

# **Sistematización y optimización de un ensayo de vibraciones aleatorias en banda ancha**

S. García Jiménez, J. M. Pintor Borobia

*Universidad Pública de Navarra, Dpto. Ingeniería Mecánica Energética y Materiales,  
Campus Arrosadía s/n, 31006 Pamplona (España), Tlf: 948169631*

[garcia.31259@e.unavarra.es](mailto:garcia.31259@e.unavarra.es)

## **Resumen:**

En el presente artículo, se lleva a cabo un estudio de los ensayos de vibraciones aleatorias en banda ancha, como los realizados habitualmente en la actualidad a componentes del sector del automóvil tanto de naturaleza electrotécnica como mecánica.

Lo que se ha pretendido es el establecimiento de una metodología para la realización de los mismos, mostrando a su vez los puntos críticos y limitaciones a la hora de llevar a cabo la validación del comportamiento vibracional de las piezas.

Se ha definido tanto el material como los equipos necesarios, y se muestra como el uso de determinado tipo de sensores, como los de no contacto, permite obtener unos mejores resultados ya que no alteran el comportamiento dinámico del sistema.

Finalmente, se muestran algunos de los resultados obtenidos del ensayo sobre un componente electrónico utilizado para comprobar la adecuación de la metodología propuesta.

**Palabras Clave:** vibraciones aleatorias, banda ancha, ensayos.

## **Abstract:**

This article talks about the study of the random wide band vibration tests. These kinds of tests are using nowadays in the automotive industry to check different specimen (electric and mechanic).

We have pretended to do a methodology for making this kind of tests and we show the critic points and the limitations to ratify pieces.

The material and the equipment have been defined for making the test. We show that using a kind of sensor (touchless sensor) we can improve the results because they don't modify the dynamic behaviour of the piece.

Finally we show some results that we have obtained to an example specimen used for checking the process defined.

**Keywords:** random vibrations, wide band, test.

## 1. Introducción

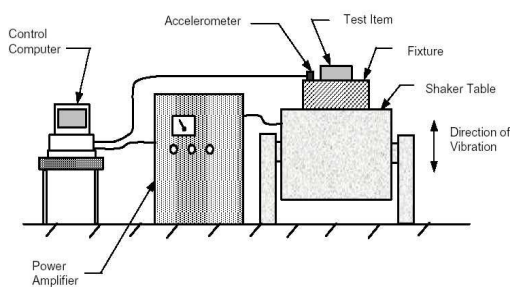
En el presente trabajo se ha llevado a cabo un estudio de los ensayos de vibraciones aleatorias en banda ancha, como los realizados habitualmente en la actualidad en diferentes componentes del automóvil tanto de naturaleza electrotécnica como mecánica. Estos ensayos resultan de importancia en las etapas de diseño y cálculo de los citados componentes al permitir garantizar su correcto funcionamiento trabajando en un ambiente vibracional estocástico, como es el caso de los automóviles.

Para la preparación y realización de los pertinentes ensayos se partió de la normativa existente [1]; que fue, a su vez, complementada con otras normas a las que se hace referencia en la misma [2-6].

El objetivo final del trabajo era poder llegar a establecer una metodología para el desarrollo de este tipo de ensayos, así como la definición y diseño del equipamiento óptimo para su realización. Mediante la realización de los mismos, se trató de determinar los posibles cuellos de botella existentes, las posibles incertidumbres que pudieran generarse, limitaciones, así como las posibles alternativas. Facilitando de este modo la posterior optimización del proceso de ensayo.

## 2. Ensayos de banda ancha. Equipo de ensayo

Para la realización de los ensayos, se estableció un sistema en lazo cerrado formado por 5 elementos, como se muestra en las figuras 1a y 1b:



**Figura 1a.** *Esquema del sistema completo para realización del ensayo*

**Figura 1b.** *Sistema completo para realización del ensayo*

- Sistema de control: encargado de la generación de la señal eléctrica, así como de la lectura de la señal que realmente le llega al espécimen a ensayar para compensar la primera con el fin de conseguir la excitación deseada en el objeto a ensayar. El equipo utilizado es un DACTRON Laser Shaker Control System, que consta de 3 módulos, caja de procesamiento de señal, tarjeta de procesamiento de señal PCI y software de funcionamiento.
- Amplificador de potencia: como su nombre indica, lo que hace es amplificar la señal generada por el sistema de control para llegar a los valores necesarios para alimentar el excitador. Se ha empleado un amplificador TIRAvib A50150.
- Excitador: es el componente encargado de transformar la señal eléctrica en un determinado movimiento vibratorio, que es transmitido al componente a ensayar. En este caso, se ha utilizado para la realización de los ensayos un excitador TIRAvib S522 que presenta una masa efectiva en movimiento de 200 gr, siendo capaz de desarrollar una fuerza de hasta 200 N, en un rango de frecuencias de 2 a 7.000 Hz y con una la aceleración máxima alcanzable de 102 g.
- Especimen: es el objeto a ensayar que puede ser validado mediante la realización de estos ensayos. En la validación de ensayos se ha empleado una tarjeta electrónica con una serie de componentes integrados sometida a la excitación que soportaría un componente eléctrico de automóvil no situado en las inmediaciones del motor.
- Sensores: situados estratégicamente tanto sobre el espécimen como sobre el utillaje de ensayo, transforman el movimiento, en este caso vibratorio, en una señal eléctrica capaz de ser leída e interpretada por el sistema de control. Los sensores utilizados en estos ensayos son acelerómetros piezoeléctricos del tipo y

características como los que se ven en la figura 2 y un vibrómetro láser. Este último, se utiliza para evitar añadir una masa, la del acelerómetro, que puede ser significativa en el espécimen ensayado, y poder medir la aceleración en el mismo sin contacto externo alguno.

	<b>ISOTRON 751-100</b>
Rango (g)	±50
Sensibilidad (mV/g)	100
Frecuencia de resonancia (KHz)	50
Rango de temperaturas (°C)	-55 / 125
Peso (grs)	7.8

**Figura 2.** *Acelerómetro piezoelectrico con sus características*

El vibrómetro láser utilizado en los ensayos, es un POLYTEC con un controlador OFV-3001 y una cabeza óptica sensora OFV-353, cuyas características se detallan a continuación en tabla 1.

<b>Controlador OFV-3001</b>		<b>Cabeza sensora OFV-353</b>	
Peso	10.8 Kg.	Peso	3.5 Kg.
Dimensiones	450X355X135 mm.	Tipo de láser	Helio neón
Tª de operación	5-40 °C.	Longitud de onda	633 nm.
Tipo de filtro	Bessel de 3 <sup>er</sup> orden	Tª de operación	0-40 °C.

**Tabla 1.** *Características del vibrómetro láser*

### **3. Metodología de ensayo**

Para la realización de los ensayos se estableció una metodología basada en los pasos descritos a continuación. En primer lugar, es necesario definir una serie de parámetros que enmarcan las características propias del ensayo como son: perfil y nivel de densidad espectral, factor de cresta, puntos de fijación, error de sesgo, rango de frecuencias de ensayo, duración del ensayo y criterios de aceptación y rechazo de espécimen. Para el caso particular desarrollado durante este trabajo, los datos se obtuvieron de los

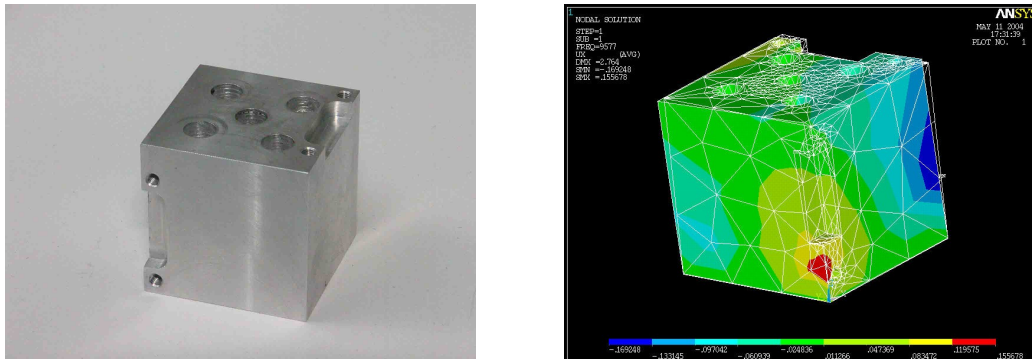
requerimientos establecidos habitualmente por un primer constructor de automóviles para sus componentes, y aparecen reflejados de forma resumida en la tabla 2.

<b>Excitación vibratoria con ruido de banda ancha (para piezas no anexas al motor)</b>	
Procedimiento de ejecución	Según DIN EN 60068-2-64 (procedimiento 2)
Grado de libertad estadístico	120
Fijación de las piezas de ensayo	Preparación sin resonancias por toda la gama de frecuencias de ensayo
Puntos reguladores	Lo más cerca posible a los puntos de fijación
Forma de la señal	Señal de ruido con distribución según Gauss de los valores instantáneos de las aceleraciones
Gama de frecuencias de ensayo	10 Hz hasta 1000 Hz
Valor efectivo de la aceleración	38.1 m/s <sup>2</sup>
Factor Cresta = Valor máximo / valor efectivo	3.0
Forma del espectro:	
f=10.0 Hz hasta 50.0 Hz	G(f)=20= constante G(f) en (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> /Hz
f=50.0 Hz hasta 66.7 Hz	G(f)=20 hasta 2 disminuyendo con 24 dB/oct
f=66.7 Hz hasta 100.0 Hz	G(f)=2= constante
f=100.0 Hz hasta 1000.0 Hz	G(f)=2 hasta 0.2 disminuyendo con 3 dB/oct
Duración vibratoria por cada eje (X, Y, Z)	8 horas
Se admiten distintos grados de intensidad por cada eje principal y deben ser especificados en el plano y en el pliego de condiciones	
Orden de los ensayos:	
La posición del ensayo y el orden de los ensayos se deberán documentar en el informe del ensayo	

**Tabla 2.** Severidades y características del ensayo

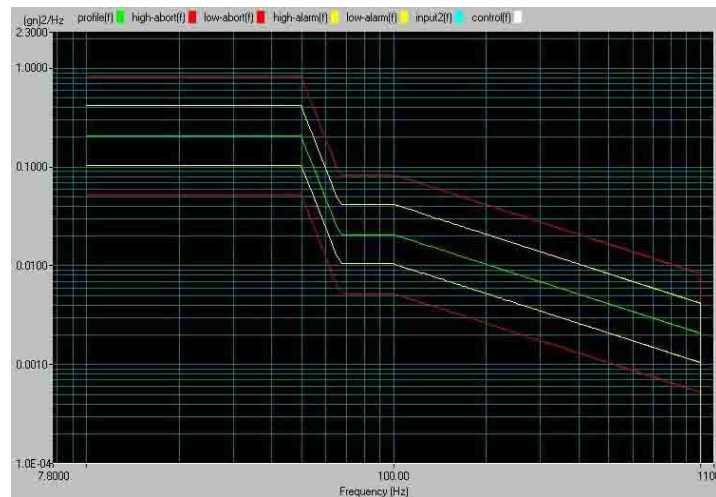
En segundo lugar, definidos estos parámetros se procede al montaje del equipo, intentando reproducir de la forma más fiel posible lo que luego sería el montaje real del componente ensayado, así como evitando que el utillaje utilizado presente frecuencias naturales dentro del rango de frecuencias de ensayo. En este caso, para asegurar el cumplimiento de este requerimiento, se realizó el estudio vibracional de un modelo virtual mediante elementos finitos del propio utillaje previamente a la fabricación y montaje del utillaje real. En este sentido, la lógica y la experiencia conducen a recomendar el empleo de utillajes compactos, que aporten una rigidez importante a la

vez que ligeros, para que las frecuencias de sus modos de vibración se sitúen fuera de los rangos de ensayo.



**Figura 3.** *Utillaje diseñado y modelo virtual*

Con el equipo montado, el paso siguiente es proceder a definir en el software del sistema de control los parámetros antes indicados para que la señal generada por éste cumpla con los requisitos de la especificación particular del fabricante, tanto en cuanto a niveles y características de la excitación a introducir, como a la duración del ensayo en los diferentes ejes. En el caso particular de este trabajo, el espectro de excitación utilizado fue el mostrado en la figura 4.



**Figura 4.** *Espectro de la excitación*

Una vez dispuesto y definido todo el equipo de ensayo, es preciso llevar a cabo un análisis previo del componente a ensayar para obtener sus frecuencias de resonancia con el ancho de banda más estrecho a -3 dB. El objetivo es poder definir una frecuencia

de muestreo para el ensayo capaz de asegurar que en el ensayo final del espécimen no se pase por alto ninguna frecuencia de resonancia como consecuencia, por ejemplo, de la presencia de modos de frecuencias muy cercanas.

Por último, a la hora de proceder a la puesta en marcha del ensayo es aconsejable disponer de la posibilidad de llevar a cabo un breve pre-test que informe de la presencia de posibles fallos en el equipo, o en el montaje del espécimen o de los sensores, mediante la aplicación de una primera excitación de bajo nivel que chequee los diferentes parámetros definidos en el software del sistema de control. Una vez superado este pre-test sin la detección de problema alguno, correspondería llevar a cabo el ensayo definitivo. Como resultado del mismo se obtendrán una serie de gráficas y parámetros que, comparándolas con los criterios de aceptación y rechazo del espécimen a ensayar permitirá establecer si dicho componente es válido o no para trabajar en un entorno vibracional de naturaleza estocástica como el ensayado.

#### **4. Resultados del ensayo**

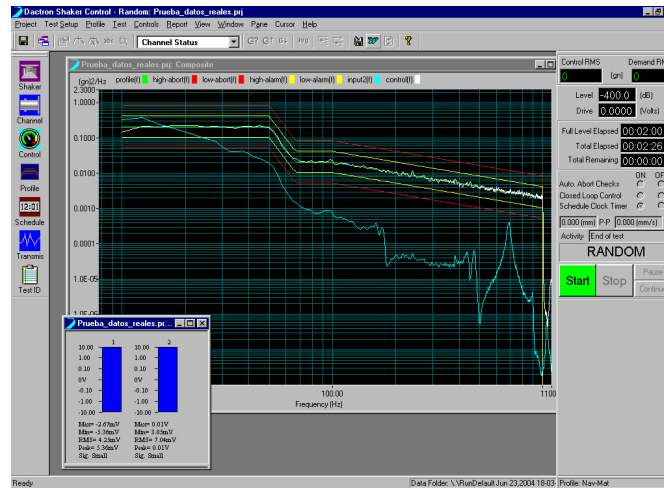
Tal y como se ha comentado anteriormente, con el objeto de validar la metodología descrita, se llevó a cabo un ensayo real aplicando un perfil de excitación del tipo de los empleados para validar piezas en el sector del automóvil. Es importante constatar el hecho de que, a su vez, este perfil siempre podrá ser reducido/amplificado en su intensidad dependiendo del componente que se quiera ensayar y de su ubicación dentro del vehículo.

De la realización de los ensayos se obtuvieron gráficas como las presentadas en la figura 5. En ellas, es posible apreciar:

La presencia o no de diferentes modos de vibración del espécimen ensayado cuando es sometido a una densidad espectral determinada. En este caso, la gráfica

de color azul permite observar la presencia de algún modo en la parte superior del rango de frecuencias ensayado.

El cumplimiento de requisito conforme al cual el utillaje no ha de tener ningún modo de vibración en el rango de ensayo. El caso particular de este trabajo, la línea blanca permite comprobar el citado cumplimiento.



**Figura 5.** Gráficas de resultados obtenidos de ensayos

La presencia de modos del espécimen dentro del rango de ensayo permite extraer otra importante recomendación. Se trataba de una tarjeta electrónica con una serie de componentes integrados utilizando diferentes tecnologías. En tal caso, lo correcto hubiera sido ensayar poder cada uno de los componentes del mismo por separado para observar su comportamiento individualizado y no en conjunto; ya que de esta última forma sólo se pudo comprobar que, como cabía esperar, la tarjeta no superaba el ensayo. Pero no fue posible saber que componente de la misma era el que había fallado.

Por último, no hay que olvidar que habitualmente este tipo de ensayos lleva incorporado el requisito de medir, con posterioridad a la realización del ensayo, una serie de parámetros establecidos por la especificación particular del fabricante que sirvan para poder dar por válida o no el componente ensayado. Estos parámetros a medir pueden ser de diferentes tipos: tensiones, pares de apriete, comprobación de la operatividad del componente, funcionamiento, etc.



## 5. Conclusiones

A partir del ensayo desarrollado para validar la metodología de ensayos de banda ancha definida en este artículo, se han ido extrayendo una serie de recomendaciones que se recogen a continuación de forma breve:

- Es importante llevar a cabo un estudio inicial del espécimen a ensayar en el que se debe realizar un análisis modal para la búsqueda de la resonancia con el ancho de banda más estrecho a  $-3$  dB en el rango de estudio. El objetivo es poder establecer una frecuencia de muestreo del sistema de control de vibración que asegure no pasar por alto frecuencias de resonancia en el estudio final.
- La obtención de unos buenos resultados dependerá también del uso de los sensores adecuados en cada caso. Dependiendo del tamaño del componente a ensayar, resultará más interesante y recomendable utilizar un tipo de sensores de medida de vibración u otros; ya que, por ejemplo, mediante el uso de acelerómetros en piezas pequeñas de poca masa se puede modificar de manera importante el comportamiento dinámico del sistema y falsear resultados. Por ello, en este tipo de casos se recomienda el uso de sensores sin contacto, como es el caso del vibrómetro láser, que proporcionarán la misma información que un acelerómetro; pero que, al no tener contacto directo con el componente, no introducen ningún tipo alteración en el comportamiento dinámico del mismo.
- El diseño del utillaje necesario para sujetar el componente en el ensayo es otro de los aspectos a no descuidar. Por un lado, debe de asemejar en la medida de lo posible las condiciones de sujeción real del espécimen en su vida útil. Por otro lado, ha de carecer de frecuencias de resonancia en el rango de ensayo. En el diseño y fabricación de éste utillaje se recomienda el uso de materiales ligeros y diseños que

aporten una rigidez importante para que las frecuencias naturales de vibración del utillaje sean lo más altas posibles y se sitúen fuera del rango de ensayo.

- En el ensayo de piezas de carácter electrotécnico, resultará recomendable el ensayo componente a componente. Si se ensaya una tarjeta con una serie de componentes integrados de una sola vez, será difícil analizar el comportamiento de cada uno de sus componentes en un ambiente vibratorio determinado; sólo se tendrá conocimiento del comportamiento global de la tarjeta, y una idea general de los componentes, resultando difícil saber, en ocasiones, dónde está el fallo.
- Por último, a la hora de realizar el montaje para el desarrollo del ensayo, éste debe asemejarse, en la medida de lo posible, a su forma de trabajo prevista en la realidad, para que tanto la acción de la gravedad como diferentes cargas derivadas del montaje (cables, tornillos, bridas, etc.) se reproduzcan de la forma más parecida posible a lo que será su modo de trabajo. Incluso para cierto tipo de piezas puede ser conveniente el ensayo mientras la pieza trabaja, ya que el calentamiento de la misma durante su funcionamiento puede afectar a su comportamiento frente a un entorno vibratorio.

## **6. Referencias**

1. UNE-EN 60068-2-64, *Ensayos ambientales. Parte 2: Métodos de ensayo. Ensayo Fh: Vibración aleatoria de banda ancha control digital y guía*, (1994).
2. UNE-EN 60068-1, *Ensayos ambientales. Parte 1: Generalidades y guía*, (1994).
3. UNE-EN 60068-2-6, *Ensayos ambientales. Parte 2: Ensayos. Ensayo Fc: Vibración sinusoidal*, (1995).

4. UNE-EN 60068-2-47, *Ensayos ambientales. Parte 2-47:Métodos de ensayo. Montaje de componentes, equipos y otros objetos para ensayos de vibración, impacto y otros ensayos dinámicos similares*, (1999).
5. UNE-EN 60721-1, *Clasificación de las condiciones ambientales. Parte 1: Parámetros ambientales y sus severidades*, (1995).
6. ISO 2041, *Vibration and Shock – Vocabulary*, (1990).