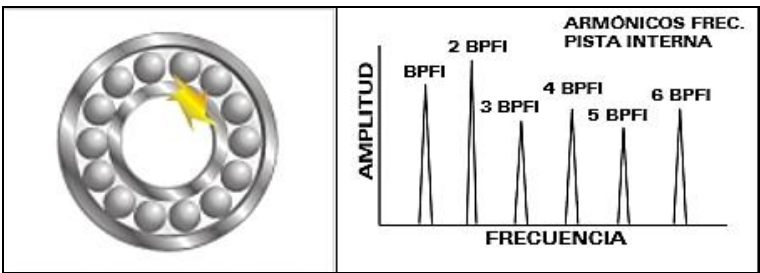


Figura A-29

Falla en pista externa: Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

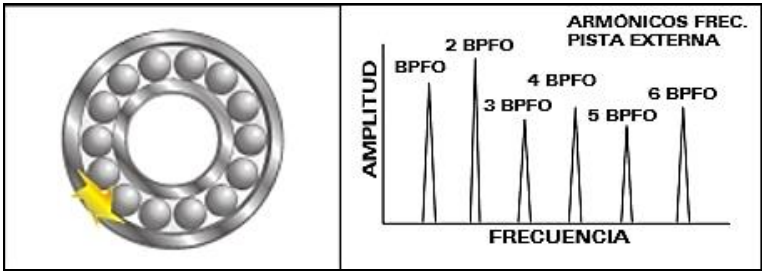


Figura A-30

Falla en elementos rodantes: Agrietamiento o desastillamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además el contacto metal-metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

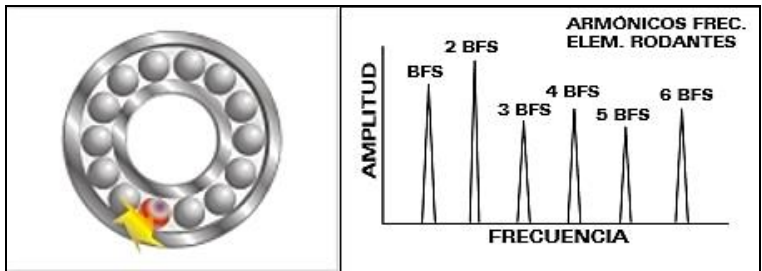


Figura A-31

Deterioro de jaula: Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes.

Se produce una serie de armónicos de la frecuencia de la jaula siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS de la frecuencia de falla en jaula, en dirección radial o axial.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Revise la posible causa que está dando origen a la falla.

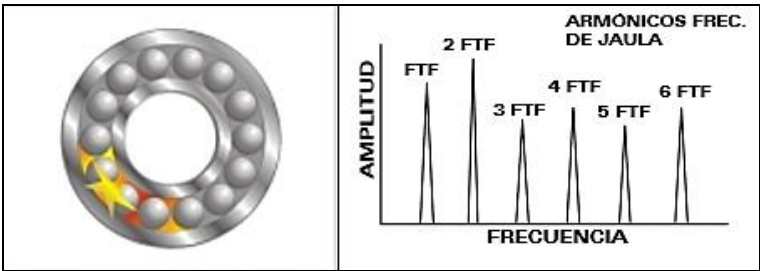


Figura A-32