

IMPACTO DEL MANTENIMIENTO PROACTIVO EN LA PRODUCTIVIDAD

Dr Pedro Saavedra G.
Msc. Edgar Estupiñan P.
Universidad de Concepción - CHILE
Casilla 160-C, Fono: 56-41-204327, Fax: 56-41-251142

RESUMEN

En este trabajo se ilustra, a través de ejemplos, el uso de una estrategia de mantenimiento predictivo-proactivo para aumentar la vida de componentes de las máquinas, aumentando así su disponibilidad y aumentando la productividad de la Planta.

1 INTRODUCCION

La intensa presión competitiva en el mercado internacional está forzando a los responsables del mantenimiento en las plantas industriales a realizar la transición de ser un departamento que realiza reparaciones y cambia máquinas, a una unidad de alto nivel que asegura capacidad de producción. Es necesario darse cuenta que el mantenimiento produce un producto y este producto es capacidad de producción.

Las estrategias de mantenimiento pueden ser clasificadas de diferentes formas Una de ellas es la que se indica a continuación:

- **MANTENIMIENTO REACTIVO.** En esta estrategia se permite a la máquina funcionar hasta la falla. En ese instante se realiza la reparación o reemplazo de ella.
- **MANTENIMIENTO PREVENTIVO O BASADO EN TIEMPO.** En esta estrategia se interviene la máquina periódicamente para inspeccionar y reemplazar componentes, aún cuando la máquina esté operando satisfactoriamente.
- **MANTENIMIENTO PREDICTIVO O BASADO EN CONDICION.** En esta estrategia de mantenimiento se evalúa la condición mecánica de la máquina y su evolución, mientras ella está funcionando, a través de diversos síntomas que ella emite al exterior. En base a esto se programan las necesidades de mantenimiento cuando se detecta un problema en ella.
- **MANTENIMIENTO PROACTIVO.** En esta estrategia de mantenimiento se identifica y corrige las causas raíz de las fallas de la máquina. Se pretende maximizar su vida útil operativa.

El aumento de la vida operativa de la máquina a través de una estrategia de mantenimiento proactivo indudablemente disminuye los costos de mantenimiento y aumenta la productividad de la Planta. Sin embargo, en la práctica en muchas empresas no se ha logrado los resultados esperados por falta de personal capacitado en el tema. A continuación se ilustrará las ideas precedentes analizando los factores a considerar cuando se quiere aumentar la vida de los rodamientos.

2 VIDA DE LOS RODAMIENTOS.

La vida de un rodamiento se define como el tiempo en horas o el número de revoluciones, que él funciona antes de que se manifieste el primer signo de fatiga superficial en uno de sus aros o de sus elementos rodantes. *Timken USA*, por ejemplo, como criterio de falla, una picadura de área 6 mm^2 . Este es un valor de referencia, pues la vida útil del rodamiento se puede extender mucho más.

Como el inicio de la fatiga es un fenómeno aleatorio, la vida de un rodamiento no se puede predecir con precisión. Es necesario basar la predicción de la vida del rodamiento en una evaluación estadística de un amplio número de rodamientos aparentemente idénticos, funcionando en idénticas condiciones. [Figura 1](#) muestra la forma de la distribución estadística de la vida de los rodamientos.

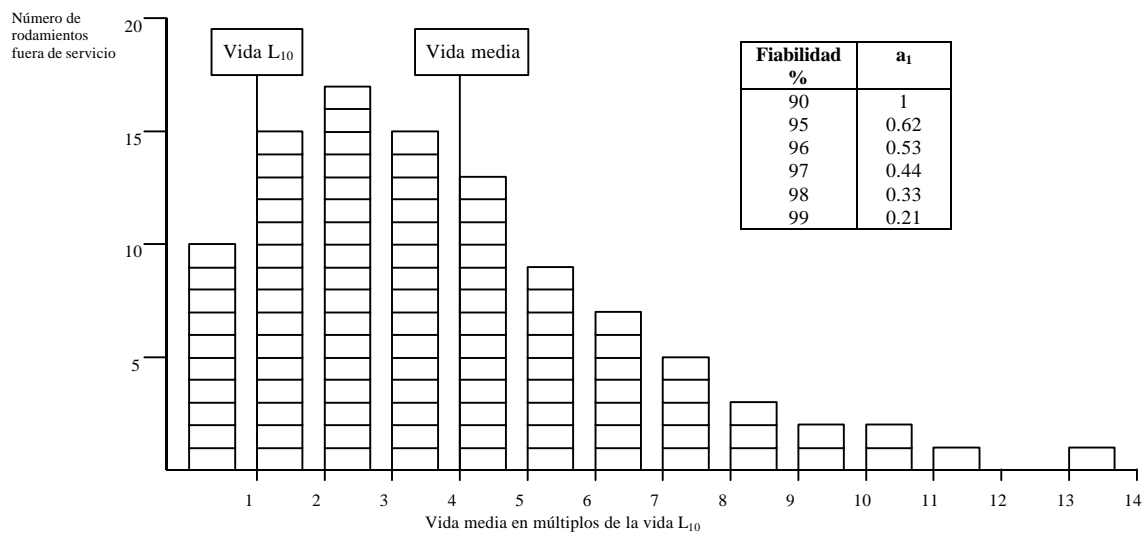


Figura 1. Distribución estadística de la vida de los rodamientos

ISO 281 evalúa la vida de un rodamiento en función de su carga como:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \times 10^6 (\text{rev})$$

- L_{10} = Vida nominal del rodamiento, en revoluciones, que se espera que alcance o sobrepase el 90% de los rodamientos antes que se manifieste signos de fatiga.
- C = Capacidad de carga dinámica, en (N)
- P = Carga dinámica equivalente, en (N)
- p = 10/3 para rodamientos de rodillos
- p = 3 para rodamientos de bolas

Observe que un aumento de un 10% en la carga, significa un aumento en el denominador de 1.1 elevado a 3.33 (para el caso de rodamiento de rodillos), es decir, 1,37.

Basada en la fórmula ISO 281/1, la vida del rodamiento considerando el efecto de la lubricación es:

$$L_{na} = (a_1)(a_{23})(L_{10})$$

a_{23} = Factor que viene determinado esencialmente por la eficacia de la lubricación del rodamiento y la separación entre las superficies en el contacto.

v_1 = Viscosidad cinemática necesaria para una lubricación adecuada (obtenida de los catálogos de rodamientos)

v = Viscosidad cinemática real del lubricante a su temperatura de funcionamiento.

Finalmente, *SKF* cuantifica el efecto de la contaminación sólida de la lubricación en la vida del rodamiento a través de:

$$L_{naa} = a_1 a_{skf} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

a_{skf} = Es un factor complejo que incluye las condiciones de lubricación

P_u = Carga límite de fatiga. Carga por debajo de la cual no se produce fatiga en el material de los rodamientos.

De lo anterior se concluye que si se quiere ser proactivo, es decir, aumentar la vida de los rodamientos, es necesario:

- ☞ Disminuir la carga que actúa sobre ellos.
- ☞ Utilizar un lubricante con la viscosidad adecuada
- ☞ Utilizar un lubricante con contaminación sólida controlada.

Tabla N°1 indica las causas más comunes por la que se carga los rodamientos adicionalmente a las fuerzas de trabajo. La necesidad de mayor vida para los rodamientos ha traído como consecuencia que el personal de mantenimiento de las empresas alineen y balanceen los rotores más allá de lo que los diferentes estándares al respecto (balanceamiento y alineamiento de precisión).

[TABLA N° 1. Causas comunes por la que se cargan los rodamientos.](#)

- Desbalanceamiento de rotores.
- Desalineamiento de acoplamientos
- Distorsión de la carcasa
- Transmisión por correas desalineadas
- Correas sobretensadas
- Bombas centrífugas trabajando lejos de su caudal nominal
- Apriete inadecuado del rodamiento en el eje.

3 TECNICAS UTILIZADAS EN EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO-PROACTIVO.

3.1 ANALISIS DE VIBRACIONES MECANICAS

Las vibraciones mecánicas es el parámetro más utilizado universalmente para monitorear la condición de la máquina, debido a que a través de ellas se puede detectar la mayoría de los problemas que ellas presentan. Para analizar las vibraciones se utilizan diferentes técnicas, como se muestra en la [Figura 2](#). Se requiere de diferentes técnicas debido a que problemas diferentes pueden presentar síntomas similares. Para ilustrar la situación, suponga que el sistema de vigilancia de la máquina detecta un cambio en la amplitud de la componente vibratoria a $1xrpm$. Este síntoma puede tener su origen en numerosos problemas: Desbalanceamiento, desalineamiento, soldaduras mecánicas, eje agrietado, pulsaciones de presión, hambruna de la bomba, resonancia, etc. Para poder discernir cuál es el problema específico, es necesario utilizar en forma integrada un conjunto de técnicas de diagnóstico.

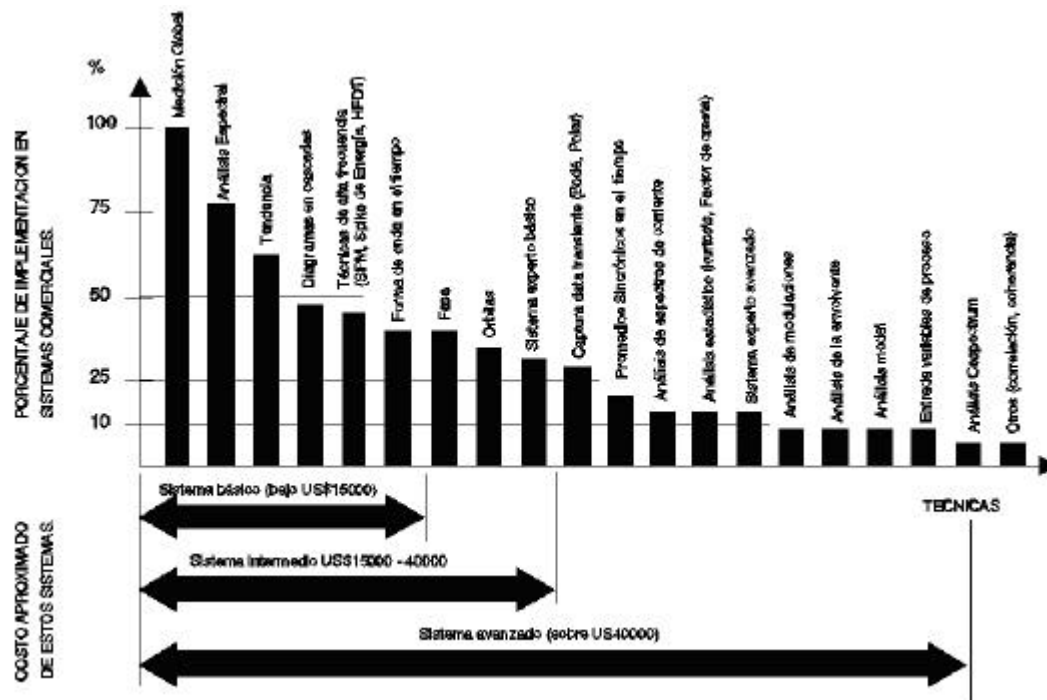


Figura 2. Técnicas vibratorias utilizadas

3.2 MONITOREO DE DIFERENTES TIPOS DE ONDAS

Otro grupo de técnicas que se utiliza en el diagnóstico de fallas y en la vigilancia de máquinas rotatorias es la medición y análisis de diferentes tipos de ondas sean mecánicas o acústicas. Dentro de las técnicas más utilizadas se encuentran:

- Análisis del sonido
- Análisis del ultrasonido
- Análisis de ondas mecánicas o vibraciones de alta frecuencia, HDF.
- Análisis de ondas de choques SPM
- Análisis de emisiones acústicas
- Análisis de la energía espectral emitida, SEE

3.3 ANALISIS DE ACEITES.

- Análisis espectral del aceite (*SOAP Analysis: Spectrometric Oil Analysis Procedure*).
- Análisis de los residuos en el aceite: ferrografía directa, ferrografía analítica, análisis de astillas (chips).
- Análisis de la contaminación en los aceites hidráulicos.

3.4 TERMOGRAFIA.

4 EJEMPLO APLICADO A UN MOTOR ELECTRICO.

Este ejemplo se refiere a un motor eléctrico de 6 MW que mueve un molino en una industria de cemento. El motor presentó vibraciones anormales. [Figura 3](#) muestra un espectro vibratorio de dicho motor tomado en el descanso lado libre en la dirección vertical. Se observa que la mayor componente se produce a una frecuencia de $2xrpm$. El personal de planta y los analistas locales diagnosticaron un problema de desalineamiento o un problema eléctrico. Como el problema continuaba fue enviado al taller del fabricante. Para confirmar el diagnóstico el motor se hizo girar con otro motor de corriente continua, de manera que no existieran fuerzas electromagnéticas. Para acoplar los motores se utilizó una doble junta cardánica, de manera que fuese eliminado cualquier problema de desalineamiento. Sin embargo, las vibraciones continuaron indicando que el diagnóstico no fue acertado. En ese momento fuimos requeridos para diagnosticar la causa del problema.

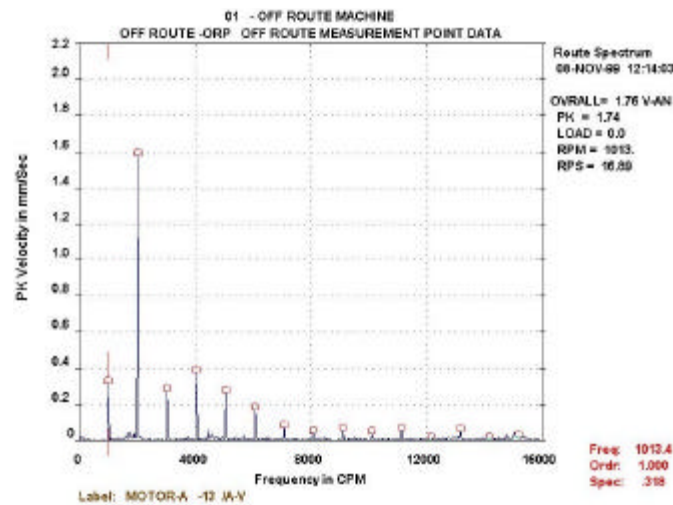


Figura 3. Espectro vibratorio del descanso A, dirección vertical.

Nosotros pensamos que el error cometido por los analistas es un error muy común y es de tratar de diagnosticar un problema basado en la componente espectral de mayor valor. El análisis correcto es determinar la causa que genera un espectro compuesto por varios múltiplos o armónicos de la velocidad de rotación. Hay cuatro principales causas que pueden generar este espectro: solturas mecánicas, rozamiento parcial rotor-estator, desalineamiento, distorsión de la carcasa. Para discriminar entre estas causas se analiza si existe vibración axial significativa y la diferencia de fase de la componente a $1xrpm$ entre las vibraciones en los diferentes descansos. Al presentar el motor vibración axial significativa y por una detallada inspección de él se descartó la solturas y el rozamiento.

Considerando que el desalineamiento no genera vibraciones cuando los ejes están unidos por una doble junta cardánica, nuestro diagnóstico de la causa de las vibraciones, por descarte de los anteriores, fue: carcasa distorsionada. Otro síntoma que confirmaba nuestro diagnóstico fue la diferencia de fase de 170° que había en las vibraciones axiales a $1xrpm$ medidas en ambos rodamientos del motor.

Figura 4 muestra un esquema del motor que explica porqué la carcasa del motor es propensa a distorsionarse. El está construido por dos tapas rígidas en los extremos, conectadas por un tubo, que es su cuerpo central. El tubo no tiene un espesor adecuado y por consiguiente, es propenso a deformarse. Un posterior análisis del motor mostró que la causa porque se distorsionaba la carcasa era porque los alojamientos de los rodamientos en ambas tapas no eran colineales.

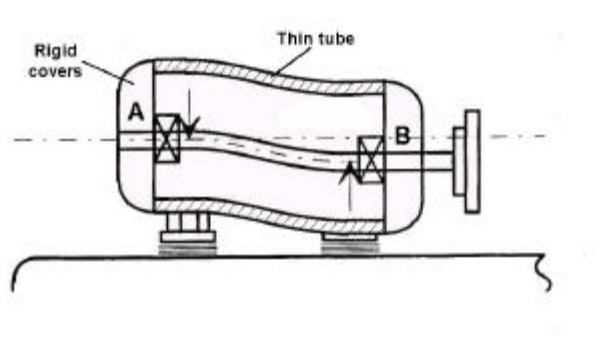


Figura 4. Esquema del motor analizado

Hasta este momento el cliente estaba parcialmente convencido con este diagnóstico. El quería más evidencias del problema. En ese momento decidimos realizar un análisis de órbitas que afortunadamente el cliente entendía del tema. Para ello usamos dos acelerómetros montados en la caja del rodamiento en las direcciones vertical y horizontal respectivamente. Para un motor sin problemas la órbita es una elipse. Cuando existen cargas adicionales sobre el descanso o precargas, la órbita cambia de la forma elíptica a una forma de plátano o un ocho de acuerdo al valor de la precarga. Figura 5 muestra las órbitas obtenidas en ambos descansos del motor. La órbita en el descanso lado libre (descanso A) tiene forma de ocho y la órbita en el descanso lado acoplamiento (descanso B) tiene forma de plátano indicando que la precarga en el descanso A es mayor que en el descanso B.

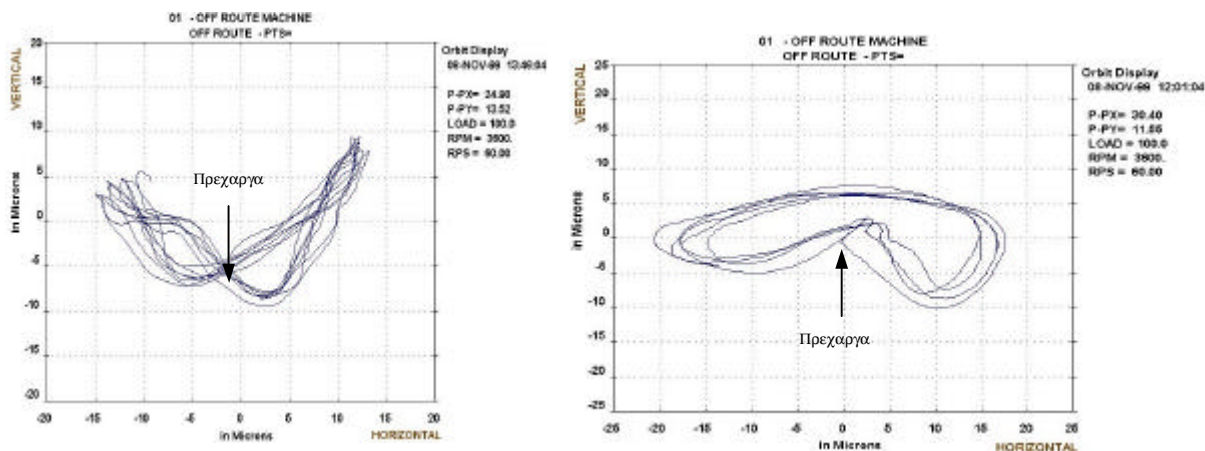


Figura 5. Orbitas medidas en ambos descansos del motor

El análisis de las órbitas indicaba que la carcasa del motor estaba deformada como se indica en [figura 3](#). Para comprobar esto se levantó verticalmente con una palanca el descanso B mientras se monitoreaba en forma continua la forma de la órbita. Se observó que a medida que iba disminuyendo la precarga sobre el rodamiento, las órbitas cambiaban la forma de plátano y ocho a una forma elíptica.

Con esta demostración el cliente y sus asesores quedaron completamente convencidos del diagnóstico y maquinaron los alojamientos de los descansos en las tapas para que quedaran colineales.

5 EJEMPLO APLICADO A UNA TRANSMISION DE ENGRANAJES.

En este ejemplo se analiza la condición mecánica de la transmisión de la pluma de una pala electromecánica de la minería. En las palas electromecánicas, las transmisiones empuje-recoge (*crowd*) y la transmisión de la pluma (*hoist*) tienen ciclos de trabajos repetitivos de corto tiempo durante los cuales las vibraciones varían grandemente debido a los cambios de carga y velocidad.

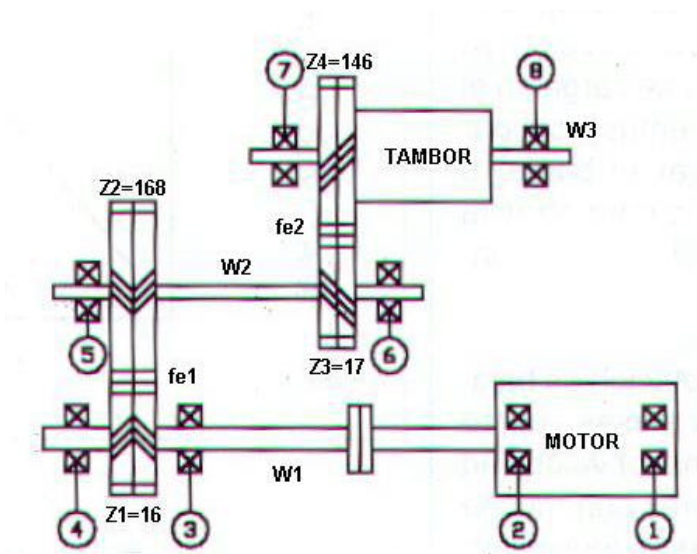


Figura 6. Esquema de la transmisión *hoist* analizada

[Figura 6](#) muestra un esquema de la transmisión *hoist* a analizar. [Figura 7](#) muestra un registro de la aceleración vibratoria medida en el descanso primario pluma durante un ciclo de trabajo. Esta vibración se puede analizar en el espectro y/o en el tiempo dependiendo de las capacidades del equipo de análisis y de los objetivos del monitoreo.

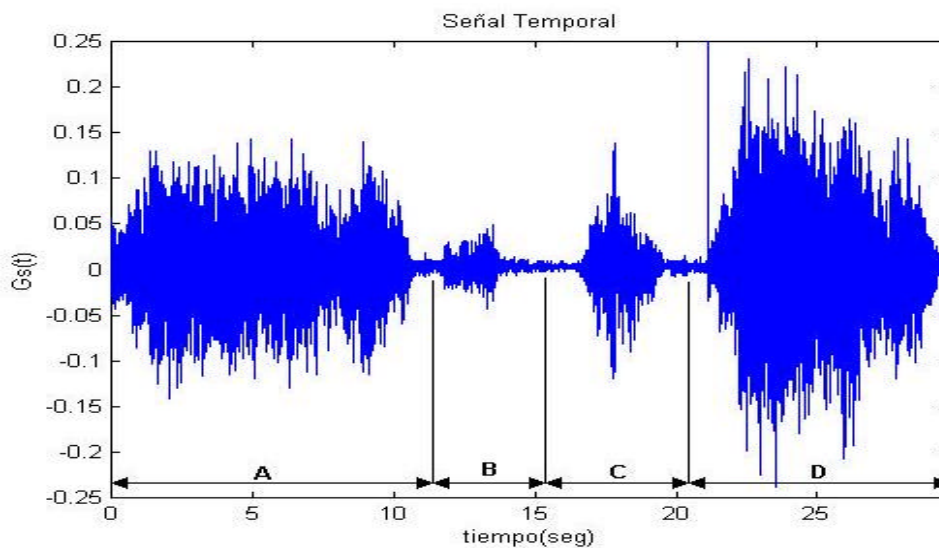


Figura 7. Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo de la pala

El análisis de la vibración en el tiempo permite determinar el valor de las aceleraciones máximas y por lo tanto de las fuerzas dinámicas máximas ($fuerza = masa \times aceleración$), y el instante en que ocurren.

El objetivo de una estrategia de mantenimiento proactivo es aumentar la disponibilidad del equipo. Para aumentar la vida de los elementos hay que evitar sobrecargas en ellos. Recuerde que la vida de los elementos (rodamientos, engranajes) disminuye significativamente con la fuerza aplicada sobre ellos. El análisis de la aceleración en el tiempo permite determinar causas de las sobrecargas, por ejemplo:

- Inadecuados settings en el sistema de control de los movimientos de la pala. Observe en figura 7 que las mayores aceleraciones en este caso (y por lo tanto las mayores fuerzas dinámicas) no se generan cuando la pala está cargando material, sino que cuando ella baja para iniciar otro ciclo después de haber descargado el material en el camión.
- Mala operación de la pala (el operario golpea la pala con materiales duros). Esta es la causa atribuida por los fabricantes de las palas para justificar roturas o daños prematuros de los elementos de ella.
- Problemas de diseño y/o de montaje. Las transmisiones que giran en uno u otro sentido trabajan con impactos. Estos impactos pueden ser significativos si el huelgo es inadecuado o la elasticidad del sistema no es la adecuada para absorberlos.

Para determinar la condición mecánica de una máquina, el punto de partida es obtener un espectro de las vibraciones medidas en la máquina. Para máquinas que trabajan con carga y velocidad variable el análisis espectral clásico basado en la *FFT* es inadecuado, como se observa en figura 8. Las componentes espectrales se desparraman en el espectro haciéndolo no interpretable.

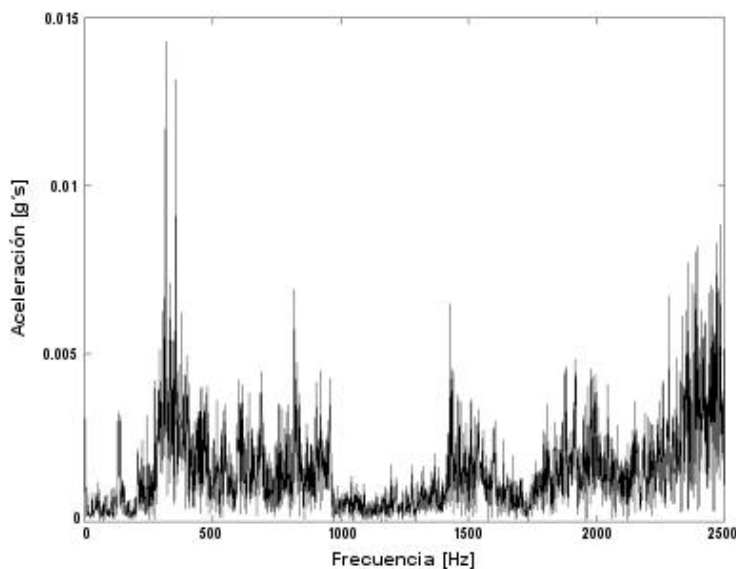
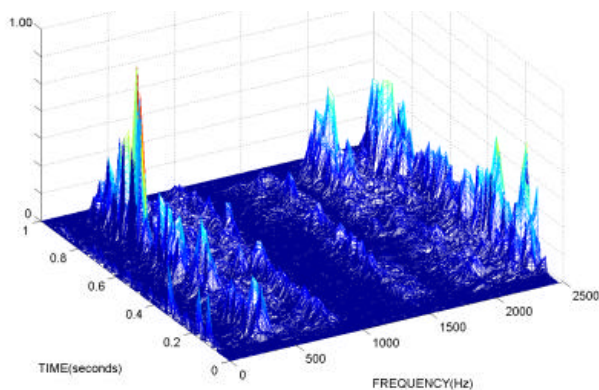


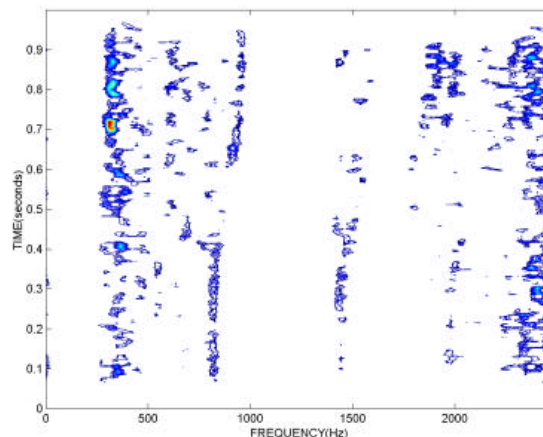
Figura 8. Espectro vibratorio

Para este tipo de máquinas es necesario utilizar otras técnicas de análisis:

1. Para sobrellevar el problema del cambio de velocidad mientras se efectúan las mediciones se utiliza el análisis de ordenes (*order tracking*, *order análisis*) o el uso de las transformadas tiempo-frecuencia, ver figura 9.
2. Análisis de transientes para permitir al usuario indicar al equipo en qué intervalo de tiempo del ciclo de trabajo se quiere que se realice el espectro. Para el ejemplo analizado, si se quiere que el análisis se realice mientras la pala está cargando material le indica de 0 a 10s, de acuerdo a figura 7.
3. Análisis de correlaciones vibración–carga. Como se puede apreciar en figura 9, las vibraciones en el engrane varían significativamente con los cambios de carga. Para poder detectar que un aumento de las vibraciones en el engrane provienen de un problema en él y no de los cambio de carga, es necesario correlacionar las vibraciones con la carga en la máquina.



a. Transformada ZAM



b. Mapa de contornos ZAM

Figura 9. Transformada Tiempo-Frecuencia ZAM

En [figura 9](#) se puede apreciar claramente como las vibraciones en el engrane superior varían su frecuencia en acorde a como varía la velocidad de rotación de la unidad. En esta figura se aprecia además, las grandes variaciones de la vibración a la frecuencia de engrane que se producen con la variación de carga en la pala.

6 CONCLUSIONES

La productividad de una Planta aumentará en la medida que las fallas en las máquinas disminuya de una forma sustentable en el tiempo. Uno de los factores importantes para lograr esto es no sobrecargarlas. En el presente trabajo se ilustró la eficacia del análisis de vibraciones para determinar problemas que sobrecargan las máquinas. Diagnosticado y solucionado el problema, la vida de la máquina y la producción de ella aumentará y los costos de mantenimiento disminuirán.