

CAPITULO 5: MEDICION DE LAS VIBRACIONES DE LAS PIEZAS Y ENSAMBLE CON PRUEBAS FISICAS.

5.1. Prueba modal experimental

5.1.1. Prueba modal experimental

Actualmente los problemas de vibraciones estructurales continúan presentándose como un gran problema por la limitación de diseños que se podrían producir. Por eso, el problema de las vibraciones se ha vuelto de vital importancia en las estructuras y maquinas.

Para tener una vida útil de una maquina es elemental que los niveles de vibración encontrados en servicio u operación sean anticipados y guardados con un control para evitar problemas como fatiga.

Los principales objetivos que se deben de considerar en el análisis de vibraciones son los siguientes:

El *primero* es donde las fuerzas de las vibraciones o las respuestas son medidas durante la operación de la máquina, mientras que el *segundo* es una prueba donde la estructura o componente se somete a una vibración con una excitación conocida para darle un servicio y evitar problemas futuros.

Este *segundo* tipo es generalmente hecho mediante unas cerradas condiciones de control las cuales brindan una aproximada y detallada información. Este tipo de prueba incluyendo la información hasta el análisis es considerado la llamada prueba modal.

Y son los procesos involucrados en probar componentes o estructuras con el objetivo de adquirir una descripción matemática de su comportamiento dinámico o de vibración.

5.1.2. Aplicaciones de prueba modal

Es en verdad decir que la prueba modal esta hecha para obtener un modelo matemático de la estructura, pero con esa información pueden haber muchas aplicaciones como:

- Quizás la aplicación mas común es la medida de las propiedades de vibración de una estructura para así comparar con las que corresponden producidas teóricamente como lo es, con la información obtenida por el **elemento finito** u otro modelo teórico. Para esta aplicación especifica lo que se requiere para la prueba son: la aproximación estimada de las frecuencias naturales, y las descripciones de un tipo de modo usando solo los detalles suficientes y aproximación para permitir sus identificaciones y similitudes con aquellas del modo teórico.
- Otra aplicación puede ser la de incorporar el modelo matemático a un ensamble de piezas de la misma familia para poder predecir los modelos dados en el futuro.
- Una aplicación muy distinta es la determinación de la fuerza, hay muchas situaciones donde el conocimiento de las fuerzas dinámicas causan vibración pero en el caso directo de la medición de las fuerzas no es práctica. Para este caso una solución es dada por un proceso donde la medición de la respuesta causada por fuerzas son combinadas con una descripción matemática para determinar las fuerzas que interactúan en el sistema.

En nuestra observación de las aplicaciones es apropiado notar el procedimiento normal:

1. La medición
2. El análisis de la información obtenida.
3. La derivación del modelo matemático de la estructura.
4. La reducción de una vasta cantidad de medidas para tener una información eficiente.
5. Determinación de las fuerzas.

5.1.3. Sistemas de medidas básicos de la prueba modal.

La parte experimental de la medida de vibraciones es muy simple, básicamente se usan casi siempre los mismos elementos, aunque pueden haber diferencias. Siempre son 3 los más importantes elementos.

1. Un mecanismo de excitación.
2. Un sistema de transducción (para medir los diferentes parámetros que nos interesan).
3. Un analizador, para extraer la información deseada (en la presencia de imperfecciones inevitables que se pueden acumular en la medida de las señales).

La figura 5.1.3.1 muestra los típicos elementos de un sistema de medida, detallando algunos de los elementos básicos que usualmente se pueden encontrar. El componente en esta ilustración llamado controlador (en la ilustración *controller*) es usualmente provisto por un complejo software, que es la parte inteligente.

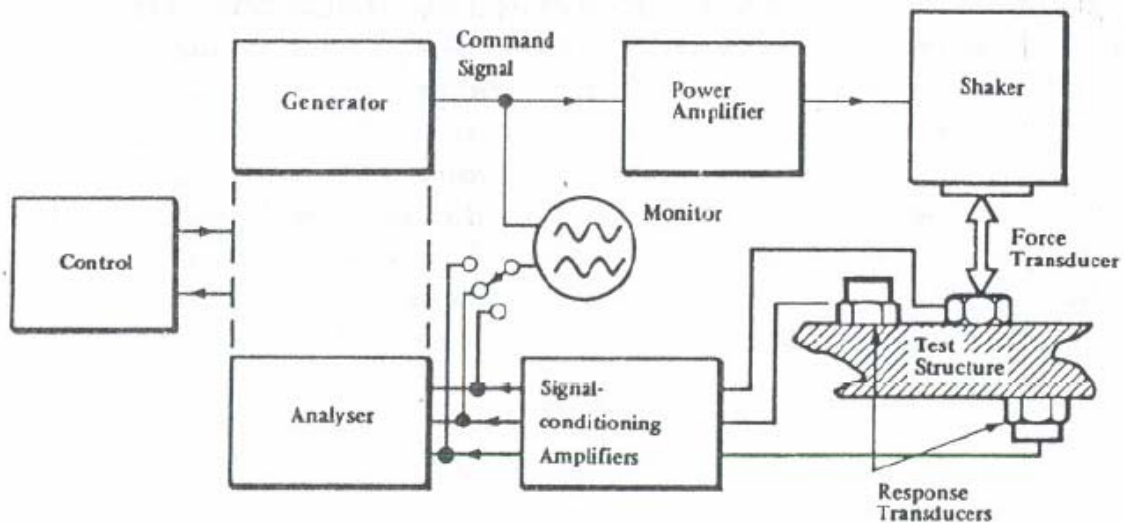


Figura 5.1.3.1: típicos elementos de un sistema de medida.

Los elementos principales en la cadena son por lo tanto:

- a) *Una fuente para la señal de excitación:* Este depende totalmente del tipo de prueba usada para medir cualquiera de las siguientes:

- Senoidal (de un oscilador).
 - Periódicas (de un generador especial capaz de producir un contenido de frecuencia específico).
 - Al azar (de un generador de ruido).
 - Transiente (de un pulso especial de una señal explosiva generando un mecanismo o aplicando un impacto con un martillo).
- b) *Amplificador de potencia*: este componente es necesario para manejar el mecanismo usado para vibrar la estructura, dependiendo del tipo de excitación deseado.
- c) *Excitador*: la estructura puede ser excitada en vibraciones de maneras distintas, aún que el mas común es usando un “*shaker*” o un soplo de martillo. Otras posibilidades podría ser por un paso relajante o por un excitación del ambiente (como una ola, viento o excitaciones ajenas de ambiente), pero estos son relativamente casos especiales que únicamente son usados cuando los métodos convencionales no son posibles.
- d) *Transductores*: hay un gran número de posibilidades del mecanismo para medir las fuerzas excitantes y las diferentes respuestas de interés. Para las demás partes, los transductores piezoeléctricos son usados ampliamente por ambos tipos de parámetros, aunque el medidor de esfuerzo es casi siempre encontrado de manera conveniente porque tiene la menor interferencia con el objeto de prueba.
- e) *Amplificadores*: la selección de amplificadores dependen del tipo de transductor usado y debería, en efecto, estar designado parte de este. En todos los casos, su rol es endurecer las señales pequeñas que han sido generadas por los transductores así que puedan ser alimentadas al analizador para su medida.
- f) *Analizador*: la función de este elemento es simplemente para medir las diferentes señales para averiguar las magnitudes de una fuerza de excitación y las respuestas. En esencia, es un voltímetro pero en la práctica éste es una parte muy sofisticada. Hay diferentes tipos de analizadores que son usados, senoidal, al azar, transiente, periódico. Los dos mecanismos mas comunes son el analizador

del espectro (Fourier) y los analizadores de la respuesta de la frecuencia, aunque tienen las mismas funciones que pueden hacer, por una tonada de filtro y un voltímetro.

5.1.4. Descripción de los resultados de la prueba modal.

Como se sabe, la interpretación de resultados resulta un poco variado, los resultados pueden ser dados según se requieran, en el caso de este proyecto lo que interesa es el espectro (figura 5.1.4.1), es decir, importan los puntos donde hay resonancia (picos en el espectro) ya que estos picos en la prueba modal, son las frecuencias naturales del método teórico o análisis teórico (análisis modal). Esto es, las frecuencias de excitación son iguales a las frecuencias naturales en los puntos de resonancia.

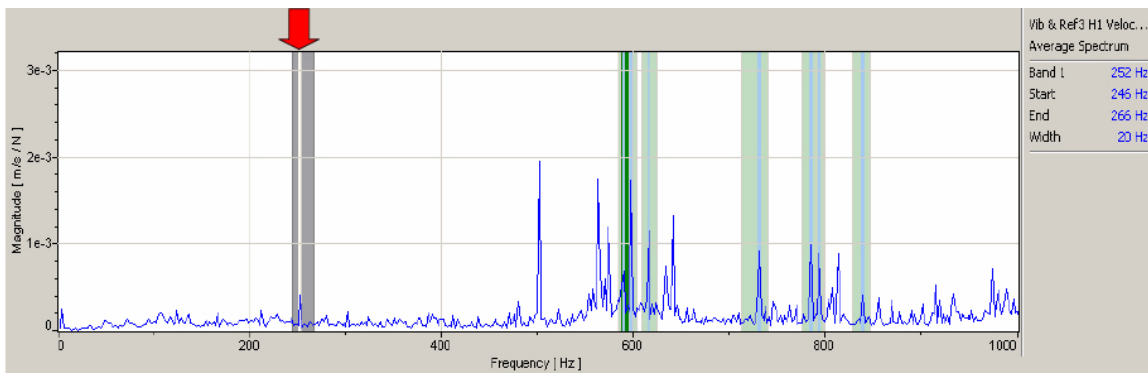


Figura 5.1.4.1: espectro.

Entonces cuando la amplitud se puede representar con A y es:

$$A = \frac{Po}{k} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\Omega}{\omega_i}\right)^2 + \left(2\varepsilon \frac{\Omega}{\omega_i}\right)^2}} \quad (1)$$

Donde el valor de Ω es la frecuencia de excitación. Por lo tanto, cuando los valores de ω_i y de Ω , son iguales entonces se obtiene un pico (resonancia).

5.2. Medición y técnicas en el análisis de vibraciones

5.2.1. Prevención de las vibraciones.

La prevención de posibles fallas en maquinarias (en este caso autos) es necesaria para una operación confiable y segura de una Instalación. El riesgo de fallas y el tiempo en que una maquinaria queda fuera de servicio pueden disminuirse sólo si los problemas potenciales son anticipados y evitados. En el caso de la armadora *VW de México*, sería un gran problema que la planta se parara por un día o por unas horas, y costaría muchísimo dinero dejar de producir. Por lo tanto, una de las herramientas fundamentales con que se cuenta en la actualidad para el mantenimiento predictivo de una Planta es la medición y análisis de vibraciones, ya que cerca del 90% de las fallas en maquinarias están precedidas por un cambio en las vibraciones de las mismas.

En general, las vibraciones en una máquina no son buenas: pueden causar desgaste, fisuras por fatiga, pérdida de efectividad de sellos, rotura de aislantes, ruido, etc. Pero al mismo tiempo las vibraciones son la mejor indicación de la condición mecánica de una maquinaria y pueden ser una herramienta de predicción muy sensible de la evolución de un defecto. Las fallas catastróficas en una maquinaria muchas veces son precedidas, a veces con meses de anticipación, por un cambio en las condiciones de vibración de la misma.

Por un lado, un bajo nivel de vibraciones es indicación de que la máquina funcionará correctamente durante un largo período de tiempo, mientras que aumento en el nivel de vibraciones es una indicación que la máquina se encamina hacia algún tipo de falla.

En general, las mediciones de vibraciones globales se realizan en forma de velocidad (*mm/seg*) debido a que la experiencia ha demostrado que las mediciones de velocidad son la mejor indicación para evaluar la severidad de las vibraciones en el rango normal de frecuencias de giro de las máquinas rotativas usuales (de 10 a 1000 Hz). El valor global de vibraciones obtenido, comparado con los valores recomendados por el fabricante de la máquina, da una idea de la condición mecánica de la misma. En ausencia de valores recomendados por el fabricante, existen tablas y normas que pueden utilizarse al efecto.

En el caso en que se encuentre que los valores globales de amplitud de vibración para una máquina en particular revelan una mala condición de la misma, deben realizarse mediciones adicionales que nos permitan determinar las causas de ese mal funcionamiento. Si bien, existen distintas maneras de presentar las mediciones de vibraciones de una máquina rotativa con el objetivo de detectar e identificar problemas específicos en la misma, alrededor del 85% de los problemas mecánicos de las mismas pueden identificarse realizando un análisis en el dominio de las frecuencias, lo que significa presentar las mediciones de vibraciones en la forma de amplitud de *vibración vs. Frecuencia*. La siguiente imagen es un ejemplo claro de la forma de representación, es un cojinete de una bomba de agua.

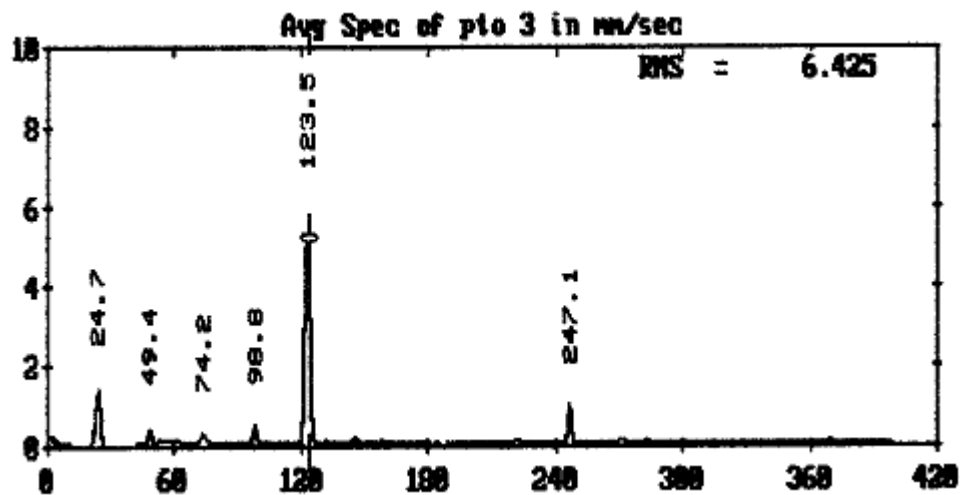


Figura 5.2.1: espectro de vibraciones obtenido de una medición sobre un cojinete de una bomba de agua.

El análisis de vibraciones en maquinarias se basa en el hecho de que en muchos casos es posible relacionar las frecuencias de vibración con el problema específico con el que nos hemos encontrado, mientras que la amplitud de la misma da una indicación de la severidad del problema.

5.2.2. Medición de vibraciones.

Las etapas seguidas para medir y/o analizar una vibración, que constituyen la cadena de medición, son:

- Etapa transductora
- Etapa de acondicionamiento de la señal
- Etapa de análisis y/o medición
- Etapa de registro.

El transductor es el primer eslabón en la cadena de medición y debería reproducir exactamente las características de la magnitud que se desea medir. Un transductor es un dispositivo electrónico que censa una magnitud física como vibración y la convierte en una señal eléctrica (voltaje) proporcional a la magnitud medida.

Típicamente hay cuatro tipos de sensores o transductores de vibraciones:

- Sensor de desplazamiento relativo sin contacto
- Sensor de desplazamiento relativo con contacto
- Sensor de velocidad o velocímetro
- Sensor de aceleración o acelerómetro.

Para la medición de vibraciones en el exterior de las máquinas y en las estructuras, hoy en día se utilizan fundamentalmente los *acelerómetros*. El acelerómetro tiene la ventaja respecto al velocímetro de ser más pequeño, tener mayor rango de frecuencia, y poder integrar la señal para obtener velocidad o desplazamiento vibratorio. El sensor de desplazamiento se utiliza para medir directamente el movimiento relativo del eje de una máquina respecto a su descanso.

Para la selección adecuada del sensor se deben de considerar: el valor de la amplitud a medir, la temperatura de la superficie a medir y fundamentalmente el rango de las frecuencias a medir. La siguiente tabla indica rangos de frecuencias de sensores de vibraciones típicos.

Tabla 5.2.2.1: Rango de frecuencias de transductores de vibración típicos

Tipo de transductor	Rango típico de frecuencia (Hz)
---------------------	---------------------------------

Desplazamiento sin contacto	0 - 10.000
Desplazamiento con contacto	0 - 150
Velocímetro sísmico	10 - 1.000
Acelerómetro de uso general	2 - 7.000
Acelerómetro de baja frecuencia	0.2 - 2.000

Otro factor que debe de tenerse en cuenta en la selección del sensor es el ruido eléctrico inherente a él. Por ejemplo, un acelerómetro de uso industrial tiene un ruido eléctrico típico de *500 mg* pico, mientras que un acelerómetro de baja frecuencia sólo tiene un ruido eléctrico típico de *10 mg* pico.

La etapa de acondicionamiento de la señal consiste en acondicionar la señal que sale del transductor para que pueda ser medida adecuadamente. Esto contempla en algunos casos, dependiendo del tipo de transductor, filtraje, integración, amplificación.

Una vez acondicionada la señal, ésta puede ser medida o analizada. Un medidor de vibraciones es un instrumento que mide el valor pico, pico a pico o RMS de la vibración. Un analizador de vibraciones es un instrumento que realiza análisis espectral.

5.2.3. Técnicas de análisis de vibraciones.

El objetivo del análisis de vibraciones es poder extraer el máximo de información relevante que ella posee. Para esto existen diferentes técnicas de análisis tanto en el dominio

tiempo como en el dominio frecuencia, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular. A continuación se van a mencionar algunas de las técnicas más utilizadas en la industria para la inspección de máquinas.

1. Análisis espectral.

La esencia del análisis espectral es descomponer la señal vibratoria en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales en frecuencia. Esto permite, en el caso de las máquinas, correlacionar las vibraciones medidas generalmente en sus descansos, con las fuerzas que actúan dentro de ella.

2. Análisis de la forma de onda.

El análisis de la forma de la vibración en el tiempo a veces puede proveer información complementaria al análisis espectral. Este análisis es adecuado para reconocer los siguientes tipos de problemas:

- Impactos
- Rozamientos intermitentes
- Modulaciones en amplitud y frecuencias
- Transientes
- Truncaciones.

3. Análisis de fase de vibraciones.

Se puede definir la diferencia de fase entre dos vibraciones de igual frecuencia como la diferencia en tiempo, o en grados con que ellas llegan a sus valores máximos, mínimos o cero. El análisis de diferencias de fase con respecto a la velocidad de giro de la máquina entre las vibraciones horizontal y vertical o entre las vibraciones axiales de los diferentes descansos del sistema motor-máquina, permite determinar los movimientos relativos entre ellos, y diferenciar entre problemas que generan vibraciones a frecuencia $1 \times rpm$:

- Desbalanceamiento
- Desalineamiento

- Eje doblado
- Resonancia
- Poleas excéntricas o desalineadas.

4. Análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo.

Esta técnica recolecta señales vibratorias en el dominio tiempo y las suma y promedia sincrónicamente mediante un pulso de referencia repetitivo. Las componentes sincrónicas al pulso se suman en el promedio las no sincrónicas disminuyen de valor con el número de promedios.

En la siguiente figura se muestran vibraciones medidas en la tercera prensa de una máquina papelera. Se observa que se utiliza la técnica de promedios sincrónicos en el tiempo a contribución a la vibración del rodillo superior y el fieltro. Esto permite determinar en forma más fácil el origen de las diferentes componentes vibratorias.

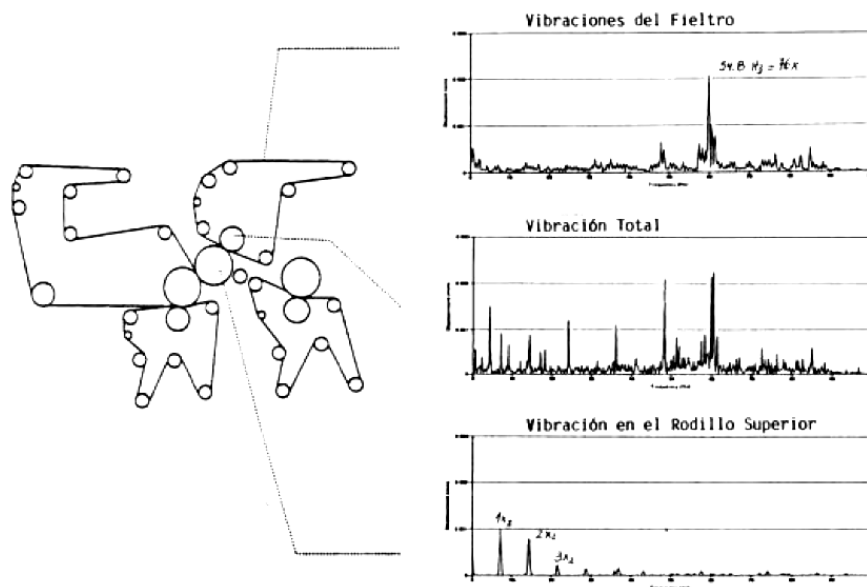


Figura 5.2.3.1: Promedios en sincronía en el tiempo.

5. Análisis de órbitas.

Combinando dos señales vibratorias captadas por sensores ubicados relativamente entre ellos a 90° (vertical y horizontal) en un descanso de la máquina se puede obtener el movimiento del eje en el descanso o su órbita.

6. Análisis de modulaciones.

El análisis de modulaciones en amplitud consiste en analizar la envolvente de la señal temporal de una señal modulada. Este análisis permite determinar más fácilmente la periodicidad de las modulaciones y diagnosticar problemas tales como:

- Rodamientos picados
- Engranajes excéntricos o con dientes agrietados
- Deterioro de alabes en turbinas
- Problemas eléctricos en motores

7. Análisis de vibraciones en partidas y paradas de una máquina.

Existen ciertos problemas que son más fáciles de diagnosticar durante el funcionamiento transiente (partidas/paradas) que durante el funcionamiento estacionario de la máquina. Es el caso de los problemas que generan vibraciones cuyas frecuencias son función de la velocidad de la máquina. Al disminuir ésta, dichas componentes van disminuyendo en acorde, por lo que en algún momento coinciden con alguna frecuencia natural de ella y son amplificadas, evidenciando en ese instante en forma más clara el problema.

Para esto se analizan los gráficos de la amplitud y fase de algunos componentes vibratorios en función de la velocidad de rotación de la máquina. Estos gráficos se denominan a veces gráficos de *Bodé*. Otro gráfico que se utiliza para estos análisis es el diagrama en cascada, como el mostrado en la siguiente figura. Este gráfico tridimensional muestra espectros vibratorios para diferentes velocidades de rotación de la máquina.

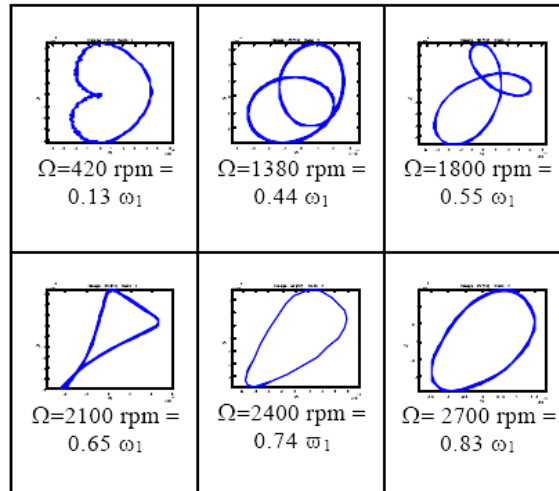


Figura 5.2.3.2: Orbitas descritas por el rotor desbalanceado y con eje agrietado para diferentes velocidades de rotación

8. Transformadas tiempo - frecuencia.

El análisis espectral es adecuado para analizar vibraciones compuestas de componentes estacionarias durante su período de análisis. Esto indica qué efectos transientes de la vibración son promediados en el período de análisis, perdiéndose información sobre la naturaleza o forma de estas variaciones.

Existe entonces la necesidad de un análisis que describa mejor señales no estacionarias o transientes. Esto se consigue con las distribuciones o transformadas tiempo - frecuencia. Las transformadas tiempo-frecuencia son análisis tridimensionales amplitud-tiempo-frecuencia, es decir, segrega una nueva dimensión (el tiempo) a la clásica FFT.

5.3. Condiciones de prueba.

5.3.1. Definición y uso de las condiciones de prueba.

Las especificaciones de prueba son fundamentales en las armadoras ya que son las condiciones que se deben de seguir al ensamblar las piezas. Estas se almacenan en estándares que se llaman *normas VW* y tienen su registro en la base de datos de la VW.

Una armadora como lo es la *Volkswagen de México* es una de las tantas armadoras de autos en las que todo esta especificado según normas o estándares.

En los estándares se encuentran normas acerca de los tipos de material, ficha mecánica de los materiales, condiciones de prueba al ensamble, además de las tantas reglas que se deben de seguir para armar el auto completo, etc.

En la *norma VW 801 01* (condiciones de prueba al ensamble) están registrados los estándares de la VW acerca de las vibraciones y voltaje requerido del sistema.

Las condiciones de prueba se deben de seguir de la siguiente forma:

- Un mínimo de 6 pruebas al componente o sistema se debe de realizar, en caso de incrementar el porcentaje de aproximación se deben realizar 10 pruebas.
- Todas las pruebas se hacen sobre una prueba previamente realizada.
- Si las tolerancias no son especificadas para temperaturas, una tolerancia de mas-menos 2° C se le debe de aplicar.
- Las pruebas se deben de realizar con una temperatura ambiental de 23 más-menos 5° C y una humedad relativa del aire de 25 a 75%.

Las pruebas de voltaje deben de seguir las siguientes tablas.

Tabla 5.3.1: pruebas de voltaje.

Prueba de voltaje	Sistema de 12V	Sistema de 24V
Motor encendido	14 mas - menos 0.1	28 mas - menos 0.2
Operación de batería	12 mas - menos 0.1	24 mas - menos 0.2

Tabla 5.3.2: voltaje operacional.

Voltaje Nominal (V)	Voltaje operacional mínimo	Voltaje operacional máximo	Notas de aplicación
12	6.0	15	Funciones deben de

			mantener su rendimiento al arranque.
12	9.0	15	Funciones deben de mantener su rendimiento al paro del motor.
12	10.8	15	Funciones deben de mantener su rendimiento a la operación del motor.
24	Valores de arriba multiplicados x 2	Valores de arriba multiplicados x 2	Grupos con voltaje nominal de 12V

Las pruebas de vibraciones deben de seguir los siguientes puntos:

- Las pruebas no son necesarias si las piezas están reforzadas.
- Las pruebas de vibración se realizan con una carga similar a la de la realidad.
- Las piezas deben ser montadas en bancos de vibración con sus sujetadores, cables y mangueras perfectamente ubicados.
- Las vibraciones deben ocurrir en el vehiculo a baja y alta temperaturas.

5.3.2. Las vibraciones del motor y partes montadas.

Las vibraciones ocurridas en un motor de combustión interna se componen por dos distintos tipos:

1. Excitación con vibraciones senoidales resultantes del movimiento del pistón.
2. Excitación con vibraciones al azar resultantes todos los demás movimientos.

La prueba se debe hacer de la siguiente manera:

1. Excitación con vibraciones senoidales.

- Duración de la prueba por cada eje espacial es de 22 horas.
- Tipo de frecuencia/tiempo es 1 octave/ min., logarítmico.

a) Tipo de prueba para máximo de 5 cilindros

b) Tipo de prueba para 6 cilindros o más.

Tabla 5.3.3: vibraciones senoidales del motor y partes montadas

Tipo a		Tipo b		Combinación	
Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud	Frecuencia	Amplitud
Hz	m/s ²	Hz	m/s ²	Hz	m/s ²
100	100	100	100	100	100
200	200	150	150	150	150
240	200	440	150	200	200
270	100			240	200
440	100			255	150
				440	150

2. Excitación con vibraciones al azar resultantes.

- Duración de cada eje espacial es de 22 horas.
- Valor de la aceleración es 181 m/s².

Tabla 5.3.4: perfil de las vibraciones al azar resultantes.

Frecuencia (Hz)	Espectro de Potencia – densidad ((m/s ²) ² /Hz)
10	10
100	10
300	0.51
500	20
2000	20

5.3.3. Pruebas de transmisión- partes montadas.

Las vibraciones de transmisión son las mismas que las de motor, la diferencia es que para las pruebas pueden resultar mayores valores.

1. Excitación con vibraciones senoidales.
 1. Duración de la prueba por cada eje espacial es de 22 horas.
 2. Tipo de frecuencia/tiempo es 1 *octave/min*, logarítmico.

Tabla 5.3.5: perfil de vibraciones de transmisión.

Frecuencia (Hz)	Amplitud de aceleración (m/s²)
100	30
200	60
440	60

2. Excitación con vibraciones al azar resultantes.

- Duración de cada eje espacial es de 22 horas.
- Valor de la aceleración es 96.6 m/s².

Tabla 5.3.6: perfil de las vibraciones al azar resultantes de transmisión.

Frecuencia (Hz)	Espectro de Potencia – densidad ((m/s²)²/Hz)
10	10
100	10
300	0.51
500	5
2000	5

5.3.4. Pruebas de las piezas del sistema del flujo de aire.

Las vibraciones del sistema flujo de aire cual es no rígido son senoidales, y son el resultado de las pulsaciones del flujo de aire.

3. Excitación con vibraciones senoidales.

- Duración de la prueba por cada eje espacial es de 22 horas.
- Tipo de frecuencia/tiempo es 1 octave/min, logarítmico.

Tabla 5.3.7: perfil de vibraciones del sistema flujo de aire.

Frecuencia (Hz)	Amplitud de aceleración (m/s²)
100	90
200	180
325	180
500	80
1500	80

5.3.5. Pruebas del auto completo – partes montadas.

Esta prueba es del sistema montado como un cuerpo en suspensión es decir, como auto completo, las vibraciones ocurren con el resultado de las rutas “Rouge-road”.

1. Excitación con vibraciones al azar.

- duración de la prueba por cada eje espacial es de 8 horas.
- Valor de la aceleración por grado de severidad.

- a) Severidad 1: 27.8 m/s².
- b) Severidad 2: 19.7 m/s².
- c) Severidad 3: 13.9 m/s².

Tabla 5.3.8: vibraciones al azar resultantes de auto completo.

Espectro Densidad - Potencia			
<i>frecuencia</i>	<i>severidad 1</i>	<i>severidad 2</i>	<i>severidad 3</i>
(Hz)	$((m/s^2)^2/Hz)$	$((m/s^2)^2/Hz)$	$((m/s^2)^2/Hz)$
10	20	10	5
55	6.5	3.25	1.625
180	0.25	0.125	0.0625
300	0.25	0.125	0.0625
360	0.14	0.07	0.035
1000	0.14	0.07	0.035

5.3.6. Pruebas de las partes del chasis.

Esta prueba es del sistema montado como un cuerpo en no suspendido (chasis y llantas) las vibraciones ocurren con el resultado de las rutas "Rouge-road".

2. Excitación con vibraciones al azar.

- Duración de la prueba por cada eje espacial es de 8 horas.

d) Valor de la aceleración $107.3 m/s^2$.

Tabla 5.3.9: vibraciones al azar resultantes del chasis.

Frecuencia	Espectro densidad - potencia
(Hz)	$((m/s^2)^2/Hz)$
20	200
40	200
300	0.5
800	0.5
1000	3
2000	3

Las pruebas físicas se realizaron por los expertos de vibraciones de la VW; haciendo la medición en el faro derecho del auto completo.

5.4. Características de la prueba.

La prueba fue un Análisis modal con vibrómetro *Láser Polytec*. Se aplicaron 2 excitaciones al auto, por medio de 2 *Shakers*, 1 acoplado en el larguero (eje Z) y otro acoplado en el gancho de arrastre (eje X).

El sistema se excitó por medio de una señal tipo *Pseudo Random* (pseudo aleatorios), con un ancho de banda de 3 kHz. Por otro lado se midieron las excitaciones con celdas de carga, las cuales se denominaron Ref 2 (Z) y Ref 3 (X) respectivamente. Esto es, los *pseudo random* dan una excitación en un rango de 0 a 3kHz, dando picos en el espectro en donde se tiene una frecuencia modal.

5.5. Equipo Utilizado.

Para las pruebas físicas se utilizó un equipo láser denominado *Laser Scanner Vibrometer POLYTEC*, el cual se basa bajo el principio de Doppler, también conocido como *Sistema LDDM* y consta de los siguientes componentes.

- *Cabezal láser*
- *Sistema electro-óptico*
- *Retroreflector*
- *Receptor*
- *Procesador conectado a un visualizador.*

Los demás equipos utilizados fueron los siguientes, de acuerdo con su clave de almacén de la VW.

<i>Laser Scanner Vibrometer POLYTEC</i>	DTV-2-112
<i>Shaker Modal Shop / Modal Shop amplifier 2050-E02</i>	DTV-2-129
<i>Shaker Modal Shop / Modal Shop amplifier 2050-E02</i>	DTV-2-130
<i>Charge Cell B & K 8200</i>	DTF-2-023
<i>Charge Cell B & K 8200</i>	DTF-2-024
<i>Charge Amplifier 2635 B&K</i>	DTV-2-030

5.6. Funcionamiento del láser.

El *efecto DOPPLER* describe la variación de la frecuencia de una onda percibida por un observador cuando la fuente que lo genera, el mismo observador, o ambos están en movimiento. Este efecto fue analizado por *Christian Doppler* (1803 – 1853), para explicar la variación de la frecuencia de las ondas luminosas que provienen de cuerpos celestes. En el caso del *efecto DOPPLER* (figura 5.4.1), la variación de la frecuencia depende de que sea la fuente o el receptor el que se esté moviendo a una velocidad v .

Dicha diferencia se debe a que existe un medio (aire) respecto al cual tiene lugar el movimiento; así es que puede distinguirse el movimiento de la fuente o el receptor respecto del aire en calma. Esta diferencia entre el movimiento de la fuente o el receptor no puede extenderse para analizar este efecto en el caso de la luz o de ondas electromagnéticas en el vacío. Aquí se analizó lo que comúnmente se conoce como “velocímetro por efecto *DOPPLER* con *LASER*”, *LDV* o *LDDM*, utilizando un *interferómetro de Michelson*. El *LDV* se basa en la variación de la frecuencia por *efecto DOPPLER* de un haz que se hace incidir sobre uno de los espejos del interferómetro que oscila con una amplitud y frecuencia conocida.

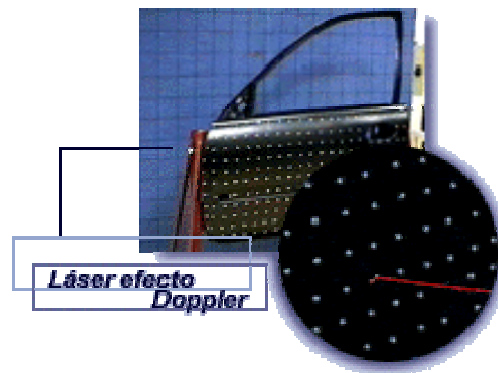


Figura 5.6.1: efecto Doppler.

Como ya se ha visto, el Principio del efecto *DOPPLER* explica que existe un cambio de frecuencia entre la onda emitida y la onda reflejada. Para el caso concreto del sensor de velocidad Delta, se transmite una señal con una frecuencia específica que refleja en una superficie y es devuelta al sensor. Si el sensor o la superficie donde se refleja el rayo

están moviéndose uno relativamente respecto del otro, la señal cambiará en frecuencia cuando vuelva al sensor. Este cambio en frecuencia permite medir la velocidad relativa entre el sensor y la superficie. El cambio de frecuencia DOPPLER viene dada por:

$$F_d = 2 \cdot V \cdot \left(\frac{F_0}{c}\right) \cdot \cos \theta \quad (2)$$

En donde:

F_d = Cambio de frecuencia observado (Hz)

V = velocidad

c = velocidad de la luz

5.7. ¿como trabaja el equipo del láser del laboratorio?

5.7.1. ¿A qué se refiere multi -punto de vibrómetro?

La capacidad simultáneamente de medir la amplitud-tiempo dependiente de la vibración, la frecuencia, y los puntos múltiples en la superficie de los objetos de una manera sin tener contacto.¹

Es a menudo provechoso, o esencial, entender la respuesta global de una estructura a los fenómenos transitorios de la vibración:

- Impactos u otras fuentes del cargamento del impulso.
- Crecimiento o identificación material de grieta de la fractura.
- Supresión global de la vibración para el control acústico estructural.

Conceptos y metas para el desarrollo multi punto de un vibrómetro (figura 5.7.1).

- Desarrolla una técnica no-contacto para adquirir simultáneamente datos estructurales dependientes del tiempo en los puntos múltiples en una superficie del objeto.
- El uso de la óptica difractinge elimina el rayo láser de la exploración.
- Los últimos avances en *Cmos*, cámaras fotográficas *linescan*, y la adquisición de los datos de video se utilizan para obtener la alta resolución espacial/temporal.

¹ http://techtransfer.gsfc.nasa.gov/downloads/HHT_expo_fleming.pdf

láser vibrometro de multi puntos de medición.

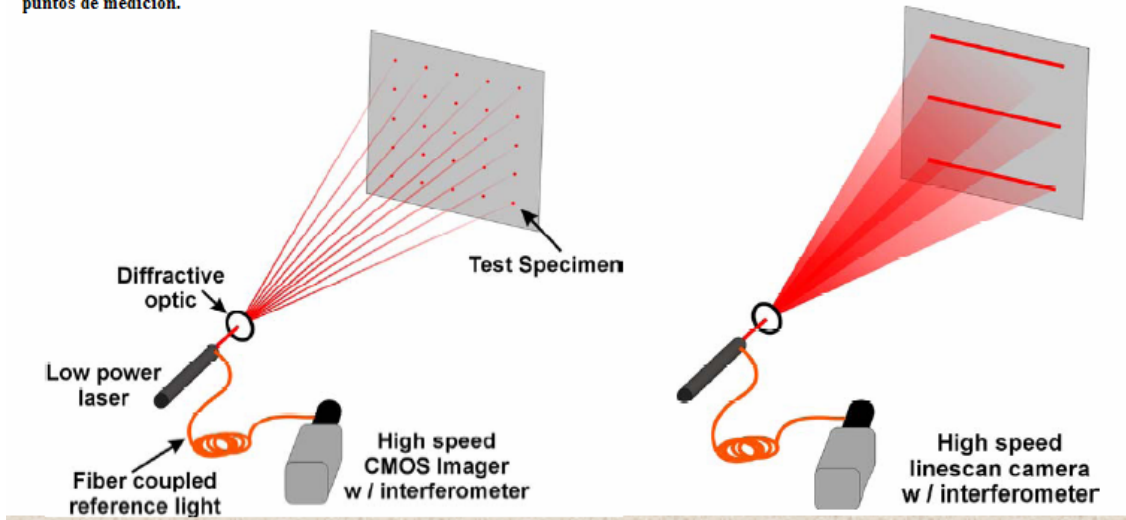


Figura 5.7.1: láser multi punto de un vibrómetro

Las unidades miden el tiempo de velocidad superficial dependiente en los puntos múltiples, usando el *efecto DOPPLER* y dos armónicos, moduladores ópticos sincronizados del acústico (*AOMs*).

5.7.2. ¿Cómo trabaja el multi punto vibrómetro?

Paso 1: utiliza *AOMs* para crear la frecuencia interferométrico del golpe que puede ser tiempo resuelto por el detector (figura 5.7.2).²

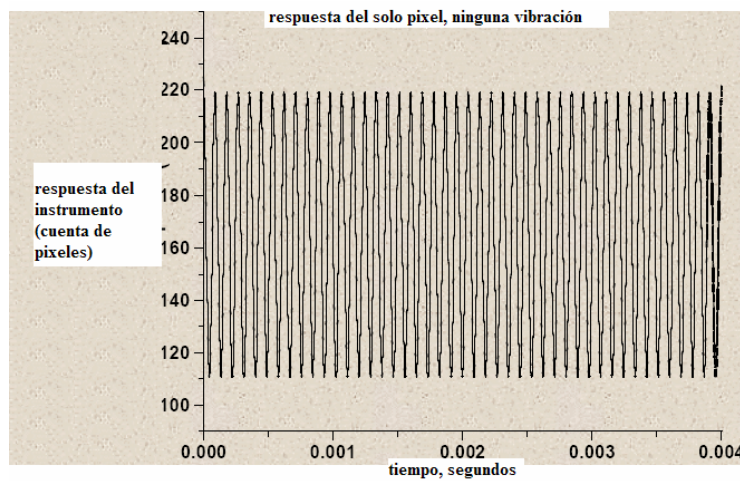


Figura 5.7.2: paso 1.

² http://techtransfer.gsfc.nasa.gov/downloads/HHT_expo_fleming.pdf

Paso 2: bajo vibración, la señal portadora es frecuencia modulado por la cambio de *DOPPLER* asociada (figura 5.7.3).

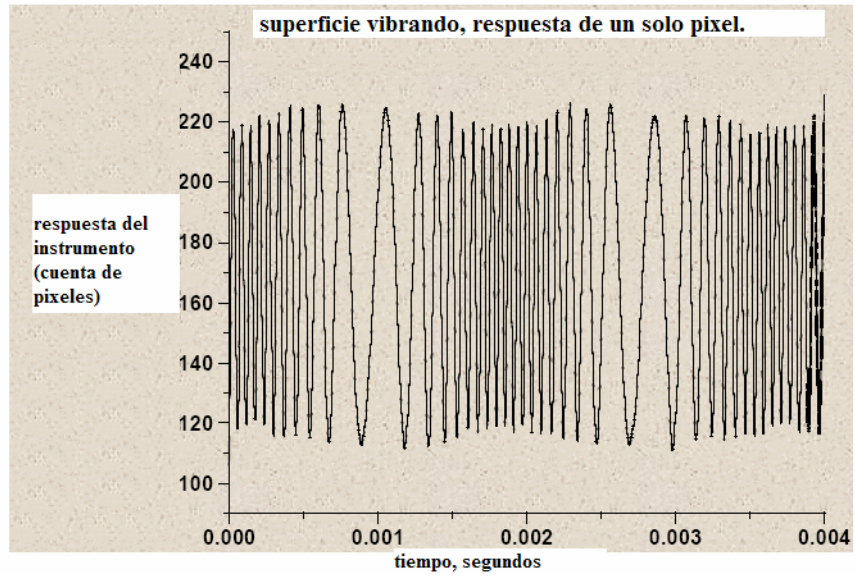


Figura 5.7.3: paso 2.

Paso 3: se hace el análisis de frecuencias usando la transformada *HUANG –HILBERT* (*HHT*) para determinar la frecuencia de *DOPPLER* (figura 5.7.4).

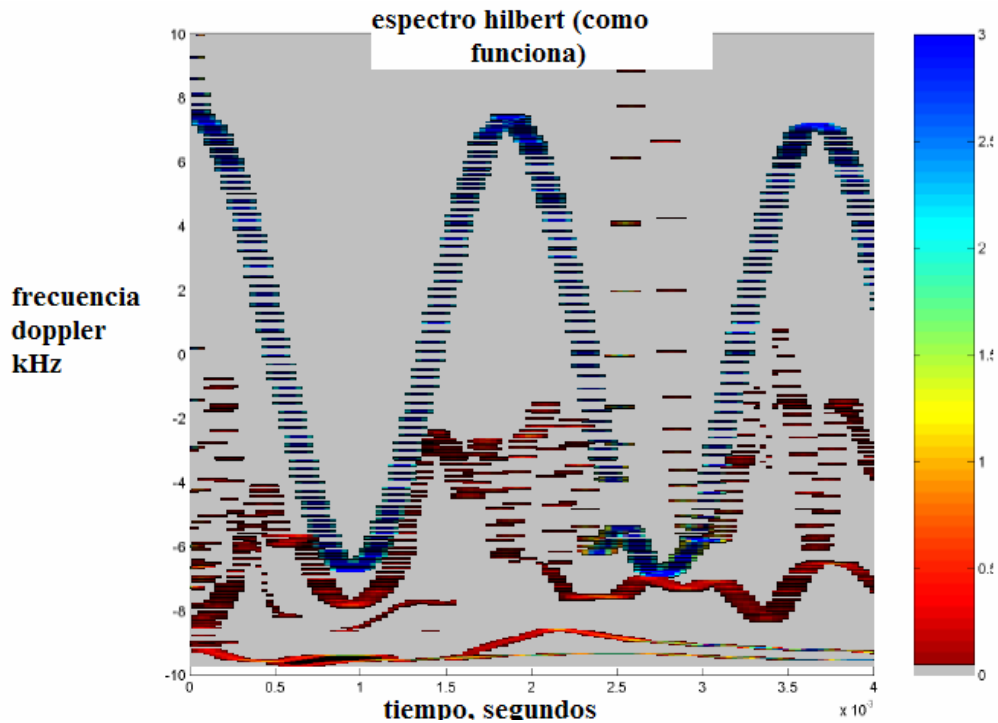


Figura 5.7.4: Paso 3.

Paso 4: se utiliza el proceso de imagen para convertir la *frecuencia de DOPPLER* a la velocidad superficial (figura 5.7.5).

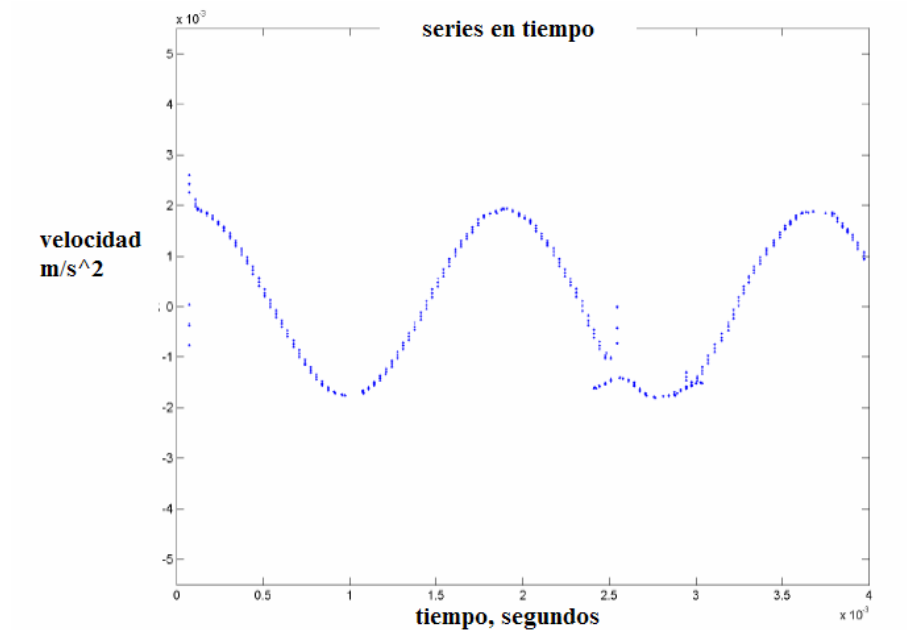


Figura 5.7.5: Paso 4.

5.8. Resultados de las pruebas físicas.

En todo el rango de frecuencias analizado, se seleccionaron las frecuencias que tienen mayor amplitud en la zona del faro (figura 5.8.1); las frecuencias que interesan son las sombreadas, ya que al ser un componente rodeado de otras piezas como la fascia, tapa y salpicadera, se separaron solamente las frecuencias pertenecientes al faro. En la figura 5.8.2a se muestran la forma en que fueron medidas las vibraciones en el sistema, el círculo del centro es el área perteneciente a la mica del faro, y las otras dos secciones son pertenecientes una a la fascia y otra a la salpicadera. Como se mencionó, la excitación se realizó en el gancho de remolque (X) y en el larguero (Y) (figura 5.8.2b) del faro derecho.

En el espectro se pueden ver varias frecuencias que no fueron tomadas en cuenta, esto se debe, que solamente se tomaron las frecuencias que se captaron en el faro, no en la fascia ni salpicadera (figura 5.8.1). Estos se midieron por medio de puntos en el faro, fascia y salpicadera.

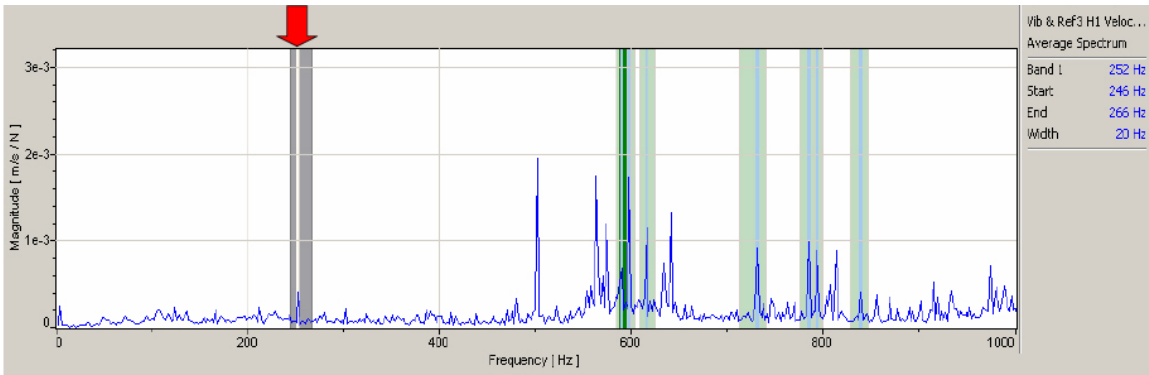


Figura 5.8.1: frecuencias con amplitud relacionadas únicamente con el faro (sombreadas).

Tabla 5.8: picos de la medición de vibraciones del faro.

Pruebas Físicas	
<i>Picos del espectro medido</i>	
<i>Número de picos</i>	<i>Frecuencias</i>
	<i>Hz</i>
1	252
2	598
3	616
4	732
5	786
6	794
7	840

Como se sabe, en una prueba modal la resonancia de las frecuencias excitadas son iguales a las frecuencias modales naturales, que en este caso son los picos en el espectro. Esto quiere decir en el análisis modal del software se puede comparar con el modelo excitado de la prueba modal.

Auto completo.



Figura 5.8.2a: auto completo (faro derecho).

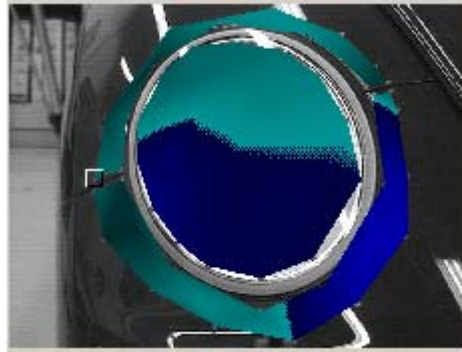


Figura 5.8.2b: Separación de piezas para el análisis (modo auto completo).

En los siguientes esquemas se muestran las frecuencias en estudio, con la mayor escala de amplitud encontrada ($2.5e-3$ m/s/N). Con ello se puede identificar fácilmente, qué frecuencia es la de mayor amplitud de todas las que se presentan (598 Hz).

En los resultados presentados se tomó como referencia *Ref 3* (Eje x) para la *FFT*.

Primer pico (Frecuencia 252 Hz).

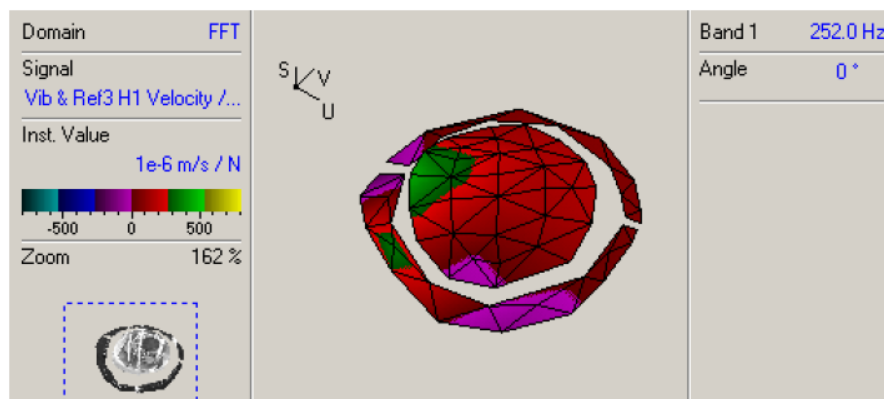


Figura 5.8.3a: Comportamiento en la frecuencia 252 Hz

En la figura 5.8.3a se muestra claramente los desplazamientos obtenidos en un rango de colores; los colores más fríos (azul) son el rango más bajo de desplazamientos, mientras que los colores cálidos (rojo, amarillo) es lo contrario, y los valores vienen dados en velocidad/fuerza.

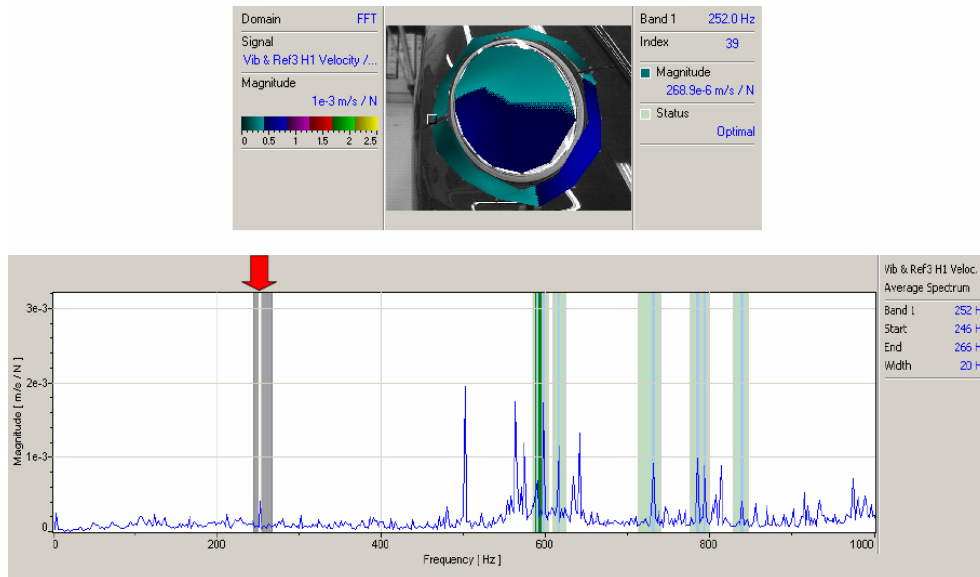


Figura 5.8.3b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 252 Hz.

Segundo pico (Frecuencia 598 Hz).

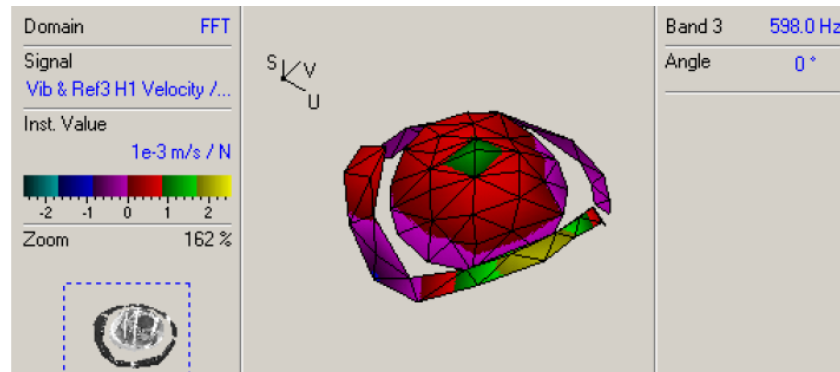


Figura 5.8.4a: comportamiento de la frecuencia 598 Hz.

En esta frecuencia, se nota que se alcanza mayor desplazamiento en el faro (se ve claramente en la figura 5.8.4a), además de tener un rango mayor en los desplazamientos de las piezas.

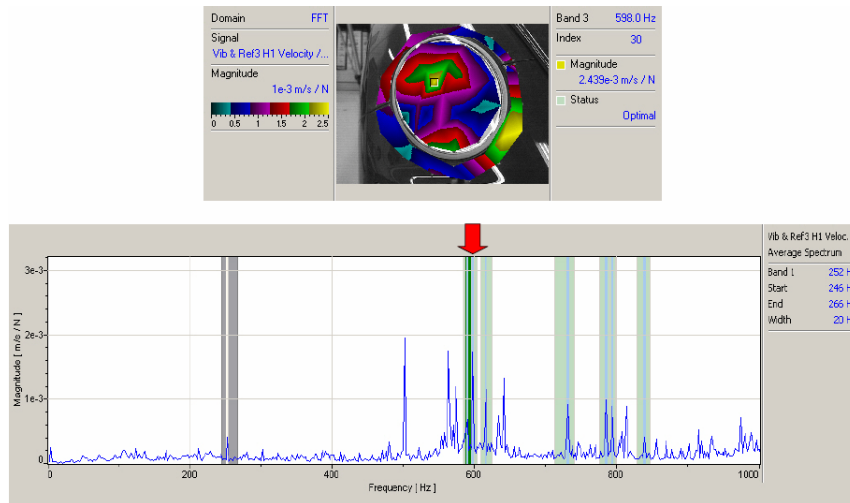


Figura 5.8.4b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 598 Hz.

Tercer pico (Frecuencia 616 Hz).

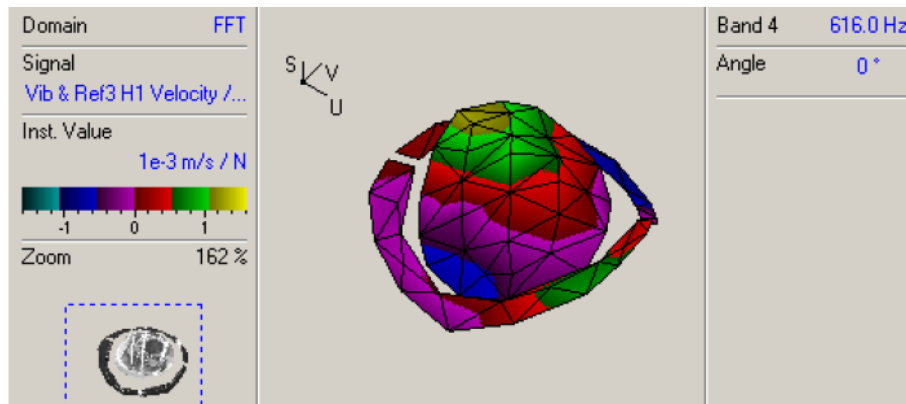


Figura 5.8.5: Comportamiento de la frecuencia 616 Hz.

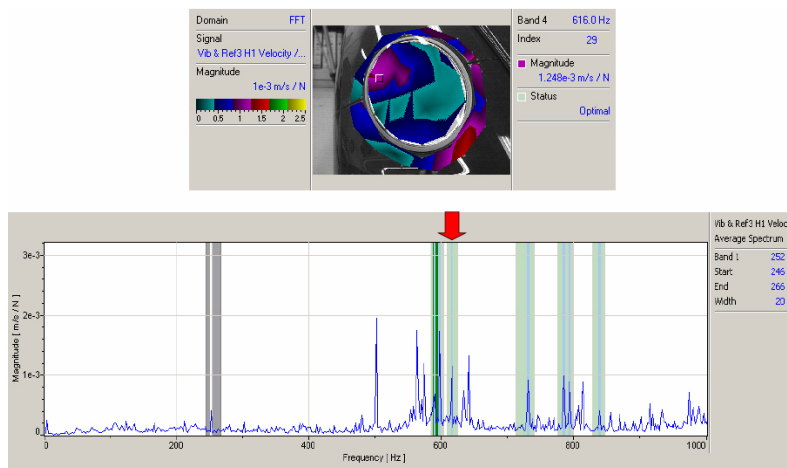


Figura 5.8.5b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 616 Hz.

Cuarto pico (Frecuencia 732 Hz).

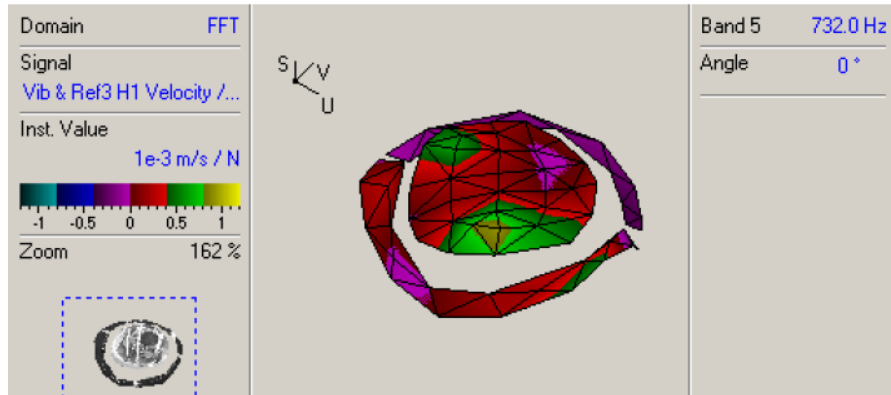


Figura 5.8.6a: Comportamiento de la frecuencia 732 Hz.

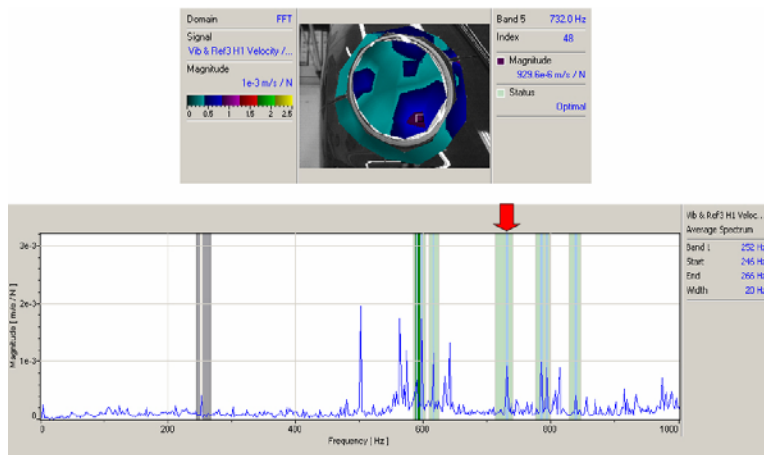


Figura 5.8.6b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 732 Hz.

Quinto pico (Frecuencia 786 Hz).

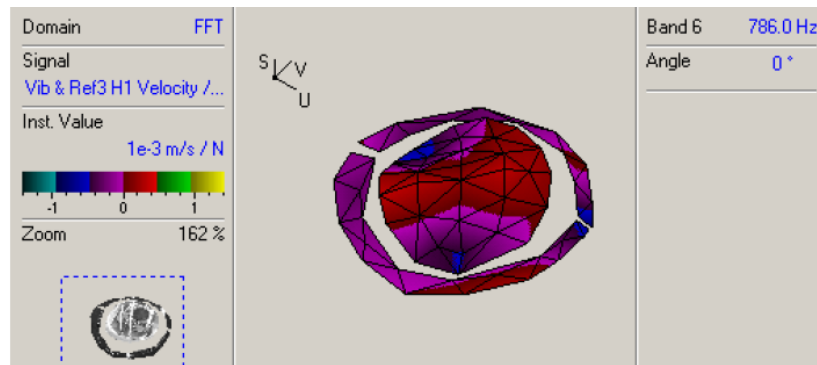


Figura 5.8.7a: Comportamiento de la frecuencia 786 Hz.

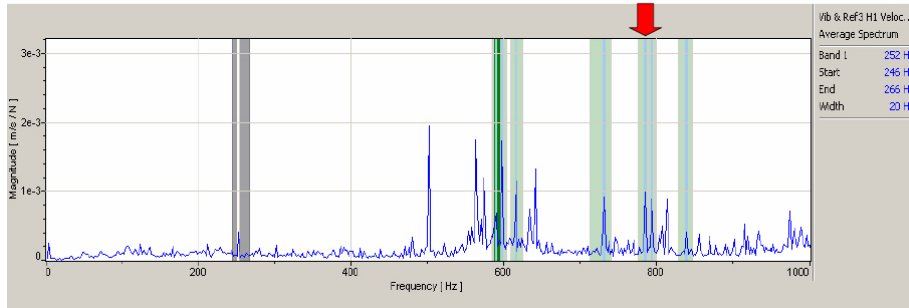
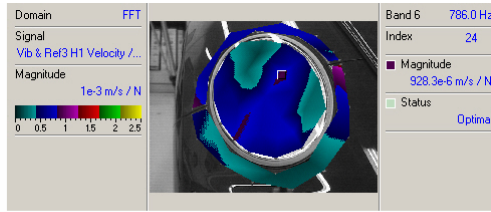


Figura 5.8.7b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 786 Hz.

Sexto pico (Frecuencia 794 Hz).

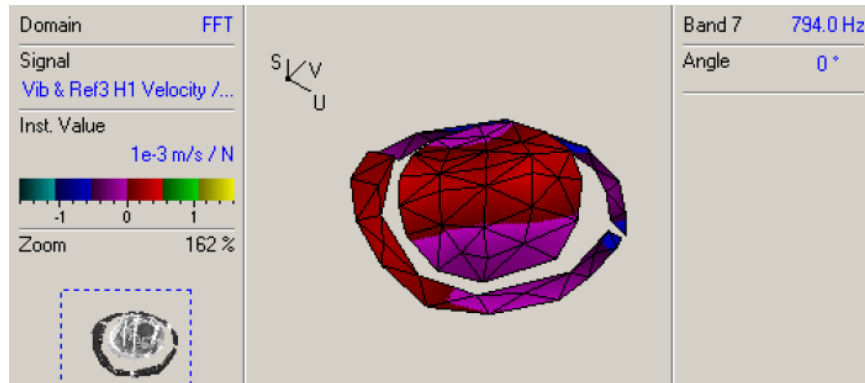


Figura 5.8.8a: Comportamiento de la frecuencia 794 Hz.

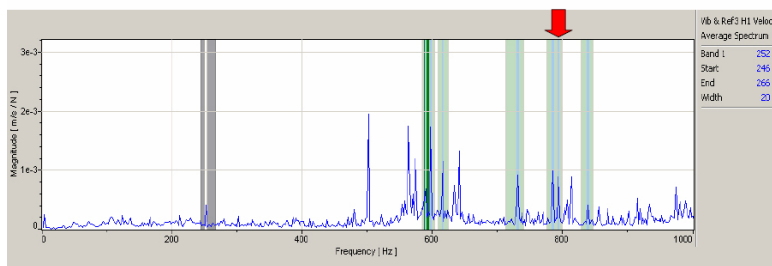
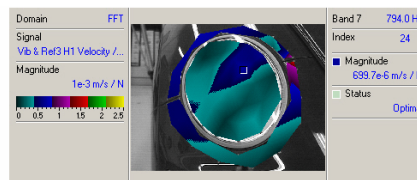


Figura 5.8.8b: ubicación en el espectro de la frecuencia 794 Hz.

Séptimo pico (Frecuencia 794 Hz).

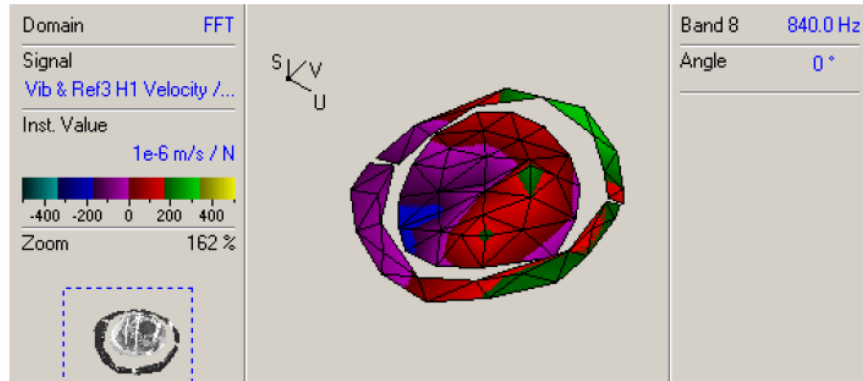


Figura 5.8.9a: Comportamiento de la frecuencia 840 Hz.

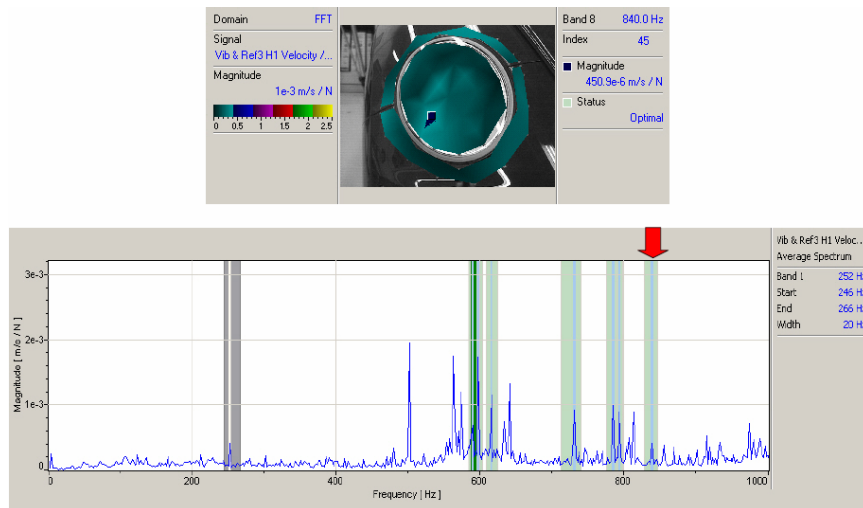


Figura 5.8.9b: Ubicación en el espectro de la frecuencia 840 Hz

Para la correlación con el modelo *FEM*, se debe tomar en cuenta el plano de medición del Láser. La frecuencia con mayor amplitud en la mica del faro fue la de 598 Hz.