



**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA, SECCIÓN DE NÁUTICA,  
MÁQUINAS Y RADIOELECTRÓNICA NAVAL**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**“Análisis de Vibraciones en Sistemas Auxiliares de Centrales Térmicas”**

**Jonatan Álvarez Hernández**

**Julio 2016**

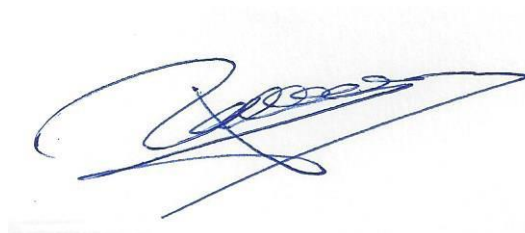


**D. Alexis Dionis Melián**, Profesor Titular de la UD de Ingeniería Marítima del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna, Certifica que:

D. Jonatán Álvarez Hernández, alumno que ha superado las asignaturas de los 4 primeros cursos del Grado en Tecnologías Marinas, ha realizado bajo mi dirección y codirección de **D<sup>a</sup>. María del Cristo Adrián de Ganzo**, el Trabajo de Fin de Grado nominado “*Análisis de Vibraciones en Sistemas Auxiliares de Centrales Térmicas*” para la Obtención del Título de Graduado en Tecnologías Marinas por la Universidad de La Laguna.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el Tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente certificado en Santa Cruz de Tenerife a 15/07/2016.



D. Alexis Dionis Melián

Director del Trabajo de Fin de Grado



**D<sup>a</sup>. María del Cristo Adrián de Ganzo**, Profesora Asociada de la UD de Ingeniería Marítima del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna, Certifica que:

D. Jonatán Álvarez Hernández, alumno que ha superado las asignaturas de los 4 primeros cursos del Grado en Tecnologías Marinas, ha realizado bajo mi dirección y codirección de **D. Alexis Dionis Melián**, el Trabajo de Fin de Grado nominado "*Análisis de Vibraciones en Sistemas Auxiliares de Centrales Térmicas*" para la Obtención del Título de Graduado en Tecnologías Marinas por la Universidad de La Laguna.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el Tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente certificado en Santa Cruz de Tenerife a 15/07/2016.



D<sup>a</sup>. María del Cristo Adrián de Ganzo

Directora del Trabajo de Fin de Grado



## Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a los profesores D. Alexis Dionis Melián y D<sup>a</sup> María del Cristo Adrián de Ganzo por la encomiable ayuda que han sido para mí en la realización de este trabajo de fin de grado, así como en mis años de estudio en nuestra escuela, en la cual han sido siempre un ejemplo de actitud profesional y personal.

Agradecer enormemente a mi gran familia el apoyo que siempre me han mostrado en mis decisiones y la motivación que siempre me han inculcado para ser una mejor persona. Sobre todo, a mis padres ya que siempre han sido mis mejores ejemplos en la vida.

A mis amigos y compañeros siempre les estaré en deuda porque cuando he tendido a perder el norte ellos me han puesto en la dirección correcta y me han regalado incontables buenos momentos.

A mi pareja que siempre está ahí cuando la necesito dispuesta a ayudarme y a prestarme apoyo emocional y cariño.

Por último, pero no menos importante a Carlos, Gil, Raúl, Pedro y todo el personal de la central energética El Palmar, los cuales me proporcionaron las ideas para este trabajo y siempre tuvieron tiempo para hacerme mejorar como profesional y sobre todo como persona.







# Índice

# Índice de contenidos

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. OBJETIVOS</b> .....	5
1. Objetivo general .....	7
2. Objetivos específicos .....	7
<b>III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES</b> .....	11
1. Antecedentes históricos del análisis de vibraciones .....	13
1.1. Fundamentos físicos de un movimiento vibratorio .....	15
1.2. Jean-Baptiste Joseph Fourier .....	17
2. Espectros de vibraciones .....	21
2.1. Tipos de espectros con su correspondiente fallo .....	22
3. Normativa aplicable al análisis de vibraciones .....	26
3.1. Carta de Rathbone .....	27
3.2. Norma ISO 2372-1974 .....	28
3.3. Norma ISO 10816 .....	29
3.4. Real decreto 1311/2005 .....	32
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	33
1. Instrumentos de medida para el correcto análisis de vibraciones .....	35
1.1. Instrumentos de representación de datos.....	37
1.2. Tipos de sensores de vibraciones .....	41
1.3. Tipos de sujeción a en la toma de muestra .....	43
2. Correcta utilización de los instrumentos .....	44
3. Central energética diésel El Palmar.....	47

<b>V. RESULTADOS</b> .....	51
1. Caso práctico .....	53
2. Aparatos de medida .....	57
3. Sistema de toma de datos .....	60
4. Revisión de datos .....	66
5. Desinstalación de la bomba HTA .....	71
<b>VI. CONCLUSIONES</b> .....	77
<b>VII. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	83
<b>VIII. ANEXO I</b> .....	89

# Índice de ilustraciones

## III. REVISIÓN Y ANTECEDENTES

Ilustración 1: Línea de tiempo del análisis de vibraciones .....	14
Ilustración 2: Oscilador armónico simple .....	15
Ilustración 3: Modos normales del sistema .....	16
Ilustración 4: Jean-Baptiste Joseph Fourier .....	18
Ilustración 5: Transformada de Fourier .....	20
Ilustración 6: Periodo, amplitud y fase .....	21
Ilustración 7: Espectro de desalineación .....	22
Ilustración 8: Espectro de fallos en engranajes: .....	23
Ilustración 9: Espectro de fallos en rodamientos .....	24
Ilustración 10: Espectro de fallos eléctricos .....	25
Ilustración 11: Carta de Rathbone.....	27
Ilustración 12: Norma ISO 2372-1974 .....	28
Ilustración 13: Normativa ISO 10816 .....	31
Ilustración 14: Salud del trabajador .....	32

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Ilustración 15: Toma de vibraciones .....	36
Ilustración 16: Analizador de vibraciones de alta calidad .....	37
Ilustración 17: Analizador de bajo costo .....	38
Ilustración 18: Analizador de monitoreo continuo .....	39
Ilustración 19: Transductor de desplazamiento .....	42
Ilustración 20: Transductor de velocidad .....	42
Ilustración 21: Transductor piezoeléctrico .....	42
Ilustración 22: Tipos de sujeciones a la toma de muestras .....	43
Ilustración 23: Puntos de toma de datos .....	45
Ilustración 24: Puntos de muestreo .....	46
Ilustración 25: Central energética El Palmar .....	47
Ilustración 26: Motores de la central energética El Palmar .....	48

## V. RESULTADOS

Ilustración 27: Bombas en paralelo .....	54
Ilustración 28: Placa de características .....	54
Ilustración 29: Bombas High Temperature .....	55
Ilustración 30: Analizador de vibraciones Prüftechnik .....	57
Ilustración 31: Sistema cargado en el software .....	58
Ilustración 32: Sensor acelerómetro con unión magnética .....	59
Ilustración 33: Puntos de análisis .....	62
Ilustración 34: Elementos de ruta de vibraciones .....	62
Ilustración 35: Puntos de realización de análisis .....	64
Ilustración 36: OMNITREND .....	66
Ilustración 37: Revisión de datos en OMNITREND .....	67
Ilustración 38: Valor pico en el historio de análisis .....	68
Ilustración 39: Señal de entrada y su respectivo espectro de vibraciones .....	69
Ilustración 40: Tabla de referencias .....	70
Ilustración 41: Bombas HT .....	72
Ilustración 42: Cojinete dañado .....	73
Ilustración 43: Cojinete en buen estado .....	73
Ilustración 44: Eje dañado .....	74

I

# Introducción





Los años de estudio en la Escuela Superior de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval de Santa Cruz de Tenerife del que suscribe, han permitido obtener conocimientos en muchas ramas, química, física, matemáticas, electricidad... Llegando a la idea de que el mundo es demasiado grande, y la única forma de avanzar en él, es el estudio de las cosas más pequeñas.

Motivado con esta idea, decidimos realizar el trabajo de fin de grado con la finalidad de conocer, la importancia de un buen análisis de vibraciones en instalaciones industriales, como puede ser una central energética o un buque portacontenedores.

La elección de este tema ha sido en parte gracias a las prácticas académicas, las cuales llevamos a cabo en la central energética diésel El Palmar, en la isla de La Gomera, que, aunque es de las más pequeñas de Canarias, cuenta con los más modernos sistemas de gestión del mantenimiento.

Una parte de este mantenimiento es el análisis de vibraciones, que es un tipo de mantenimiento conocido como predictivo, debido a su gran ventaja, revelarnos fallos o desgastes en las máquinas más complejas sin tener que dejarlas fuera de funcionamiento.

En la central energética El Palmar, llevé a cabo múltiples rutas de vibraciones, gracias a la formación que me aportaron los trabajadores de dicha central, pude comprender las peculiaridades que supone este tipo de análisis, tiempo que requiere, capacidad, correcta toma de datos ...

La práctica en esta materia nos llevó a investigar más y más, hasta conseguir un nivel de aptitudes con la que se puede llevar a cabo un correcto análisis de vibraciones. Y, por lo tanto, creemos que es un buen tema para este trabajo de fin de grado ya que es algo específico en su rama que aporta mucha calidad al operario que puede realizarlo correctamente.

En un primer punto, reflejaremos los objetivos generales y específicos que queremos mostrar en nuestro trabajo de fin de grado. En ellos expondremos las

ideas generales que queremos a dar a conocer en cada uno de los puntos del trabajo.

En revisión y antecedentes realizaremos un estudio de la historia del análisis de vibraciones. Como comenzó el estudio de un movimiento vibratorio, así como en que se basa este tipo de movimiento. Estudiaremos los espectros de vibración y su importancia tan relevante en este trabajo. Para concluir este punto, pasaremos a estudiar la normativa aplicable en el análisis de vibraciones, tanto la nacional como la internacional.

En materiales y métodos, en un primer punto estudiaremos los tipos de aparatos de medición que se utilizan para el análisis de vibraciones, así como los elementos de los que se compone. Una vez realizado esto, explicaremos su correcta utilización a la hora de llevar a cabo una toma de muestras. Para finalizar el apartado de materiales y métodos haremos una descripción de la central energética diésel El Palmar.

En el apartado de resultados, realizaremos la descripción de un caso práctico ocurrido en la central, en el que veremos en la práctica la utilización de los instrumentos de medida, así como su correcta utilización. Además, para finalizar este caso práctico analizaremos los datos recogidos y veremos a que conclusiones llegamos con estos datos.

**II**

# **Objetivos**



## **1. Objetivo general**

El objetivo de este trabajo es el estudio del análisis de vibraciones, como un tipo de mantenimiento predictivo que ahorra grandes cantidades de dinero en una central energética, con unos costes iniciales relativamente mínimos. Pudiendo llevar a cabo un análisis no tan exhaustivo, pero efectivo, con relativamente poca formación por parte de los operarios.

## **2. Objetivos específicos**

### **2.1. Antecedentes históricos del análisis de vibraciones**

En este primer punto de objetivos específicos de nuestro trabajo, queremos tratar sobre los fundamentos del análisis de vibraciones, donde comenzamos a estudiar las vibraciones y como continuamos avanzando hasta llegar a lo que es hoy en día. Explicaremos en que se basa un movimiento vibratorio, así como los espectros de vibración que tanta importancia tienen en este campo del mantenimiento, como también su creador Jean-Baptiste Joseph Fourier.

### **2.2. Espectros de vibración**

En esta parte del trabajo queremos hacer hincapié en la importancia de los espectros de vibración, pudiendo con ellos llevar acabo análisis de cualquier máquina de una manera muy exacta, obteniendo con este análisis de espectros la avería concreta de la que se trata.

## **2.3. Normativa aplicable al espectro de vibraciones**

La normativa en este trabajo, cobra un significado muy relevante ya que es esta la que nos da unos estándares normalizados en todo el mundo para todo tipo de máquinas industriales. Por ello describiremos como ha avanzado la normativa global en este ámbito, y cuál es la norma referente en la actualidad. También queremos hacer hincapié en las normas españolas que, más que con un carácter de normalización, están orientadas a la salud y bienestar del trabajador.

## **2.4. Instrumentos de medida para el correcto análisis de vibraciones**

En este punto del trabajo queremos destacar los beneficios e inconvenientes que supone la elección de un aparato de mayor coste con respecto de uno de menor coste. Así iremos desvelando cuales son las ventajas de cada uno con respecto al otro. También nombraremos un tipo de analizador muy usado, los de tipo continuo, que se utilizan para máquinas de coste superior y que requieren de un monitoreo de el parámetro de vibraciones a tiempo continuo en la máquina.

Además de esto realizaremos un estudio de los tipos de sensores de vibraciones que se encargan de recoger los parámetros del análisis en las máquinas, estudiando las peculiaridades que presenta cada uno de ellos. Tampoco nos olvidamos de sus sujeciones, que adelantamos, serán más fijas cuanto más sensible tenga que ser esta medida.

## **2.5. Correcta utilización de los instrumentos**

Para la correcta toma de datos, queremos mostrar los parámetros que la hacen peculiar en el día a día de un operario. Así este tendrá que tener en cuenta múltiples factores que garantice que la recogida de datos se realice de una manera correcta y fiable.

## **2.6. Central energética diésel El Palmar**

La central energética diésel El Palmar es el lugar donde realicé mis prácticas académicas, y donde me formaron para la práctica de análisis de vibraciones en los sistemas de la misma. Por ello, en esta parte del trabajo pasaremos a describir la magnitud de la central y de sus sistemas para que el lector pueda hacerse a la idea de lo que supone un análisis de vibraciones en instalaciones energéticas de esta magnitud.

## **2.7. Caso práctico**

Finalizadas ya las explicaciones, pasamos a la descripción del caso práctico sucedido en la central, el cual nos introduce en la relevancia que supone este tipo de análisis en unas instalaciones de estas dimensiones. En este punto queremos hacer referencia a una bomba, la cual sin previa advertencia podría haber supuesto un grave problema en la central.

## **2.8. Aparatos de medida**

Haremos una descripción del aparato de medida que se utiliza, así como por que lo hemos elegido. También hablaremos de sus características y sus peculiaridades, destacando desde este momento la facilidad de uso que tiene.

## **2.9. Sistema de toma de datos**

En la descripción del sistema de toma de datos, mostraremos paso a paso en que consiste una ruta de vibraciones en la central, mostrando puntos en los que debemos prestar especial atención. En este punto describiremos el sistema de toma de muestras empleado en la central que bajo mi punto de vista es verdaderamente adecuado.

## **2.10. Revisión de datos**

Analizaremos los datos obtenidos en la toma de muestras, teniendo en cuenta que en esta central no existe personal especializado en análisis de parámetros, indicaremos paso a paso como debemos tratar los datos para aplicar un correcto análisis a nuestro problema con los correspondientes resultados.

## **2.11. Desinstalación de la bomba HTA**

En este punto final esperamos apreciar los resultados finales de todo este trabajo que, sin previo aviso, nos revela una avería que de otra forma no hubiese sido detectada, por lo tanto, ahorrando los correspondientes gastos adicionales que una avería imprevista de este tipo supone en la central.



**III**

# **Revisión y antecedentes**



# 1. Antecedentes históricos del análisis de vibraciones

En el estudio de la historia del análisis de vibraciones en máquinas industriales debemos aclarar que, aunque es un estudio relativamente nuevo y cada vez más usado, las bases de dicho estudio remontan mucho más atrás.

También hay que añadir que el estudio de las vibraciones es el conjunto de estudios en diferentes ramas de la ciencia que nos da las herramientas necesarias para el correcto análisis de vibraciones.

Ya Pitágoras (570 a.C. – 497 a.C.) experimentaba haciendo vibrar agujas del mismo espesor y misma tensión, pero de distinta longitud, con este experimento relaciono el mundo de la música con la teoría de los números concluyendo que las notas dependían de la frecuencia de vibración.

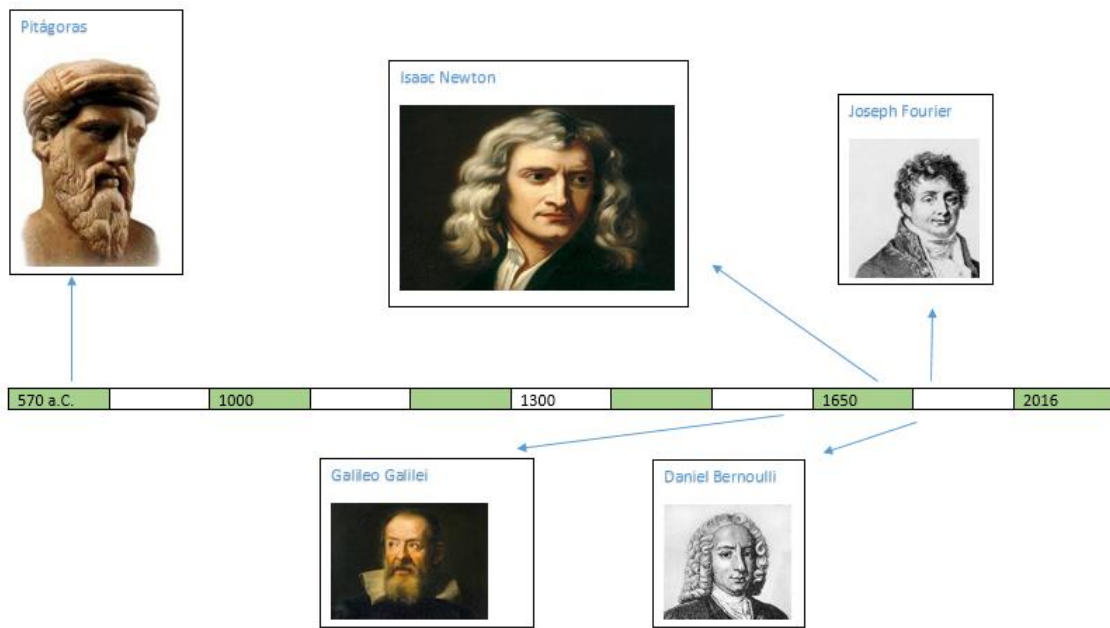
Galileo Galilei (1564 - 1642) dio a este estudio la relación entre la longitud de las cuerdas de un péndulo y su frecuencia de oscilación, relacionando así tensión, longitud y frecuencia de vibraciones en cuerdas.

El uso de las leyes de Isaac Newton (1700 – 1782) en el estudio del análisis de vibraciones supuso un antes y un después en esta rama.

Daniel Bernoulli (1700 – 1782) estudio las vibraciones de algunos cuerpos usando el principio de superposición.

Una de las aportaciones más importantes y en la que podemos decir que es de las más destacada en el análisis de vibraciones es la de Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830). Gracias a su transformada somos capaces de pasar de una señal ilegible a un espectro definido que puede prestarse a estudio.

Ilustración 1: Línea de tiempo del análisis de vibraciones



Fuente: Google imágenes [1]  
Elaboración propia

Todos estos estudios sumados a importantes aportaciones matemáticas aplicadas al área de las vibraciones y añadiendo además los avances de las tecnologías como son los ordenadores, los PLC's, analizadores de vibraciones y software de monitoreo y/o mantenimiento hacen del análisis de vibraciones lo que es hoy en día. [2]

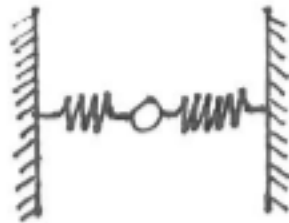
Como ya hemos dicho el análisis de vibraciones en máquinas industriales es el conjunto de varios estudios realizados en la historia por diferentes ramas de la ciencia que se juntan para darnos una herramienta imprescindible en la actualidad para un buen mantenimiento predictivo de nuestras instalaciones.

## 1.1. Fundamentos físicos de un movimiento vibratorio

Podemos llamar vibración a la propagación de ondas elásticas produciendo deformaciones y tensiones sobre una posición de equilibrio.

Para entenderlo de una forma práctica describiremos el caso más simple, un oscilador armónico simple. De una forma simple, este sistema no es sino una

*Ilustración 2: Oscilador armónico simple*



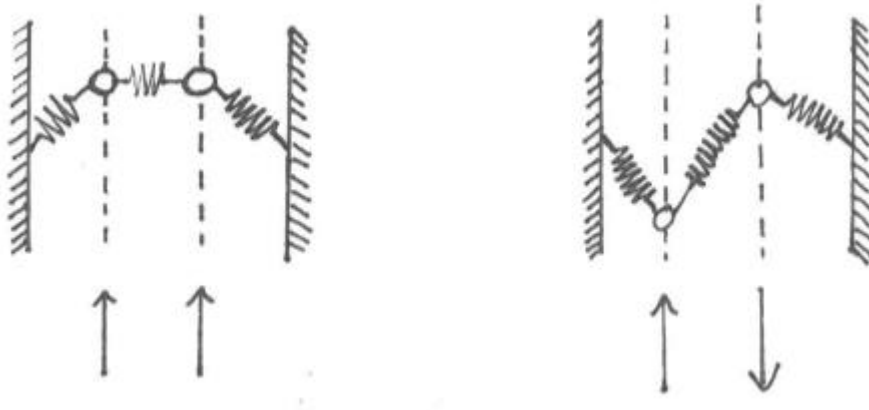
*Fuente: Quantum Fracture [3]*

*Elaboración propia*

masa unida a dos muelles. Esta masa está en una posición de equilibrio, pero si la movemos de ahí, aparecerá una fuerza que la devolverla a su sitio.

El problema de los cálculos de en dichos sistemas es que cuando en vez de una masa, existen dos y están unidas por un muelle. Este sistema tiene muchas formas de moverse según cuanto separe cada masa del equilibrio y la velocidad con la que las empujes. Pero gracias a la física y más concretamente la mecánica clásica somos capaces de describir todos estos movimientos en la suma de los siguientes dos.

*Ilustración 3: Modos normales del sistema*



*Fuente: Quantum Fracture [3]*

*Elaboración propia*

Estos movimientos en los que se basa el movimiento vibratorio se llaman modos normales del sistema y podemos describir esta vibración ampliando o reduciendo dichos modos normales y después sumándolos.

Cuando ampliamos el número de masas esto se aplica de igual modo.

Una cosa que se puede observar es que si ampliamos el número de masas lo suficiente podemos empezar a observar formas más curvilíneas.

Hasta ahora hemos estudiado el caso concreto, ya que podemos observar las masas que oscilan, pero en la naturaleza, para estudiar estos fenómenos es necesario aplicar el método continuo, que no es más que añadir infinitas masas y reducir el espacio entre ellas hasta que se haga cero.

Ya no hay osciladores puntuales, todo es un medio elástico susceptible de vibrar. También podemos verlo como una cuerda sin extremos. En este caso los modos normales siguen existiendo, pero ahora se conocen como ondas planas, de las cuales podemos encontrar infinito número de ellas. Cada honda se diferencia de la otra por el llamado número de onda  $K$  y este está relacionado con la frecuencia de vibración y, al contrario.

Todo movimiento que ejecute nuestra cuerda puede generarse sumando las infinitas ondas planas calibradas convenientemente como dicta el espectro de frecuencia o podemos realizar la operación contraria y obtener el espectro de frecuencia aplicando la transformada de Fourier. [3]

## 1.2. Jean-Baptiste Joseph Fourier

Su niñez estuvo marcada por las dificultades económicas de su familia, y la pérdida de seis de sus hermanos, su madre y su padre, quedando huérfano a los diez años de edad. Siendo menor de edad, las gestiones de su municipio hicieron que le adoptara Joseph Pallais, organista del templo de Auxerre, quien le enseñaría las primeras letras y, en apariencia, lo formaría en las ideas del escritor y pensador francés Jean-Jacques Rousseau.

Inició sus estudios en la Escuela Superior Benedictina de Auxerre, orientándose inicialmente a la carrera religiosa, hasta que el monarca Luis XV la convirtió en academia militar. Jean-Baptiste es seleccionado como estudiante en la institución ya reformada, donde permanecería hasta los 14 años de edad, y empieza a ser instruido en idiomas, música, álgebra y matemáticas, materia en la que destacó, lo que le hace dedicarse al estudio de las ciencias.

Ilustración 4: Jean-Baptiste Joseph Fourier



Fuente: Sancho, J.A. et al [4]

Posteriormente, participó en la revolución francesa y, gracias a la caída del poder de Robespierre, se salvó de ser guillotinado. Se incorporó a la Escuela Normal Superior de París en donde tuvo entre sus profesores a los matemáticos Joseph Louis Lagrange y Pierre Simon Laplace. Posteriormente, ocupó una cátedra como docente en la prestigiosa École polytechnique.

Fourier participó en la expedición de Napoleón Bonaparte a Egipto en 1798. Ya designado secretario perpetuo del Instituto de Egipto el 22 de agosto de 1798, presentó numerosas memorias y dirigió una de las comisiones de exploración del Alto Egipto. Entre las distintas funciones políticas o administrativas que llevó a cabo, destaca la de comisario francés en el Divan. A la muerte del General en Jefe del Ejército de Oriente Jean Baptiste Kléber a manos de un fanático sirio en su residencia en El Cairo, Fourier, quien era amigo y colaborador del General Kléber, es designado para pronunciar el elogio fúnebre, el 17 de junio delante del Instituto de Egipto. A su regreso a Francia en 1801, Napoleón Bonaparte lo nombra prefecto de Isère y entre 1802 y 1815, Fourier presenta a Jean-François Champollion a los veteranos de la expedición de Egipto.

Entró a la Academia de Ciencias Francesa en 1817 y al cabo de cinco años se convirtió en el secretario perpetuo de las secciones de matemáticas y física. Muere en París el 16 de mayo de 1830. [4]

Fourier realizó una de las más importantes aportaciones al análisis de vibraciones, la transformada de Fourier.

La transformada de Fourier, es una transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio del tiempo(o espacial) y el dominio de la frecuencia, que tiene muchas aplicaciones en la física y la ingeniería. Es reversible, siendo capaz de transformaciones de cualquiera de los dominios al otro. El propio término se refiere tanto a la operación de transformación como a la función que produce.



En el caso de una función periódica en el tiempo (por ejemplo, un sonido musical continuo pero no necesariamente sinusoidal), la transformada de Fourier se puede simplificar para el cálculo de un conjunto discreto de amplitudes complejas, llamado coeficientes de las series de Fourier. Ellos representan el espectro de frecuencia de la señal del dominio-tiempo original.

La transformada de Fourier es una aplicación que hace corresponder a una función  $f$  de valores complejos y definida en la recta, con otra función  $g$  definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

Donde  $f$  es  $L^1$ , es decir,  $f$  tiene que ser una función integrable en el sentido de la integral de Lebesgue. El factor, que acompaña la integral en definición facilita el enunciado de algunos de los teoremas referentes a la transformada de Fourier. Aunque esta forma de normalizar la transformada de Fourier es la más comúnmente adoptada, no es universal. En la práctica las variables  $x$  y  $\xi$  suelen estar asociadas a dimensiones como el tiempo —segundos— y frecuencia —hercios— respectivamente, si se utiliza la fórmula alternativa:

$$g(\xi) = \sqrt{\frac{\beta}{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\beta\xi x} dx$$

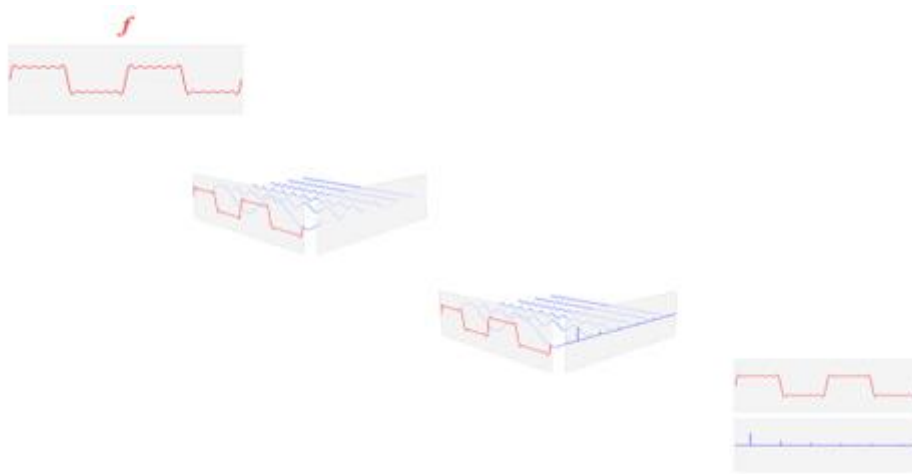
La constante  $\beta$  cancela las dimensiones asociadas a las variables obteniendo un exponente adimensional.

La transformada de Fourier así definida goza de una serie de propiedades de continuidad que garantizan que puede extenderse a espacios de funciones mayores e incluso a espacios de funciones generalizadas.

Sus aplicaciones son muchas, en áreas de la ciencia e ingeniería como la física, la teoría de los números, la combinatoria, el procesamiento de señales (electrónica), la teoría de la probabilidad, la estadística, la óptica, la propagación de ondas y otras áreas. En procesamiento de señales la transformada de Fourier suele considerarse como la descomposición de una señal en componentes de frecuencias diferentes, es decir,  $g$  corresponde al espectro de frecuencias de la señal  $f$ . [5]

Es básicamente el espectro de frecuencias de una función. Un buen ejemplo de esto es lo que hace el oído humano, ya que recibe una onda auditiva y la transforma en una descomposición de distintas frecuencias (que es lo que finalmente se escucha). El oído humano va percibiendo distintas frecuencias a medida que pasa el tiempo, sin embargo, la transformada de Fourier contiene todas las frecuencias del tiempo durante el cual existió la señal; es decir, en la transformada de Fourier se obtiene un sólo espectro de frecuencias para toda la función.

*Ilustración 5: Transformada de Fourier*



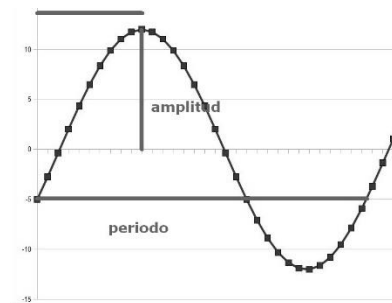
*Fuente: Mathews, J. [5]*

## 2. Espectros de vibraciones

Una vez entendido de dónde venimos y los precedentes que se dan para el estudio de vibraciones podemos empezar a hablar de los espectros de vibraciones.

Los espectros de vibraciones no son más que el resultado de la transformada rápida de Fourier a una señal de entrada de un sensor el cual veremos más adelante. Este puede ser de desplazamiento, velocidad o aceleración. Entenderemos entonces el espectro de vibraciones como la herramienta fundamental del analista de vibraciones.

*Ilustración 6: Periodo, amplitud y fase*



Fuente: <http://fisiologoi.com/>

Al analizar un movimiento armónico simple como es el de una vibración podemos observar que este tiene tres parámetros fundamentales:

- Amplitud
- Frecuencia
- Fase

La transformada de Fourier recoge estos parámetros y nos da un espectro el cual podemos entender y analizar para comprender cuál es el problema que puede presentarse en la máquina que estamos analizando.

Para la mejor comprensión de este trabajo tenemos que tener en cuenta los espectros más importantes de dicho análisis ya que, siempre un mismo problema como puede ser un cojinete con una pista exterior dañada, nos dará un tipo de espectro similar.

## 2.1. Tipos de espectros con su correspondiente fallo

A continuación, pasaremos a mostrar los espectros más frecuentes obtenidos de análisis de vibraciones en máquinas industriales, que nos muestran de forma legible, gracias a la transformada de Fourier los principales signos de que una máquina puede estar a punto de romperse sin llegar a ello y poder solucionarlo a tiempo.

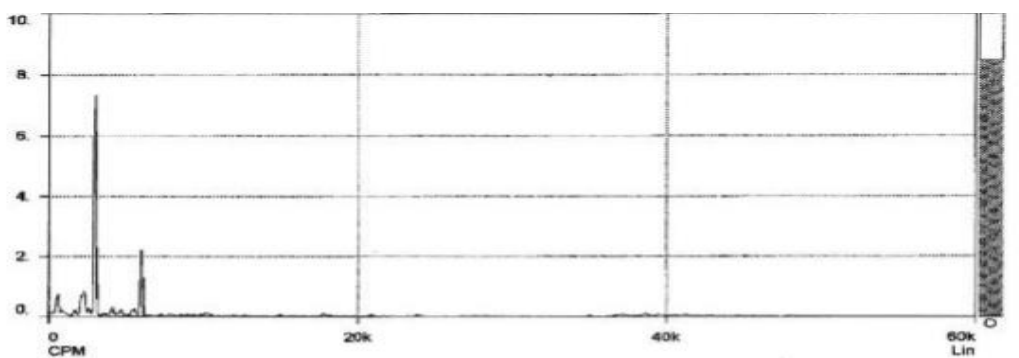
Hay que aclarar que los espectros que obtenemos de un análisis pueden ser la suma de varios de estos fallos y por lo tanto su análisis requiere de un mayor nivel de experiencia que nos ayude a diagnosticar el fallo sin ningún problema. Estos niveles ya requieren de cursos como los que se muestran en el Anexo I. [6]

### 2.1.1. Desalineación

Las desalineaciones son las principales causas de excesos de vibraciones en máquinas industriales y se deben principalmente a la mala alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos.

Las causas pueden deberse a problemas en el montaje, falta de apriete en la unión, desequilibrio de la bancada de la máquina, mal cálculo de una unión elástica... [6]

Ilustración 7: Espectro de desalineación



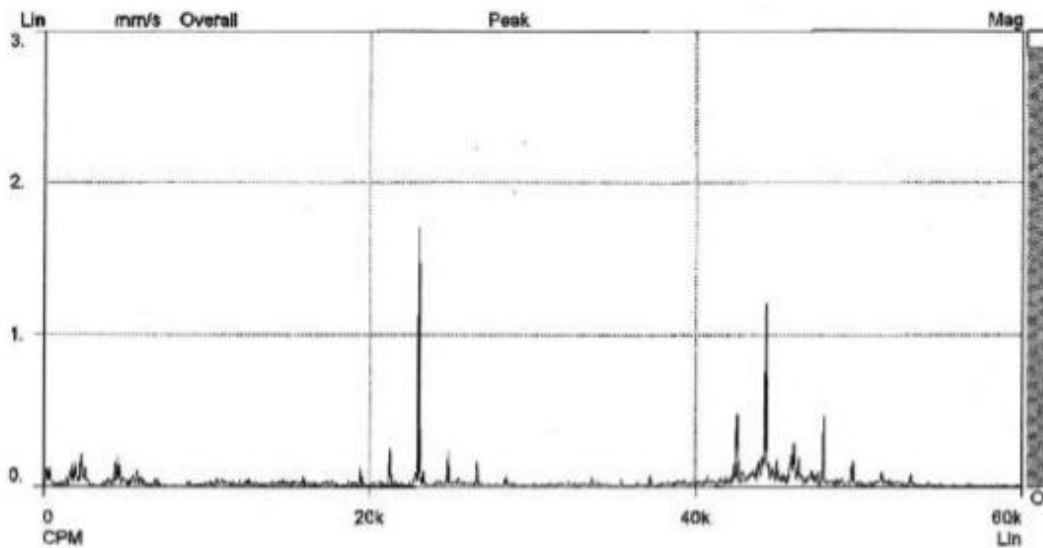
Fuente: Torres, F. et al [6]

### 2.1.2. Engranajes

Los fallos en engranajes son típicos en máquinas que transmiten movimientos como puede ser dispositivos que requieran de una reducción o aumento de rpm. Un ejemplo típico de este caso es una reductora que con el paso del tiempo o por un mal mantenimiento puede sufrir un desgaste excesivo.

Este fallo es un claro ejemplo de que la máquina que lo sufre puede seguir trabajando por mucho tiempo con este desgaste ya que, la transmisión de

*Ilustración 8: Espectro de fallos en engranajes:*



*Fuente: Torres, F. etal [6]*

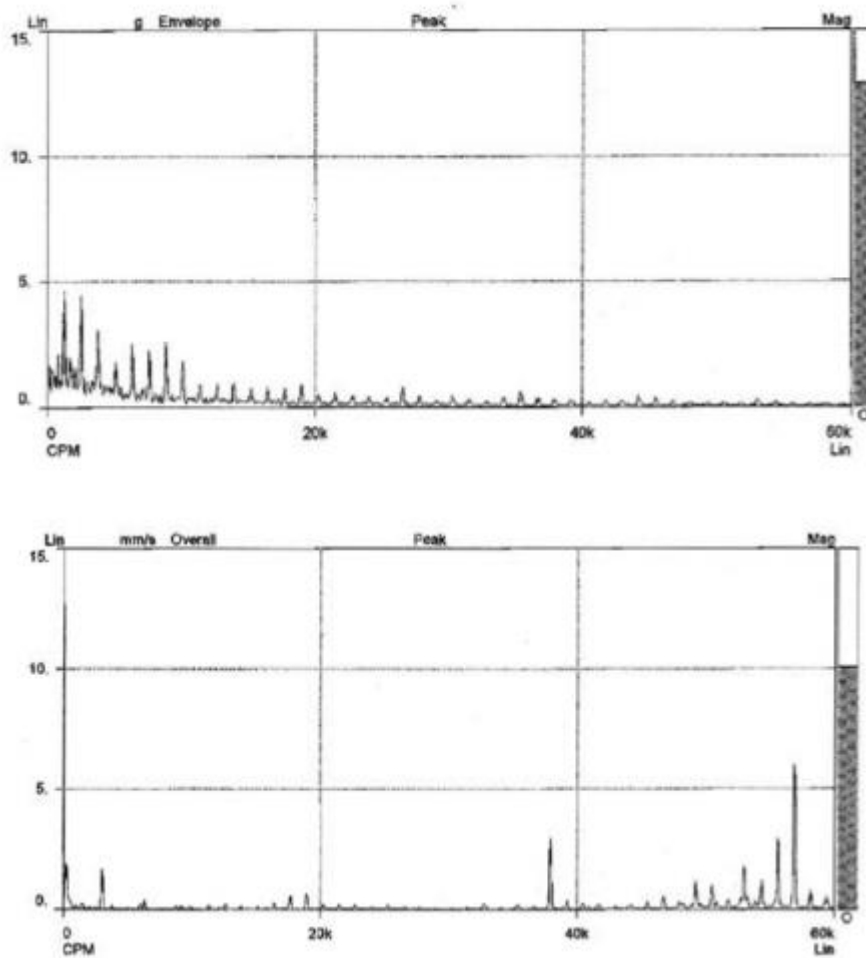
movimiento no se reduce, pero en cambio las vibraciones generadas sí que aumentan y pueden llegar a producir fallos graves en la máquina que ni siquiera están conectados a dichos engranajes. [6]

### 2.1.3. Rodamientos

Los rodamientos están presentes en casi todas las máquinas industriales, al ser elementos que están sometidos a altas revoluciones de giro son víctimas de desgastes o de sufrir daños en sus pistas de rodamiento.

Las gráficas representativas de este defecto son fácilmente reconocibles debido a que en ella se presenta multitud de picos a diferentes amplitudes y observando con más detalle podemos claramente detectar donde se encuentra el fallo ya que es representado por una amplitud mayor. [6]

Ilustración 9: Espectro de fallos en rodamientos

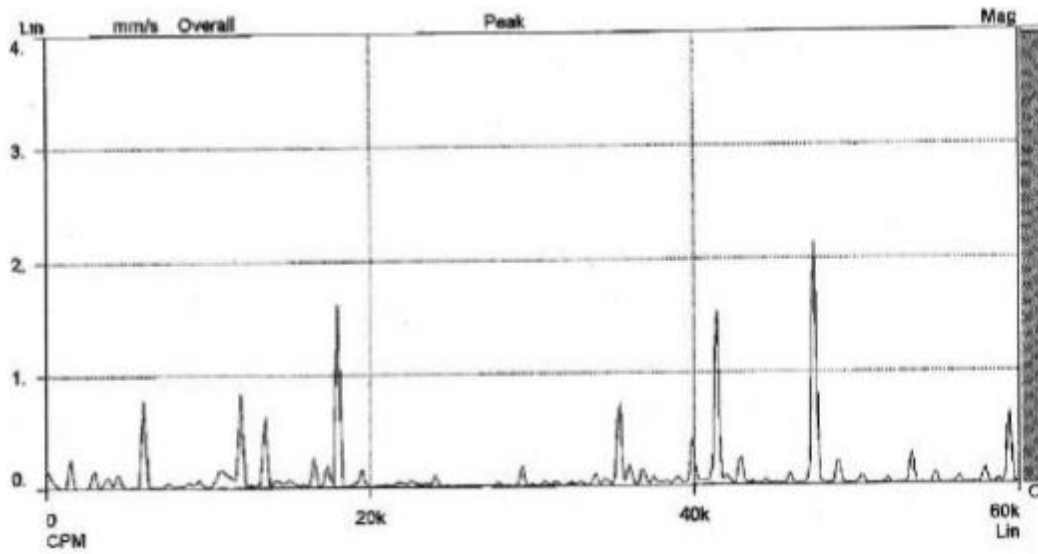


Fuente: Torres, F. et al [6]

#### 2.1.4. Fallos eléctricos

Estos fallos son difícilmente reconocibles con el espectro de vibraciones ya que pueden confundirse con otros tipos de espectros. Hay formas de detectar este tipo de fallo con respecto a los otros como, por ejemplo, desconectar la corriente en el momento de la medición, pero aun así es un fallo bastante difícil de diagnosticar. [6]

Ilustración 10: Espectro de fallos eléctricos



Fuente: Torres, F. et al [6]

## 3. Normativa aplicable al análisis de vibraciones

En el estudio del análisis de vibraciones en máquinas industriales cabe decir que el análisis de la normativa aplicable a este sector es de verdadera relevancia, no con un carácter restrictivo ni sancionador, sino como un estándar de referencia para el buen análisis de vibraciones y su estandarización.

Esto significa que cualquier máquina en general a la que queramos someter a este tipo de análisis, podemos decir previamente antes de analizar nada que ya disponemos de una guía básica para saber que lo estamos haciendo correctamente.

La normativa en análisis de vibraciones de máquinas industriales es por lo tanto un estudio de las características de las máquinas, tamaño, bancada, alternativa o rotatoria... y de la aplicación de esta a la norma que corresponda.

En referencia a la normativa, podemos decir que como en casi todos los sectores en el ámbito industrial se dispone de normas generales o estándares a los que, sin ser de obligación, nos acogemos para su correcta estandarización.

Normalmente podemos distinguir tres niveles:

- Normativa internacional (ISO) o normas que, aunque no son internacionales se respeta su fiabilidad y se pueden acoger como estándar internacional (VDN, ANSI).
- En nuestro caso podíamos describir un segundo nivel de normativa europea (EN) o normativa nacional (UNE).



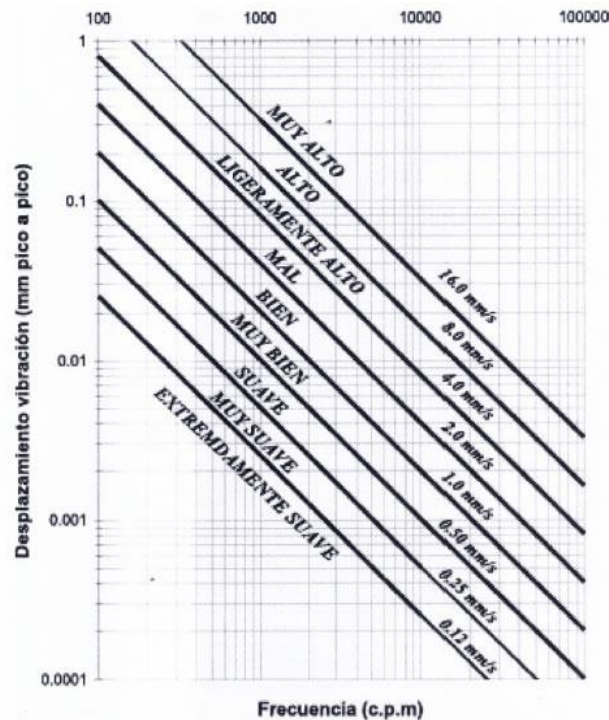
- Normas o recomendaciones del fabricante el cual da una serie de especificaciones para su propia máquina y normas internas de la empresa la cual realice estos análisis.

En esta escala ha quedado demostrado en la práctica que las normas internas de las empresas, siempre en línea con las superiores, dan resultados muy satisfactorios y son las que mejor se adaptan a cada industria y a la realización de estos análisis.

En esta parte del trabajo estudiaremos las principales y más utilizadas normas o estándares que se utilizan para el análisis de vibraciones:

### 3.1. Carta de Rathbone

Ilustración 11: Carta de Rathbone



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [7]

Fue la primera guía, no considerada norma, que nos daba una idea de los correctos niveles de vibraciones que podía permitirse en una máquina. Fue desarrollada en los años treinta y mejorada posteriormente. En ella hay que

tomar como medidas de referencia la escala de frecuencias en hercios o CPM, la amplitud del desplazamiento y la velocidad.

Esta carta fue desechada al cabo del tiempo debido a que no tenía en cuenta el tipo de máquina, la potencia y la rigidez de los anclajes. Tampoco es aplicable a equipos alternativos y la carta considera que el mismo desplazamiento a bajas revoluciones es menos grave que a altas.

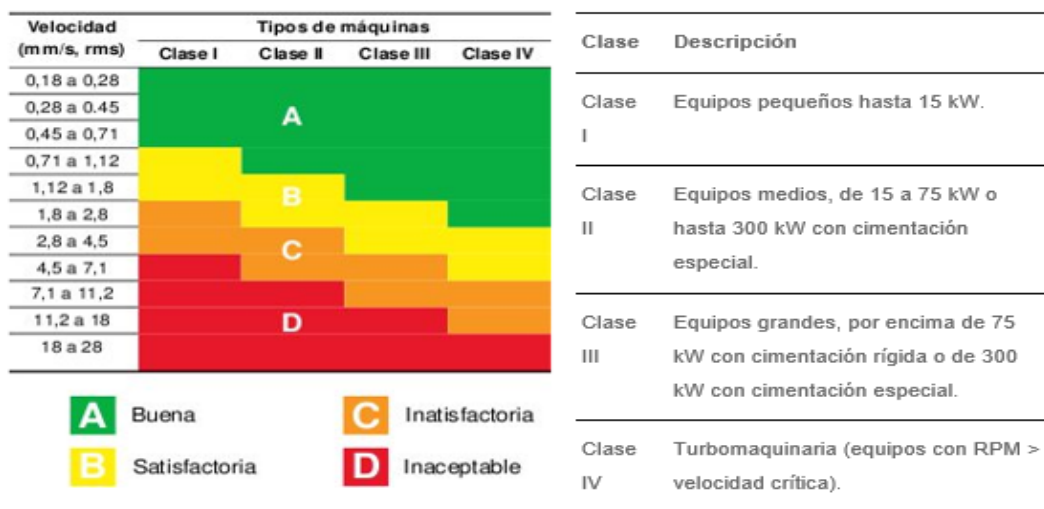
Esta carta fue creada para máquinas con bajos CPM y hoy se considera obsoleta dando paso a normas más especializadas. [7]

### 3.2. Norma ISO 2372-1974

Esta norma es ya mucho más moderna y nos da una mejor idea de referencias que debemos tomar según el tipo de máquina que estemos analizando. Esta norma es aplicable a equipos en cuyo rango de velocidades entran entre 600 y 12000 RPM.

Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel de vibración en velocidad y el valor eficaz RMS, en un rango entre 10 y 1000 Hz, distinguiendo también según la clase de equipo rotativo.

Ilustración 12: Norma ISO 2372-1974



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [8]

Esta norma, aunque ya mucho más moderna y exacta que la Carta de Rathbone fue revisada y sometida a examen para su mejor adecuación y aplicación en máquinas industriales, por lo que se sustituye por la norma ISO 10816. [8]

### 3.3. Norma ISO 10816

Esta norma es de uso general y su fiabilidad ha quedado demostrada debido a que, en su aplicación, las máquinas presentan una buena respuesta a largo plazo.

Esta norma consta de cinco partes:

- Parte 1: indicaciones generales
- Parte 2: turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM
- Parte 3: máquinas industriales con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM
- Parte 4: conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica
- Parte 5: conjunto de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo

Como se puede ver, en esta revisión se engloban y se amplían los anteriores estándares.

Hay que tener en cuenta que estas referencias son tomadas en las máquinas libres sin que les afecten vibraciones externas de otros aparatos independientes. Si las vibraciones son superiores a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se han de tomar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de las vibraciones externas. Si con la máquina detenida exceden un 25% de la medición obtenida con la máquina en funcionamiento serán necesarias acciones correctivas para disminuir o eliminar las vibraciones de fondo.

La severidad de la vibración en esta normativa se clasifica según los siguientes parámetros:

### 3.3.1. Tipos de máquina, potencia o altura de eje

- Grupo 1: máquinas rotatorias grandes con potencia superior a 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $H \geq 350$  mm
- Grupo 2: máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $160 \leq H < 315$  mm
- Grupo 3: bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrifugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW
- Grupo 4: bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrifugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW

### 3.3.2 Según la flexibilidad del soporte

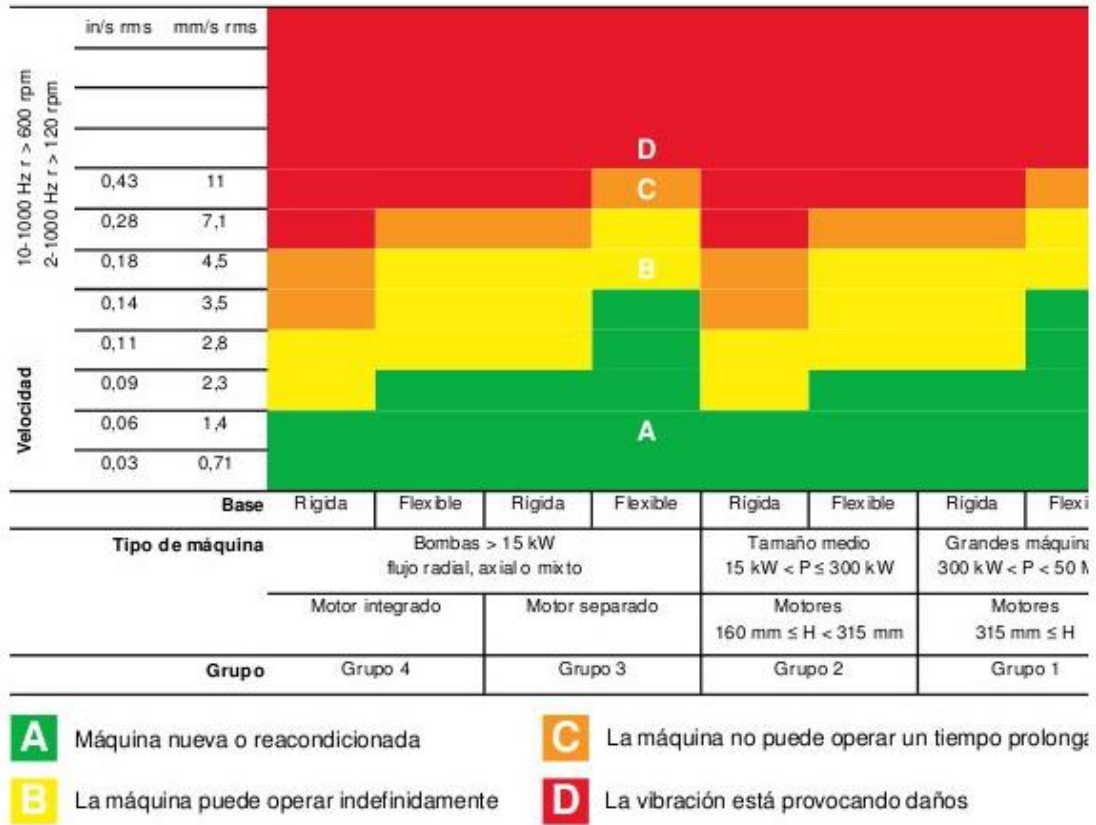
Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación) en al menos un 25%, entonces el sistema soporte puede ser considerado rígido en esta dirección. Todos los otros sistemas soportes pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección y flexible en otra. Tales sistemas serían rígidos en el plano vertical y flexible en el plano horizontal. En este caso la vibración debe ser evaluada siendo consiente del tipo de flexibilidad que se debe interpretar en cada caso.

Evaluación:

- Zona A: valores de vibraciones de máquinas recién puestas en funcionamiento o reacondicionadas
- Zona B: máquinas que pueden funcionar indefinidamente sin restricciones
- Zona C: las condiciones de la máquina no son adecuadas para una operación continua, sino solamente para un periodo de tiempo limitado. Se debería llevar acabo medidas correctivas en la siguiente parada programada.

- Zona D: los valores de vibraciones son peligrosos, la máquina puede sufrir daños. [9]

Ilustración 13: Normativa ISO 10816



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [9]

### 3.4. Real decreto 1311/2005

Esta norma española no tiene relación con las otras, aunque deba ser respetada y puesta en marcha en el estado español. La razón por la que no tiene relación es que esta norma ha sido creada por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo y tiene como objetivo principal la elaboración de guías destinadas a la evaluación y prevención de riesgos laborales.

*Ilustración 14: Salud del trabajador*



*Fuente: <http://www.ga-consultores.com>*

Este real decreto nos presenta un segundo punto de estudio el cual no es el fin de este trabajo, pero igualmente importante ya que destaca uno de los beneficios principales del análisis de vibraciones después del mantenimiento de la propia máquina. Con este beneficio nos referimos al de la propia salud del trabajador.

Para añadir datos específicos de este real decreto hay que decir que da una idea del nivel máximo de exposición a vibraciones que puede someterse un trabajador a ellas sin tener repercusiones en su salud.

Así podemos decir que un trabajador debe tener mayor número de descansos periódicos cuando se trata de una máquina con alto nivel de vibraciones y menos descansos cuando las vibraciones no excedan demasiado los límites establecidos.

Para la vibración transmitida al sistema mano-brazo:

El valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas se fija en  $5 \text{ m/s}^2$ . b. El valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en  $2,5 \text{ m/s}^2$ .

La exposición del trabajador a la vibración transmitida al sistema mano-brazo se evaluará o medirá con arreglo a lo dispuesto en el apartado A.1 del anexo.

Para la vibración transmitida al cuerpo entero:

El valor límite de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas se fija en  $1,15 \text{ m/s}^2$ . b. El valor de exposición diaria normalizado para un período de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

La exposición del trabajador a la vibración transmitida al cuerpo entero se evaluará o medirá con arreglo a lo dispuesto en el apartado B.1 del anexo.

Cuando la exposición de los trabajadores a las vibraciones mecánicas sea de forma habitual inferior a los valores de exposición diaria establecidos en el apartado 1.b) y en el apartado 2.b), pero varíe sustancialmente de un período de trabajo al siguiente y pueda sobrepasar ocasionalmente el valor límite correspondiente, el cálculo del valor medio de exposición a las vibraciones podrá hacerse sobre la base de un período de referencia de 40 horas, en lugar de ocho horas, siempre que pueda justificarse que los riesgos resultantes del régimen de exposición al que está sometido el trabajador son inferiores a los que resultarían de la exposición al valor límite de exposición diaria. [10]





**IV**

# **Materiales y métodos**



# 1. Instrumentos de medida para el correcto análisis de vibraciones

Los instrumentos de medida en el análisis de vibraciones podemos estudiarlos como aparatos de medición en general. Quiero decir que los analizadores de vibraciones que podemos encontrar en el mercado pueden ser de una gran sensibilidad y fiabilidad, como los que podemos usar para la medición de vibraciones en turbinas o bombas, y no tan sensibles que nos siguen dando una información de igual importancia.

La diferencia entre ambos es mayormente el precio, perfectamente comprensible si entendemos de lo que es capaz de realizar un aparato de mayor coste, el cual es capaz de registrar directamente los datos recogidos en una base de datos que automáticamente comparará los resultados con valores de referencia y nos dirá el nivel de gravedad del análisis. Nos ofrece también multifunciones como tomar una simple medida de velocidad que nos interesa sin que se registre en la base de datos o revisar anteriores medidas que nos aportaran una mayor información de medición. Los más económicos toman medidas igualmente fiables, pero estos no disponen de una base de datos propia y el operario tiene que transferir constantemente los datos recogidos a un software para compararlo con los valores de referencia.

*Ilustración 1: Toma de vibraciones*



Fuente: <http://www2.pruftechnik.com>

En la imagen podemos observar un operario realizando tomas de vibraciones a una máquina rotatoria.

Hay que destacar que para el estudio del analizador de vibraciones tenemos que tener en cuenta que está dividido en dos partes.

Una primera parte que sería el aparato que sostiene el operario en las manos, es el encargado de recoger la información del análisis y transformar esta, para que le sea legible al operario. Y una segunda parte fundamental para el análisis que es el sensor que está conectado a la máquina y el cual es el verdadero encargado de la fiabilidad de la recogida de datos.

## 1.1. Instrumentos de representación de datos

Como ya hemos dicho anteriormente la calidad y las utilidades de estos analizadores dependen del coste y por lo tanto en el mercado existen todo tipo de gamas.

*Ilustración 2: Analizador de vibraciones de alta calidad*



Fuente: <http://www.fluke.com/>

El aparato que vemos a continuación es un analizador de parámetros de la casa FLUKE que tiene un coste de unos 9000€. No es un precio excesivo si consideramos las garantías que ofrece el fabricante, además de que el propio aparato tiene un software interno en el que podemos cargar nuestra planta, y una vez hecho esto, introducir una ruta de análisis de vibraciones. Una vez acabada esta ruta que debe ser realizada como explicaremos más adelante por personal correctamente formado debido a sus peculiaridades. El mismo software nos dirá que aparatos, y en que partes, se detecta un incremento de vibraciones inusual al cual deberemos prestar atención. Tanto si disponemos de una persona

dedicada al análisis de espectros en plantilla, como si es personal poco formado el que debe atender esta situación, debe analizar los datos recogidos por el aparato y en consecuencia tomar medidas en la planta.

Las ventajas de este aparato con respecto a otros de gama más baja es la facilidad para la introducción de una base de datos, como es la planta, en el software y el propio análisis que hace esta de las medidas tomadas, reduciendo así muchos errores humanos que podamos tener en las tomas de medidas, en la transferencia de información o en la detección de la avería.

*Ilustración 3: Analizador de bajo costo*



Fuente: <http://es.aliexpress.com/popular/vibration-testing-machine-analyze.html>

El aparato que vemos en la imagen anterior es un modelo de medidor de vibraciones de los más económicos que nos podemos encontrar en el mercado. Su valor no supera los 100€ y sus funciones son relativas a dicho precio.

La función principal que realiza este sistema es la toma del nivel pico de amplitud medidas con el sensor. Esto quiere decir que a la hora de realizar una medición este solo nos dirá el valor que nos aporta el sensor. También hay que destacar que no realiza los cálculos de la transformada de Fourier para la obtención del espectro de vibraciones con lo que no nos aporta información para un mejor análisis de un posible fallo detectado.

Una vez recogido este valor deberemos compararlo con valores de referencia o series de valores anteriores que nos den una idea del valor correcto de esta vibración.

Con esto no quiero decir que sea un mal analizador o un mal método de medida, ya que la medida de vibraciones que aporta es tan fiable como la del analizador de mayor valor, pero al contrario que el otro, el tratamiento de la información es

Ilustración 4: Analizador de monitoreo continuo



Fuente: <http://www.idear.net/Especificaciones/Vibraspec-800.pdf>

un poco más compleja y pueden darse errores humanos que nos lleven a gastos de dinero innecesario.

La imagen que vemos a en la parte superior corresponde a otro tipo de analizador de vibraciones, concretamente nos referimos a uno de tipo fijo o un analizador de vibraciones para monitoreo continuo. Como hemos podido ver anteriormente existen varios precios según la calidad del analizador o las posibilidades que ofrezca, pero estos tienen una peculiaridad con respecto a los anteriores, la finalidad de este analizador es monitorear de forma continua los parámetros de vibración de una máquina en uno o varios puntos de manera constante, pudiendo enviar esta información sobre el nivel de vibraciones a una sala de control para el monitoreo constante de los operarios. Estos tipos de analizadores los creo convenientes en sistemas que necesiten una mayor atención, debido a que el montaje de este analizador con sus respectivos sistemas supone un desembolso mucho mayor que un analizador de tipo portátil como los que pudimos ver anteriormente.



## 1.2. Tipos de sensores de vibraciones

Es importante recordar que según el tipo de máquina al que vamos a tomar las vibraciones y según la importancia de esta debemos elegir un tipo de sensor adecuado. Así, por ejemplo, para una turbo que gira a altas revoluciones y que requiere de un monitoreo constante de este tipo de parámetros, elegiremos un sensor de tipo acelerómetro y con una colocación fija a la turbo.

A continuación, explicaremos el porqué de esta elección del medidor o analizador de vibraciones ya que como vemos requiere de un estudio concreto para cada tipo de máquina.

El transductor o analizador es el elemento que transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, para posteriormente, poder ser procesada y medida.

Según su tipo de construcción podemos encontrar tres tipos de analizadores, de desplazamiento, de velocidad y de aceleración.

Un requisito indispensable en un analizador de vibraciones es su precisión a la hora de medir frecuencias y amplitudes, ya que son estos los parámetros que luego utilizaremos para el análisis.

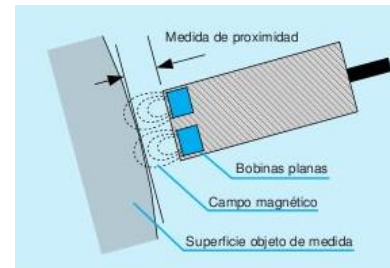
El transductor de desplazamiento no es más que una sonda de proximidad la cual es muy útil para vibraciones a bajas frecuencias.

El transductor de velocidad o sonda de velocidad es de mayor campo de aplicación ya que funciona bien a todas las frecuencias, pero, aun así, el de mayor utilización es el piezoeléctrico o acelerómetro ya que este es muy bueno para altas frecuencias y el circuito eléctrico encargado de la integración de esta señal para convertirla en velocidad o desplazamiento, es de mucho menor coste que uno de diferenciación. [11]

### 1.2.1. Transductores de desplazamiento

Estos transductores tienen la ventaja de dar una lectura perfecta de las vibraciones por debajo de 1000 Hz, pero tienen los inconvenientes de tener que ser montados permanentemente en la zona a medir lo que requiere un coste adicional. [12]

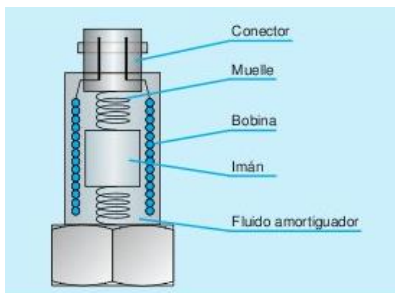
Ilustración 5: Transductor de desplazamiento



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [12]

### 1.2.2. Transductores de velocidad

Ilustración 6: Transductor de velocidad



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [13]

Estos transductores consisten en un imán que se desplaza amortiguado por una bobina. El movimiento de este depende del movimiento transmitido por la máquina.

Las ventajas de este transductor es que tiene un amplio rango de vibraciones admisibles, desde 10000 a 1000Hz. Este rango tiene una desventaja, el transductor es de un tamaño mayor lo que requiere un espacio que muchas veces no se tiene.

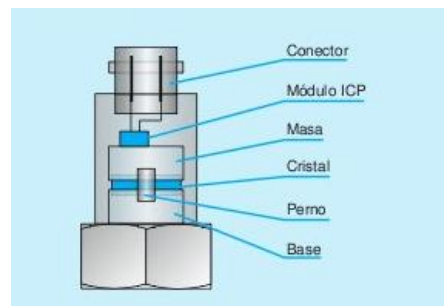
Otra de las desventajas de este dispositivo es que tiende a descalibraciones debido al desgaste o a la temperatura. [13]

### 1.2.3. Transductores piezoeléctricos

Este tipo de transductor genera una tensión eléctrica proporcional a la aceleración por presión sobre un cristal piezoeléctrico.

Entre sus ventajas está que tiene una muy buena recepción de las vibraciones a muy altas frecuencias y que estas pueden ser muy bajas hasta de 1Hz. También hay que destacar que el circuito de integración necesario para obtener

Ilustración 7: Transductor piezoeléctrico



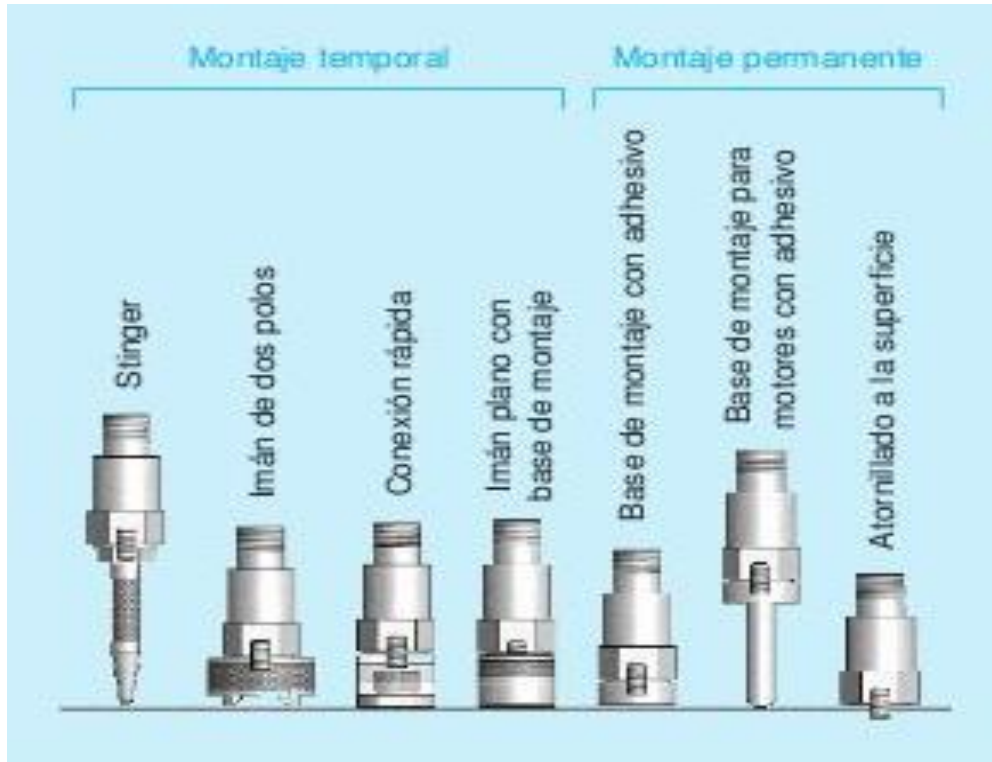
Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [14]

la velocidad y desplazamiento, es mucho más barato que uno derivativo. Se debe

tener especial cuidado a la hora de que este transductor reciba impactos, ya que el cristal piezoeléctrico es frágil. [14]

### 1.3. Tipos de sujeción en la toma de muestra

Ilustración 8: Tipos de sujeciones a la toma de muestras



Fuente: Signas. Ingeniería de mantenimiento [15]

Los tipos de sujeciones que podemos utilizar en el sensor de vibraciones vienen dados según el tipo de muestra que vamos a llevar a cabo. Por poner un ejemplo, si utilizamos el sensor para medir un ventilador que se mueve a unas revoluciones de 3000 r.p.m., y este ventilador no es un sistema de mucha importancia, la toma de muestras la podríamos realizar con una sujeción magnética. En cambio, sí nos vamos a una turbina de gas, la cual gira a 8000 r.p.m. las más lentas, pues para obtener unos datos fiables sería necesario una unión atornillada o adherida para que no nos de errores la lectura.

Para su mejor comprensión, en el caso de que tengamos que elegir entre un método de sujeción u otro, debemos tener en cuenta la frecuencia de la máquina a la que vamos a realizar el análisis y su importancia, ya que cuantas más altas sean esta frecuencia, más uniforme debe de ser la unión entre el sensor y la máquina para una buena obtención de datos. [15]

## 2. Correcta utilización de los instrumentos

Para un buen análisis de vibraciones es intrínsecamente imprescindible una buena recogida de datos.

Para una buena recogida de datos debemos comprender que debemos hacerlo abarcando situaciones muy puntuales, como son las de cada máquina, y situaciones muy amplias como es el comienzo de una ruta de vibraciones.

Una ruta de análisis de vibraciones, no es más que tomar un orden en el que pasaremos por las máquinas introducidas en dicha ruta. Al realizar esta ruta tenemos que tener en cuenta la situación de dichas máquinas y su operatividad. Por operatividad nos referimos a que dichas máquinas estén en ese momento en un funcionamiento normal.

Dicha ruta nos debe ahorrar tiempo en la recogida de datos y siempre tener en cuenta que el operario que la va a realizar pueda acceder a las dichas zonas de análisis.

Refiriéndonos a los analizadores de medida de vibraciones que antes mencionamos, añadiremos que, en los aparatos de coste superior, en el software, nos permite crear esta ruta internamente en el analizador de vibraciones, ahorrándonos así mucho tiempo.

Las situaciones más puntuales se refieren a las precauciones y orden por el que debemos tomar los datos en la máquina en concreto que queremos analizar. Con esto hay que tener muy en cuenta que siempre estamos trabajando con máquinas de altas r.p.m. o máquinas alternativas que siempre requieren de unas precauciones previas como puede ser la utilización de guantes.

Un buen hábito en la toma de muestras en una planta es la señalización de los puntos de medida, ya que, para un correcto análisis de vibraciones es necesario que las vibraciones siempre sean tomadas en los mismos puntos.

*Ilustración 9: Puntos de toma de datos*



*Fuente: Trabajo de campo*

Las arandelas circulares que podemos observar en la imagen son elementos que se le han añadido a esta bomba para que dichas tomas de vibraciones se realicen siempre en los mismos puntos, asegurando así la fiabilidad de estas muestras.

Hay que recordar que para una correcta toma de muestras debemos siempre tomar dos muestras radiales a 90° y una axial para obtener unos datos correctos en el análisis.

*Ilustración 10: Puntos de muestreo*



*Fuente: Trabajo de campo*

### 3. Central energética diésel El Palmar

Ilustración 11: Central energética El Palmar



Fuente: <https://www.google.es/maps>

La central energética diésel del Palmar está situada en la isla de la Gomera, concretamente en el municipio de San Sebastián en la Provincia de Santa Cruz de Tenerife.

Dicha central es la única suministradora de energía eléctrica en la isla de la Gomera y dicho esto, acentuar que la importancia de un buen plan de mantenimiento en esta central nos asegura un suministro de energía sin fallas.

Ilustración 12: Motores de la central energética El Palmar

GRUPO	POTENCIA	FABRICANTE	MODELO	Nº DE SERIE	Nº DE CILINDROS	VELOCIDAD DE RÉGIMEN	CONSUMO ESPECÍFICO	VOLUMEN CIRCUITO DE AGUA
D-12	1650 kW	CATERPILLAR	3606 Línea	8RB 326	6	1000 RPM		745
D-13	1650 kW	CATERPILLAR	3606 Línea	8RB 298	6	1000 RPM		745
D-14	2240 kW	CATERPILLAR	3608 Línea	6MCO 246	8	1000 RPM		875
D-15	2333 kW	CATERPILLAR	3608 Línea	6MCO 255	8	1000 RPM		875
D-16	2850 kW	CATERPILLAR	3612 V	9RC02 04	12	750 RPM		1100
D-17	2850 kW	CATERPILLAR	3612 V	9RC03 16	12	750 RPM		1100
D-18	3570 kW	DEUTZ	BV 16 M 628	69883 55011 4	16	1000 RPM		600
D-19	3570 kW	DEUTZ	BV 16 M 628	69883 55011 5	16	1000 RPM		600
DM-2	1460 kW	CATERPILLAR	3516 V	25Z04 157	16	1500 RPM	211,40 gkW/h	
DM-3	1000 kW	CATERPILLAR	3512 V	24Z08 363	12	1500 RPM	201,40 gkW/h	

Fuente: Elaboración propia

Como vemos en el cuadro la central basa su forma de generación energética en motores diésel de 4 tiempos de diferentes potencias. Estos motores diésel son de gran tamaño y esto conlleva un gran despliegue de sistemas auxiliares que los hacen funcionar correctamente.

Algunos de los sistemas auxiliares que podemos destacar para este proyecto son bombas de trasiego, ya sean de agua, diésel o aceite la central cuenta con gran número bombas con su respectivo motor eléctrico o diésel, que las hacen funcionar y, por lo tanto, necesitan mantenimiento.

También destacar que estos motores disponen todos de motor de arranque tipo bendix accionado por aire lo que ya nos lleva a un sistema de aire comprimido con sus respectivos compresores.

La importancia de asegurar el suministro en la isla en todas las circunstancias hace que sea necesario la implantación de dos sistemas de refrigeración de estos motores, el primero gracias a un suministro de agua de mar con sus



respectivas bombas e intercambiadores de calor de placas agua/agua. El segundo tipo se basa en un sistema de refrigeración agua/aire con grandes refrigeradores por lo que se hace pasar el agua de refrigeración de los motores y a los que se les extrae el calor por medio de ventiladores.

Otro importante elemento de esta central es la planta desalinizadora que, gracias al calor residual que arrastra el agua de la refrigeración de los motores se aprovecha para la evaporación de agua y para generar agua destilada, que más tarde se usará para refrigeración de los motores previamente añadiendo los aditivos necesarios.

Es muy importante nombrar también los sistemas contraincendios existentes en la central, los cuales pasan unas estrictas revisiones periódicas claramente basadas en la importancia de este sistema.

Como podemos observar en la central, aun siendo de las más pequeñas de nuestro archipiélago, tiene grandes sistemas encargados de su funcionamiento que requieren de un buen plan de mantenimiento que evite averías imprevistas y ahorre una cantidad importante de dinero en gastos derivados de dichas averías. En este aspecto es muy importante el análisis de vibraciones que se realiza en esta central, ya que gracias a este se puede llevar a cabo un control más exhaustivo de las máquinas que puedan sufrir una avería inesperada, pudiendo así ser reparadas con planificación previa y sin costes imprevistos.



**V**

# **Resultados**



# 1. Caso práctico

Una vez analizados los aspectos fundamentales del análisis de vibraciones podemos pasar al desarrollo de un caso práctico ocurrido durante mis prácticas académicas el cual, podemos dar por un buen ejemplo de análisis predictivo.

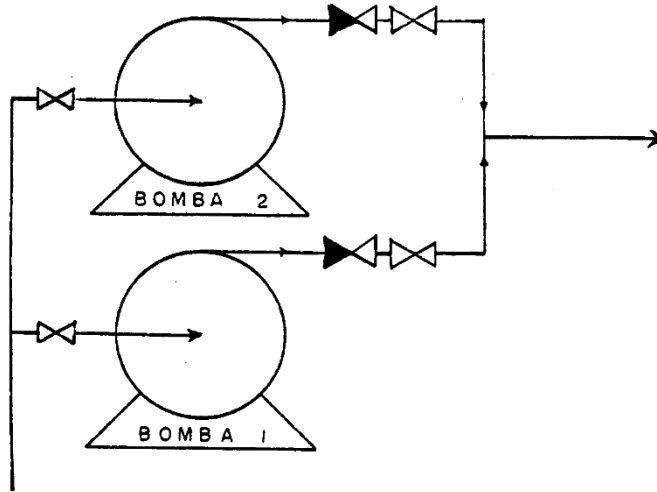
En este punto desarrollaremos que aparatos de medida hemos utilizado, el sistema de toma de muestras, así como la revisión de los datos obtenidos y sus conclusiones.

Con dicho caso práctico quiero destacar las grandes ventajas que supone este tipo de análisis viendo como un alumno en prácticas sin mucha formación puede llegar a detectar averías que de otro modo no serían previstas y que pueden ocasionar graves daños para la planta energética.

Este caso práctico comienza con la detección de una fuga de agua de una de las bombas en paralelo en el motor D-18. Este motor es uno de los dos más grandes de los que dispone la central, siendo un motor diésel 4 tiempos de 3570 KW fabricado por la casa DEUTZ.

Cabe destacar la necesidad de un par de bombas en paralelo en este tipo de motores ya que estos motores son los más usados en la central, pudiendo estar en funcionamiento una semana entera sin detenerse, y por lo tanto, la necesidad de un plan alternativo si una de las bombas sufriera algún tipo de daño o tuviera que pasar algún mantenimiento periódico. Para su mejor comprensión añadimos un esquema de un sistema de bombas en paralelo.

Ilustración 1: Bombas en paralelo



Fuente: Elaboración propia

Para continuar con la explicación estas bombas a la salida del agua de refrigeración del motor son bombas de tipo dinámico, más bien conocido como bombas centrífugas, dichas bombas funcionan alternativamente con cada parada y arranque del motor ya que así se asegura que puedan llevar un número de horas de funcionamiento similar. Estas bombas son capaces de mover 58 m<sup>3</sup>/h de agua y el motor eléctrico proporciona 2940 RPM nominales.

Ilustración 2: Placa de características



Fuente: Trabajo de campo

A estas bombas en concreto, en la central se las denominas bombas de HT (High Temperature) debido a la salida de agua de alta temperatura del motor, las cuales son completamente idénticas, pero se diferencian al nombrarlas en HTA y HTB.

*Ilustración 3: Bombas High Temperature*



*Fuente: Trabajo de campo*

Para acabar la descripción de estas bombas destacar que su salida normalmente está dirigida hacia los intercambiadores de calor agua/aire, pero si estos tuvieran algún problema es posible cambiarlo y hacer pasar el agua por intercambiadores de placas agua/agua, pudiendo así refrigerar el agua de salida de los motores con agua de mar.

Para continuar con el caso práctico, como íbamos diciendo, se detecta una pequeña fuga de agua en la carcasa de la bomba HTB. La fuga es detectada por

uno de los operarios de turno de madrugada con los que cuenta la central y este genera un aviso informando de la fuga. La detección de la fuga se realizó de madrugada, pero al tratarse de bombas en paralelo el operario cambio de bomba a la HTA a la espera de la mañana siguiente, para que el jefe de la sección de motores tomara una decisión sobre dicha bomba.

A la mañana siguiente, el jefe de la sección de motores recibe el aviso y va a comprobarlo con el operario de la mañana, dicho operario vuelve a arrancar la bomba y vuelve a haber una fuga constante de agua de poco caudal pero aun así constante. El jefe de la sección de motores se cerciora de la fuga y se estima que es un fallo en el sello exterior de la carcasa que no implica una avería grave pero que debe ser reparada.

En la oficina me informa que debo realizar un análisis de vibraciones y ya de paso, a las bombas que se encuentran en esa sección. El jefe de la sección de motores me comenta que estas bombas tienden a dar estos tipos de fallos, además de desgastes más rápidos de lo normal en los rodamientos debido al calor que se encuentra en la zona, ya que se encuentran en la parte alta de la sala de máquinas entre dos salidas de gases de escape.



## 2. Aparatos de medida

Ilustración 4: Analizador de vibraciones Prüftechnik



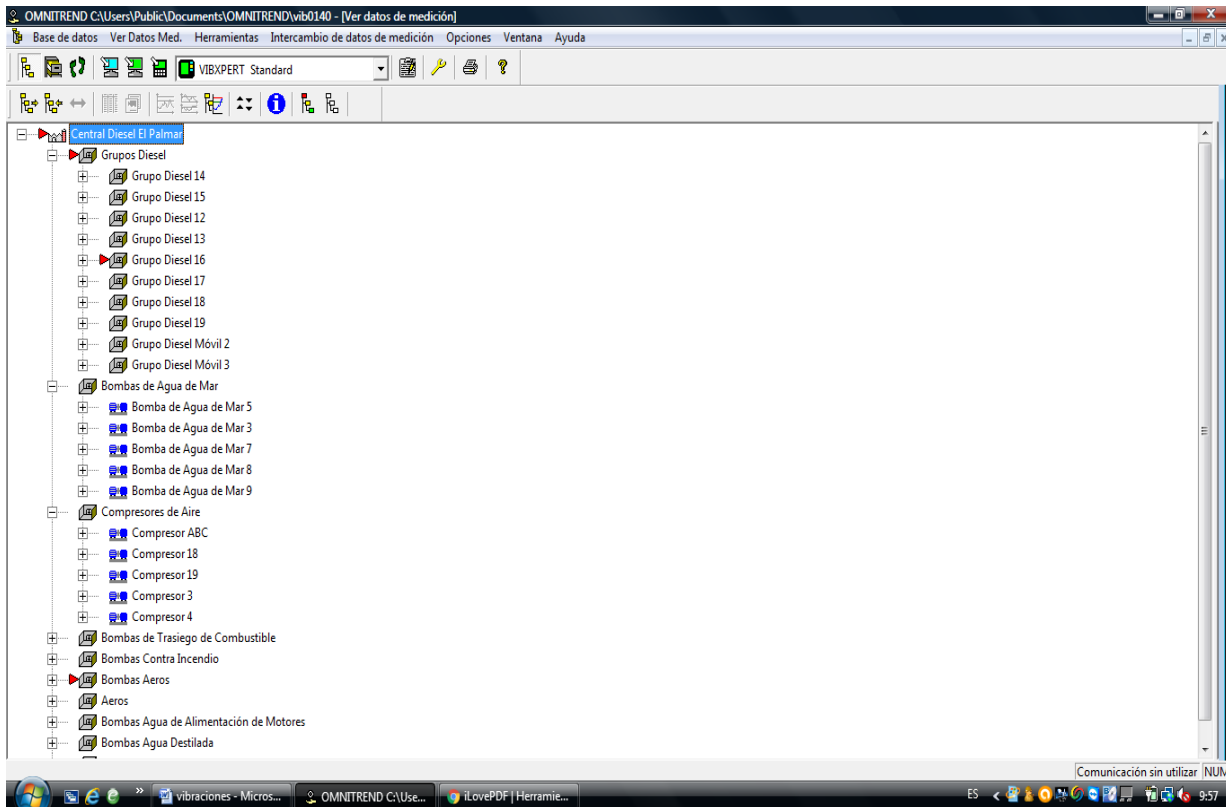
Fuente: Trabajo de campo

El aparato de medida del que se disponía en la central energética El Palmar pertenece a la casa Prüftechnik. La empresa fabricante del aparato se dedica a la creación de software e instrumentos de muy alta calidad para análisis de tipo predictivo como, por ejemplo, medidores ópticos de temperatura, medidores laser de desalineamiento y por supuesto, analizadores de vibraciones.

Este aparato es de uso portátil por el hecho de que es un requisito indispensable en esta central que podamos trasladarlo de un lugar a otro sin mucha dificultad ya que se realizan rutas que pueden llevar varios días.

En este aparato los operarios habían cargado ya, con el paso del tiempo, todas las máquinas de la central, desde los motores de los ventiladores que suministran aire a la sala de máquinas, hasta los diésel de 4 tiempos de los que dispone la central para la generación de energía eléctrica.

*Ilustración 5: Sistema cargado en el software*



*Fuente: Trabajo de campo*

Al tener la central cargada completamente en el aparato, el operario podía seleccionar porque máquinas pasaría su ruta de análisis, indicándole así el aparato cual sería la siguiente máquina que debía analizar.

La siguiente propiedad de este analizador es que dispone de una interfaz de manejo muy simple así que solo con 4 botones podemos desplazarnos por el menú y acceder a las diferentes partes de las que se compone.

Una de las propiedades más notables que pude observar de este analizador es que, es tan intuitivo que es capaz de decirle al operario en que puntos de la máquina debe colocar el sensor de vibraciones. Por ejemplo, en el caso de una

bomba, siempre indica que hay que comenzar por el cojinete posterior radial del motor eléctrico, y así, punto a punto te lleva hasta el cojinete axial de la bomba. Dando así menos error en la toma de datos que nos asegura un mejor análisis final.

Otra ventaja de este aparato es que permite reescribir datos que por fallos en la toma de muestras hayan sido erróneos, pudiendo con esto de una manera sencilla volver a tomar el valor correcto sin mucho esfuerzo.

Este analizador de vibraciones dispone de un programa en un ordenador de la central que se llama OMNITREND, desde donde podemos cargar todas las rutas, sistemas y realizamos el análisis final del mismo.

El sensor que se utiliza en esta central es un sensor acelerómetro de unión magnética. Esto es debido a que gran parte de los equipos de los que dispone la central tienen unas RPM entre los límites de uso de este tipo de sensor acelerómetro. También se utiliza la unión magnética ya que a la hora de tomar muestras es de fácil montaje y desmontaje y agiliza en gran medida la tarea.

*Ilustración 6: Sensor acelerómetro con unión magnética*



*Fuente: Trabajo de campo*

### 3. Sistema de toma de datos

La toma de datos en el análisis de vibraciones es uno de los momentos de mayor complejidad. El sistema de toma de datos debe ser tal, que sea cual sea el operario que lo realiza debe siempre, para un mismo punto de toma de muestra:

- Tomar el dato que se le pide en ese lugar.
- Tomar el dato correctamente con el sensor bien colocado.
- Esperar el tiempo suficiente para que se carguen los datos y puedan ser procesados.
- Cargar una ruta acorde a las posibilidades del análisis y comprobar siempre ante todo la seguridad del operario ante la toma de datos.

La seguridad en la toma de datos es algo que se debe reiterar debido a que hay muchas situaciones en las que el operario debe tomar precauciones antes de coger una muestra. Estas situaciones se repiten constantemente y la costumbre no debe hacer que nos descuidemos.

- Algunas de estas situaciones pueden ser tan simples como.
- Meternos en espacios demasiados estrechos o confinados sin nadie que nos vigile ante un posible accidente.
- Acercarnos demasiado al eje de una máquina rotativa y quedarnos enganchados.
- Acercarnos demasiado a máquinas que se encuentran a alta temperatura.
- Permanecer demasiado tiempo tomando muestras en zonas en las que no se puede permanecer más de un tiempo determinado como por ejemplo en la zona alta de una sala de máquinas.

En la central energética diésel El Palmar la toma de datos se realiza de una manera que, en mi opinión, es de las mejores que he podido estudiar. Los operarios tienen todas las máquinas cargadas en el programa del analizador de vibraciones, lo que ya de por sí al tener un aparato de tan alta calidad es un gran

adelanto en la toma de muestras, ya que el propio aparato es el que te dice en que puntos de la máquina se debe tomar la muestra.

También en toda la central, más concretamente en cada máquina, el punto de análisis está especialmente señalado con una arandela adherida al punto de medida por medio de masilla epoxi. Estas arandelas están pintadas de color rojo para su mejor localización. Dichas arandelas son una gran idea, ya que, al ser el tipo de sensor magnético, hace muy fácil su colocación en ellas.

Otra gran ventaja de dichas arandelas es asegurar la correcta colocación del sensor en cualquier punto, y por lo tanto que las tomas de muestras sean siempre en los mismos puntos.

Hay que destacar que cualquier operario, aun con poca experiencia, con muy pocas instrucciones, puede realizar una perfecta recogida de datos con este sistema.

Para seguir con la explicación del caso práctico, el jefe de la sección de motores me encargó la tarea de hacer una ruta de vibraciones por las bombas de la zona ya nombrada.

En dicha zona existen 4 bombas centrifugas, dos en paralelo de baja temperatura que entran al motor y dos de salida también en paralelo que mandan el agua caliente a la refrigeración.

Estas 4 bombas están cargadas en OMNITREND que como recordaremos es el programa para cargar las rutas, crear nuevos elementos de ruta o analizar finalmente los datos obtenidos.

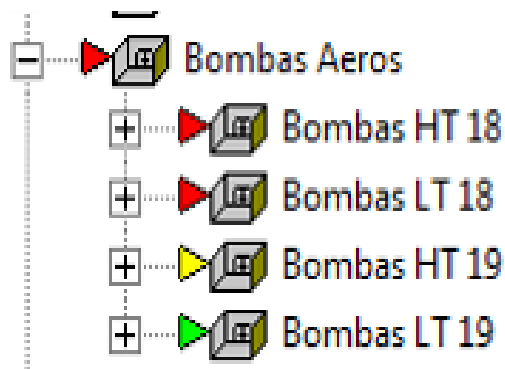
Ilustración 7: Puntos de análisis



Fuente: Trabajo de campo

Como ya están cargadas lo único que tenemos que hacer es generar una ruta en la que se carguen estas bombas, conectar el analizador a ordenador por medio de un puerto USB y guardar la ruta en el analizador.

Ilustración 8: Elementos de ruta de vibraciones



Fuente: Trabajo de campo

Las bombas están situadas en la parte superior de la sala de máquinas, por lo tanto, tengo que avisar al operario de turno que me acompañe a la toma de muestras, además el operario es el encargado en la central de poner en funcionamiento las bombas, ya que si está en marcha las A deben desconectarse para poner las B y así poder completar el análisis en todas las bombas de la zona.

En dicha zona entre las bombas de entrada y salida de agua está la salida de agua del diésel número 18, y aunque este esté aislado térmicamente, la temperatura en la capa externa es aun alta. También hay que considerar que las bombas son máquinas rotativas en las que un operario por accidente puede engancharse y sufrir algún tipo de lesión. Por otra parte, uno de los accesos a las bombas es una escalinata vertical de unos 6 metros de alto donde es obligada la utilización de una línea de vida. Para acabar hay que considerar que las bombas están en el interior de la sala de máquinas, por lo tanto, la utilización de protección auditiva es obligatoria, además de que las normas de la central obliga a llevar casco y botas en toda la zona industrial.

Como podemos observar además del analizador de vibraciones, para realizar el análisis es necesario llevar con nosotros los siguientes materiales de seguridad:

- Guantes y ropa adecuada
- Arnés con línea de vida
- Protección auditiva
- Casco y botas de seguridad
- Operario que nos vigile mientras realizamos la recogida de muestras

Una vez tenemos todo esto podemos proceder a acceder a la zona donde realizaremos el análisis.

Ilustración 9: Puntos de realización de análisis



Fuente: Trabajo de campo

Como podemos observar en la imagen solo queda recoger los datos en los 5 puntos de toma de análisis señalados por las arandelas. Dichos puntos como ya comentamos anteriormente son arandelas metálicas para que el sensor magnético se adhiera a ellas.

Cuando se toman medidas en el análisis de vibraciones tenemos que tener en cuenta que el cristal piezoeléctrico del que está hecho el sensor acelerómetro es muy frágil, por lo que debemos tener cuidado de darle cualquier tipo de golpe.

En el proceso de toma de muestras nos guiaremos por las instrucciones que aparecen en la pantalla del analizador, siendo estas muy intuitivas, realizamos la recogida de datos correctamente sin ningún tipo de problema.

Una vez acabada la recogida de datos el propio analizador nos indica que la ruta ha sido finalizada y que ya podemos descargar los resultados en el ordenador.

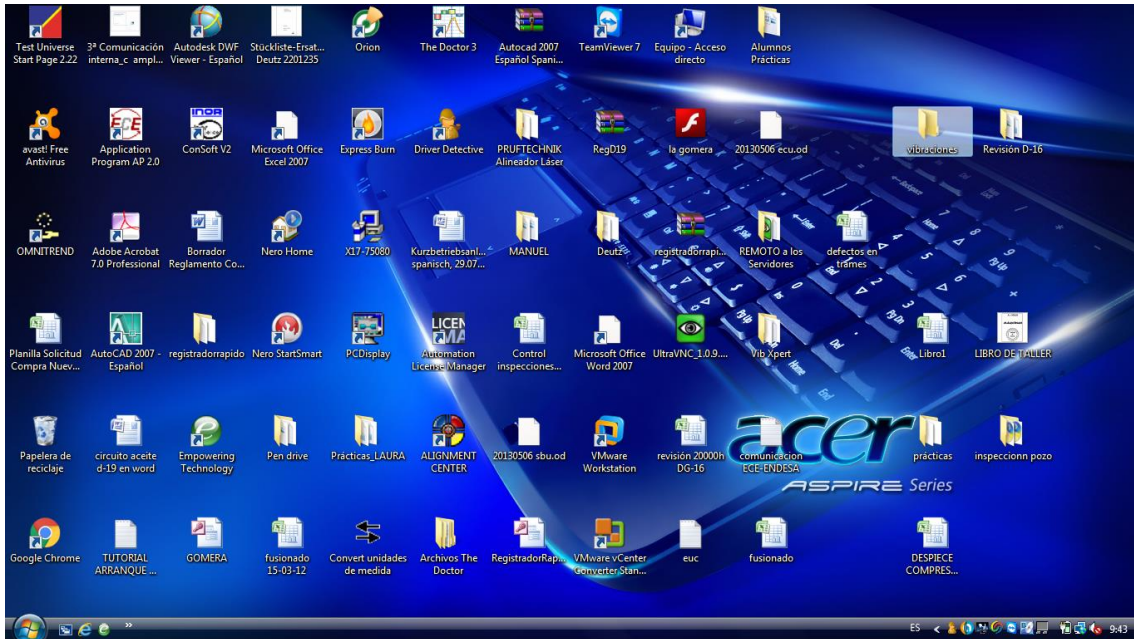


En este momento unos de los operarios de la contrata del mantenimiento de la central me piden que tome un punto de muestra en la bomba para compararlo con los resultados que está obteniendo con su aparato ya que no le concuerdan. Al ser un aparato de tan alta calidad nos permite realizar mediciones instantáneas sin tener que cargar ninguna ruta y lo realizo sin problema.

Realizado el trabajo de campo vuelvo a la oficina para descargar los datos en el ordenador.

## 4. Revisión de datos

Ilustración 10: OMNITREND

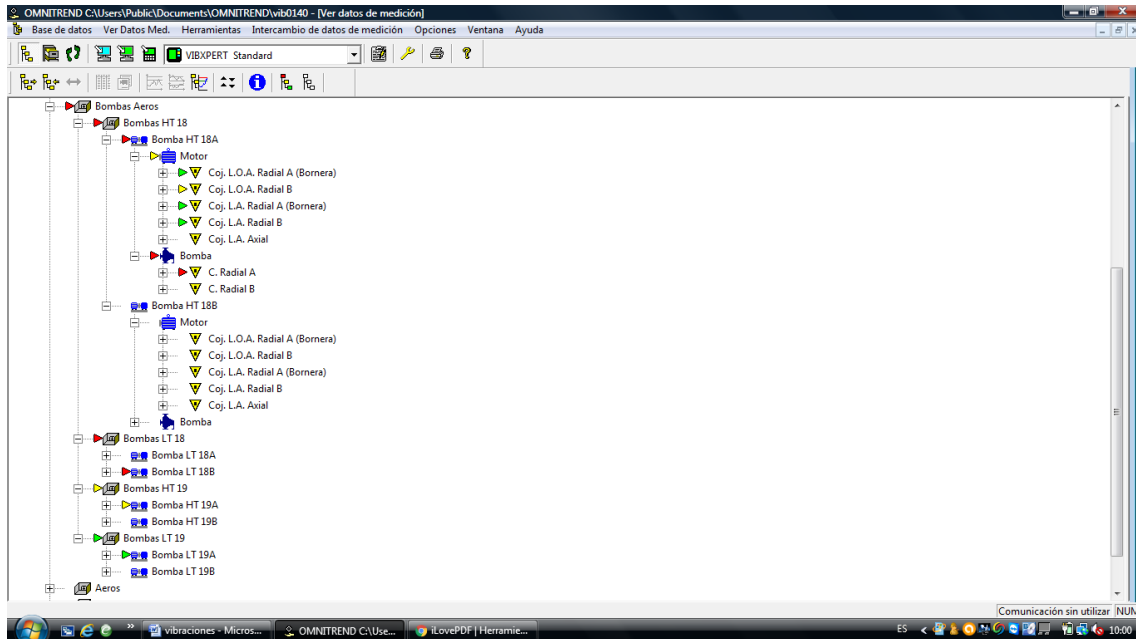


Fuente: Trabajo de campo

Una vez recogidos los datos en la zona industrial procedemos a su análisis conectando el analizador al ordenador por medio del puerto USB y abriendo el OMNITREND.

Una vez abierto podemos apreciar en el despliegue de la biblioteca de sistemas que ha detectado un fallo en las bombas de los aros y lo remarca en rojo para señalar cual es.

Ilustración 11: Revisión de datos en OMNITREND



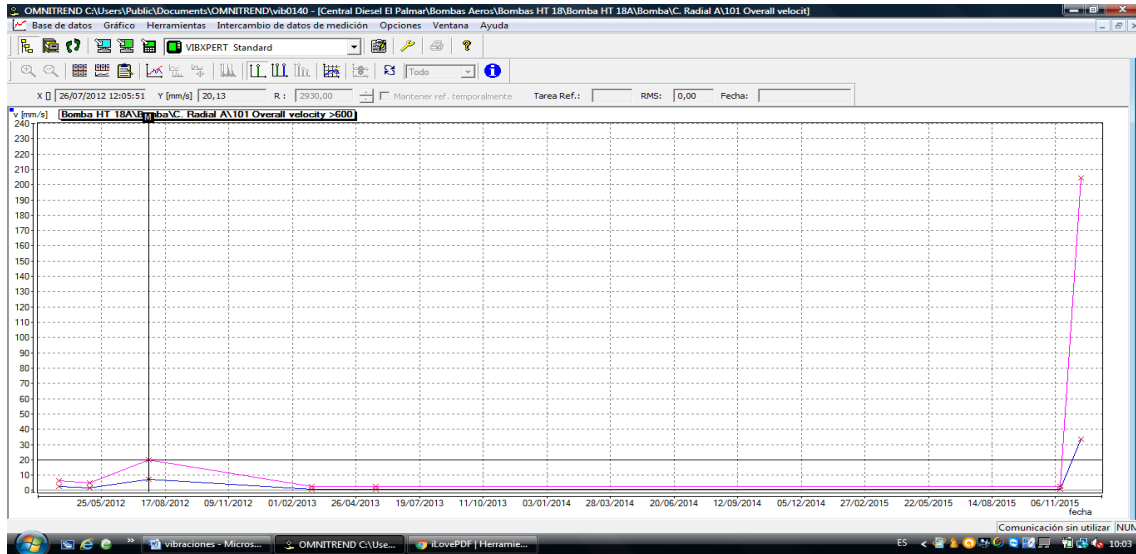
Fuente: Trabajo de campo

Se detecta un fallo en la bomba de HTA, algo inesperado por completo ya que la bomba que pierde agua es la HTB. Cuando se lo comento al jefe de la sección de motores cree que puede haber sido una mala práctica en la toma de muestras, yo le propongo repetirla aunque estoy seguro de que lo había echo bien.

Cuando vuelvo de una segunda toma de muestras el jefe de la sección de motores comprueba que no se debe a una mala práctica y que realmente sucede algo con la bomba HTB de diesel 18.

A continuación junto con el jefe de la sección de motores comprobamos la grafica de valores pico con respecto al tiempo que vemos a continuación.

Ilustración 12: Valor pico en el historio de análisis



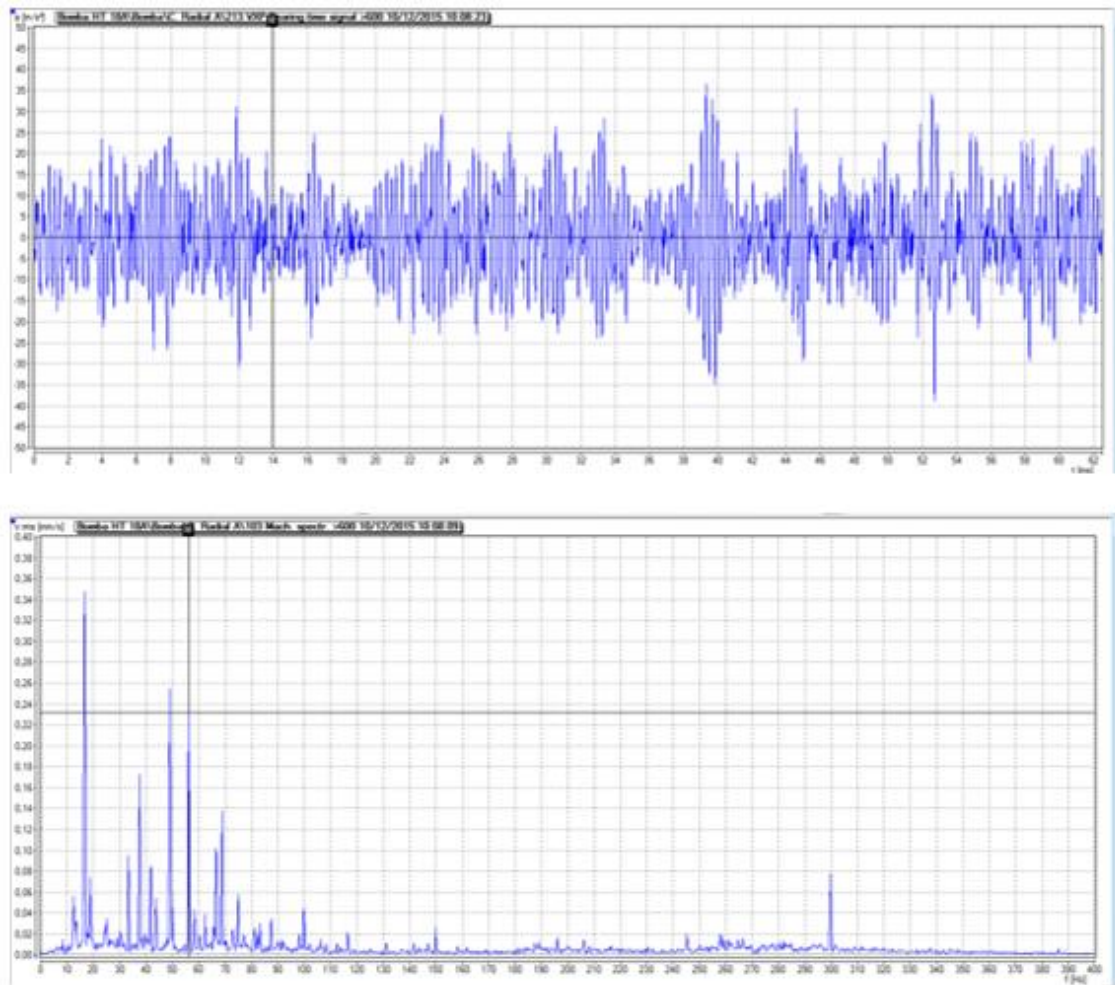
Fuente: Trabajo de campo

En ella podemos apreciar como en los antecesores analisis que se le habian realizado a esta bomba no habia nunca llegado a un nivel tan extremo de vibraciones llegando este a superar los 200 mm/s que, para una bomba de esta clase es un nivel exesivo de vibraciones.

Lo siguiente que analizamos es el espectro de vibraciones y la onda que recibe el analizador del sensor acelerometro.

Como recordamos el espectro de vibraciones es la herramienta fundamental del analista de vibraciones y con ella podemos saber concretamente donde se encuentra el origen de dichas vibraciones. También recordamos que este espectro de vibraciones se obtiene de la transformada de Fourier, que nos lo da a entender de una manera gráfica unos valores pico de mm/s con respecto a la frecuencia.

Ilustración 13: Señal de entrada y su respectivo espectro de vibraciones



Fuente: Trabajo de campo

En la central energética El Palmar no hay operarios especializados en análisis de vibraciones así que me encargan que compare la transformada obtenida con unos gráficos de referencia de espectros según el tipo de avería que puede presentarse.

Ilustración 14: Tabla de referencias



Fuente: Trabajo de campo

Comparándolo con las gráficas que aparecen hay una que es especialmente parecida. Esta hace referencia a fallos en pistas de los rodamientos. Así se lo comunico al jefe de la sección de motores y está conforme con mi elección.

Dicho esto, el jefe de la sección de motores inmediatamente organiza todo para que se produzca el desarme de esa bomba para comprobar cuál fue la avería, también que pusieran en funcionamiento mientras tanto la bomba que perdía un poco de agua ya que no presenta un peligro para el motor.

Me comenta que lo decide así también porque en el análisis de vibraciones daba unos niveles de vibraciones muy bajos en la bomba que perdía agua, lo que es un indicador que le asegura aún más que no perjudicará al motor.

Estos preparativos llevan toda la mañana ya que en la central es necesario generar ordenes de trabajo para la contrata que se encarga del mantenimiento, preparación de otros motores por si fuera necesario desacoplar de la red el diésel 18 y apagarlo, encargar a un operario la desconexión eléctrica de la bomba para que la contrata de mantenimiento pueda trabajar con seguridad...

## 5. Desinstalación de la bomba HTA

Para la desinstalación de la bomba como adelantábamos antes, es necesario una serie de tareas que aseguran la buena práctica del trabajo tanto en efectividad como en hacerla lo más segura posible.

Dicha desinstalación comienza en la oficina realizando ordenes de trabajo, esto no son sino un listado de los trabajos en orden que se deben realizar en el lugar de la desinstalación.

Estos trabajos comienzan con la desconexión eléctrica e hidráulica y su correspondiente señalización con pegatinas. Esto significa la desconexión en el interior del cuadro eléctrico que da suministro a la bomba, señalizando esta con una pegatina que no permita volver a subir la palanca. Dicha pegatina solo está autorizada a quitarla el jefe de la sección de motores, cuando haya revisado que todo el trabajo este correctamente realizado. Igualmente sucede con las válvulas de entrada y salida de la bomba a las cuales también se les coloca una pegatina de señalización. Esta pegatina contiene información de los trabajos que se realizan además de información sobre donde está colocada, por ejemplo, la del cuadro eléctrico indica que está prohibida la conexión eléctrica de ese magnetotérmico.

La desconexión es realizada por los operarios de turno de la central, para que los operarios de la contrata de mantenimiento puedan empezar a trabajar y solo podrán empezar cuando estos los autoricen.

Una vez autorizado lo primero que hacen los operarios de la contrata es señalar la zona de trabajo con una cadena de seguridad e incluir un cartel donde se explica el trabajo que se está realizando y la orden de trabajo entregada por el jefe de la sección de motores que los autoriza a hacerlo.

Ilustración 15: Bombas HT



Fuente: Trabajo de campo

Ya pueden comenzar el desarme de la bomba, en donde yo no pude estar presente, pero si me explicaron como realizaron dicho trabajo. Esta bomba fue separada del motor eléctrico soltando el eje que los hacia solidarios. Después sujetaron las bombas con trinchas y estas se colgaron de diferenciales, debido a que estas bombas son de un peso considerable. Una vez soltada la tornillería que une el motor eléctrico con la bomba solo queda usar el diferencial para separar los dos elementos.

Una vez que se separan se aparta un lado el motor eléctrico apoyándolo en el suelo. Se gira el eje y se puede apreciar que no hay nada raro y que gira sin problemas. En cambio, cuando giran el eje de la bomba se nota forzado e incluso se atasca.

Deciden soltar los tornillos de la carcasa de la bomba y al levantarla se aprecia clara mente lo que produce esa rotación tan poco fluida.



El cojinete de la bomba ha sufrido graves daños quedando casi irreconocible en comparación a uno nuevo.

*Ilustración 16: Cojinete dañado*



*Fuente: Trabajo de campo*

*Ilustración 17: Cojinete en buen estado*



*Fuente: <http://www.skf.com/es/index.html?switch=y>*

Se separa de la carcasa de la bomba y en un intento de separar el cojinete del eje en la prensa hidráulica, se aprecia como este eje se dobla como se puede ver en la siguiente imagen.

*Ilustración 18: Eje dañado*



*Fuente: Trabajo de campo*

Dicho eje queda inutilizado y uno de los jefes me explica que esto sucede porque el cojinete y el eje han sufrido tal calentamiento que se ha gripado. Este calentamiento es apreciable en el eje. Para separarlos hacen uso de una cortadora angular. Con esta herramienta, finalmente consiguen separarlos, pero el eje tiene que ser enviado a que se reconstruya de nuevo ya que, solo enderezarlo no vale. Este eje tiene unos tratamientos de dureza que si se enderezara podría perder.

Una conclusión que sacan los encargados de la central energética El Palmar es la necesidad de buscar unos cojinetes especiales para estas bombas, ya que se ha apreciado que los cojinetes debido a estas altas temperaturas de esta zona

de la sala de máquinas, no lubrican correctamente y sufren un desgaste excesivo.

También deciden cambiar los cojinetes del motor eléctrico y los sellos de la bomba que, aunque no tengan signos de sufrir ningún daño, podrían estar afectados por estos sobrecalentamientos o por las vibraciones que producía el cojinete afectado.

Recordar que esta bomba hasta el momento en el que el jefe de la sección de motores no dio la orden de cambiar a HTA, estuvo funcionando sin ningún problema aparente. Ni pérdidas de presión en la línea, ni calentamiento en el motor, ni siquiera pérdida de agua por dicha bomba.



**VI**

# **Conclusiones**



Para concluir este trabajo sobre análisis de vibraciones quiero resaltar la importancia que se le debe dar a este tipo de análisis predictivos, ya que, con ellos, en una zona industrial como es una central eléctrica o como lo es una sala de máquinas de un buque, puede predecirse averías que, de otra forma, jamás sabríamos que están ahí hasta que se produjeran. Evitando con este tipo de mantenimiento averías que pueden suponer riesgos para la salud de los operarios en primer lugar, y en segundo lugar costes adicionales para la empresa en gastos imprevistos.

## **1. Antecedentes históricos del análisis de vibraciones**

En esta primera parte del trabajo hemos analizado la historia del análisis de vibraciones, cuales son los avances más relevantes de la historia y quienes los llevaron a cabo. También hemos hecho una introducción a la física de un movimiento vibratorio, así como a la relevancia de los espectros de vibraciones.

## **2. Espectros de vibración**

En la parte de espectros de vibración, hemos hecho hincapié en la importancia de estos espectros, pudiendo con ellos, llevar a cabo análisis de cualquier máquina de una manera muy exacta, obteniendo con este análisis de espectros la avería concreta de la que se trata.

## **3. Normativa aplicable al análisis de vibraciones**

En lo referente a la normativa hemos estudiado su avance este sector, así como la importancia que tiene a la hora de su normalización. También hemos podido revisar la normativa global aplicable al análisis de vibraciones, como la

nacional que está más orientada a la salud de los trabajadores en el caso de España.

## **4. Instrumentos de medida para el correcto análisis de vibraciones**

Hemos llevado a cabo un estudio de los aparatos de medida más habituales que nos podemos encontrar y hemos desarrollado las características de cada uno para poder establecer cuál sería el más adecuado en cada caso.

También realizamos un repaso por los tres tipos de sensores que se utilizan en el análisis de vibraciones y explicamos el porqué de su utilización.

En esta parte fue importante nombrar los tipos de sujeciones de estos sensores ya que debido a estas recibiremos de una manera más limpia la señal a analizar.

## **5. Correcta utilización de los instrumentos**

Hemos realizado un estudio de cómo debe ser un correcto análisis de vibraciones en función de la situación que nos encontremos, teniendo siempre en cuenta los riesgos y las protecciones que tenemos que llevar para un análisis seguro.

## **6. Central energética diésel El Palmar**

Para entender mejor la magnitud del caso práctico de este trabajo, hemos hecho una descripción de las instalaciones energéticas en las que realicé mis prácticas. Entendiendo con esta descripción la cantidad de componentes individuales de los que se forma una central energética.



## 7. Caso práctico

Para concluir este trabajo hemos decidido añadir un caso práctico referente a unas bombas de trasiego de agua de refrigeración de uno de los motores diésel, a la cual se le detectó una avería grave gracias a este tipo de análisis predictivo.

## 8. Aparato de medida

Hemos hecho de una descripción del aparato de medida del que dispone la central, siendo este el que utilizamos en el caso práctico. En esta descripción hemos destacado las ventajas que supone tener un aparato portátil y con esta interface para la central.

## 9. Sistema de toma de datos

Nos ha interesado añadir una descripción del sistema de toma de muestras y de las peculiaridades que supone realizarlo. En esta descripción destacamos principalmente el trabajo previo que supone la realización de un análisis de vibraciones ya que hay que tener en cuenta múltiples factores para que la toma de muestras sea segura y eficiente.

## 10. Revisión de datos

En la revisión de datos hacemos referencia a como se tratan los datos recogidos, llevando la descripción paso por paso hasta la decisión final del jefe de la sección de motores que concluye, gracias a este análisis, la desinstalación de la bomba.

## **11. Desinstalación de la bomba HTA**

En esta parte final del caso práctico destacamos la gravedad que supuso esta avería y las pocas señales que había dado para su detección, pero que gracias a este análisis se pudo reparar sin mayor complejidad.

**VII**

# **Bibliografía**



[1]

Google imágenes

Pitágoras: <http://www.buscabiografias.com/biografia/verDetalle/1231/Pitagoras>

Isaac Newton: <http://www.biografiasyvidas.com/monografia/newton/>

Joseph Fourier: <http://scienceworld.wolfram.com/biography/Fourier.html>

Galileo Galilei: <http://www.biografiasyvidas.com/monografia/galileo/>

Daniel Bernoulli: <https://edukavital.blogspot.com.es/2015/10/biografia-de-daniel-bernoulli.html>

[2]

Enríquez Peña, J.L.

*“Historia de vibraciones”*

Instituto Tecnológico de Saltillo. <http://es.slideshare.net/CesarOmarAR93/historia-de-vibraciones>

[3]

Quantum Fracture

*“Como entender cualquier vibración”*

4 de junio del 2015. <https://www.youtube.com/watch?v=UdMRgTF6lxY>

[4]

Sancho, J.A. etal

*“Jean-Baptiste Joseph Fourier”*

1 de abril del 2007. <http://www.egiptologia.com/grandes-egiptologos/2906-jean-baptiste-joseph-fourier.html>

[5]

Mathews, J.

*"Transformada de Fourier"*

<http://web.archive.org/web/20130407080224/http://math.fullerton.edu/Mathews/c2003/FourierTransformMod.html>

[6]

Torres, F. et al

*"Análisis de vibraciones e interpretación de datos"*

DIDYF Universidad de Zaragoza. <http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>

[7]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*"Carta de Rathbone"*

2013. Signais. <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/rathbone.html>

[8]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*"Norma ISO 2372-1974"*

2013. Signais. <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso2372.html>

[9]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*"Norma ISO 10816-1995"*

2013. Signais. <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/normativa/iso10816.html>

[10]

Ministerio de trabajo y asuntos sociales

*“BOE núm. 265”*

5 de noviembre del 2005. BOE. <https://www.boe.es/boe/dias/2005/11/05/pdfs/A36385-36390.pdf>

[11]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*“Transductores y su tipología”*

2013. Signais. <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores.html>

[12]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*“Transductores de desplazamiento”*

2013. Signais. [http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores\\_desplazamiento.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores_desplazamiento.html)

[13]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*“Transductores sísmicos de velocidad”*

2013. Signais. [http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores\\_velocidad.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores_velocidad.html)

[14]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*“Transductores piezoeléctricos”*

2013. Signais. [http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores\\_piezoelctricos.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/transductores_piezoelctricos.html)

[15]

Signas. Ingeniería de mantenimiento.

*“Transductores piezoeléctricos”*

2013.Signais.[http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/tecnicas\\_fijacion.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/sensores/tecnicas_fijacion.html)



**VIII**

**Anexo I**



**Empresa:** Renovetec

**Nombre:** Curso práctico de análisis de vibraciones

**Precio:** 600€ + IVA

**Lugar y fecha:** Madrid, 26, 27 y 28 de octubre de 2016

**Duración:** 24h

**Enlace:** <http://www.renovetec.com/318-curso-practico-analisis-de-vibraciones>

**Empresa:** Preditec

**Nombre:** Curso de certificación de analista de vibraciones (ISO-18436-2)

**Precio:**

Categoría I: 1.350,00 € (IVA no incluido). Examen de certificación: 250,00 € (IVA no incluido)

Categoría II: Curso: 1.400,00 € (IVA no incluido). Examen de certificación: 300,00 € (IVA no incluido)

Categoría III: 1.550,00 € + IVA. Examen: 350,00 € +IVA

**Lugar y fecha:** Madrid, del 9 al 13 de mayo de 2016; Zaragoza, del 24 al 28 de octubre de 2016

**Duración:** 30h

**Enlace:** <http://www.preditec.com/formacion/iso-18436-2-cat-i-ii-y-iii---mobius-institute/>

**Empresa:** Universidad de Concepción, Departamento de ingeniería mecánica

**Nombre:** Curso de análisis de vibraciones, según ISO 18436-2

**Precio:**

Categoría I: 690\$

Categoría II: 730\$

Categoría III: 780\$

Categoría IV: 820\$

**Lugar y fecha:** Chile; octubre 18, 19, 20 y 21 de 2016

**Duración:** 32h (4 días)

**Enlace:** <http://www.dim.udec.cl/lvm/capacitacion/fechas-y-costos/>

**Empresa:** IME (Ingeniería de Máquinas Eléctricas)

**Nombre:** Curso análisis de vibraciones

**Precio:**

Categoría I: 437,88€ + IVA Examen: 350,77€ + IVA

Categoría II: 583,32€ + IVA Examen: 370,04€ + IVA

Categoría III: 719,29€ + IVA Examen: 408,58€ + IVA

**Lugar y fecha:** Colombia, Cali; Del 23 al 26 noviembre, 2015

**Duración:** 30h – 38h

**Enlace:** [http://www.ime.com.co/informacion\\_de\\_cursos#.V4PRpbjhDIU](http://www.ime.com.co/informacion_de_cursos#.V4PRpbjhDIU)