

Memoria

1. Objetivos y alcance

El objetivo fundamental del proyecto es analizar en profundidad cómo se puede utilizar el análisis de vibraciones en auxiliares de motores alternativos de combustión interna como herramienta de diagnóstico de los mismos.

Para poder realizar el correcto diagnóstico de una máquina es necesario conocer todos los problemas que pueden ocurrir. Para poder identificar un fallo en función, en este caso, de las vibraciones generadas es imprescindible conocer qué defectos son propios de cada máquina. Por ello, en este proyecto se presentan y explican las anomalías que pueden tener lugar en los distintos elementos y sistemas auxiliares del motor y posteriormente se muestran y analizan las vibraciones correspondientes a cada uno de los fallos. De este modo, al visualizar una señal vibratoria atípica captada en un componente determinado se dispone de una lista limitada de causas posibles de dicha vibración y basta identificar la señal captada con el problema que la genera.

Los problemas que ocurren en auxiliares de MACI son muchos y muy variados dependiendo de la configuración y tipo de máquina que se analice, por lo que es necesario tener presente a la hora de realizar el estudio y posterior diagnóstico el tipo de máquina que se está analizando, incluyendo su modo de funcionamiento, partes que la componen y uniones entre dichas partes.

Aparte de estudiar detalladamente los fallos en auxiliares de motores y las vibraciones que éstos generan, el proyecto tiene la finalidad añadida de servir de guía rápida para el diagnóstico de dichos problemas. Es por ello que se han incluido numerosas tablas resumen, las cuales pueden ser empleadas para identificar de forma sencilla la causa de una determinada vibración captada en los auxiliares sometidos a estudio.

La estructura principal del proyecto consta de la presente Memoria y siete anexos.

En la Memoria se presenta y justifica la importancia del análisis de vibraciones en auxiliares de MACI, puesto que un fallo en alguna máquina o componente puede afectar al resto de elementos y conllevar a la rotura del motor. También se estudia la importancia de dicho tipo de análisis a la hora de llevar a cabo Mantenimiento Predictivo, ya que gracias al estudio de las vibraciones se puede conocer el estado de un defecto y su futura evolución, pudiendo planear así reparaciones en la máquina y evitando paradas imprevistas que suponen importantes pérdidas económicas.

Otro de los objetivos de la Memoria es presentar el contenido de los anexos que forman este proyecto, por lo que se introduce de forma breve pero completa el contenido de cada anexo, con el fin añadido de servir de guía rápida para el reconocimiento de un problema en una máquina basándose en el análisis de su espectro vibratorio. Con este propósito se han incluido al final de la Memoria una serie de tablas que muestran de manera general los

distintos problemas y sus efectos vibratorios, los cuales son tratados en profundidad en los anexos correspondientes.

El primer anexo es una introducción al fenómeno vibratorio. En él se estudian las distintas unidades de medida de las vibraciones, sensores a emplear y escalas recomendables. También se explica el proceso que sigue la señal vibratoria desde su captación mediante transductores hasta su monitorización en el dominio de la frecuencia. Es también en este primer anexo donde se incluyen algunas tablas y normas para la evaluación de la severidad de vibraciones en maquinaria, cuya finalidad de poder diagnosticar el estado de la máquina y elaborar gráficos de tendencia.

En el segundo anexo se analizan los fallos comunes a gran parte de las máquinas rotativas, es decir, aquellos que tiene lugar en elementos presentes en la mayoría de los auxiliares de motores objeto de estudio de este proyecto.

Finalmente, en el resto de anexos (del 3 al 7) se estudian los fallos y las vibraciones generadas en auxiliares de MACI concretos. La importancia de conocer el estado de los auxiliares del motor radica en que un problema en uno de ellos puede suponer el fallo del motor y/o de otro sistema auxiliar al que se encuentre unido. Los sistemas auxiliares de MACI analizados en estos anexos son: Sistema de refrigeración, Sistema de lubricación, Motores eléctricos auxiliares, Turbocompresor y Líneas de inyección. Aunque estas últimas no constituyen un sistema auxiliar propiamente dicho, las variaciones de presión en ellas van a generar vibraciones. Estas variaciones de presión pueden tener su origen en problemas que conviene conocer e identificar, puesto que en su mayoría están asociados a problemas en el sistema de inyección o combustión los cuales imposibilitan el correcto funcionamiento del motor.

2. Introducción

Una vez presentados los objetivos del proyecto es esencial justificar la importancia del análisis de vibraciones como método para el diagnóstico del estado de maquinaria rotativa en general y de auxiliares de MACI en particular. En la actualidad, el análisis de vibraciones es la técnica fundamental sobre la cual se basan muchos análisis predictivos en plantas industriales. Para aplicar convenientemente esta técnica es fundamental conocer qué fallos se pueden detectar mediante el análisis de maquinaria por vibraciones. De esta manera se podrá hacer un seguimiento del estado de las máquinas y se podrá llevar a cabo un mantenimiento predictivo basado en las tendencias y evolución de los diferentes defectos analizados [1].

El hecho de que el estado de una máquina esté estrechamente ligado a las vibraciones que ella produce hace que el análisis de vibraciones sea una de las herramientas básicas del mantenimiento predictivo. El método general de mantenimiento predictivo por vibraciones mecánicas tiene el objetivo final de asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas a través de la vigilancia continua de los niveles de vibración en las mismas, siendo estos últimos, los

indicadores de su condición; y se ejecuta sin necesidad de recurrir a desmontajes y revisiones periódicas.

La medida y análisis de vibraciones resulta de gran utilidad para llevar a cabo labores de mantenimiento de forma planificada. La toma de medidas de forma regular permite determinar los niveles inaceptables y definir la correspondiente parada de la máquina. La medida del nivel vibratorio de una máquina persigue conseguir los datos necesarios para analizar, con tiempo suficiente, un problema cuando su estado es incipiente, de forma que permita tomar medidas correctoras antes de que el deterioro sea mayor y de peores consecuencias.

Una vez presentados los objetivos del proyecto y la importancia del análisis de vibraciones en el diagnóstico de auxiliares de MACI, se va a resumir el contenido de cada anexo, con la excepción del anexo 1. Al tratarse éste último de un anexo introductorio no tiene sentido resumirlo en la memoria, pero sí incluirlo en el proyecto, puesto que va a ser el que sitúe al lector en el contexto del análisis vibratorio.

3. Detección mediante el análisis de vibraciones de defectos comunes a máquinas rotativas.

La información que se expone seguidamente se ha extraído del anexo 2. En este anexo se analizan los fallos que pueden ocurrir en cualquier máquina rotativa. A este grupo pertenecen auxiliares de MACI tales como bombas, compresores, ventiladores, motores eléctricos auxiliares, etc. Cada una de estas máquinas está formada por una serie de componentes más simples susceptibles de fallar y generar vibraciones, como pueden ser estator, rotor, juntas, rodamientos, ejes, correas, engranajes, etc.

Aunque existen fallos propios de ciertas máquinas asociados a su diseño y modo de operación, los cuales se analizan en anexos posteriores, hay otro gran grupo de problemas comunes a la mayoría de máquinas rotativas los cuales son objeto de estudio pormenorizado en el anexo 2. Los fallos más comunes que causan altos niveles de vibraciones son: Desequilibrio de partes rotantes, Alineación incorrecta de acoplamientos, Rotor excéntrico, Ejes doblados o agrietados, Fallos en cojinetes, correas, engranajes y soportes, Holguras y Resonancia.

Desequilibrio

En primer lugar se analiza el desequilibrio. Este fallo se da cuando, debido a alguna anomalía en el rotor, el centro de gravedad y el centro de giro no coinciden. Esta situación genera niveles de vibración excesivos. Existen tres tipos de desequilibrio: estático, dinámico y el propio de rotores en voladizo.

La tabla 1 muestra las características principales de los espectros vibratorios de los diferentes tipos de desequilibrio existentes. Si después de diagnosticar que una máquina está desequilibrada se quiere profundizar en la causa y/o tipo de desequilibrio en el anexo 2 se encuentran tanto las principales causas de desequilibrio como la información necesaria para poder distinguir los diferentes tipos de desequilibrio.

Tipo de desequilibrio	Efecto
Estático	Aumento de amplitud de la vibración a frecuencia 1X RPM en dirección radial.
Dinámico	Aumento de amplitud de la vibración a frecuencia 1X RPM en dirección radial.
Rotor en voladizo	Aumento de amplitud de la vibración a frecuencia 1X RPM en dirección axial y radial.

Tabla 1. Vibraciones debidas a desequilibrios.

A parte del desequilibrio hay otros fallos que también generan un aumento del nivel de vibración a 1X RPM. Entre ellos destaca la desalineación.

Desalineación

De una manera breve se puede definir la desalineación como dos ejes acoplados cuyos centros geométricos no coinciden. Los diferentes tipos de desalineación se pueden identificar de manera sencilla en la figura 1.

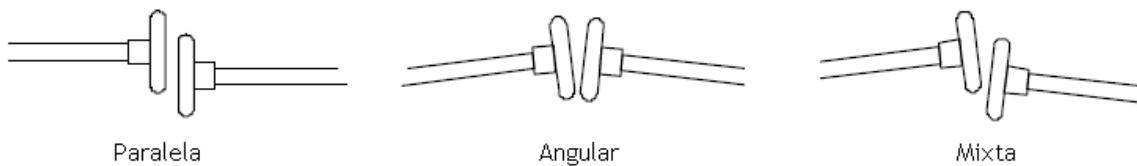


Figura 1. Tipos de desalineación

La desalineación es un problema habitual, y en la mayoría de los casos se trata de una combinación de desalineación paralela y angular [4]. El diagnóstico, como regla general, se basa en una vibración dominante al doble de la velocidad de giro (2X RPM), con un incremento de la amplitud de la vibración a la velocidad de giro (1X RPM) tanto en la medida axial como en la radial. Junto a los picos producidos a 1X RPM y a 2X RPM, también suele aparecer una vibración a 3X RPM, como muestra la figura 2.

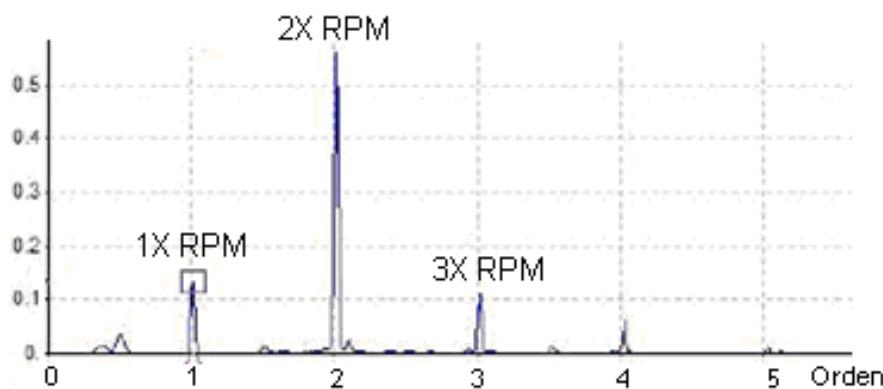


Figura 2. Espectro de vibraciones típico de la desalineación.

Ejes doblados, agrietados, rotores excéntricos y holguras

Continuando con los defectos que generan un aumento de la vibración a 1X RPM, se nombran ahora otros fallos que también generan un aumento del nivel de vibración a la frecuencia 1X RPM. Dichos fallos son: ejes doblados, rotores excéntricos, ejes agrietados (en este caso también hay vibraciones a 2X y 3X RPM) y holguras.

Dentro de las holguras hay que diferenciar entre holgura rotativa y no rotativa, y dentro de esta última cabe distinguir entre holgura por fatiga estructural y holgura en sujetaciones. La tabla 2 describe los efectos vibratorios derivados de los distintos tipos de holgura.

Tipo holgura	Efecto
Holgura rotativa	<ul style="list-style-type: none">- Aumento de la vibración en dirección radial a frecuencia 1X RPM eje y sus armónicos (incluso 10X RPM).- En casos severos pueden aparecer picos a 0,5X y 0,3X RPM.
Holgura no rotativa por fatiga estructural	Aumento de la vibración a frecuencia 1X RPM en la dirección de menor rigidez.
Holgura no rotativa en sujetaciones	<ul style="list-style-type: none">- Aumento de la vibración a frecuencia 1X RPM en la dirección de la sujeción.- Aparición de vibraciones a 2X y 3X, y, en los casos más severos a 0,5 RPM.

Tabla 2. Vibraciones asociadas a cada tipo de holgura.

Una vez analizados en profundidad los problemas en ejes y rotores de máquinas rotativas que generan vibraciones y las principales características de éstas, se van a estudiar los defectos propios de los cojinetes.

Cojinetes

Los cojinetes se clasifican en cojinetes de fricción (o casquillos) y rodamientos. En los cojinetes de fricción, los ejes giran con deslizamiento en sus apoyos. En los rodamientos, entre el eje y su apoyo se interponen esferas, cilindros o conos, logrando que el rozamiento sea solo de rodadura cuyo coeficiente de fricción es notablemente menor.

Casquillos

Los elevados niveles de vibración ocasionados por cojinetes de fricción defectuosos son generalmente el resultado de una holgura excesiva (causada por desgaste), problemas de lubricación o desalineación.

Una holgura excesiva se traduce en el aumento de la amplitud de la vibración a frecuencias 1X RPM y sus armónicos. En caso más graves, pueden llegar a aparecer de picos a 0,5 X RPM y 0,5X armónicos.

Dentro de los problemas de lubricación destacan el remolino de aceite (Oil whirl), latigazo de aceite y látigo seco.

El remolino de aceite (oil whirl) es uno de los fallos más fácilmente reconocibles, ya que ocurre a una frecuencia de entre 0,40 y 0,48X RPM. Este defecto ocurre como consecuencia de una excesiva diferencia entre el centro del eje y el del cojinete de fricción.

El latigazo de aceite ocurre cuando la frecuencia del componente de vibración debido a remolino de aceite (aproximadamente 0,4X RPM) coincide con la frecuencia natural del eje. Esta situación se da, normalmente, cuando la maquina funciona a velocidades superiores al doble de la velocidad crítica del rotor, por lo que la frecuencia de la vibración generada en este caso es superior a 0,4 veces el doble de la velocidad crítica.

En el caso del látigo seco (Dry whirl) la lubricación insuficiente causa excesiva fricción entre el casquillo y el eje, y dicha fricción induce vibración en el resto del casquillo y en las demás piezas relacionadas. La frecuencia de la vibración debida al látigo seco generalmente es muy alta (1kHz a 20 kHz) y produce un sonido chillón característico de los cojinetes que están funcionando en seco [6].

Una incorrecta alineación de los casquillos de un eje genera un elevado nivel de vibración a la frecuencia típica de los problemas de desalineación (1XRPM), independientemente de si la lubricación y holguras son adecuadas o no.

Rodamientos

Una vez introducidos los problemas en casquillos que generan vibraciones se van a presentar los defectos propios de los rodamientos junto con sus vibraciones características. Para comprender los distintos fallos hay que conocer las partes que forman un rodamiento: Pista interior, Pista exterior, Jaula y Elementos rodantes (bolas o rodillos). En función de la frecuencia de la vibración predominante se puede localizar el fallo en una de las cuatro partes mencionadas, ya que cada una de ellas posee una frecuencia característica de fallo. Las cuatro frecuencias de fallo (o tonos de rodamiento) son las siguientes y se calculan a partir de las expresiones mostradas en el anexo 2.

- Frecuencia de fallo en la jaula (FTF)
- Frecuencia de fallo en la pista interna (BPFI)
- Frecuencia de fallo en la pista externa (BPFO)
- Frecuencia de fallo en algún elemento rodante (BSF)

La figura 3 muestra el espectro vibratorio de un rodamiento de un ventilador [7] en el cual pueden apreciarse notables niveles de vibración a FTF y BPFO, lo que es indicativo de la existencia de defectos tanto en la jaula como en la pista externa.

Al igual que ocurría en los casquillos, los rodamientos pueden estar alineados incorrectamente en el eje. Este hecho genera el aumento de las

vibraciones a frecuencias 1X, 2X y 3X velocidad de giro del eje, siendo predominante 2X RPM en dirección axial.

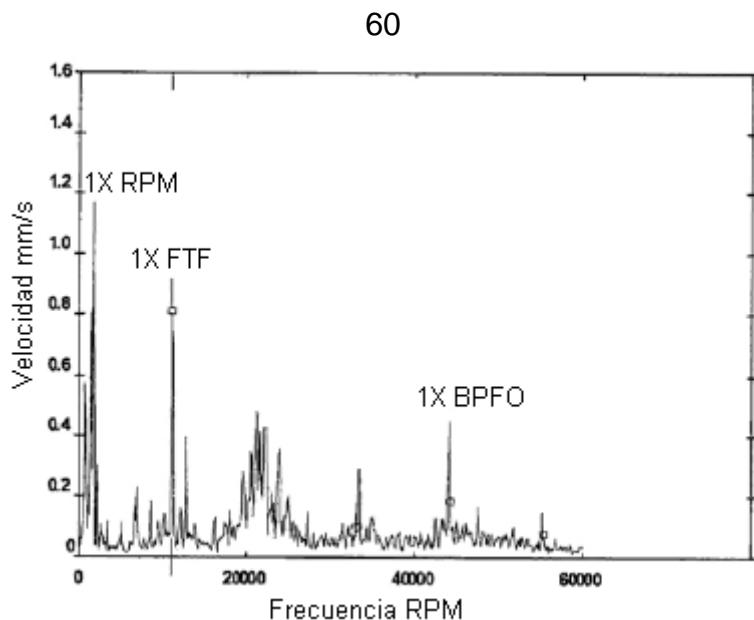


Figura 3. Espectro vibratorio de un rodamiento con fallos en jaula y en pista externa.

La tabla 3 resume los fallos que pueden ocurrir tanto en cojinetes de fricción como en rodamientos, así como los efectos vibratorios asociados a dichos fallos.

Fallo	Efecto
Holgura excesiva	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la amplitud de la vibración a frecuencias 1X RPM y sus armónicos. En caso más graves, aparición de picos a 0,5 X RPM y 0,5X armónicos. En casos extremo, aparición de picos a 0,25-0,3X RPM y 0,25-0,3X armónicos
Remolino de aceite	Vibración a frecuencia 0,4-0,48X RPM
Latigazo de aceite	Vibración a frecuencia 0,4-0,48X RPM cuando la velocidad de giro es superior al doble de la velocidad crítica.
Torbellino de histéresis	Pico elevado a frecuencia 1X RPM crítica
Látigo seco	Vibraciones a alta frecuencia (1- 20 kHz) y sonido chillón

Incorrecta alineación entre cojinetes	Aumento de la amplitud de la vibración a frecuencias 1X RPM
Defectos en pista interna	<ul style="list-style-type: none"> - Vibraciones a frecuencias 1X BPFI y sus armónicos, rodeadas de bandas laterales. - Vibraciones a alta frecuencia (1-10 kHz)
Defectos en pista externa	<ul style="list-style-type: none"> - Vibraciones a frecuencias 1X BPFO y sus armónicos, rodeadas de bandas laterales. - Vibraciones a alta frecuencia (1-10 kHz)
Defectos en elementos rodantes	<ul style="list-style-type: none"> - Vibraciones a frecuencias 1X BSF y sus armónicos, rodeadas de bandas laterales. - Vibraciones a alta frecuencia (1-10 kHz)
Deterioro de la jaula	Vibraciones a frecuencias 1X FTF y sus armónicos, rodeadas de bandas laterales.
Desalineación de rodamientos	Aumento de la amplitud de la vibración a frecuencias 1X, 2X y 3X RPM, siendo predominante el pico a 2X RPM.

Tabla 3. Fallos en cojinetes y vibraciones que generan.

Correas y engranajes

Otros fallos comunes a muchas máquinas rotativas son aquellos que tienen su origen en distintos sistemas de transmisión de movimiento. En este proyecto se han analizado dos de estos sistemas: correas y engranajes.

Las transmisiones por correa, en su forma más sencilla, constan de una banda colocada en tensión entre dos poleas: una motriz y otra conducida. Al moverse la correa transmite energía desde la polea motriz a la polea conducida por medio del rozamiento que surge entre la correa y las poleas. Los principales problemas en correas que generan vibraciones son: correas desgastadas, correas destensadas, desalineación en poleas, excentricidad de poleas y resonancia. Cada uno de estos fallos genera unas vibraciones características, que se explican detalladamente en el apartado 21 del anexo 2.

En lo referente a transmisiones por engranajes, están formadas por el acoplamiento de dos ruedas dentadas, una motriz (piñón) y otra conducida (rueda o corona), que, al estar los dientes de una en los huecos de la contraria y producirse el giro de la rueda motora, ésta arrastra a la conducida diente a diente. Este es el sistema de transmisión más utilizado, tanto para ejes paralelos como para cruzados o que se cortan, y sirve para un amplio rango de relaciones de transmisión, potencias y velocidades. Los fallos que se analizan

en el apartado 23 del anexo 2 pueden ocurrir tanto en engranajes rectos como en helicoidales, y los espectros vibratorios son similares para ambos tipos de engranajes.

Los principales fallos que tienen lugar en los sistemas de transmisión mediante engranajes y que generan vibraciones son los siguientes: dientes desgastados, excentricidad, backlash, engranajes desalineados, sobrecarga, holgura y problemas de hunting o cazado. Muchos de los problemas citados generan vibración a la frecuencia de engrane o GMF (Gear Mesh Frequency), la cual se determina multiplicando el número de dientes Z de una rueda (piñón o rueda) por su velocidad de operación [23]. Si al realizar el análisis vibratorio se detecta alguna señal a esta frecuencia es claro indicativo de la presencia de alguna anomalía en los engranajes.

La tabla 4 muestra los defectos en correas y engranajes que pueden causar vibraciones, así como las características del espectro en caso de existir dichos defectos.

Fallo	Efecto
Correas desgastadas	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la amplitud de la vibración a 1X frecuencia de correa y sus 4 primeros armónicos. - El pico de mayor amplitud suele corresponder a 2X F_c. - Aparición de vibraciones de poca amplitud en un amplio rango de frecuencias.
Correas destensadas	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X, 2X, 3X y 4X frecuencia de correa.
Desalineación de poleas	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la amplitud de la vibración a 1X RPM conducida. - Aparecen picos a 2X y 3X frecuencia de correa.
Excentricidad de poleas	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X RPM conductora y 1X RPM conducida.
Resonancia	Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de resonancia (natural de la correa) y a frecuencia de correa.
Dientes desgastados	Aumento de la amplitud de vibración a GMF y sus primeros armónicos, con bandas laterales a \pm frecuencia giro rueda

Excentricidad / Backlash	Aumento de la amplitud de vibración a GMF y sus primeros armónicos, con bandas laterales a \pm RPM rueda defectuosa
Engranajes desalineados	Aumento de la amplitud de vibración a 1X, 2X y 3X GMF, sin bandas laterales
Sobrecarga en engranajes	Aumento de la amplitud de vibración a GMF y aparición de numerosas bandas laterales separadas \pm RPM rueda defectuosa
Problemas de Hunting	Vibración a bajas frecuencias <10 Hz (HTF)
Fijación deficiente ruedas-eje	Aumento del nivel de vibraciones en un amplio rango de frecuencias (Ruido blanco)

Tabla 4. Fallos en correas y engranajes que generan vibraciones.

Estructuras y/o soportes

Para finalizar de resumir los fallos comunes objeto de estudio del anexo 2 se estudian los problemas en estructuras y/o soportes de maquinaria rotativa. En la tabla 5 se muestran los principales problemas en soportes del motor y de sus elementos auxiliares y las frecuencias de las vibraciones que se generan como consecuencia de los distintos fallos.

Fallo en soporte	Efecto
Resonancia	Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia natural de la estructura
Apoyo débil (<i>Soft foot</i>)	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X RPM de la máquina. Mayor amplitud de la vibración en la dirección vertical.
Tornillos flojos Rotura de soldaduras	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X RPM de la máquina (1X RPM conductor o conducido en transmisión por correas)
Grietas	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X y 2X RPM máquina, siendo mayor la amplitud de la vibración en zonas cercanas a la grieta

Tabla 5. Fallos más frecuentes en soportes de máquinas rotativas.

En el caso concreto de problemas debidos a apoyos débiles (Soft foot) éstos se presentan cuando alguno de los apoyos de la máquina no se encuentra en el mismo plano que el resto [10]. Se puede deber a defectos en la cimentación, en la base, deformaciones térmicas, corrosión o mal acabado, por lo que un correcto montaje inicial puede evitar problemas de este tipo.

Una vez vistos los fallos comunes a máquinas rotativas se van a estudiar los diferentes sistemas auxiliares del motor desde el punto de vista del análisis de vibraciones, comenzando por el sistema de refrigeración.

4. Estudio de los componentes del sistema de refrigeración desde el punto de vista de las vibraciones.

La temperatura que alcanzan los gases en el interior de los cilindros es muy elevada, y de no ser por el sistema de refrigeración, al estar dicha temperatura por encima del punto de fusión de los metales empleados en la construcción del motor podría causar la destrucción de los mismos.

La principal clasificación de los sistemas de refrigeración existentes en la actualidad se basa en el fluido empleado como refrigerante y diferencia entre refrigeración por agua o aire. Los problemas y vibraciones son distintos para ambos sistemas de refrigeración, ya que la mayor parte de los fallos ocurren por problemas en los elementos principales de refrigeración: bomba y ventilador, respectivamente.

La gran mayoría de los motores emplea agua como fluido de refrigeración, la cual se hace circular por canales internos dentro del conjunto enfriando las partes más calientes del mismo. El sistema se basa en disponer una bomba centrífuga intercalada en el circuito y movida por el propio motor o por un motor eléctrico auxiliar.

De todos los elementos que componen el sistema de refrigeración, la bomba centrífuga es el más susceptible de sufrir vibraciones. Además de los fallos comunes que generan vibraciones en máquinas rotativas en general, que ya se han explicado anteriormente, tales como desequilibrio, fallos en correas, desalineación, ejes doblados, defectos en rodamientos, holguras, etc; existen causas de vibraciones propias de las bombas centrífugas, como pueden ser la cavitación, defectos en el rodete, desgaste de los difusores, obstrucciones... La mayoría de estos problemas se traducen en un aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de álabes (BFP):

$$BFP = \frac{z \cdot RPM}{60}$$

donde *BFP* es la frecuencia de paso de álabes (Hz), *z* es el número de álabes del rotor de la bomba y *RPM* son las revoluciones por minuto del rotor de la bomba. Es fundamental remarcar que en el análisis vibratorio de una bomba o ventilador centrífugo en correcto estado siempre va a aparecer una señal a la BFP. Lo que indica un problema es el aumento de la amplitud de dicha señal.

De entre los fallos anteriormente citados, destacan dos: Cavitación y Álabes dañados. El primero de los modos de fallo de la bomba centrífuga que

va a ser estudiado es la cavitación. La cavitación consiste en la formación de burbujas de vapor que viajan a través del fluido hasta encontrar una región cuya presión es superior a la presión del vapor, donde colapsan e implosionan. Las burbujas se forman y se rompen muchas veces por segundo, esto genera ruido y vibraciones en el sistema. El espectro de la figura 4 muestra el efecto de la cavitación, que provoca el aumento de la amplitud de las vibraciones a la frecuencia de paso de álabes (BFP) y una vibración caótica que se presenta a altas frecuencias, del orden de 2000 Hz [10] [39].

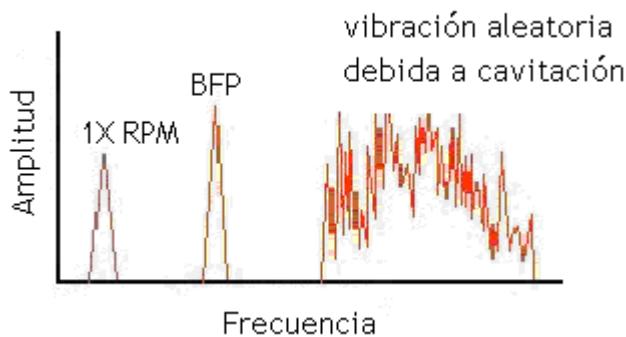


Figura 4. Espectro vibratorio de una bomba que sufre cavitación.

Otra causa habitual de vibraciones en bombas centrífugas son los álabes dañados. La existencia de un álate defectuoso genera un aumento considerable en la amplitud de la vibración a la frecuencia BFP.

Como ya se ha indicado al comienzo de este apartado, pueden aparecer otros defectos en bombas centrífugas aparte de la cavitación y álabes dañados. La tabla 6 recoge los principales fallos en bombas de sistemas de refrigeración por agua.

Fallo	Efecto
Cavitación	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de álabes y aleatoria a 2000 Hz aprox. - Ruido similar a grava en el rodete.
Álabe dañado	Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de álabes y de su 2^{o} armónico, rodeadas de bandas laterales.
Rodete excéntrico	<ul style="list-style-type: none"> - Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia 1X RPM rodete. - Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de álabes.
Obstrucciones	Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de álabes, sin bandas laterales

Tabla 6. Fallos propios de una bomba centrífuga.

Una vez analizado el sistema de refrigeración por agua se estudiará el sistema de refrigeración por aire. Este tipo de refrigeración se realiza mediante un ventilador y se emplea en motores de pequeña potencia. Consiste en evacuar directamente el calor del motor a la atmósfera a través del aire que lo circunda.

Los principales fallos relacionados con el ventilador que generan vibraciones son el desequilibrio del rotor, rodamientos defectuosos y problemas en las aspas, que aumentan la amplitud de la vibración a la frecuencia de paso de aspas (BFP) y provocan turbulencias [70]. Aunque ya se han estudiado en apartados anteriores del presente documento las características principales de las vibraciones causadas por desequilibrio, fallos en rodamientos y defectos en álabes o aspas, la tabla 7 resume dicha información y añade las vibraciones causadas por variaciones de velocidad.

Fallo	Efecto
Desequilibrio del rotor	Aumento de la amplitud de la vibración a la frecuencia 1X RPM.
Rodamientos defectuosos	Aparición de vibración a alguna frecuencia de fallo de rodamiento.
Defectos en aspas	Aumento de la amplitud de la vibración a 1X y 2X BFP, rodeadas de bandas laterales.
Variaciones de velocidad	Aparición de vibración aleatoria a bajas frecuencias (<30 Hz) y aumento de la amplitud de la vibración a la BFP, sin bandas laterales.

Tabla 7. Fallos propios de un ventilador.

A continuación se presenta el sistema de lubricación de un MACI, describiendo su importancia y funcionamiento, sus principales componentes y los fallos característicos de este sistema auxiliar, junto con las vibraciones que dichos fallos generan.

5. Estudio de los componentes del sistema de lubricación desde el punto de vista de las vibraciones.

La función del sistema de lubricación consiste en permitir la creación de una cuña de aceite lubricante en las partes móviles, evitando el contacto metal-metal, además contribuye a la refrigeración de las partes con alta temperatura al intercambiar calor con el ambiente cuando circula por zonas de temperatura más baja.

Los sistemas de lubricación se proyectan de forma que suministren la suficiente cantidad de aceite a todas las partes móviles del motor y sus auxiliares para realizar su engrase. El aceite se recoge de un depósito situado en la parte inferior del motor y por medio de una bomba se envía a los distintos

puntos del motor, como cojinetes, cabeza de bielas, apoyos del árbol de levas, guías de válvula, paredes del cilindro, etc. y otros elementos auxiliares, como la bomba de refrigeración, el turbocompresor, etc.

Para lograr dicho objetivo existen diferentes formas de realizar la lubricación, definidas en función del modo en que se introduce el aceite en el bloque motor. En todos los tipos de lubricación el elemento más importante del sistema es la bomba de aceite. La bomba es el componente mecánico que sirve para poner en circulación el aceite, manteniendo un flujo y presión dentro de los límites apropiados a las características de diseño del motor. La bomba toma el aceite del depósito del motor y lo envía al filtro a una presión regulada. Despues se distribuye a través de conductos interiores y exteriores del motor a las partes móviles que va a lubricar y/o enfriar.

Los tipos de bomba más utilizados son: bomba de engranajes externos, bomba lobular (o de rotor), bomba de sector (de engranajes internos o de media luna) y bomba de paletas [17]. Todos los tipos de bombas están sometidos a las solicitudes mecánicas propias de una máquina rotativa, por lo que pueden padecer todos los fallos que se estudian en el anexo 2, tales como desequilibrio, desalineación, holguras, excentricidad, fallos en rodamientos, etc. siendo de especial importancia en algunos tipos de bombas de lubricación los fallos que tienen lugar en sistemas de transmisión mediante engranajes.

El análisis de vibraciones de la bomba de aceite de engranajes va a presentar siempre componente de vibración importante a la frecuencia del engranaje (GMF), que es el número de dientes de una de las ruedas del engranaje por sus RPM o bien un componente a la frecuencia de paso de lóbulos (número de lóbulos multiplicado por la velocidad de giro) en el caso de las bombas de tipo lobular. La amplitud de estos componentes depende mucho de la presión de salida de la bomba. Si la amplitud de la vibración a la frecuencia del engranaje o de paso de lóbulo aumenta de manera significativa y hay una aparición de armónicos o de bandas laterales en el espectro de vibración podría ser una indicación de un diente o lóbulo cuartead o dañado. La figura 5 muestra el espectro vibratorio de una bomba de aceite de lóbulos externos. En dicho espectro puede apreciarse una señal de gran amplitud a la frecuencia de paso de lóbulo, que en este caso es $4 \times \text{RPM}$ al tratarse de una bomba de cuatro lóbulos. Aunque dicha vibración está también presente en condiciones normales de operación, un aumento tan significativo de su amplitud permite diagnosticar que hay algún lóbulo deteriorado.

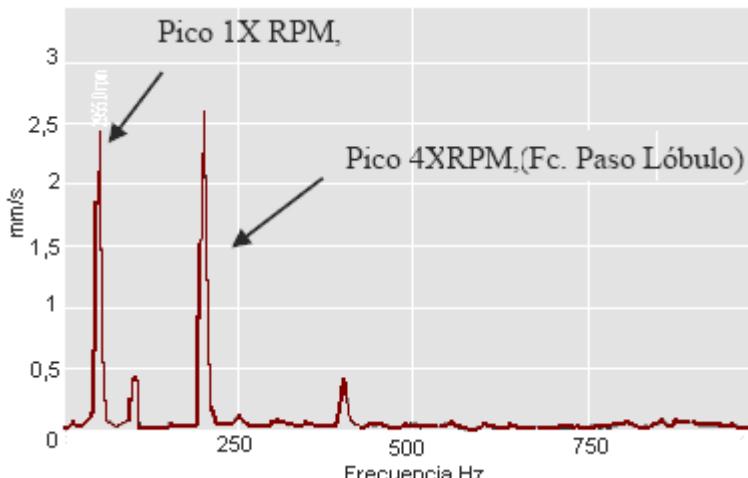


Figura 5. Espectro vibratorio de una bomba de lóbulos externos con defecto en algún lóbulo.

A parte de las vibraciones causadas por problemas o anomalías en la bomba de aceite, existen fallos en otros elementos del sistema de lubricación que también pueden generar vibraciones a frecuencias características. Tanto el filtro de aceite como los elementos de regulación constituyen una parte muy importante del sistema e lubricación, y un problema en alguno de ellos provoca el incorrecto funcionamiento del motor y de otros sistemas auxiliares, como por ejemplo el turbocompresor.

Los principales elementos de regulación presentes en el sistema de lubricación son la válvula reguladora de presión y la válvula de derivación del filtro. Las principales causas que pueden generar vibraciones en una válvula son un mal dimensionado, fugas y resonancia de resortes. Dichos problemas provocan el aumento del nivel de vibración en un amplio rango de frecuencias, que va desde los herzios hasta las decenas de kiloherzio, siendo recomendable el análisis por ultrasonidos para la detección de estas últimas vibraciones a altas frecuencias.

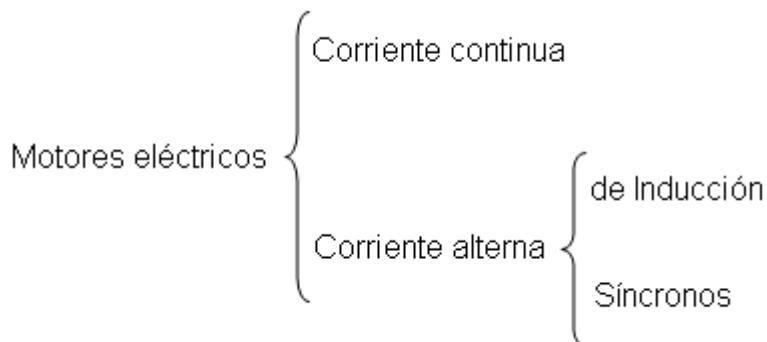
Tras haber estudiado los sistemas de refrigeración y lubricación, se van a analizar a continuación los motores eléctricos auxiliares.

6. Análisis de vibraciones en motores eléctricos auxiliares.

Algunos motores de combustión emplean motores eléctricos como apoyo en el arranque. En algunas configuraciones de MACI alguno de sus auxiliares, como por ejemplo la bomba de refrigeración, puede estar accionada por un motor eléctrico en lugar de por el propio MACI.

A la hora de tratar los fallos que tienen lugar en un motor eléctrico y que pueden ser diagnosticados mediante el análisis de vibraciones, hay que tener presente que la maquinaria eléctrica sufre los defectos comunes al resto de maquinaria rotativa, con la complicación adicional de defectos puramente eléctricos. Además, dependiendo del tipo de motor eléctrico empleado, se van a tener diferentes características en cuanto a construcción, funcionamiento y

vibraciones se refiere. El esquema 1 muestra los distintos tipos de motores eléctricos que se estudian en el presente proyecto.



Esquema 1. Tipos de motores eléctricos.

En la actualidad, el tipo de motor eléctrico más extendido como elemento auxiliar de MACI son los motores de inducción, también llamados asíncronos o de jaula de ardilla.

En lo que al análisis frecuencial de motores eléctricos se refiere, las vibraciones ocasionadas por problemas eléctricos dependen de las condiciones de carga del motor. A medida que se modifica la carga, la amplitud de la vibración y/o las variaciones de fase pueden indicar cambios significativos en el estado del motor. Las principales causas de vibraciones de naturaleza eléctrica son:

- Barras dañadas o sueltas en el rotor
- Láminas del rotor o devanados del estator en cortocircuito.

Si una barra del rotor tiene más resistencia que las otras debido a grietas o roturas habrá menos corriente inducida en ella, y cuando esté alineada con los polos producirá un poco menos de par en este punto del ciclo de deslizamiento. Esto se traduce en el aumento de amplitud de la vibración a la frecuencia $1X$ RPM en el espectro y en la aparición de bandas laterales alrededor del componente de vibración distanciadas la frecuencia de paso de polos ($F_P = 2.F_L - RPM.P$. Donde F_L es la frecuencia de la línea eléctrica y P es el número de polos del motor [18]).

Otra fuente de vibraciones de naturaleza eléctrica es el cortocircuito entre láminas del rotor. Este hecho lleva asociado un aumento de la vibración a la frecuencia de 100 Hz ($2.F_L$). Si el cortocircuito se da entre devanados del estator, esto se traduce en un aumento en la vibración de la máquina a frecuencia $1X$ RPM, y a más largo plazo conlleva a la degradación del aislamiento y daños en los rodamientos del rotor [9].

A parte de los fallos que generan vibraciones comunes a todas las máquinas rotativas, y de los fallos de índole eléctrica, existe un tercer grupo de problemas presentes en motores eléctricos. Se trata de defectos mecánicos propios de motores eléctricos. Los principales problemas pertenecientes a este

tercer grupo son: Flexión térmica del rotor, Rotor excéntrico, Holgura en devanados del estator y Conectores flojos

La tabla 8 recoge los fallos en los diferentes tipos de motores eléctricos, tanto problemas de naturaleza eléctrica como mecánica, que pueden generar vibraciones.

Fallo	Tipo motor	Efecto
Barras del rotor dañadas	asíncronos	Aumento de la vibración a frecuencia 1X RPM con bandas laterales a F_p
Barras del rotor rotas	asíncronos	Bandas laterales a F_p alrededor de 1X, 2X, 3X y 4X RPM
Láminas del rotor en cortocircuito	motores CA	Aumento de la vibración a frecuencia $2.F_L$
Flexión térmica del rotor	motores CA	Aumento de la vibración a frecuencia 1X RPM (como desequilibrio)
Rotor excéntrico	todos	Vibración a 1X RPM con bandas laterales a $\pm 2X F_s$
Holgura devanados estator	todos	Aumento de la vibración a frecuencia 1X, 2X RPM y $2.F_L$
Conectores flojos	todos	Aumento de la vibración a frecuencia $2.F_L$ con bandas laterales a $1/3.F_L$
Problemas en SCR	motores CC	Vibración de gran amplitud a frecuencia 6. F_L
Bobinas sueltas	síncronos	Pico de vibración a CPF con bandas laterales a 1X RPM
Barras del rotor sueltas	asíncronos	Vibración a RBPF con bandas laterales separadas $2.F_L$
Cortocircuito devanados estator	todos	Aumento de la vibración a frecuencia 1X RPM

Tabla 8. Fallos que generan vibraciones en motores eléctricos

Una vez presentados los fallos que pueden ocurrir en motores eléctricos, el siguiente sistema auxiliar objeto de estudio es el turbocompresor.

7. Sobrealimentación del motor: Turbocompresor.

La función del turbocompresor consiste en sobrealimentar el motor, es decir, aumentar la presión del aire de entrada a los cilindros. Para realizar la sobrealimentación se necesita una máquina capaz de tomar el aire a la presión atmosférica y comprimirlo para conseguir una sobrepresión. De esta tarea se encargan los compresores. El compresor más empleado en motores es el turbocompresor centrífugo y está accionado por una turbina alimentada mediante los gases de escape.

El grupo de turbocompresión, habitualmente denominado turbo, aprovecha la energía con la que salen los gases de escape del motor para impulsar una turbina colocada en la salida del colector de escape. Dicha turbina se une mediante un eje a un compresor colocado a la entrada del colector de admisión (figura 6). Gracias al movimiento giratorio que transmite la turbina a través del eje común, el compresor eleva la presión del aire que entra a través del filtro y consigue que mejore la alimentación del motor. Debido a la elevada velocidad de giro del turbo y a las altas temperaturas que se alcanzan, el correcto estado de los sistemas de refrigeración y lubricación es fundamental para el buen funcionamiento del grupo de turbocompresión.

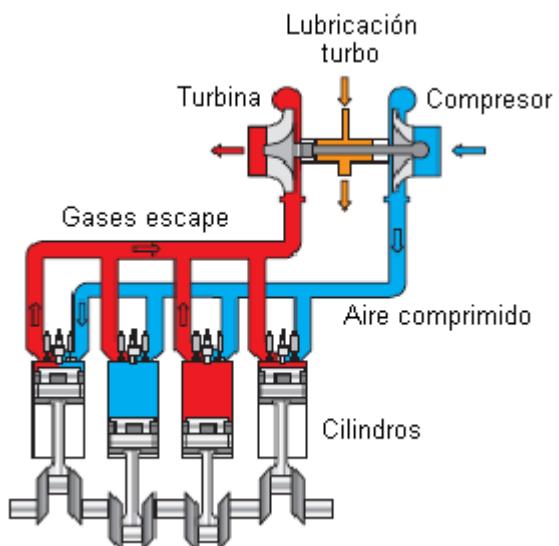


Figura 6. Funcionamiento del turbo.

Como se acaba de ilustrar, los turbos están formados por una serie de elementos comunes a todos ellos, sin embargo, pueden presentar notables diferencias constructivas y de funcionamiento atendiendo, principalmente, a la clasificación en turbos de geometría fija (TGF) y turbos de geometría variable (TGV). La principal diferencia entre ambos tipos de turbos radica en la geometría de la turbina. En el caso de los turbos de geometría variable los álabes de la turbina son móviles, es decir, su posición final depende de la presión de sobrealimentación. La figura 7a) representa la situación en que los álabes están prácticamente cerrados, por lo que al ser menor el área de paso de los gases aumenta su presión. Esta primera situación corresponde a regímenes de giro del motor bajos, donde la energía de los gases de escape es baja. La figura 7b) representa la situación opuesta, en la que los álabes móviles

están totalmente abiertos (mayor sección de paso de gases). Se dará esta situación cuando se alcancen los valores máximos de presión establecidos.

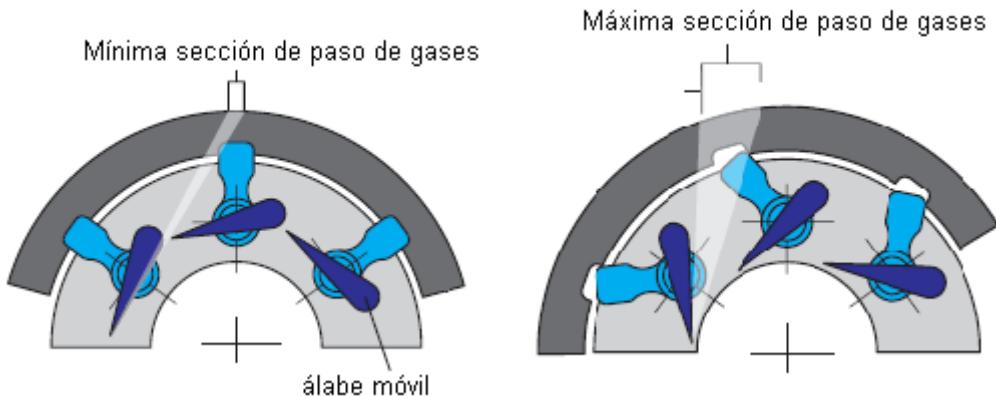


Figura 7a). TGV a bajas RPM del motor

Figura 7b). TGV a altas RPM del motor

Como consecuencia del movimiento de álabes mediante una serie de varillas, los turbos de geometría variable van a poder presentar una serie de vibraciones que no se dan en turbos de geometría fija. Se trata de vibraciones a una frecuencia aproximada de 5000 Hz causadas por una incorrecta fijación de los álabes de la turbina. Esto suele deberse a problemas en las varillas que los guían, como holguras excesivas o varillas dobladas.

Una vez explicado el objetivo, funcionamiento y partes del turbo, así como las diferencias entre TGF y TGV, se analizan a continuación las principales vibraciones que tienen lugar en dicho sistema, independientemente de su configuración o geometría.

El diagnóstico por análisis de vibraciones del grupo de turbocompresión es muy importante, puesto que el correcto estado del turbo es fundamental para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro del motor de combustión. Las vibraciones que se generan en un turbo son las típicas de una máquina rotatoria, es decir, las producidas por fallos en rodamientos y casquillos, ejes desalineados, desequilibrados, excéntricos o doblados, problemas de lubricación, y las producidas como consecuencia de fallos tanto en el compresor como en la turbina. La mayoría de los fallos anteriores ya han sido tratados en el apartado 3 de esta Memoria, por lo que a continuación se van a analizar los problemas propios de turbinas y compresores capaces de generar vibraciones, y las características de éstas.

Los espectros vibratorios del compresor centrífugo y de la turbina son similares. En ambos, incluso en condiciones normales de funcionamiento, aparece la frecuencia de paso de álabes. En el caso de que haya álabes dañados o erosionados habrá un incremento en la amplitud de la frecuencia de paso de álabes ($BFP = n^o$ álabes .RPM) y también aparecerán bandas laterales a su alrededor. El compresor y la turbina están unidos a través del eje común, por lo que cabe esperar que vibraciones en una de las partes puedan afectar al resto del conjunto.

La figura 8 muestra un espectro de vibración típico de un compresor centrífugo con 6 álabes [9]. En ella se puede observar la presencia del pico a la

frecuencia de paso de álabes (BFP), sus armónicos (2X, 3X, 4X, 8X RPM) y bandas laterales junto a todos ellos, lo cual indica que hay álabes dañados.

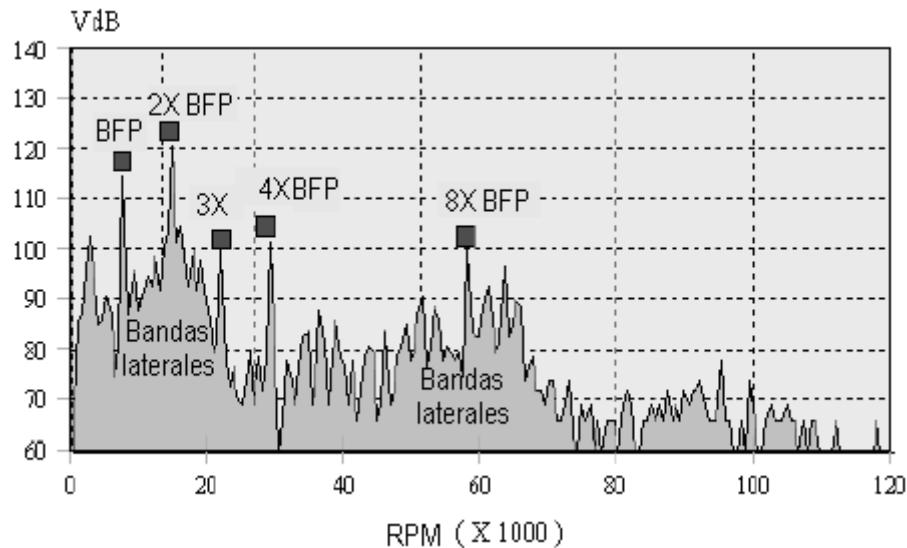


Figura 8. Espectro vibratorio de un compresor centrífugo con daños en los álabes.

A parte de las vibraciones causadas por álabes dañados o erosionados, el turbocompresor y la turbina pueden sufrir desequilibrios dinámicos en caso de que se le peguen restos de aceites o carbonillas a los álabes del rodamiento, los cuales producirán vibraciones a frecuencia 1X RPM y armónicos, que entrando en resonancia pueden romper la película de engrase y provocar fallos muy graves. Esta situación es más frecuente en el caso de las turbinas, ya que son accionadas por los gases de escape del motor, los cuales contienen partículas procedentes de la combustión, mientras que el aire que pasa por el compresor proviene del ambiente y está libre de carbonillas.

Como ya se ha comentado en la introducción del presente documento, aunque las líneas de inyección no constituyen un sistema auxiliar propiamente dicho, las variaciones de presión en ellas van a generar vibraciones. Estas variaciones de presión pueden tener su origen en fallos asociados a problemas en el sistema de inyección o combustión los cuales imposibilitan el correcto funcionamiento del motor.

8. Diagnóstico de MACI basado en vibraciones en las líneas de inyección

El sistema de inyección constituye el sistema de alimentación de los motores de combustión interna. Para realizar la combustión es necesario inyectar una determinada cantidad de combustible finamente pulverizado en la cámara de combustión. Dicha misión está encomendada a los inyectores, que reciben el combustible de la bomba de inyección. El combustible debe ser inyectado en la cámara de combustión en condiciones adecuadas (cantidad, presión, grado de pulverizado), pues el correcto funcionamiento de un motor depende en gran parte de una inyección correcta [53, pág 16].

No es objeto de este proyecto analizar el sistema de inyección en su totalidad, únicamente se estudian las causas que pueden dar lugar a variaciones de presión en las líneas de inyección, es decir en los conductos que unen la bomba de inyección con los inyectores. Las variaciones de presión pueden hacer que dichos conductos vibren de un modo determinado en función del origen de la variación de presión. Conociendo las diferentes formas de vibración se puede diagnosticar cuál es el problema que está modificando la presión del combustible a la entrada del inyector.

Las líneas de inyección de combustible a alta presión están unidas a la bomba de inyección y a los inyectores. Puesto que la presión en la bomba de inyección es pulsatoria, la señal vibratoria medida en las líneas de inyección tendrá unas características pulsatorias, y una frecuencia de vibración de acuerdo a la siguiente expresión [61]:

$$f = \frac{n \cdot j}{60 \cdot \tau}$$

Donde n es la velocidad del motor en RPM, j el número de cilindros y τ es un coeficiente que para motores de cuatro tiempos toma el valor de 2.

De este modo ya se conoce la frecuencia fundamental del sistema de inyección. Toda medida que se aleje notablemente de dicho valor será un indicativo de la existencia de algún problema. Para la obtención de los valores reales de vibración en un conducto de inyección se emplean, normalmente, sensores de presión, capaces de detectar variaciones anómalas de presión en el interior de los conductos de inyección.

Una vez presentados los objetivos y contenido del proyecto se presentan las conclusiones alcanzadas durante la realización del mismo.

9. Conclusiones

En primer lugar, este proyecto permite valorar la importancia del análisis de vibraciones en maquinaria en general. Dicha importancia está asociada al hecho de llevar a cabo un Mantenimiento Predictivo de forma adecuada. De este modo una máquina o elemento será reparado o sustituido en el momento oportuno, es decir, tras haber aprovechado al máximo su vida útil pero antes de que falle y provoque una parada no planificada. De acuerdo a esta idea se pueden resumir las ventajas que el análisis por vibraciones aporta al mantenimiento en dos puntos. Por un lado, permite detectar e identificar defectos incipientes sin necesidad de parar ni desmontar la máquina y por otro lado, hace posible el seguimiento de la evolución del defecto a lo largo del tiempo hasta que alcanza niveles no aceptables.

En la actualidad, la mayoría de estudios sobre vibraciones en motores se centran en el motor propiamente dicho, olvidando en muchos casos la importancia de los sistemas auxiliares para el correcto funcionamiento del conjunto. En este proyecto se han estudiado los principales sistemas auxiliares de MACI, incluyendo diferentes configuraciones y modos de operación, así

como los principales fallos que pueden tener lugar en cada uno de ellos. Cada sistema auxiliar posee varios modos de fallo propios, los cuales generan vibraciones características. La bibliografía existente sobre este tema está dispersa y, en algunos casos puede llegar a resultar confusa y densa, lo cual pone de manifiesto la necesidad de reunir, ordenar y presentar de forma clara los problemas que pueden ocurrir en cada auxiliar de MACI y las vibraciones que se generan como consecuencia de dichos defectos. De acuerdo con esto, cabe resaltar la importancia y utilidad de las tablas-resumen incluidas en este proyecto. Las tablas constituyen una guía rápida para el diagnóstico de fallos en auxiliares de MACI, que permite asociar la señal vibratoria (captada y procesada) a un problema concreto. Aparte de las tablas, el lector dispone, en cada uno de los anexos, de las explicaciones necesarias para comprender los fallos, localizar las posibles causas y determinar la gravedad del problema.

Al ser el análisis de vibraciones uno de los métodos de diagnóstico del estado de maquinaria con mayores perspectivas de futuro, este proyecto es sólo el principio de lo que debería ser una sólida línea de investigación, tanto por la relevancia de dicho método como por la importancia de los sistemas auxiliares del motor. Una vez finalizado el proyecto (cumpliendo objetivos y alcance) hay algunos temas que podrían mejorarse. Por ejemplo, al no ser objeto del presente proyecto, no se ha profundizado en el tratamiento de la señal captada por los transductores (amplificación, filtrado, conversión, etc), sin embargo, dicho estudio sería un complemento adecuado a todo lo presentado en este documento.

Finalmente, como conclusiones personales del autor, cabe destacar el interés despertado no sólo en el análisis de vibraciones, sino también en el mantenimiento predictivo y la instrumentación. Si bien es cierto que el proyecto se centra en auxiliares de motores térmicos, el diagnóstico mediante análisis de vibraciones se puede aplicar a cualquier máquina, desde grandes islas de inyección hasta aerogeneradores, por lo son muchas las posibilidades profesionales en el campo del análisis de vibraciones. Desde un punto de vista personal, el presente proyecto ha supuesto, entre otros muchos aspectos positivos, aprendizaje continuo, hacer frente a tareas cuyos resultados no se obtienen a corto plazo (búsqueda de información, organización, redacción de forma clara y precisa, etc), seleccionar la información necesaria y descartar el resto, repasar y releer con atención y, finalmente, estar satisfecho del trabajo realizado.

10. Fuentes de información

Referencias bibliográficas y artículos

- [1] BALLESTEROS ROBLES F. *Tablas aplicables al mantenimiento predictivo de maquinaria industrial*, Escuela Universitaria Politécnica, Universidad de Sevilla.
- [2] MOBLEY, R. KEITH. *An Introduction to Predictive Maintenance*, Butterworth Heinemann, 2002.
- [3] MONCHY F. *Teoría y Práctica del Mantenimiento industrial*. MASSON, S.A. 1990.
- [4] MACIÁN MUÑOZ, VICENTE. *Mantenimiento de Motores de Combustión Interna Alternativos*. Universidad Politécnica Valencia, 1993.
- [5] DÍAZ NAVARRO, JUAN. *Técnicas de mantenimiento industrial*. Calpe Institute of Technology, 2007.
- [6] MOSQUERA, GENARO. *Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo*, ISID, Venezuela 2001.
- [7] MOBLEY, R. KEITH, *Vibration Fundamentals*. Newnes (Butterwoth- Heinemann), 1999.
- [8] SANTAMARÍA HOLEK, RICARDO. *Consideraciones prácticas y económicas del alineamiento de maquinaria*, 2002.
- [9] WHITE, GLENN D. *Introduction to Machine Vibration*. DLI Enginnering Corporation 1997.
- [10] PINTOR BOROBIA, JESÚS M. *Elementos de máquinas y vibraciones*, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Universidad Pública de Navarra.
- [11] VALVERDE, ANICETO. *Introducción al estudio, análisis y control de las vibraciones*, Universidad Politécnica de Cartagena, 1998.
- [12] JIMÉNEZ YENNY, OSCAR. *Casos Reales de Análisis de Vibración*, 1er Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento, Octubre 2003.
- [13] KULICHEVSKY, R, *Medición y Análisis de vibraciones: una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinarias*, Estudio y ensayo de componentes estructurales, Buenos Aires 1997.
- [14] PARDIÑAS ALVITE, JOSE. *Sistemas auxiliares del motor*, Editex 2007.
- [15] SALAZAR MONCADA, CARLOS A. *Guía de laboratorio para la Simulación de modos de fallo en un sistema de bombeo*. Universidad EAFIT, Medellín 2005.
- [16] GIACOSA, DANTE. *Motores endotérmicos*. Editorial Omega. 1988.
- [17] SANZ ACEBES, SANTIAGO. *Motores*. Editex 2007.
- [18] SCHEFFER, CORNELIUS & GIRDHAR, PARESH. *Practical Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance*. ELSEVIER 2004.
- [19] BARILÁ, DANIEL O. *Contribución al diagnóstico de averías en motores diesel por análisis de vibraciones*, Universidad Politécnica de Valencia.
- [20] WATSON, N & JANOTA, M.S. *Turbocharging. The internal combustion Engine*. Mcmillan 1982.
- [21] WIDMAN, RICHARD. *La vida útil del motor – Refrigeración*. Boletín técnico de Widman International S.R.L, Nº 18, 2001.
- [22] FRIEDMAN, ALAN. *Detección automática del desgaste de rodamientos*. Procedimientos del Instituto de Vibraciones, EE.UU. 2004

- [23] PALOMINO MARÍN, EVELINO. *Curso de análisis de vibración: La medición y el análisis de vibración en el diagnóstico de máquinas rotativas*. Renovetec 2005
- [24] WINKHOFER, JOHN. *Chain Enginnering*. Múnich 1994.
- [25] AZOVTSEV, ANTON & BARKOV, ALEXEI. *Rolling Element and Fluid Film Bearing Diagnostics Using Enveloping Methods*. VibroAcoustical Systems and Technologies, Inc.
- [26] JONES, ROBERT.M. *A Guide to the Interpretation of Frequency and Time Domain Spectrums*. SKF Condition Monitoring, 19 Febrero 1993.
- [27] MEHERWAN P. BOYCE. *Gas Turbine Enginnering Handbook*. Gulf Publishing Company, 1982.
- [28] LILLY, LRC. *Diesel Engine Reference Book*. Butterworth, 1984.
- [29] PERAL ORTS, RAMÓN; CAMPILLO DAVÓ, NURIA & VELASCO SÁNCHEZ, EMILIO. *Bancos de ensayo para docencia en vibraciones mecánicas*. Universidad Miguel Hernández de Elche. Octubre 2008.
- [30] NELSON SAAVEDRA, PEDRO. *La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes: aplicaciones, normativas y certificación*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile.
- [31] FRAGA LÓPEZ, PEDRO. *Las vibraciones torsionales en la detección de la rotura de ejes: Una herramienta para el mantenimiento predictivo*. Revista "Automática e Instrumentación" páginas 70-73, Nº 302, 1999.
- [32] FERREIRO, RAMÓN. *Mantenimiento de bombas centrífugas mediante la captura e interpretación de vibraciones*. "Montaje e Instalaciones" Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones, páginas 42-46, Nº 402, 2006.
- [33] *Manual SKF de mantenimiento de rodamientos*. SKF. Suecia 1992.
- [34] PÉREZ MORENO, R & LIZANA MERCHANT, C. *Acoplamientos mecánicos*. INACAP
- [35] SÁNCHEZ, CARLOS. *Análisis de Vibraciones: Problemas de correas*. "Boletín de noticias Mantenimiento Predictivo" páginas 3-6, Nº 17, mayo 2005.
- [36] BARRETT, RICHAD M. *Low Frecuency Machinery Monitoring: Measurement considerations*. WILCOXON RESEACH, INC. Agosto 2007.
- [37] PACHECO PACHECO, MANUEL. *Bombas centrífugas*. PEMEX 2001.
- [38] EGUSQUIZA, E; PAULA, L; VALERO, C & JOU, E. *El Diagnóstico de Daños en Grupos Hidroeléctricos mediante el Análisis de Vibraciones*. ETS Ingenieros Industriales de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [39] A-MAQ S.A. (ANÁLISIS DE MAQUINARIA). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. 2005.
- [40] HIDALGO, JUAN C. *Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos*. TERMOGRAM.
- [41] *Estudio de fallos en un rodamiento de bolas*. Máster en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico 2009-2010, Universidad de Sevilla.
- [42] ESTUPIÑÁN, E; SAN MARTÍN, C & SOLALIGUE, R. *Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas*. Facultad Ingeniería, Univ. Tarapacá, Chile 2006.
- [43] TORRES, FERNANDO; ROYO, JESÚS A. & RABANAQUE, GLORIA. *Análisis de vibraciones e interpretación de datos*. DIDYF Universidad de Zaragoza.
- [44] DÍAZ, SERGIO. *Medición y Análisis de Vibraciones*. Laboratorio de Dinámica de Máquinas, Universidad Simón Bolívar.
- [45] SINAIS (Ingeniería de Mantenimiento). *Tutorial 3: Demodulación*.

- [46] BELTRÁN PALOMO, PUBLIO & PÉREZ ALARCÓN, ÁLVARO. *La monitorización de vibraciones, solución eficaz para la protección y vigilancia de las turbosoplantes de motores diesel*. TSI –Técnicas y Servicios de Ingeniería S.L. Enero 1998.
- [47] ESTUPIÑÁN, EDGAR & SAAVEDRA, PEDRO. *Análisis de vibraciones aplicado a las maquinas rotatorias de baja velocidad*. Universidades de Tarapacá y Concepción, Chile.
- [48] *Oleohidráulica y Neumática*. Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Oviedo.
- [49] ABB TURBO SYSTEM; LTD. *ABB Turbocharging. Product information*.
- [50] GARCÍA GARRIDO, SANTIAGO. *Averías en turbinas de gas*. Editorial Renovetec 2010.
- [51] LINARES, O. *El Turbocompresor y su mantenimiento*. Boletín técnico de Widman Nº 25.
- [52] ZHIQIANG WANG. *Study on Fault Diagnosis of Fuel Injection Based on Vibration Signal Analysis of High-pressure Fuel Injection Pipe*. CCSE Applied Physics Research, Nov 2009.
- [53] ARANEDA, DANIEL; ARAVENA, DIEGO; ACUÑA, ITALO & BELLO, JULIO. *Motores Diesel*. INACAP.
- [54] CAMPILLO DAVÓ, NURIA; PERAL ORTS, RAMÓN & VELASCO SÁNCHEZ, EMILIO. *Aplicación de técnicas de análisis espectral de vibraciones e identificación de fuentes de ruido de la planta enfriadora BRAW-90*. Universidad Miguel Hernández de Elche. TECNIACUSTICA 2006.
- [55] REIMCHE, W.;SÜDMERSEN, U.;PIETSCH, O.; SCHEER, C. & BACH, F. *Basics of vibration monitoring for fault detection and process control*. University of Hannover, 2003.
- [56] ZHU, JIAN-YUAN. *Detection of cylinder pressure in diesel engines using cylinder head vibration and time series methods*. "Journal of Marine Science and Application" Volumen 6, Nº 4, Diciembre 2007.
- [57] ABAROA GÁLVEZ, AGUSTIN. *Fuerzas y momentos en los motores diesel de dos tiempos con cruceta que excitan vibraciones en los buques*. Bit microprecisión S.A. Julio 2009.
- [58] *Predictive Maintenance*. Electric Power Research Institute (EPRI). 2003
- [59] Apuntes de *Mantenimiento de equipos electromecánicos*. Universidad de Burgos. 2005.
- [60] BRUZOS, TOMÁS. *Tubos de los inyectores*. "Sabelotodo.com". Septiembre 2009.
- [61] DAMING, TANG. *Vibration control of internal combustion engine*. Southwest Jiaotong University Press, 1993.
- [62] BRUZOS, TOMÁS. *Sistema de inyección: mecanismos de avance*. "Sabelotodo.com". Septiembre 2009.
- [63] FRIEDMAN, ALAN. *Demodulación*. DLI Engineering Corp.
- [64] FERTIS, DEMETER G. *Mechanical and structural vibrations*. 1981
- [65] VIEJO ZURUCARAY, MANUEL. *Bombas: Teoría, diseño y aplicación*. Ed. Limusa. 1985.

Direcciones de Internet

- [66] Brüel & Kjaer. Transductores y analizadores de vibración. www.bksv.es
- [67] Reycomotor. Componentes de motor. www.reycomotor.com
- [68] Bombas de agua y aceite Kitset. www.reycomotor.com/Reyco/Kitset/Document/Pumps
- [69] Bombas de aceite Clevite. www.reycomotor.com/Reyco/Dana/Pumps3
- [70] SPM. Condition monitoring solution. Monitoreo completo de ventiladores. www.predictivo-industrial.com/spm/products/online/mg4apps/fans1

- [71] TSI – Técnicas y servicios de ingeniería S.L. www.tsisl.es
- [72] PSOC-CHILE. Vibraciones. www.psoc-chile.es.tl/Vibraciones
- [73] Usos y aplicaciones de las bombas centrífugas
www.quiminet.com/ar4/ar_vcdaddsaadvcadvc-usos-y-aplicaciones-de-las-bombas-centrifugas
- [74] MS MOTOR SERVICE. Circuito de refrigeración. www.ms-motor-service.es/content2
- [75] Tipos de cojinetes para bombas centrífugas.
<http://bombascentrifugas.info-tecnica.org/category/cojinetes/>
- [76] Motores sobrealimentados. www.mecanicavirtual.org/turbo2
- [77] Clevite: Cigüeñales. Absorbedor vibraciones. www.reycomotor.com/Reyco/Dana/Cranks1
- [78] Cursos de mecánica del automóvil. www.mecanicavirtual.org
- [79] Cojinetes y rodamientos. <http://rodamientos.wordpress.com>
- [80] Detección de averías en turbos. www.ventadeturbos.es/deteccion_de_averias
- [81] SPM Turbo charger monitoring solution. www.dvingenieria.com.ar/Turbocharger.pdf
- [82] Soler&Palau. Soluciones innovadoras. Vibraciones. www.solerpalau.es/formacion_01_19
- [83] Confidabilidad.net. <http://confidabilidad.net/articulos/analisis-de-firma-electrico/>
- [84] Reset S.A. www.resetsa.com/Shinkawa.ppt
- [85] Sinais: Ingeniería de Mantenimiento. www.sinais.es/indice_vibraciones
- [86] Sistema de Turbo. La Sobrealimentación. www.automecanico.com
- [87] Widman. www.widman.biz
- [88] Sistema de lubricación. www.mecanicayautomocion.blogspot.com/2009_02_01_archive
- [89] INECO. www.ineco.cl/noticias/tecnicos/soluciones-valvulas-de-control
- [90] Turboalimentación e intercooler.
<http://turbogarzon.blogspot.com/2008/08/para-llevar-cabo-la-combustin-completa.html>
- [91] Sensores de presión en el automóvil. www.mecanicavirtual.org/sensores4