



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis de vibraciones en una tronadora de
madera

Vibration analysis in a wood chipper

Autor

David Esteban Villuendas

Directores

Jorge Aisa Arenaz
Daniel Mercado Barraqueta

Titulación del autor

Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Año 2024

Resumen

Este presente proyecto tiene como objetivo fundamental estudiar detalladamente mediante el análisis de vibraciones el estado de una tronadora de madera en una fábrica de papel y celulosa.

El primer paso consiste en distinguir y clasificar los distintos tipos de fallos probables de la máquina a estudiar. Una vez clasificados, se hace un seguimiento temporal de la máquina mediante el análisis de espectros de vibraciones. El espectro de vibración no sólo puede aportar información acerca de la gravedad del problema a seguir, sino que también, conociendo los componentes y características de la máquina, es posible determinar la fuente potencial del problema.

Cada componente genera un fallo con una vibración y amplitud distinta a cualquier otro. Sin embargo, en el análisis de vibraciones hay patrones que son similares en cualquier tipo de máquina rotativa que servirán de referencia para identificar el problema. Para ello, se utilizan equipos electrónicos de diagnóstico, capaces de mostrar gráficas que ayudan y facilitan al analista a hacer la valoración del equipo.

Una vez identificado el problema, se hace un seguimiento de la máquina hasta que alcance los valores críticos para poder extender al máximo la vida útil del equipo y conseguir una eficiencia mayor.

En el transcurso de este proyecto se irá explicando detalladamente el proceso que se ha seguido con el equipo, así como los espectros recopilados en el análisis vibracional.

Abstract

The main objective of this project is to study in detail, by means of vibration analysis, the condition of a wood cutting machine in a pulp and paper mill.

The first step is to distinguish and classify the different types of probable failures of the machine to be studied. Once classified, the machine is temporarily monitored by analyzing vibration spectra. The vibration spectrum can not only provide information about the severity of the problem to follow, but also, knowing the components and characteristics of the machine, it is possible to determine the potential source of the problem.

Each component generates a fault with a vibration and amplitude different from any other. However, in vibration analysis there are patterns that are similar in any type of rotating machine that will serve as a reference to identify the problem. For this purpose, electronic diagnostic equipment is used, capable of displaying graphs that help and facilitate to make the assessment of the equipment to the analyst.

Once the problem is identified, the machine is monitored until it reaches critical values in order to maximize the life of the equipment and achieve higher efficiency.

In the course of this Project, it will be explained in detail the process followed with the equipment, as well as the spectra collected in.

Índice

Introducción	6
Capítulo I: Conceptos básicos y teóricos.....	8
Mantenimiento	8
Introducción a la vibración.....	9
Transformada de Fourier	11
PeakVue.....	12
Procesamiento de señales.....	13
Capítulo II: Contexto de la máquina a analizar	15
Capítulo III: Desarrollo.....	17
Preparación	17
Capítulo IV: Resultados	23
Interpretación de resultados.....	23
Corrección y comparativa tras el cambio	25
Conclusiones	28
Referencias.....	29

Introducción

Toda máquina rotativa se encuentra continuamente expuesta a un gran desgaste mecánico. Se pueden obtener múltiples parámetros en una máquina de esta característica (temperatura, velocidad, consumo de intensidad...), siendo el espectro de vibraciones el parámetro que mayor cantidad de información nos puede proporcionar. Debido a este motivo, se considera de vital importancia abordar el tema del análisis de vibraciones en este trabajo final de grado, generando así conocimiento al respecto y teniendo un impacto directo en la sociedad y en la mejora de sus equipos productivos. Dicha importancia cobra una fuerza mayor cuando se trata de una empresa como se mencionará posteriormente, una fábrica de papel y celulosa, La Montañanesa, del grupo Lecta, una compañía europea líder en la fabricación y distribución de papeles especiales para etiquetas y embalaje flexible, papel estucado y no estucado para edición e impresión comercial. Lecta es un grupo multinacional con 2.852 empleados y siete fábricas en España, Francia e Italia que cuentan con las certificaciones internacionales más exigentes, donde la fábrica mencionada anteriormente cuenta con 430 empleados y cuenta con una producción de 436.000 toneladas por año, siguiendo un desarrollo continuo de fabricación y el fallo o la parada inesperada de un equipo de la producción significaría bloquear prácticamente todo el proceso de fabricación. El análisis de vibraciones es un recurso integrado en una sección llamada mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo aglutina una agrupación de técnicas encaminadas a predecir la avería y/o rotura de la máquina, objeto de estudio antes de que se produzca o se empiece a manifestar gravemente afectando a la calidad del producto o a la producción. Actualmente, el mantenimiento predictivo se está posicionando como el ámbito más importante en cuanto a mantenimiento se refiere en la nueva revolución industrial conocida como “industria 4.0” [22]. Por ello, este proyecto utiliza una de las técnicas más extendidas del mantenimiento predictivo en Ingeniería Mecánica, el análisis de vibraciones, una técnica en continua mejora y muy importante para la confiabilidad de una planta. Esta técnica está muy extendida por la industria y ya se ve en muchas fábricas implantada en su propio GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistida por Ordenador), un software para la gestión del mantenimiento.

Una gran ventaja del análisis de vibraciones es que se trata de una herramienta que no se interpone ni altera el funcionamiento de la máquina. Se recopilan las vibraciones mecánicas y a través de un espectro se nos muestra la información que permite al técnico valorar la gravedad del problema. Debido a este motivo, una de las cuestiones más importantes es realizar medidas

periódicas, puesto que cada máquina se comporta de una manera totalmente distinta pese a que sean iguales o similares.

En el transcurso de este proyecto se expondrán con detalle algunas de las técnicas del análisis de vibraciones (forma de onda, "PeakVue", etc...) así como los principales fallos teóricos que pudiera tener la máquina a estudiar. Finalmente se estudiará y diagnosticará el problema detectado en dicho equipo mencionado.

Capítulo I: Conceptos básicos y teóricos.

En este capítulo se exponen los principios de la teoría de vibraciones y el análisis de éstas. Es decir, se presentan los fundamentos del diagnóstico de fallas en equipos, basado en la medición, recogida de datos y análisis e interpretación de éstos.

Mantenimiento

Tener las máquinas en perfecto funcionamiento en una industria es vital para el óptimo funcionamiento de ésta. Para ello, tener una buena gestión del mantenimiento industrial permite asegurarse un eficaz y correcto funcionamiento de la empresa. A continuación, se exponen los principales tipos de mantenimiento en función de las demandas de las empresas [2]:

- Mantenimiento correctivo. Como su propio nombre indica, este tipo de mantenimiento consiste en reparar una avería que ya está producida. El mantenimiento correctivo se trata de un tipo de mantenimiento no planificado, puesto que es recomendable aplicarlo en equipos poco críticos, que tengan margen de paro para no influir en la producción de una empresa. Este tipo de mantenimiento reduce la pérdida de rentabilidad de una empresa, puesto que necesitas tener un alto stock de repuesto para evitar grandes paros y generalmente, las averías imprevistas suelen conllevar mayores problemas y defectos que una localizada previamente. Por esta última razón es un tipo de mantenimiento no recomendable tampoco desde el punto de vista de la seguridad laboral.
- Mantenimiento preventivo. Consiste en evitar la aparición de averías. En este tipo de mantenimiento, o bien por experiencia o por indicación del fabricante se sustituyen los componentes desgastados cuando se cree que han llegado al final de su vida útil. En este tipo de mantenimiento se realizan paros programados en los equipos para acondicionar y revisar posibles desgastes que puedan estar aumentando. Ejemplos de este tipo de mantenimiento podrían ser la lubricación periódica, limpieza o la sustitución anticipada de piezas críticas.
- Mantenimiento predictivo. Se trata de recopilar una serie de datos y parámetros de la máquina para conocer su comportamiento a lo largo del tiempo y poder predefinir el instante de rotura de la máquina a través de la interpretación de dichos datos. Así se puede realizar una revisión o una reparación antes de que se produzca la avería. Hay varias técnicas no destructivas que son empleadas en este tipo de mantenimiento para determinar el estado de la máquina sin dañarlo. Las técnicas más comunes son:

- Análisis de vibraciones
 - Termografía.
 - Ultrasonidos.
 - Radiografía.
 - Líquidos penetrantes
 - Partículas magnéticas.
- Mantenimiento prescriptivo. Se trata de una técnica de mantenimiento muy avanzada que utiliza análisis de datos a través del monitoreo de condición y la inteligencia artificial para poder predecir los fallos y hacer un diagnóstico con las acciones para evitar el problema. Se trata de una evolución del mantenimiento predictivo. Este tipo de mantenimiento recopila todos los datos obtenidos desde los distintos sensores colocados, se transfieren a una plataforma donde se recopilan y a través de la inteligencia artificial se determina los posibles problemas y el tipo de mantenimiento necesario para evitar este fallo.

Una vez conocidos los tipos de mantenimiento principales, este trabajo se puede incluir dentro del mantenimiento predictivo, puesto que nos centraremos en el análisis de vibraciones.

Introducción a la vibración

Se entiende por vibración el movimiento de un cuerpo en torno a una referencia. La referencia se trata de la posición de la masa cuando se encuentra en reposo. En un cuerpo giratorio, la referencia corresponde con la línea central del eje que se encuentra girando [3].

La vibración es producida cuando un cuerpo u objeto responde a algún tipo de excitación o fuerza. Esta fuerza, generalmente denominada fuerza dinámica, puede estar originada en el interior o el exterior del cuerpo. Las fuerzas dinámicas pueden ser periódicas, como por ejemplo un fallo en la pista de un rodamiento, o aleatorias, como por ejemplo la cavitación de una bomba.

Las vibraciones se estudian a partir de las ecuaciones básicas del movimiento armónico simple. Si nos imaginamos que el cuerpo que se encuentra vibrando es un muelle con una masa ideal, al excitarla, el cuerpo irá oscilando en torno a su eje de referencia originando un desplazamiento que lo podemos representar en una forma de onda. En esta forma de onda se puede observar que el periodo es un ciclo completo del movimiento, la amplitud es el desplazamiento que ha hecho el cuerpo y el RMS o valor eficaz se le denomina al valor cuadrático medio de una

onda sinusoidal [4]. Dicho valor es muy usado porque así evitas picos de vibración en una onda, es decir, la conviertes más constante. Generalmente todos los valores de vibración tanto en velocidad como en aceleración se muestran en RMS.

$$RMS = \frac{Amplitud}{\sqrt{2}}$$

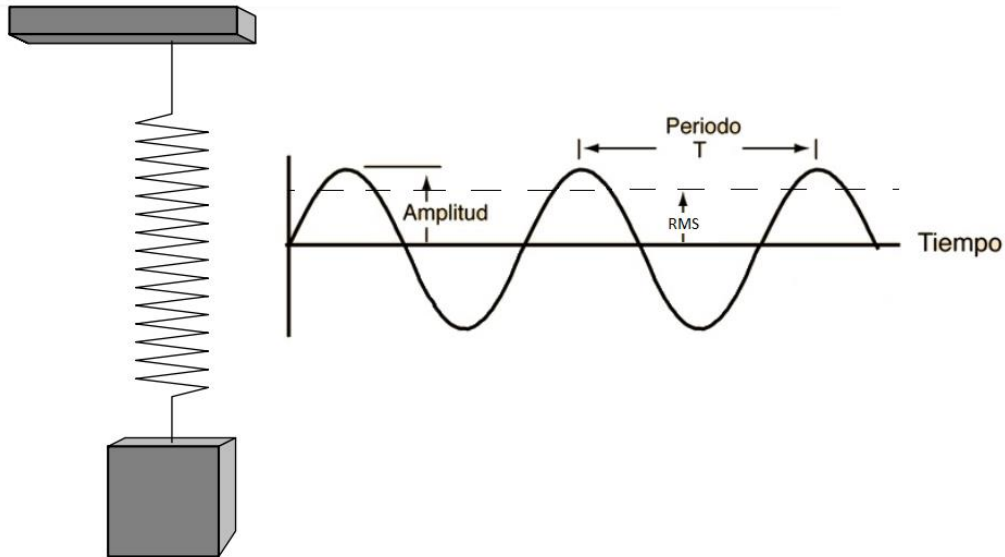


Figura 1. Movimiento armónico simple [23]

La amplitud de la onda mencionada anteriormente es la magnitud de la vibración, muestra de la gravedad de ésta. La amplitud puede representarse de tres formas:

- **Desplazamiento:** Es la magnitud más adecuada para elementos giratorios de bajas frecuencias. La unidad de medida comúnmente utilizada son las micras de milímetro en valor pico a pico (micras P-P). La función expresada analíticamente es:

$$X = x \cdot \text{sen}(\omega t)$$

- **Velocidad:** Es la magnitud más adecuada para elementos giratorios de frecuencias medias. La unidad de medida utilizada son mm/s en valor RMS. La forma de onda de la velocidad está desfasada 90° con respecto al del desplazamiento. La función expresada analíticamente es:

$$V = \frac{dx}{dt} = Ax \cdot \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

- **Aceleración:** Es la magnitud más adecuada para elementos giratorios de frecuencias altas. La unidad de medida utilizada son G's en valor RMS (1G's = 9,80665 m/s²). La forma de onda de la aceleración está desfasada 90° con respecto a la velocidad. La función expresada analíticamente es:

$$a = \frac{dv}{dt} = A^2x \cdot \text{sen}(\omega t + \pi)$$

En función de las frecuencias (generalmente no será una única, sino que habrá que identificar las frecuencias de interés y aquellas espurias o “ruido”) con la que nos encontremos en nuestro problema, conviene utilizar unos parámetros u otros. Generalmente, el inicio del problema suele aparecer a altas frecuencias y será mucho más fácil de interpretar observando el espectro en aceleración.

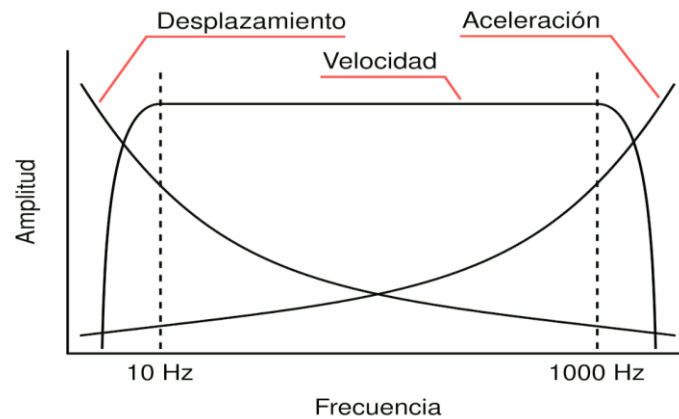


Figura 2. Magnitudes en función de la frecuencia [15]

Se denomina baja frecuencia cuando la vibración se encuentra a 10 Hz o inferior, mientras que, alta frecuencia cuando supera los 1000 Hz.

Transformada de Fourier

Las vibraciones de los cuerpos, normalmente, están compuestas por muchos movimientos vibratorios diferentes. Para poder realizar un estudio óptimo de vibraciones en un equipo, es necesario observar la forma de onda y el espectro de vibraciones. Para ello, es necesario usar la transformada de Fourier (FFT), un algoritmo matemático que descompone una señal en todas sus frecuencias. Esto justifica la afirmación anterior respecto a la importancia de la función armónica, puesto que la FFT acaba “descomponiendo en armónicos”, cada uno de ellos con su frecuencia, esta es la base de todo. De esta manera, podemos usar la FFT para visualizar una gráfica con la suma de todas las ondas vibratorias del sistema en función del tiempo (forma de onda), o visualizar una gráfica con las amplitudes de cada onda vibratoria en función de la frecuencia (espectro). Hoy en día el espectro de vibración es la mejor herramienta conocida [5].

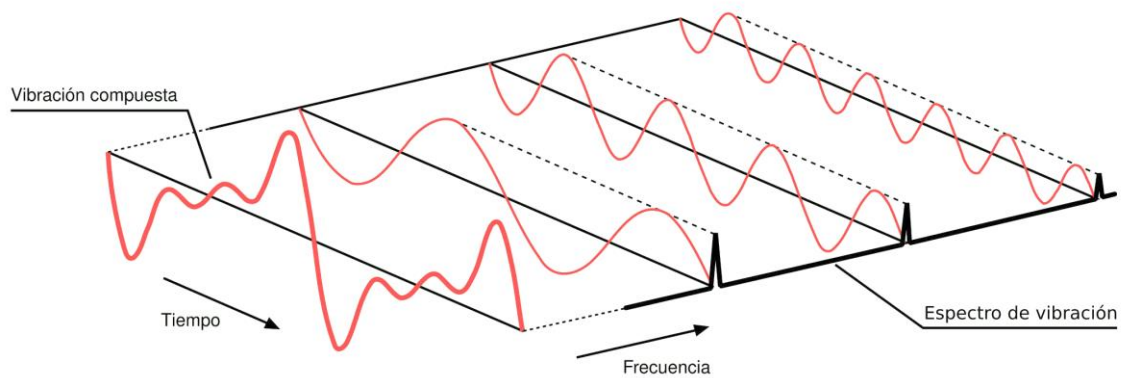


Figura 3. Transformada de Fourier [15]

La relación de los picos de frecuencia en el espectro de vibración está asociada con cada vibración característica de la máquina. Debido a este motivo, el espectro se convierte en la mejor opción para hacer un análisis de vibraciones, quedándose la forma de onda en segundo plano como ayuda en casos concretos.

PeakVue

El PeakVue es un método desarrollado por Emerson de detección de impactos, característica que carece el espectro normal debido al ruido que le pueden generar otras vibraciones en el espectro. La ventaja principal del PeakVue respecto al análisis tradicional es que cuando los impactos de, por ejemplo, un defecto en un rodamiento, son de baja magnitud, en el análisis tradicional cuesta mucho identificarlos o incluso no se ven porque los picos tan pequeños del defecto están envueltos por otras vibraciones de la máquina. PeakVue utiliza un filtro de paso alto que elimina todos los elementos de baja frecuencia de la señal. Esta señal es amplificada y demodulada para convertirla en una señal a baja frecuencia similar a la señal original [7].

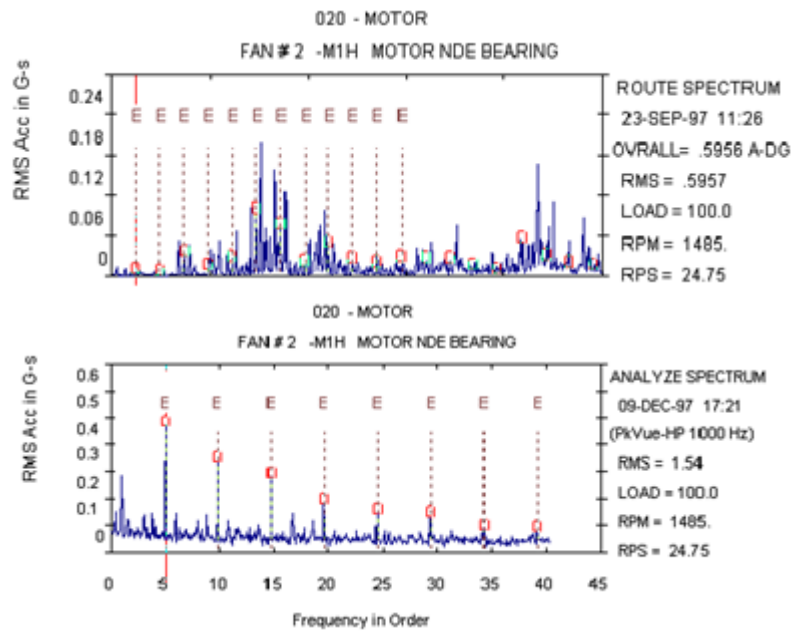


Figura 4. Ejemplo de la tecnología PeakVue [7]

Como se puede observar en la figura 4, el espectro de la parte superior se trata de un espectro normal, donde aparecen una familia de picos que pueden estar relacionados con el defecto BPFI (defecto de la pista interior de un rodamiento). Después de hacer un análisis mediante la tecnología de PeakVue (parte inferior de la imagen) se puede observar que todo el ruido generado en baja frecuencia se ha eliminado pudiendo dejar visualizarse claramente la familia de picos del defecto de pista interna. Debido a este motivo, este tipo de tecnología es un gran avance sobre todo para la detección de fallos en rodamientos.

Procesamiento de señales

Para poder llevar a cabo este proyecto y realizar medidas in situ es necesario precisar de un buen analizador de vibraciones. En este caso, se ha utilizado un analizador de la marca Emerson, el CSI AMS 2140, un dispositivo electrónico con gran capacidad de recogida de datos y con multitud de herramientas de análisis de vibraciones en una sola unidad [8].

El dispositivo CSI 2140 es capaz de recopilar datos en cuatro canales de manera simultánea, generalmente se usan 3 para las direcciones de los acelerómetros (axial, horizontal y radial) y uno para el tacómetro, aunque en nuestro caso utilizaremos un canal para su correspondiente acelerómetro y llevaremos una lámpara estroboscópica manual para no tener que usar tacómetro. Este tipo de analizador debido a su velocidad de recopilación y muestreo de datos te permite realizar un diagnóstico aceptable del estado de salud de la máquina, aunque es mucho mejor acompañarlo del software de CSI en el ordenador puesto que te permite realizar muchas más operaciones y ofrece mejores tipos de visualización de espectros.

En uno de los canales del analizador conectaremos un acelerómetro de SKF modelo CMS2200. Se trata de un acelerómetro acodado que permite un mejor manejo y movilidad en campo, con un gran rango de temperaturas para su uso (-50 - 120°C), resistente y con una sensibilidad de 100 mV/g, dato que deberemos configurar en el analizador [9].

En la figura posterior les mostramos los dos dispositivos a utilizar.



Figura 5. Dispositivos utilizados para la medición de vibraciones [21] [22]

En el anexo 3 de este proyecto está recogida la ficha técnica de estos dispositivos con todas sus características.

Capítulo II: Contexto de la máquina a analizar

La madera industrial sirve para la fabricación de celulosa y papel. Aquí, la madera (en concreto el eucalipto) se reduce mecánicamente a virutas, elementos indispensables en el proceso de fabricación de celulosa.

El proceso comienza con el corte de árboles y el procesado de ramas y hojas para su utilización como biomasa. Por su baja calidad como materia prima, se debe eliminar la corteza antes del proceso de pasteado. En función de la dificultad que ello plantee, el descortezado se realiza en el bosque o en fábrica. La longitud de los troncos que se envían a las fábricas depende de los medios de transporte y los equipos disponibles para su procesado. Una vez descortezados los troncos llegan a fábrica con una longitud de 2 metros, con un diámetro que varía entre 100 y 800 mm y se apilan en una esplanada para que las máquinas los introduzcan en la máquina.

La madera es introducida a un sistema de alimentación que mediante cintas transporta los troncos para su triturado. La línea de alimentación dispone de un detector de metales que detecta su presencia y detiene la alimentación para evitar el deterioro de los equipos.

La máquina capaz de triturar los troncos de eucalipto a pequeñas virutas de madera es la tronzadora. Esta máquina, que podría asemejarse a un ventilador, consiste en una voluta en cuyo interior contiene un disco de cerca de 3000 mm de diámetro donde van fijadas 12 cuchillas y se encuentra apoyado en dos rodamientos, uno a cada lado de la voluta. La voluta tiene una anchura de 560 mm. Los troncos llegan a través de la cinta entrando por la boca principal de la tronzadora donde entran en contacto con las cuchillas del rotor, girando a baja velocidad (340 RPM) y alto par produciendo un corte y cizallamiento del tronco reduciéndolo a astillas. Debido a la fuerza que necesitan las cuchillas para astillar los troncos, es preciso que esté accionada por dos motores y un reductor para obtener una mayor potencia de corte. En la siguiente figura se muestra una ilustración de la máquina con sus partes.

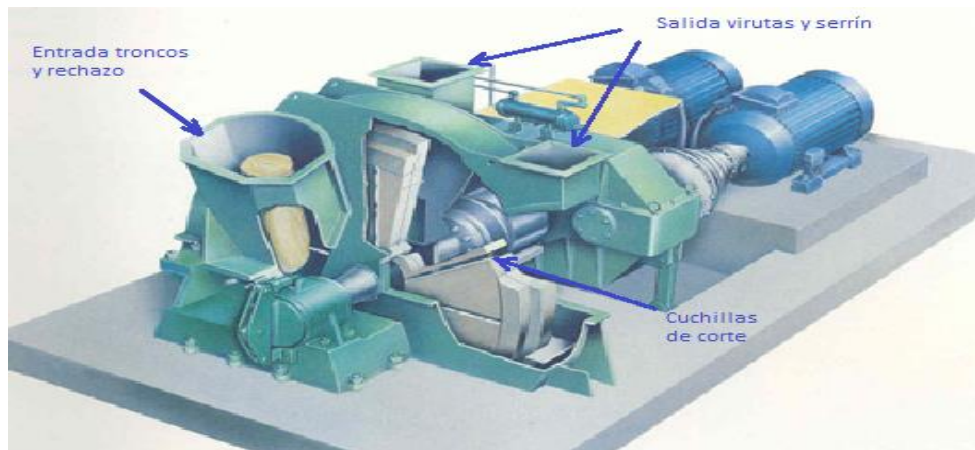


Figura 6. Imagen ilustrativa de tronzadora

Los troncos llegan a través de la cinta transportadora entrando por la boca a la tronzadora. Una vez entran, las cuchillas trituran el tronco dejándolo en pequeñas astillas y serrín. Cuando la madera es triturada, pasa a un tamiz vibrante que se encarga de clasificarla en tres tipos de virutas:

- Aceptadas: con un tamaño de 7 a 20 mm y un espesor de 2-3 mm.
- Rechazas: son astillas sobredimensionadas que a través de una cinta se devuelven a la boca de la tronzadora para hacer las virutas más pequeñas.
- Finos y serrín: residuo que se vende como subproducto para hacer pellets, tableros, etc.

Finalmente, las astillas aceptadas son transportadas mediante cintas a un silo donde permanecen allí almacenadas hasta su requerimiento para el proceso de pasteado. A continuación, se muestra un esquema del proceso del triturado de la madera:

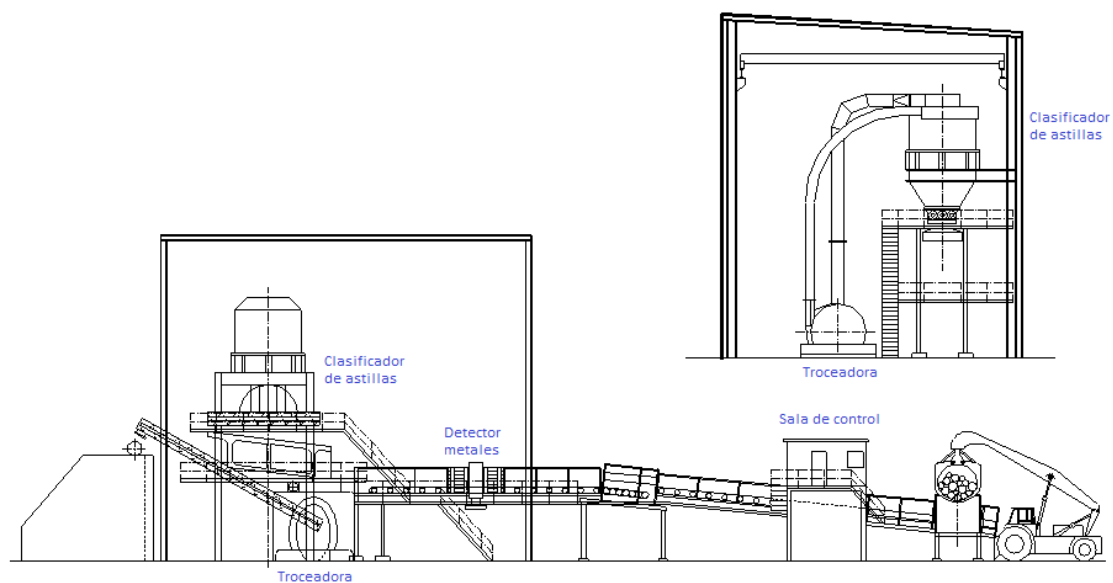


Figura 7. Esquema de proceso de triturado

En el anexo 4 se encuentran recopilados los planos del conjunto, así como fotografías de la máquina.

Capítulo III: Desarrollo

El análisis de vibraciones es la técnica más eficaz y que te proporciona más información dentro del mantenimiento predictivo. Para implementar el mantenimiento predictivo en una máquina resulta imprescindible establecer un plan y una organización asegurando el seguimiento constante de todos los elementos, o al menos los más críticos, que componen la máquina.

Las pautas en las que se basa el análisis de vibraciones siguen una secuencia lógica: seguimiento, identificación, estudio, búsqueda de causa y finalmente, la corrección de ésta [10].

Preparación

Para poder llevar a cabo este proceso necesitamos conocer todos los aspectos de la máquina. En el cuarto anexo del presente proyecto se muestra tanto planos como fotografías de la máquina a estudiar, así como en el capítulo II se explica y analiza el funcionamiento de ésta, que nos servirá de guía para la configuración del plan de predictivo.

Como se trata de una máquina crítica dentro de la producción en la empresa, puesto que es la primera de la cadena de producción, estableceremos en el plan un punto de medida por cada apoyo que contenga la máquina, sumando en total 16, 1 en cada apoyo de la tronzadora, 10 en el reductor y 2 por cada motor tal y como se muestra en la figura 6 a continuación. En cada punto se recopilarán mediciones en las tres direcciones: axial, horizontal y vertical.

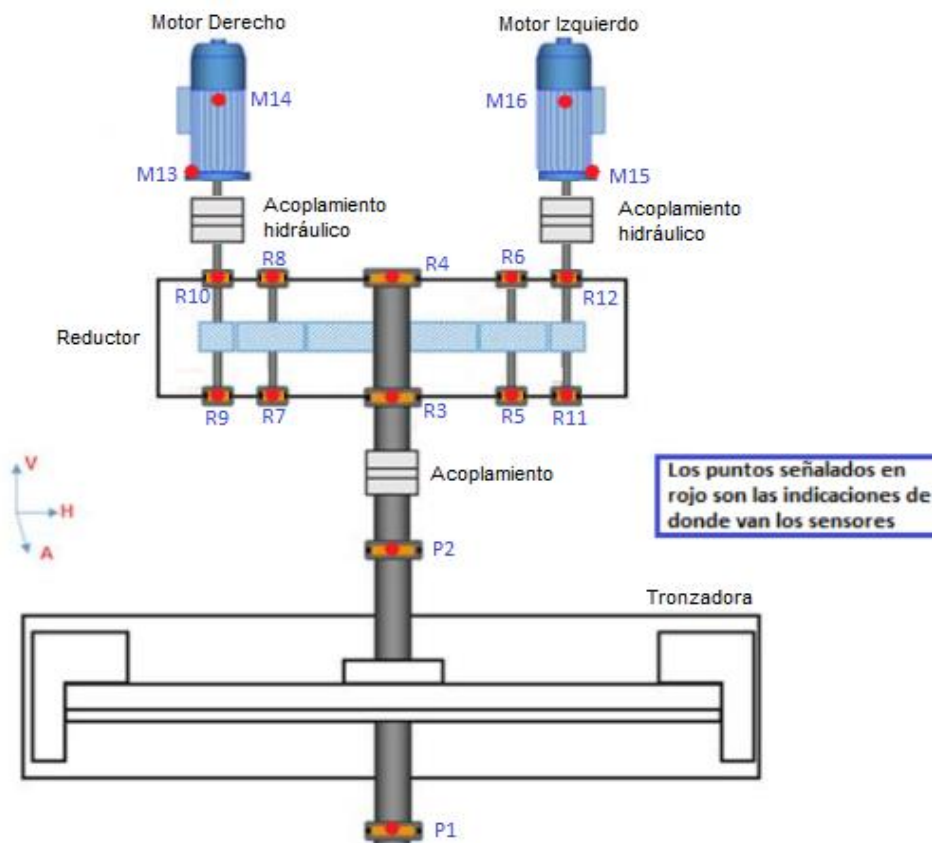


Figura 6. Esquema con puntos de medida de la tronzadora

La tronadora de madera dispone de dos apoyos entre la voluta. Dichos apoyos tienen dos rodamientos de rodillos a rótula, un 22160 en el apoyo del lado libre y un 22344 en el apoyo del lado del reductor. En el interior de la voluta se encuentra un disco conformado por 12 cuchillas de corte de la madera cuyo giro es de 330 revoluciones por minuto.

La voluta es accionada mediante dos motores de 750 KW cada uno cuyo giro es de 1500 revoluciones por minuto, en cuyos apoyos se encuentran dos rodamientos rígidos de bolas 6226J.

La reducción de velocidad que hay entre los motores y la voluta de la tronadora la proporciona una reductora marca Santasalo de tipo 2D100H660VP que consta de dos entradas y una salida. Su factor de reducción es de 4.5/1. Los dos ejes primarios se componen de un piñón de 29 dientes y apoyado en dos rodamientos de rodillos a rótula 23222EAS.M.C3. Los ejes intermedios son idénticos a los ejes de la entrada o primarios con la salvedad que el piñón que contiene es de 37 dientes. Finalmente se encuentra un solo eje primario con una corona dentada de 130 dientes, en cuyos apoyos se encuentran dos rodamientos rígidos de bolas 6244M.C3. En la figura 7 se muestra un plano de las partes de la reductora:

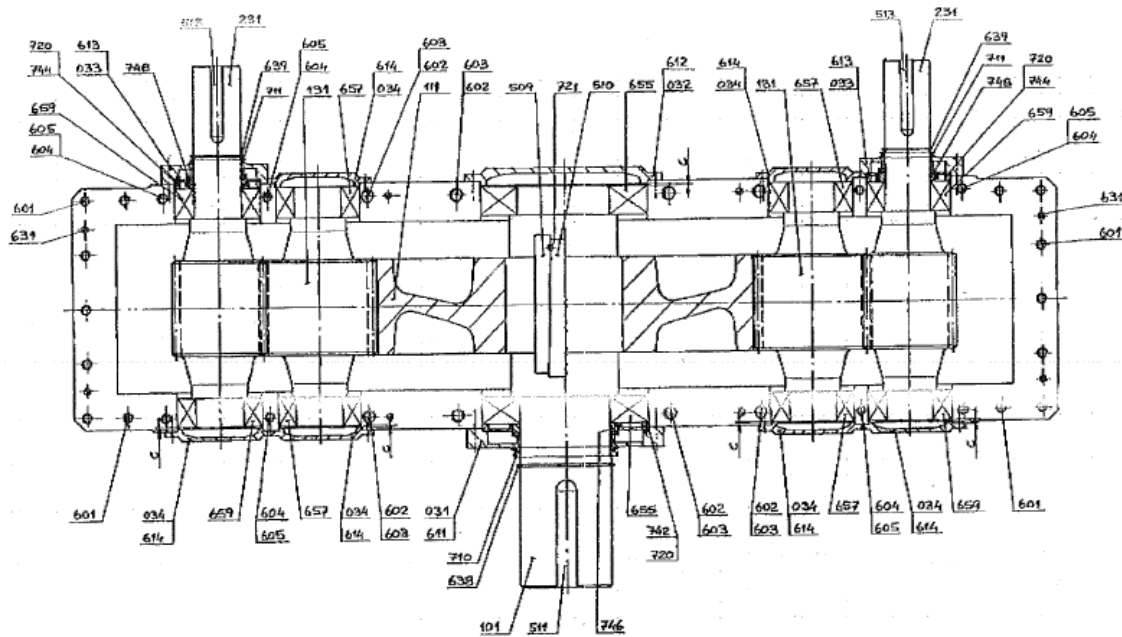


Figura 7. Plano del conjunto reductor

Una vez obtenidos todos los datos de la máquina, podremos obtener todas sus frecuencias características con las fórmulas explicadas en el Anexo II:

- Frecuencias propias de los rodamientos:

$$BPFI = \frac{N_B}{2} \cdot RPM \cdot \left(1 + \frac{B_D}{D_P} \cdot \cos\alpha\right) \cong 0,6 \cdot N_B \cdot RPM$$

$$BPFO = \frac{N_B}{2} \cdot RPM \cdot \left(1 - \frac{B_D}{D_P} \cdot \cos\alpha\right) \cong 0,4 \cdot N_B \cdot RPM$$

$$FTF = \frac{RPM}{2} \cdot \left(1 - \frac{B_D}{D_P} \cdot \cos\alpha\right) \cong 0,4 \cdot RPM$$

$$BSF = \frac{D_P}{2 \cdot B_D} \cdot RPM \cdot \left(1 - \left(\frac{B_D}{D_P}\right)^2 \cdot (\cos\alpha)^2\right)$$

- Frecuencias propias del reductor:

$$GMF = Z_{\text{piñon}} \cdot RPM_{\text{piñon}} = Z_{\text{corona}} \cdot RPM_{\text{corona}}$$

$$FFE = GMF / N_E$$

$$HTF = \frac{GMF \cdot N_E}{Z_{\text{piñon}} \cdot Z_{\text{corona}}}$$

- Frecuencias propias del motor:

$$F_L = 50\text{Hz} = 3000\text{CPM}$$

$$n^{\circ} \text{ polos} = \frac{2F_L}{RPM}$$

$$F_{\text{Deslizamiento}} = RPM_{\text{Estátor}} - RPM_{\text{Rotor}}$$

$$F_{pp} = F_{\text{Deslizamiento}} \cdot n^{\circ} \text{ polos}$$

$$F_{\text{barras}} = N^{\circ}_{\text{barras}} \cdot RPM$$

$$F_{\text{paso de ranura}} = N^{\circ}_{\text{ranuras}} \cdot RPM$$

Finalmente, tras obtener todas las ecuaciones características de la máquina, podemos proceder a realizar la captura de datos en campo.

El técnico de vibraciones cada 15 días irá a la tronzadora de madera con el analizador de vibraciones, una lámpara estroboscópica (para coger las RPM exactas) y un termómetro y cogerá datos en cada uno de los 16 puntos de medida explicados anteriormente. Por motivos de seguridad, cuando la máquina se encuentra en funcionamiento y con carga, todo el personal tiene el acceso restringido a ella, por lo que las mediciones que se efectúan en campo son con la máquina funcionando sin carga, es decir, en vacío. Debido a este motivo, cada vez que

tenemos que acercarnos a recopilar datos de medición, la producción de la planta se ve mermada, por lo que se opta por la decisión de tener sólo un análisis en PeakVue en la dirección vertical de cada punto, puesto que este tipo de medida tarda mucho más tiempo en comparación con las otras.

Una vez recopilados los datos serán descargados del analizador de vibraciones al ordenador. Con todas estas medidas recogidas se irá creando una línea de tendencia que el técnico tendrá que ir evaluando y analizando en el ordenador con el software de CSI.

Seguimiento temporal y recogida de datos

Tras varios días efectuando la recopilación de datos en campo se va creando una línea de tendencia en cada punto de medida para cada dirección de captura de vibraciones. Siguiendo la línea temporal de captura de datos desde el ordenador, observamos que, a partir del día 15 de noviembre, uno de los motores experimenta un ligero cambio ascendente en velocidad en la tendencia, como se muestra en la siguiente gráfica.

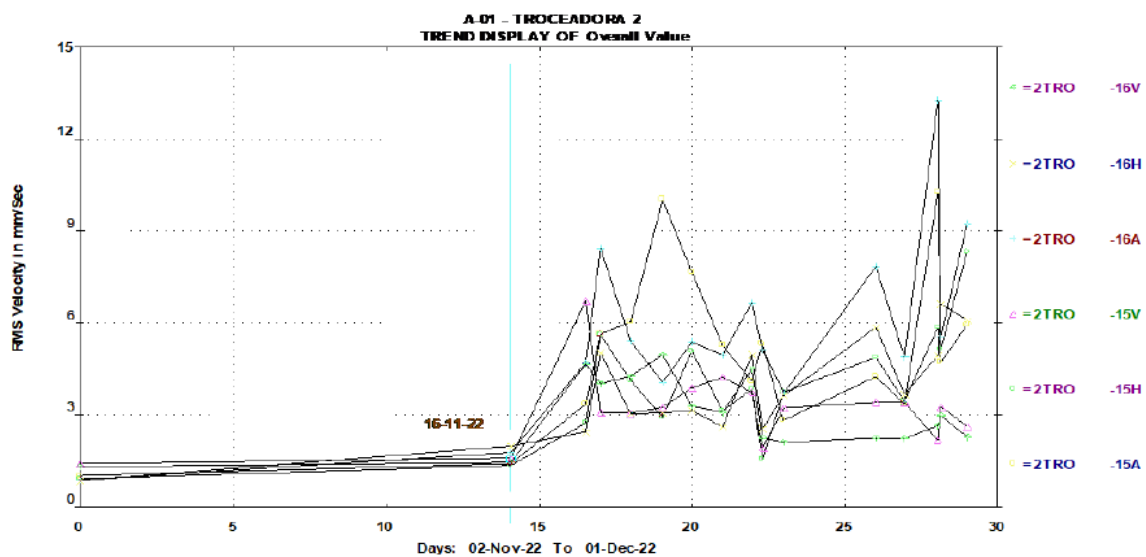


Figura 8. Gráfica de tendencias del motor izquierdo

En la tendencia se observa que tanto los dos puntos horizontales como los dos axiales aumentan más que los dos puntos verticales. Tras esta tendencia ascendente de la vibración del motor izquierdo, se decide hacer un estudio más exhaustivo del motor izquierdo de la máquina, porque se considera que está comenzando a dañarse. La decisión se trata de reducir la periodicidad de la recogida de datos y recopilar datos de todos los componentes de la máquina para calcular sus frecuencias características.

En el anexo 2 del presente proyecto se analizan los tipos de frecuencias características de cada defecto posible en una máquina. Todos los descritos en dicho anexo pueden producirse en

nuestra máquina a excepción de los fallos en cojinetes de fricción, puesto que no lleva. Con todo lo descrito en el anexo, a continuación, se mostrará una tabla con frecuencias de posibles fallos de la máquina.

Tronzadora		CPM	Reductor		CPM
RPM		333,2	Rodamientos apoyos SKF 23222 C Eje Salida	FTF	144,2126
Rodamientos apoyos SKF 22160	FTF	148,7	Rodamientos apoyos SKF 23222 C Eje Intermedio	BSF	1164,7426
	BSF	1504,5		BPFO	2741,7124
	BPFO	3420,3		BPFI	3615,6876
	BPFI	4242,8		FTF	506,7267
Frecuencia cuchillas	12 cuchillas	3998,1	Rodamientos apoyos SKF 23222 C Eje Entrada	BSF	4092,6117
Rodamientos apoyos SKF 22344	FTF	139,6		BPFO	9633,6858
	BSF	985,8		BPFI	12704,6142
	BPFO	2373,1	Rodamientos apoyos SKF 23222 C Eje Entrada	FTF	646,5
	BPFI	3290,9		BSF	5221,5
Motor				BPFO	12291
Rodamientos apoyos SKF 6226 J	FTF	618		BPFI	16209
	BSF	4120,5	Repetición de diente HFT	1->2	40,5
	BPFO	6177		2->3	9,04
	BPFI	8823	frecuencia engrane	GMF	43313,1

Con todas las frecuencias características calculadas, ahora procederemos a realizar un resumen de los defectos explicados y analizados en el anexo 2 que pueden tener relación con nuestro problema en este proyecto.

FALLO	EFEECTO	CORRECCIÓN
Desequilibrio	Aumento notable del pico 1x	Hacer un equilibrado del componente
Desalineación	Aumento de 1x, 2x, 3x	Comprobar alineación
Holguras	Internas. Aumento de armónicos de giro y medios armónicos Externa. Aumento de armónicos de giro	Sustituir pieza con holguras
Rodamientos	Presencia de armónicos de sus fallas características: BSF, FTF, BPFO o BPFI	Cambio de rodamiento dañado

Barras rotor abiertas	Armónicos giro con bandas a frecuencia paso polos Frecuencia de barras con bandas doble frecuencia línea	Reparación de barras
Excentricidad rotor	Armónicos giro con bandas a frecuencia paso polos	Hacer equilibrado de rotor
Excentricidad estátor	Armónicos de giro predominando 1x Presencia del doble de la frecuencia de línea	Cambio de motor
Desequilibrio de fases	Doble de la frecuencia de línea con bandas a 1/3 frecuencia línea	Megado de motor Revisar caja de bornas
Dientes desgastados	Aumento de la amplitud de la frecuencia de engrane con bandas laterales a velocidad giro.	Sustitución corona o piñón dañado
Excentricidad	Aumento de la amplitud de la frecuencia de engrane con bandas laterales a velocidad giro del eje excéntrico.	Ajuste de piñones de engrane
Piñones desalineados	Aumento de la amplitud de la frecuencia de engrane y sus armónicos. No se visualizan bandas laterales.	Ajuste de piñones de engrane
Diente roto	Presencia de una pulsación por vuelta en la forma de onda	Sustitución corona o piñón dañado

Capítulo IV: Resultados

Cuando se estudia el comportamiento vibratorio de una máquina, es igual de importante tanto el análisis de las fuerzas excitadoras del problema de la máquina como el estudio de la movilidad y comportamiento de ésta. Debido a este motivo, cada vez que se ha realizado una medida, se coloca el sensor en el mismo lugar, se hace un muestreo de temperaturas, se coge las RPM exactas con una lámpara estroboscópica, etc. Es decir, para poder hacer un análisis riguroso y una buena comparativa con la última medida, necesitamos tomar todas medidas de la misma manera que la vez anterior.

Interpretación de resultados

Una vez recopilados un número grande de medidas y espectros de la máquina y viendo que la tendencia aumenta notablemente, llega el momento de hacer un análisis y diagnóstico del espectro de vibración.

Viendo las tendencias de vibraciones mostradas en el anterior capítulo, se puede apreciar un claro ascenso de las vibraciones del motor izquierdo en mayor medida en la dirección axial. Este cambio se aprecia tanto en la parte delantera como en la trasera de dicho motor.

Si observamos una serie de espectro en cascada, se puede ver reflejada claramente la tendencia ascendente de los armónicos del pico 1x, correspondiente a la velocidad de giro del motor. Además, se aprecia un pico, también con tendencia ascendente, que no es armónico del 1x, por lo que se trataría de un pico más preocupante y habría que visualizarlo y analizarlo detenidamente.

A continuación, se muestra una imagen de una cascada de espectros con el cambio significativo de los espectros tomados en distintos días comentado anteriormente:

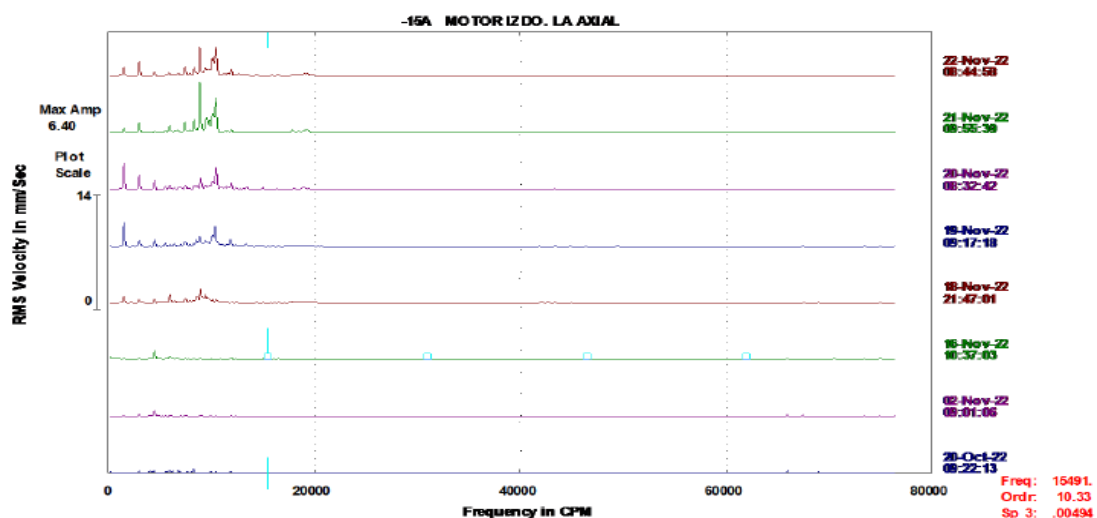


Figura 9. Espectros múltiples en cascada del motor izquierdo en dirección axial

Si nos fijamos en el último espectro recogido observamos que tenemos un claro pico a 8830 CPM. Buscando en las tablas de las frecuencias de falla características del equipo explicadas en el anterior capítulo se puede deducir que ese pico se trata de un defecto BPFI (fallo en la pista interna del rodamiento del motor). En la siguiente figura aparece señalado el pico con el defecto BPFI.

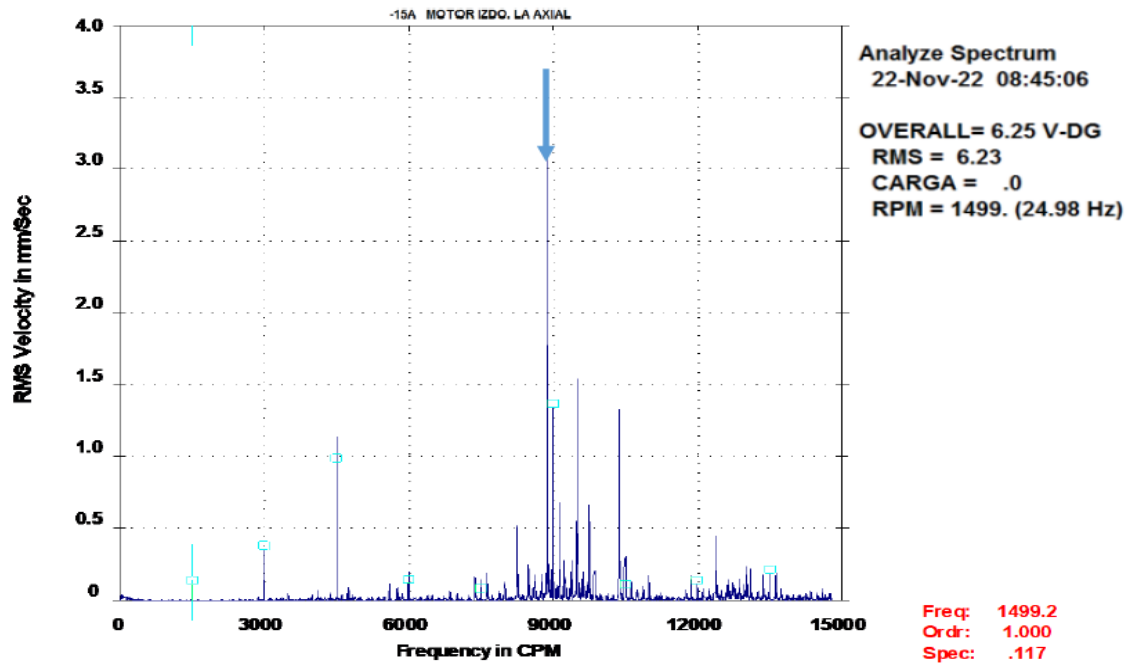


Figura 10. Espectro de vibración del motor izquierdo

Además, se aprecian bandas muy cercanas a los armónicos de giro que podrían tratarse de la frecuencia de paso de polos, síntoma evidente de que podríamos encontrarnos con un defecto de barras rotas del motor.

En el siguiente espectro se aprecia, aunque no con claridad debido a la falta de resolución del analizador, bandas laterales en el 5x de la velocidad de giro del motor a una distancia de unos 2 CPM. Cogiendo las RPM del motor con una lámpara estroboscópica, observamos que gira a 1499,4 RPM. Si nos fijamos en lo explicado en el anexo II, la frecuencia de paso de polos es:

$$F_{pp} = (RPM_{Estator} - RPM_{Rotor}) \cdot n^{\circ} \text{ polos}$$

Al tratarse de un motor de 1500 RPM teóricas, sabemos que tiene 4 polos, por tanto:

$$F_{pp} = (1500 - 1499,4) \cdot 4 = 2,4 \text{ CPM}$$

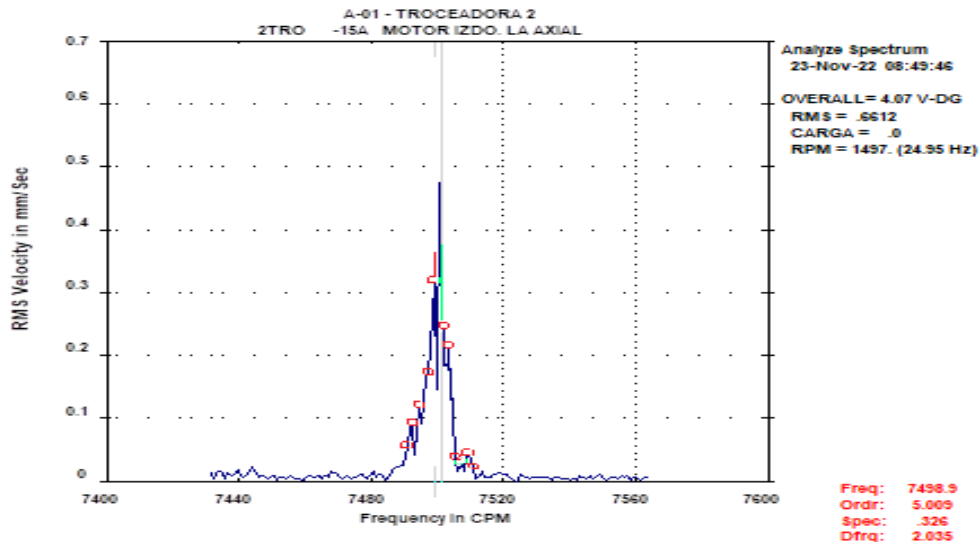


Figura 11. Espectro de vibración ampliado del motor izquierdo

Una vez identificados todos los defectos posibles del motor, el siguiente paso es hacer un seguimiento exhaustivo y preparar un nuevo motor para realizar el cambio.

Corrección y comparativa tras el cambio

Tras hacer un seguimiento exhaustivo, la tendencia del motor izquierdo sigue con notables muestras de empeoramiento. Si nos fijamos en la tabla de la normativa ISO 20816 mostrada en el anexo 1, vemos que supera claramente el valor crítico de vibración, puesto que se trata de un motor de 800 KW con una bancada rígida.

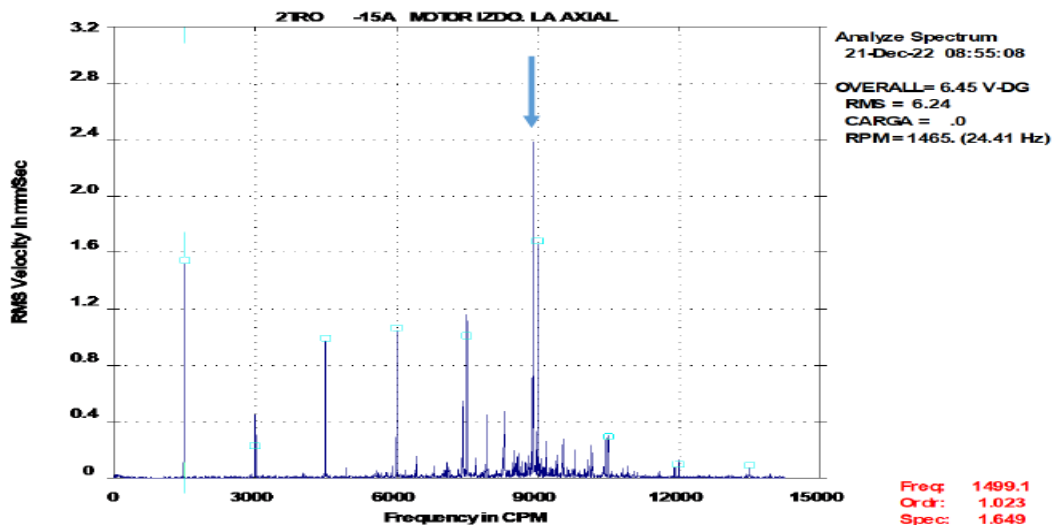


Figura 12. Espectro de vibración del motor izquierdo

Si visualizamos el espectro de nuevo (figura 12), se observa que el pico de BPFi se mantiene constante, sin embargo, los armónicos del pico a 1x la velocidad de giro han aumentado claramente. Si se analizan los tipos de fallos explicados en el anexo 2, se puede deducir que esta familia de picos está asociada a unas holguras internas en el motor.

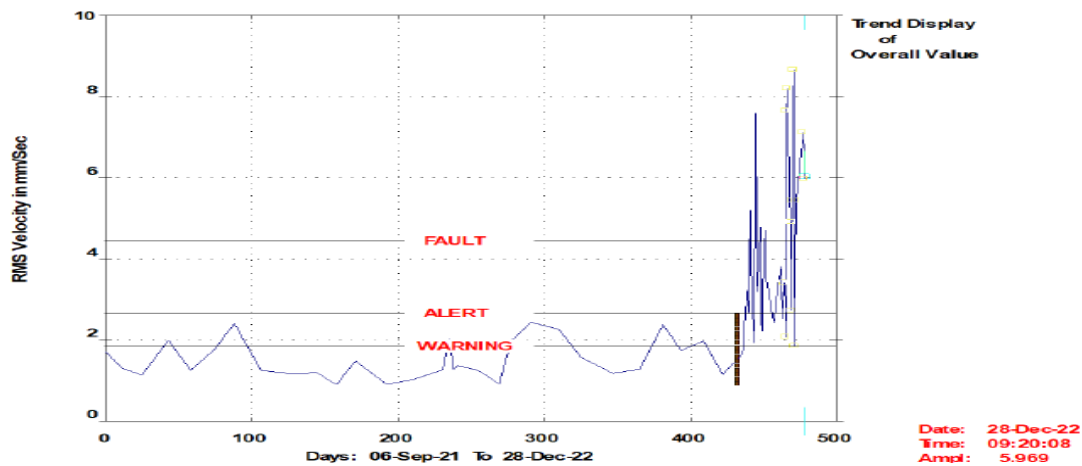


Figura 13. Tendencia de medidas de vibración recopiladas

Si se visualiza la tendencia de la imagen superior (figura 13) se observa el claro ascenso que está experimentando el motor en cuando a valores de vibración se refiere. Por lo tanto, debido a los motivos explicados y analizados anteriormente, se decide cambiar el motor.

Una vez efectuando el cambio del motor, se puede observar que el cambio en la tendencia de los datos de vibración recogidos mejora considerablemente, así como el espectro de vibración, que disminuye o incluso se eliminan todos los picos y defectos analizados en los anteriores apartados.

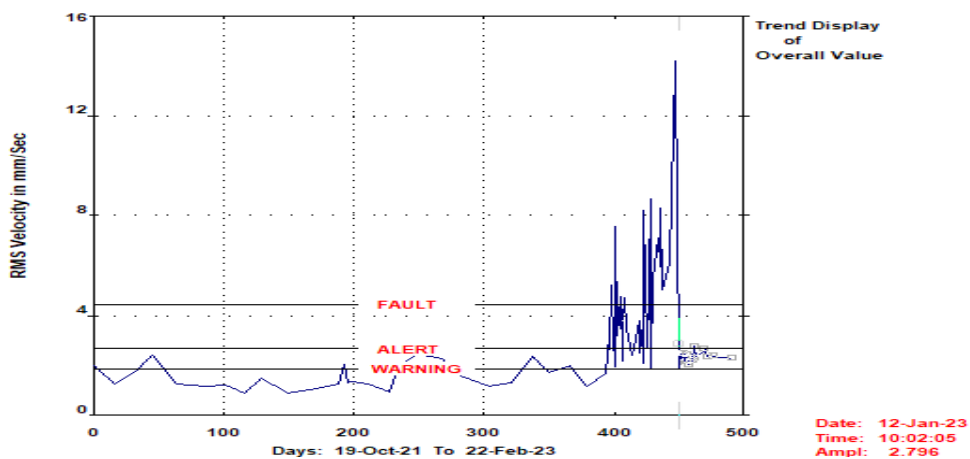


Figura 14. Tendencia de medidas de vibración recopiladas

Después de haber efectuado el cambio de motor y haber comprobado varias veces el estado y funcionamiento del motor nuevo puesto en la tronadora, se lleva al taller a desmontar el motor averiado para poder repararlo.

Conforme se desmonta el motor, se observa que el alojamiento de la carcasa donde va embutida la pista exterior del rodamiento delantero se encuentra “ovalada”, es decir, tiene un poco de desgaste en la zona de carga (dirección vertical).



Figura 15. Medición de diámetro del alojamiento del rodamiento

Tras quitar el rodamiento del eje del motor, también se observa que dicho eje presenta rozaduras y un poco de desgaste consecuencia de que se haya producido algún pequeño deslizamiento de la pista interna del rodamiento sobre el eje del motor (figura 15).

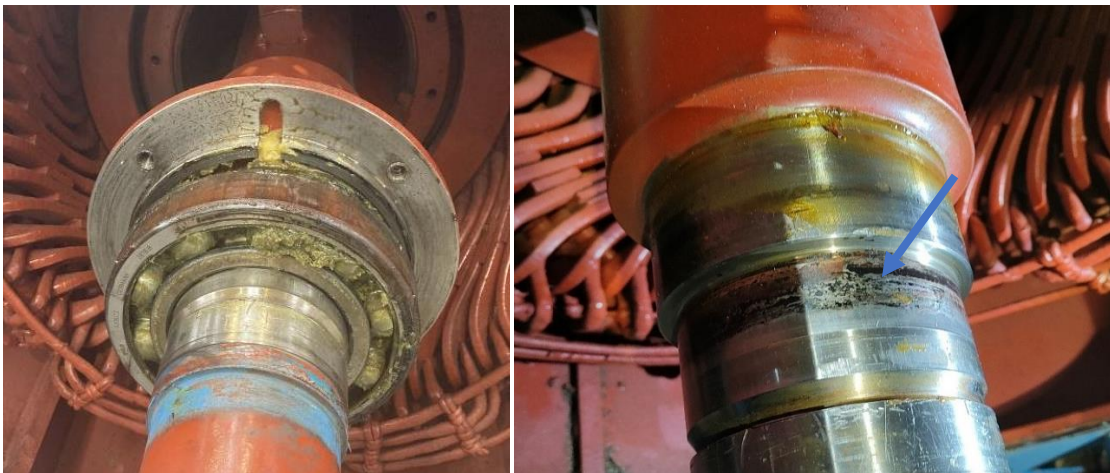


Figura 16. Fotografías de eje de motor desgastado

Por último, cuando se finaliza el desmontaje se detecta que el motor tiene 24 barras rotas en el rotor. Probablemente, este gran problema ha hecho producir las vibraciones capaces de provocar los otros defectos del motor.



Figura 17. Fotografías de las barras rotas del rotor.

Conclusiones

Este proyecto ha sido una inmensa fuente de riqueza en cuanto a conocimiento se refiere puesto que trata de un tema menos conocido que otros, pero muy importante dentro del campo de la ingeniería como es el análisis de vibraciones. Además, ha supuesto una notable utilidad para la empresa donde lo he desarrollado.

En la actualidad, una multitud de empresas tienen cadenas de producción automatizadas y que una avería imprevista supondría un enorme tiempo improductivo, generando muchas pérdidas. Por este motivo me pareció muy interesante sumergirme en el área de mantenimiento predictivo y, en concreto, en el análisis de vibraciones.

El análisis de vibraciones es una técnica en la que se estudia las fuerzas dinámicas periódicas que actúan sobre un elemento pudiendo llegar a provocar un defecto o un fallo. Es una técnica muy importante en mantenimiento predictivo porque le otorga una alta eficiencia al mantenimiento de una empresa. Debido a este motivo, resultaba un trabajo muy interesante pudiéndolo llevar a cabo de manera práctica en una empresa para poder ver resultados reales y tener una mejor experiencia.

Para poder hacer un análisis eficiente y serio en una empresa, era necesario previamente estudiar y aprender toda la materia teórica del análisis de vibraciones, desde la transformada de Fourier y todos los tipos de vibraciones, etc., hasta el estudio de todas las frecuencias características de fallo en máquinas rotativas. Todo esto mencionado ha servido para dominar este campo y poder efectuar la parte práctica en una empresa.

La parte práctica también me ha proporcionado conocimiento y aptitudes de gran utilidad. Uno de los conocimientos más importantes que he obtenido ha sido la toma de datos en campo de una máquina real varias veces con un analizador de vibraciones de última generación, además de utilizar un programa de análisis de vibraciones, muy útil para un ingeniero en la industria 4.0.

Seguidamente, he podido ver en primera persona los defectos hallados analíticamente, hecho que, para mí, tiene una especial relevancia.

Finalmente, como conclusiones personales, quiero destacar la curiosidad que me ha generado este tema que, dentro de la industria de hoy en día, puede resultar de vital importancia para un ingeniero en formación como yo.

Referencias

- [1] JOSE LUIS DEL VAL. *Industria 4.0: la transformación digital de la industria*. Revista Deusto Ingeniería. 18 marzo 2016
- [2] <https://tractian.com/es/blog/tipos-de-mantenimiento-la-guia-definitiva>
- [3] MANUEL RODRÍGUEZ. *Análisis modal y operacional: Teoría y práctica*. Universidad de Sevilla. 10 marzo 2005
- [4] GLEN WHITE. *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima DLI. 1990-2010
- [5] <https://power-mi.com/es/content/estudio-de-las-vibraciones>
- [6] <https://www.predictivototal.com.pe/wp-content/uploads/DATA-SHEET-CSI2140.pdf>
- [7] <https://www.dmc.pt/es/analizador-de-vibracoes-a-apresentacao-circular/>
- [8] <https://www.predictivototal.com.pe/wp-content/uploads/DATA-SHEET-CSI2140.pdf>
- [9] <https://www.tequipment.net/SKF/CMSS-2200/General-Accessories/>
- [10] <http://www.todosensores.es/articulos/vibraciones.pdf>
- [11] <https://pruftechnik.wordpress.com/2011/10/13/la-vibracion-confirma-la-norma/>
- [12] <https://www.dmc.pt/en/a-iso-20186-3-de-2022/>
- [13] <https://power-mi.com/es/content/diagn%C3%B3stico-de-desbalance-en-ventiladores>
- [14] EDUARDO SEGUNDO HERNÁNDEZ. *Método para la alineación de ejes de máquinas rotacionales conformado por componentes de poliácido láctico*. Dominio de las ciencias. Abril-junio 2020
- [15] Manual de análisis de vibraciones. Power-MI cloud condition monitoring
- [16] PABLO PÉREZ Y VÍCTOR BERMEJO. *Estudio de la vibración en baja frecuencia de un motor eléctrico*. Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 2013
- [17] ALEX JORGE ALVAREZ. *Técnica de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. Universidad de Magallanes. Año 2005
- [18] <https://tractian.com/es/blog/fases-de-desgaste-en-rodamientos>
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Gearbox-vibration-signal-A-time-waveform-B-enlarged-view-Colour-figure-can-be-viewed_fig4_337723244
- [20] <https://www.predictivototal.com.pe/wp-content/uploads/DATA-SHEET-CSI2140.pdf>
- [21] <https://www.tequipment.net/SKF/CMSS-2200/General-Accessories/>
- [22] <https://www.directindustry.com/pt/prod/csi-technologies/product-113065-1284817.html>
- [23] <https://motoresygeneradores.com/principio-de-vibraciones/>