

IV Conferencia Panamericana de END

Buenos Aires – Octubre 2007



AAENDE

Asociación Argentina de Ensayos
No Destructivos y Estructurales

Ensayos Ambientales de Vibración Aplicados al Desarrollo y Calificación de Componentes

Pablo A. Yedros, José M. Fiori, Mauricio Sacchi, R. Guardia, J. Casais, R. Martinez Gazoni y
A. Martin Ghiselli

UA ENDE - Comisión Nacional de Energía Atómica
San Martín, Buenos Aires, (C1234ABC), Argentina,
(54 11) 6772-7439/7843
(54 11) 6772-7426
yedros@cnea.gov.ar

Resumen

El desarrollo y calificación de componentes desde el punto de vista de las vibraciones, se obtiene realizando ensayos que verifiquen el comportamiento y funcionalidad frente a cargas dinámicas que deberán soportar en las condiciones normales o especiales de operación previstas en el diseño. De esta manera se caracteriza la respuesta dinámica de los componentes ensayados. Para la realización de estos ensayos se utilizan equipos excitadores de vibración de distintas características en función del componente que se pretenda ensayar, esto puede abarcar desde componentes muy pequeños como por ejemplo discos rígidos de computadora o autopartes hasta grandes sistemas como satélites espaciales o componentes de centrales nucleares.

En este trabajo se presenta una descripción de los distintos tipos de ensayo que se realizan, según se trate de ensayos para apoyar el desarrollo de la ingeniería de un componente, o ensayos de calificación para aceptar un diseño o un proceso de fabricación ya completados. Se describen las facilidades de ensayo existentes y se presentan ejemplos de ensayos de calificación realizados sobre componentes de uso nuclear como fuentes selladas de cobalto y de ensayos de desarrollo como los efectuados sobre componentes de uso espacial.

1. Introducción

Los requerimientos de calidad y seguridad impactan en el desarrollo de productos de la industria en general y en el desarrollo de proyectos donde estos requerimientos sobre el producto fabricado resultan críticos. La posibilidad de someter a esos productos a un ambiente de vibraciones controladas en laboratorio cobra un papel importante en la determinación de fallas incipientes y en la verificación de características de diseño. Esta posibilidad resulta también de importancia durante las distintas etapas en las que se divide el diseño y desarrollo de un componente, así como también durante las etapas de calificación del dispositivo diseñado.

Mediante la utilización de un excitador electrodinámico de vibraciones asociado a un controlador electrónico adecuado que permite establecer el tipo de vibraciones que se desea obtener y controlar las mismas, se simulan distintas condiciones de operación de la pieza bajo ensayo. De esta manera, se caracteriza dinámicamente y se verifica la funcionalidad y la respuesta dinámica de la pieza frente a cargas dinámicas de tipo senoidal, aleatoria, cuasi-estáticas o bien de impacto. Una vez montado el modelo de ensayo en el generador de vibraciones, se registra y analiza el comportamiento dinámico de distintos puntos característicos del componente mediante la utilización de sensores, pudiéndose determinar el estado de deformaciones y/o aceleraciones, velocidades o desplazamientos. Las mediciones y los subsiguientes análisis en el dominio del tiempo y la frecuencia de las señales obtenidas, como ser espectros o análisis de envolvente, permiten determinar comportamientos dinámicos no previstos y daños incipientes.

En la ejecución de ensayos de desarrollo de un componente, es frecuente tener que estudiar la correcta respuesta dinámica del componente, aplicando una excitación establecida con criterios formados a partir de experiencias previas sobre componentes de características similares, o bien seleccionando una o varias normas que se adapten al estudio que se desea realizar. En el caso del desarrollo de componentes aeroespaciales, las normas utilizadas no definen un criterio para cada tipo de componente o sistema desarrollado, sino que el ensayo a efectuar debe incluirse en el marco de los requerimientos generales especificados por la norma.

En los ensayos de durabilidad y/o de calificación de productos de fabricación en serie, se define el espectro de excitación por alguna norma de aplicación desarrollada para el componente. De esta manera quedan definidos, o bien limitados, los parámetros del ensayo de vibraciones. A tal efecto, existen normas de aplicación específica para cada componente o pieza bajo ensayo, utilizándose normas de uso general en el caso de que no se hayan establecido unas específicas para ese producto.

2. Excitador electrodinámico de vibraciones

Un Excitador Electrodinámico de Vibraciones (EEV), utiliza el concepto básico de fuerza vs. corriente de los motores eléctricos para generar la fuerza de vibración. Su construcción y principio de funcionamiento es similar al de un altavoz, convirtiendo la corriente eléctrica proveniente de un generador de funciones y un amplificador de corriente, en fuerza mecánica en todo el rango de frecuencias de trabajo, con una distorsión espectral mínima de la forma de onda de alimentación. La configuración tipo “altavoz” permite la fijación de componentes con masas importantes frente a una masa en movimiento reducida del EEV. La fuerza de vibración es transmitida a una armadura, la cual posee una guía que proporciona una única dirección de movimiento aportando mayor rigidez en cualquiera de las otras direcciones.

Por lo dicho anteriormente, un EEV es básicamente un generador de fuerza diseñado para trabajar con una respuesta lineal en un rango de baja frecuencia. El grupo Estudio y Ensayo de Componente Estructurales del la UA ENDE - CNEA cuenta dos EEV con una fuerza de excitación de 11 KN y de 112 N, con los cuales se pueden realizar ensayos de las siguientes características:

- Senoidal: el dispositivo permite controlar la amplitud y la frecuencia de excitación, pudiendo realizar un barrido en frecuencia con velocidad de barrido también controlada mediante una computadora.
- Detección de frecuencias de resonancia: durante el barrido senoidal de frecuencias, el controlador es capaz, mediante la correcta instalación de los acelerómetros de control, de determinar las frecuencias de resonancia presentes en el ancho de banda bajo ensayo.
- Seguimiento de las frecuencias de resonancia: detecta previamente las frecuencias de resonancia y realiza un ensayo de carga cíclica durante un tiempo predeterminado por el usuario a cada una de las frecuencias de resonancia seleccionadas también por el usuario. Este módulo permite además detectar el cambio de frecuencias de respuesta, que resulta como consecuencia de roturas inducidas por la alta exigencia que significa este tipo de ensayo.
- Aleatorias: dado que este tipo de ensayo provee la energía de manera simultánea en todas las frecuencias, para un ancho de banda especificado, se pre-establece la densidad de potencia del espectro, fijando la envolvente global dividida en pequeñas bandas de frecuencia. Para describir excitaciones aleatorias se utiliza la función espectral de potencia (PSD) ‘ g_d ’ definida por la aceleración rms (‘ a ’) y un determinado ancho de banda ‘ Δf ’:

$$g_d = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{a^2}{\Delta f} \dots\dots\dots (1)$$

El gráfico de densidad de aceleraciones en función de cada componente de frecuencia (g^2/Hz) versus la frecuencia para todo el espectro de frecuencias de interés, se conoce como densidad espectral de potencia (de las siglas en inglés, PSD)

- Programación por tonos: es posible programar el generador de manera tal que modifique la densidad espectral en un determinado ancho de banda dentro del rango de frecuencias de un ensayo aleatorio. Puesto que una PSD preestablecida por norma no necesariamente es suficientemente severa como la que resultaría posible encontrar en la operación del componente, se pueden definir los niveles de g^2/Hz de varias formas variando la naturaleza de la distribución aleatoria. Para redefinir la naturaleza de la PSD, se utiliza la función Kurtosis, la cual modifica la exigencia del ensayo en un determinado ancho de banda dentro del espectro definido.
- Suavizado (“notching”): esta característica cobra especial interés cuando se desea realizar una limitación de la fuerza (“force limiting”) que se genera sobre el modelo. Produciendo un “suavizado” en el espectro de excitación en un determinado ancho de banda, se limitan las fuerzas dinámicas en la pieza bajo estudio.
- Seguimiento de señales temporales: el programa permite alimentar con el registro de vibraciones correspondiente a un modo de funcionamiento característico del componente bajo ensayo. Tal es el caso de ciertos componentes del automóvil, en donde deben excitarse los mismos con el registro de vibraciones correspondiente a las vibraciones que resultan de un determinado tipo de camino.
- Impulso: el controlador ajusta los parámetros de aceleración de forma tal de generar un impulso de forma y duración controlada, manteniendo nulos los desplazamientos y las velocidades antes y después del impulso. Un impulso es la variación de la aceleración en un período de tiempo muy corto (generalmente del orden de los milisegundos). De esta manera puede generarse con el EEV un pico de aceleraciones como las que se tienen en un choque o impacto.

Estas características cubren un amplio margen de prestaciones para la industria en general y para las áreas de investigación asociadas a la mecánica estructural. En la Figura 1 y 2 se observan las imágenes de los EEV de 11 KN y 112 N respectivamente, el controlador y amplificador de potencia de la Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

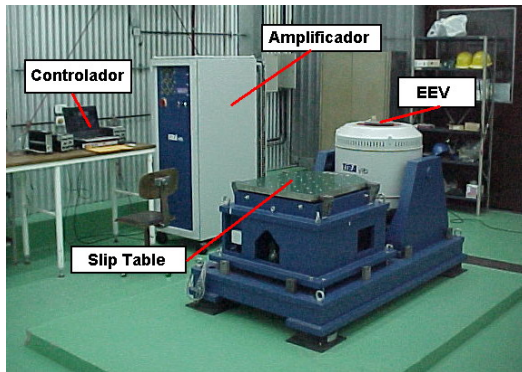


Figura 1: EEV de 11.000 N

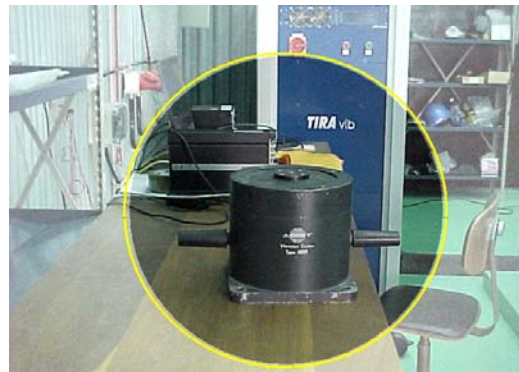


Figura 2: EEV de 112 N

Como puede observarse en la Figura 1, el EEV de 11 KN cuenta además con una Mesa Deslizante (“Slip Table”), la cual permite ensayar las piezas bajo estudio en un plano paralelo al plano de tierra. Utilizando este dispositivo, el peso del componente a ensayar no es soportado por el EEV propiamente, sino por la mesa deslizante. Para realizar estos ensayos, debe rotarse el EEV de manera tal que su eje de excitación sea coincidente con el de movimiento de la mesa deslizante. Además, cuando el EEV se utiliza en la posición observada en la Figura 1 (eje de excitación normal al plano de tierra), es posible montar sobre el mismo un cabezal expansor, que permite aumentar la superficie de fijación de los componentes de mayor tamaño y mantener así la rigidez requerida para los mismos.

El control de la excitación se realiza mediante un acelerómetro instalado en algún punto característico del componente bajo ensayo, el cual produce una señal de realimentación al excitador. El control de las aceleraciones también puede realizarse en varios puntos de acuerdo a las necesidades del ensayo. Para estructuras con zonas de baja rigidez, se utiliza un control multipunto al efecto de disminuir las cargas dinámicas en ese punto en, por ejemplo, el instante en el cual la pieza está sometida a la frecuencia correspondiente a algún modo natural de vibración. El control se realiza midiendo el valor pico de alguno de los acelerómetros denominados de control, o bien mediante un promedio de estas señales.

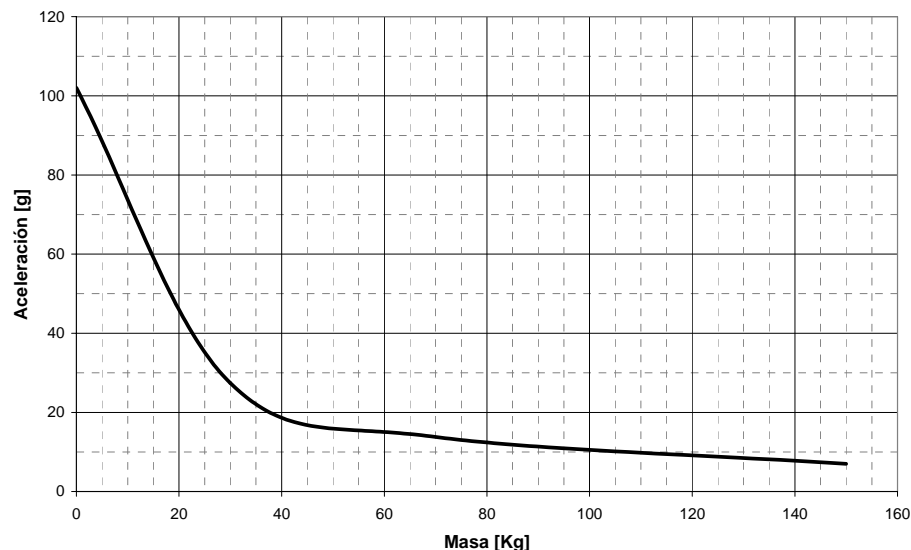


Figura 3: Aceleración máxima vs. masa – EEV 11 KN

El EEV de 112 N (Figura 2) permite ensayar piezas cuya masa total no supere, en la mayoría de las aplicaciones, el kilogramo, dado que el peso máximo a ensayar depende de los niveles de excitación requeridos por cada ensayo.

En la Figura 3 se observa un gráfico de la variación de la máxima aceleración de ensayo posible en función de la masa del componente ensayado en el EEV de 11 KN. Los límites de operación del equipo están relacionados con la frecuencia de ensayo, así para frecuencias de ensayo inferiores a 12 Hz, la limitación la produce el máximo recorrido del cabezal, siendo este de 50,8 mm; y para el rango de frecuencias entre 12 y 90 Hz el límite está dado por la velocidad de ensayo: 1,8 m/s. Puede observarse cómo los máximos niveles de aceleración cambian con el aumento de la masa, verificándose que la máxima aceleración posible con el EEV excitado en vacío es de 102 g, en tanto que con una masa total de ensayo de 20 Kg la aceleración se reduce a 55,5 g, y a 28,75 g con una masa de 40 Kg montada en el cabezal del excitador.

El peso máximo que puede montarse en el EEV de 11 KN, esto es considerando todo dispositivo montado sobre el cabezal del EEV: cabezal de expansión cuando corresponda, estructura de vinculación al EEV y masa del componente bajo ensayo; es de 150 Kg, siendo la máxima aceleración posible para este ensayo de 7 g.

La aceleración se encuentra relacionada con los desplazamientos y la velocidad a través de las siguientes relaciones:

$$\text{Acel. vs. despl.: } a = \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Acel. vs. vel.: } a = \frac{\partial v}{\partial t} \dots\dots\dots (3)$$

Para una señal de excitación del tipo senoidal, las relaciones para un EEV resultan:

$$\text{Despl} \quad : \quad d = D \cdot \text{sen}(2\pi ft) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{Acel. vs. despl.: } a = -D \cdot (2\pi f)^2 \text{sen}(2\pi ft) \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Acel. vs. vel.} \quad : \quad a = -V \cdot 2\pi f \cdot \text{sen}(2\pi ft) \dots\dots\dots (6)$$

Siendo:

a, v, d : aceleración, velocidad y desplazamiento en función del tiempo

V, D : magnitud de la velocidad 0-pico y del desplazamiento pico-pico

Con esto, las curvas de límites del EEV en función de la masa y de la frecuencia resultan como las que se observan en la Figura 4, nuevamente para el EEV de 11 KN.

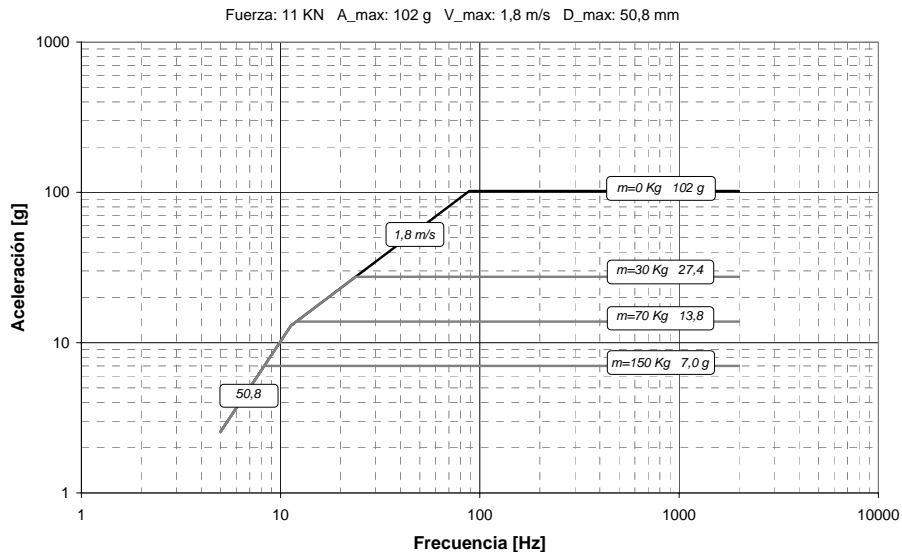


Figura 4: Límites de un EEV de 11 KN

3. Tipos de ensayos

Los ensayos de vibraciones de una pieza montada en un excitador electrodinámico están regidos por normas que fijan los parámetros de sollicitación dinámica.

En el caso de los ensayos programados utilizando el criterio de “Seguimiento de señales temporales”, el EEV es alimentado con el registro de vibraciones registrado en condiciones reales de operación, en un punto característico donde se produce la sollicitación dinámica a la cual debe ser sometida la pieza bajo ensayo. Esta característica se utiliza por ejemplo para ensayos de transporte, donde se excita la pieza a ensayar con el perfil de aceleraciones medidos en un amortiguador durante la circulación por caminos de distintas superficies. Al utilizar el registro de las condiciones reales de servicio en función del tiempo, se incluyen directamente las intensidades y frecuencias de excitación a las que está sometido el componente.

Estas características no se cumplen en un ensayo realizado bajo normas, dado que las mismas establecen como criterio de excitación al EEV una densidad espectral de potencia obtenida como promedio de distintas experiencias. En los ensayos que se realizan según normas, se pueden identificar dos tipos:

- 1) Ensayos diseñados para un determinado tipo de componente;
- 2) Ensayos definidos mediante la experiencia obtenida en componentes de características similares de funcionamiento.

En el primer grupo se tienen claramente los ensayos que se realizan sobre autopartes, donde los requerimientos de cada ensayo son especificados por las fábricas automotrices para los componentes provistos por los departamentos de fabricación o por proveedores externos. Existen distintos tipos de ensayos a realizar sobre el mismo componente, como por ejemplo los ensayos de calificación y de aceptación del producto. El objetivo de los ensayos de calificación es la demostración formal de que la implementación del diseño y la fabricación han resultado en un elemento que satisface los requerimientos de especificación en los ambientes previstos de operación con márgenes adecuados de seguridad. En tanto que el objetivo de los ensayos de aceptación es demostrar la conformidad con los requerimientos de especificación y actuar como un control de calidad para la detección de defectos de fabricación, montaje, integración, etc., que no son de fácil o normal detección por medio de las técnicas habituales de inspección.

Durante los ensayos realizados en las etapas de desarrollo, calificación y aceptación, pueden tener que verificarse durante la ejecución de los mismos las características funcionales del componente bajo estudio, como puede ocurrir con dispositivos electrónicos. En general, los ensayos de vibraciones comprenden una verificación de las características funcionales antes y después de los ensayos de vibraciones. En la Figura 5 se observa un ensayo de calificación realizado sobre una pieza de automóvil en donde, además de evaluar la respuesta dinámica del componente, se verificó el correcto funcionamiento del mismo durante las sollicitaciones producidas con el EEV.

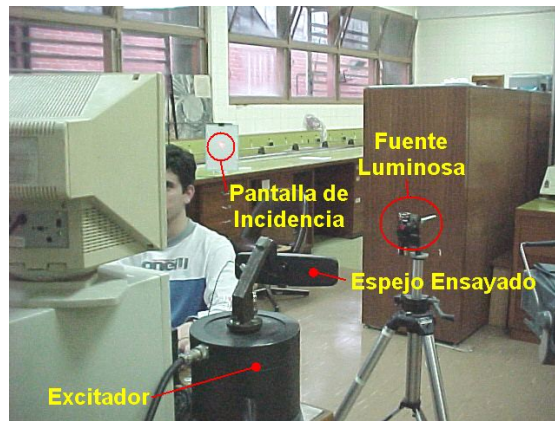


Figura 5: Ensayo de un dispositivo para automóvil

En el segundo grupo de ensayos de vibraciones definidos por normas, se encuentran aquellos componentes que no pertenecen a una línea de producción. Se destacan en este grupo los componentes de uso espacial y los de uso nuclear, debido a que son componentes que se diseñan para un uso específico y único. En el caso de los ensayos de componentes de uso espacial, las normas aeroespaciales especifican que de no disponerse del espectro de aceleraciones correspondientes al vehículo de lanzamiento en el cual se montará el componente a ensayar, se debe utilizar la envolvente de los espectros correspondientes a los lanzadores de mayor exigencia. Para ello las normas especifican espectros como los que pueden observarse en la Figura 6, donde se muestra la densidad del espectro de aceleraciones correspondiente a ensayos de vibraciones aleatorias, para ensayos de calificación y de aceptación del producto. Estos requerimientos generales utilizados en las normas aeroespaciales para ensayos estructurales de componentes diseñados para su uso en vuelo, permiten que el dispositivo sea aceptado/calificado, asegurando la compatibilidad con los requerimientos establecidos para un conjunto de lanzadores.

Existen normas que además fijan criterios básicos para ensayos de vibraciones que deben realizarse en la etapa de diseño. El objetivo de los ensayos de desarrollo es apoyar el diseño y colaborar en la evolución del mismo, realimentándolo con datos experimentales, siendo los requerimientos de estos ensayos dependientes del grado de avance del diseño y de los requerimientos operacionales del proyecto. Los ensayos de desarrollo son también utilizados para validar nuevos conceptos y modificaciones al diseño. Estos se utilizan para confirmar:

- ✓ Márgenes de funcionamiento
- ✓ Posibilidades de fabricación
- ✓ Expectativa de vida
- ✓ Modos de falla
- ✓ Compatibilidad con los requerimientos

El resultado de la confirmación de estas características se logra realizando los ensayos de desarrollo en un amplio rango de condiciones de operación, las cuales exceden los límites de diseño para poder detectar las características operativas marginales del diseño.

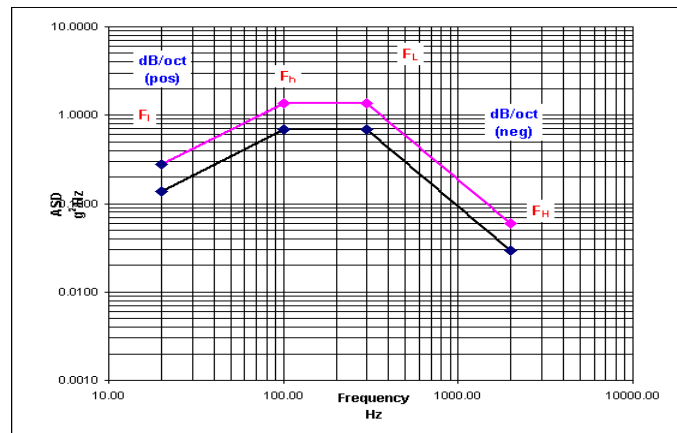


Figura 6: Espectros de vibraciones aleatorias

Para estructuras que presentan resonancias dentro del rango de frecuencias de ensayo o presentan un bajo amortiguamiento, se utiliza como criterio de ensayo el “suavizado” del espectro de excitación, para lo cual debe controlarse el EEV midiendo las aceleraciones en varios puntos. Este criterio es claramente visible en ensayos de sistemas con varios componentes, estructuras en voladizo, equipos con modos de vibrar dominantes tales como las estructuras rígidas con fijaciones flexibles, etc. En este tipo de componentes sometidos a ensayo se debe reducir la respuesta dinámica que se tiene en las resonancias producidas por la excitación del EEV para la configuración de montaje establecida para el ensayo. Para evaluar e implementar esta característica de la excitación, se utilizan acelerómetros y/o sensores dinámicos de fuerza ubicados en distintos puntos de la estructura bajo ensayo, conectados a un analizador dinámico de señales que permite determinar el rango de frecuencias donde se ubican las resonancias del componente ensayado, realimentando el EEV con un espectro de menor energía. En la Figura 7 se observa un espectro de vibraciones en el cual se realizó un suavizado de la señal de excitación implementado con este tipo de instrumentación.

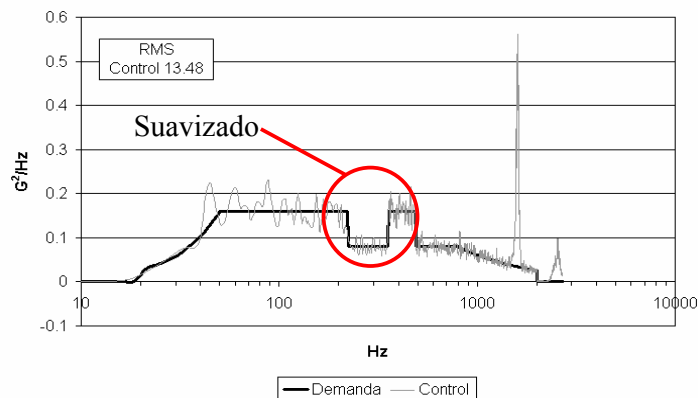


Figura 7: Señal suavizada

3.1. Desarrollos previos

Previo a la ejecución de cada ensayo de vibraciones, se estudian los requerimientos de ensayo especificados por el proveedor del modelo, definiendo un plan de ensayos.

Para vincular el componente al EEV, se diseñan dispositivos de fijación al cabezal de montaje del excitador, o bien a la mesa deslizante según sea el eje de excitación solicitado en los requerimientos del ensayo. Cada dispositivo de montaje se diseña teniendo en cuenta que la pieza agregada al conjunto a ensayar debe permitir cumplir con las condiciones de rigidez del dispositivo bajo ensayo. Para esto se utiliza como criterio de diseño que la frecuencia correspondiente al primer modo natural de vibración del dispositivo de fijación sea superior en un determinado factor, a la primera frecuencia natural de vibración correspondiente al componente ensayado. En la Figura 8 se observan algunos dispositivos de vinculación diseñados para distintos ensayos de vibraciones.

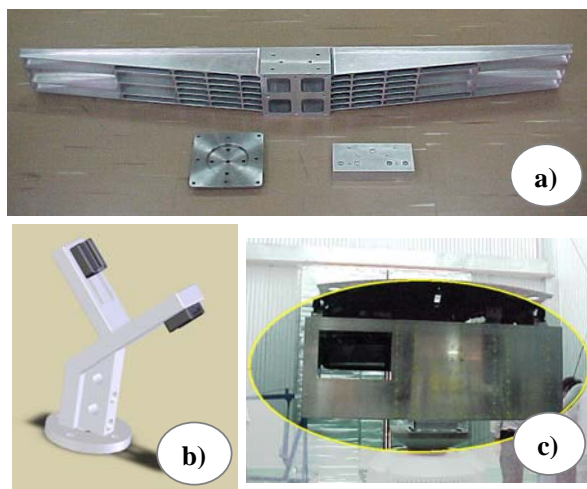


Figura 8: Dispositivos de montaje

3.2. Equipamiento Utilizado

Para medir la respuesta dinámica de la estructura bajo ensayo se utilizan transductores de aceleración de tipo piezoeléctrico y para medir los esfuerzos producidos en determinados puntos de la estructura estudiada, se utilizan sensores dinámicos de fuerza y extensómetros eléctricos para medir las deformaciones producidas.

Para registrar y analizar las señales provenientes de los distintos transductores se utilizan analizadores dinámicos de señales, los que permiten realizar el procesamiento de las señales medidas. En la Figura 9 se observa una parte de la instrumentación y uno de los analizadores dinámicos de señales utilizados durante un ensayo de vibraciones.

Para asegurar la calidad de las señales generadas y medidas, todos los equipos utilizados en el Laboratorio de Vibraciones son sometidos previamente a una verificación de sus parámetros de calibración. Para esta tarea se utilizan calibradores, utilizando el procedimiento de calibración indicado por el fabricante de cada instrumento o bien el indicado por el organismo de referencia en el país para medidas físicas.



Figura 9: Instrumentación empleada

4. Ejemplos de aplicación

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Vibraciones han tenido como objeto determinar las siguientes características sobre los distintos componentes ensayados:

- ✓ Performance
- ✓ Funcionabilidad de los dispositivos / componentes
- ✓ Durabilidad / Envejecimiento por vibraciones
- ✓ Modos de falla

La experiencia desarrollada ha involucrado a la industria automotriz y a empresas de investigación y desarrollo en los rubros nuclear y aeroespacial.

4.1. Sector Automotriz

Para el sector automotriz se tienen ejemplos de ensayos realizados en las siguientes tres categorías:

- ✓ Calificación del proveedor de autopartes
- ✓ Aceptación del producto
- ✓ Ensayo de envejecimiento por vibraciones

Las normas utilizadas para todos los ensayos han sido especificadas por las empresas terminales, diseñadoras y fabricantes de los automóviles. Estas normas son evaluadas con el objeto de establecer los parámetros de vibraciones y ensayos complementarios solicitados por la norma, de forma tal de cumplir con todos los requerimientos de ensayo. Otro de los puntos a estudiar y especificar junto al fabricante de las piezas a ensayar, es el criterio de evaluación empleado para aceptar el ensayo.

Deben evaluarse además los ensayos complementarios requeridos junto al ensayo de vibraciones, como ensayos de ciclado térmico, medición del ruido ambiente generado por el componente, etc. En la Figura 10 se observa la ejecución de un ensayo en el cual, además de verificarse la respuesta dinámica de la pieza ensayada, se determinó la funcionalidad del componente mediante ensayos complementarios.

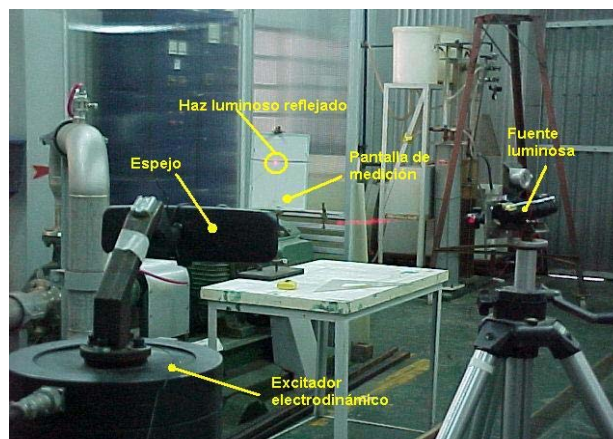


Figura 10: Distribución de los elementos de ensayo

El componente ensayado es un espejo retrovisor para un automóvil. Durante los ensayos se determinó la respuesta en frecuencia del dispositivo, encontrándose las frecuencias de resonancia en el rango de ensayo. Durante el ensayo se determinó la funcionalidad del espejo midiendo la imagen de reflexión de un láser. Para cuantificar la respuesta funcional, el requerimiento de ensayo requiere ubicar el origen de un haz de luz láser a una dada distancia del espejo y con un determinado ángulo de incidencia sobre el mismo, para medir luego la luz reflejada en una pantalla, determinando la máxima dispersión del haz y verificando que ésta no supere un determinado valor para cada frecuencia de ensayo, tomado como criterio de evaluación y también indicado por la norma de aplicación. En la Figura 11 se muestra como ejemplo uno de los ensayos realizados y pueden apreciarse los valores máximos de dispersión indicados por la norma y los registrados durante el ensayo.

En la Figura 12 se muestra el esquema de pasos a seguir en la ejecución de un ensayo realizado sobre otro componente para la industria automotriz. Dadas las dimensiones y peso del componente, para realizar el ensayo se utilizó el EEV de 11 KN de fuerza de excitación. El ensayo se realizó para determinar el envejecimiento por

vibraciones del componente, para lo cual fue necesario someter al mismo a un ciclado térmico con temperaturas de +80 °C y de -30 °C durante 2 hs para cada ciclo. Al momento de la recepción del componente, se realizó un ensayo de vibraciones de 5 hs de duración, repitiéndose estos ensayos luego de cada ciclo de temperatura; cada ensayo de vibraciones tuvo una duración igual al ensayo de recepción del componente.

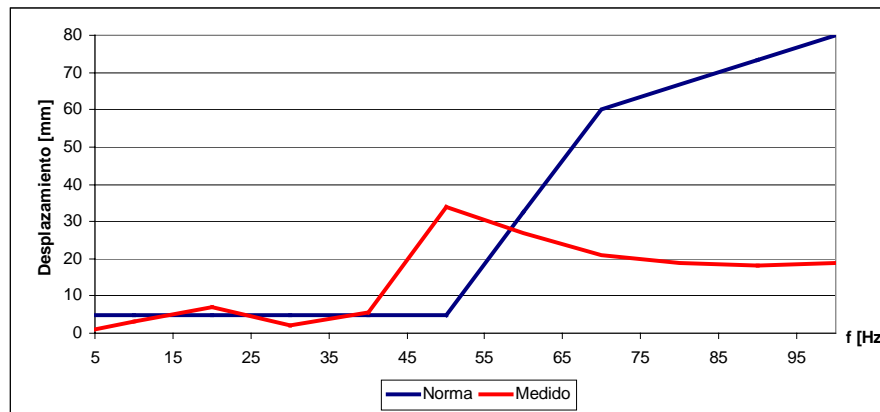


Figura 11: Valores registrados durante un ensayo

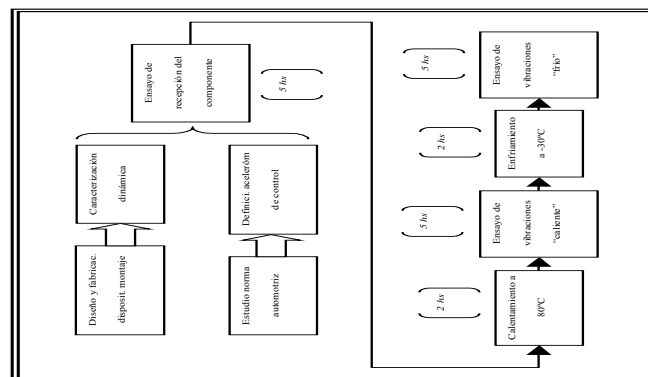


Figura 12: Esquema de ensayo

En la Figura 13 se presenta una imagen del ensayo de vibraciones pudiendo observarse el diseño del dispositivo de montaje específico para este ensayo, el cual debió cumplir con el criterio de no introducir respuestas originadas en resonancias en el rango de frecuencias de ensayo, requiriéndose para el mismo una primera frecuencia natural de vibración que superara la máxima frecuencia de excitación requerida en el ensayo.

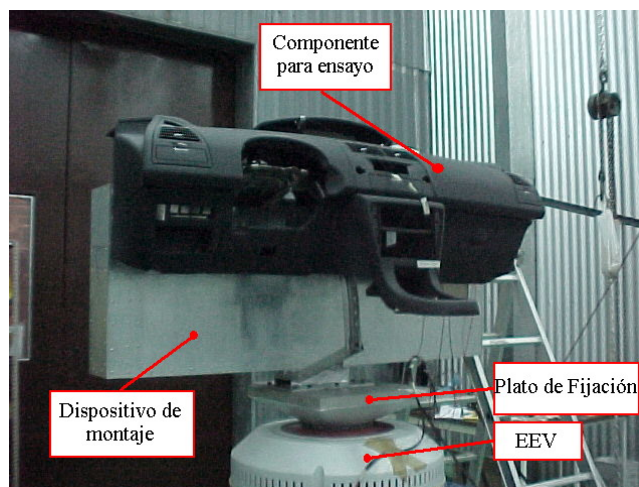


Figura 13: Ensayo de vibraciones con cicladros térmicos

4.2. Sector Aeroespacial

Se han realizado ensayos de vibraciones sobre dispositivos y mecanismos destinados a satélites. Es el caso de un satélite cuya principal carga útil es un Instrumento Radar de Apertura Sintética (SAR), que se utilizará entre otras cosas para el monitoreo, evaluación y prevención de desastres naturales, monitoreo de recursos agrícolas, hielos y zonas marítimas. Para esto, la antena del instrumento está formada por un conjunto de módulos irradiantes fijados a una estructura de soporte que le aporta la rigidez requerida y permite la fijación de la antena al satélite.

Dadas las dimensiones y los requerimientos de diseño y fabricación de los paneles estructurales, cada componente es ensayado durante las distintas fases del proyecto, pudiéndose clasificar los ensayos como:

- ✓ Ensayos de desarrollo
- ✓ Ensayos de calificación
- ✓ Ensayos de aceptación

Cada una de estas etapas requiere de la preparación de un Plan de Ensayos y cada ensayo particular tendrá su correspondiente Requerimiento, Procedimiento y Reporte de Resultados. Dentro del programa de ensayos establecido, se ha superado la etapa de desarrollo en el diseño y fabricación de algunos de los dispositivos y componentes de la antena, habiéndose ensayado alguno de los componentes con niveles de ensayo de calificación.

Los ensayos se realizaron sobre modelos de desarrollo, modelos estructurales y de ingeniería. Los modelos de desarrollo fueron utilizados en las primeras fases del proyecto donde se evaluaron las principales características funcionales y se establecieron las modificaciones necesarias. El modelo estructural, representativo de las características estructurales del mecanismo o dispositivo de ensayo, se utilizó para la calificación del diseño estructural del producto y para la verificación de la correlación de los resultados de ensayo con los modelos matemáticos de simulación. En tanto los modelos de ingeniería se usan para la calificación funcional de sistemas.

Las Figuras 14 a 17 muestran, como ejemplo de los ensayos realizados, los ensayos de vibraciones que se realizaron sobre uno de los dispositivos desde las primeras fases de los ensayos de desarrollo hasta los ensayos realizados con niveles de calificación. El dispositivo ensayado y mostrado en las Figuras 14 a 17 desde maquetas de prueba hasta modelos de tamaño normal, corresponde a uno de los Módulos Irradiantes que componen el elemento activo de la antena.

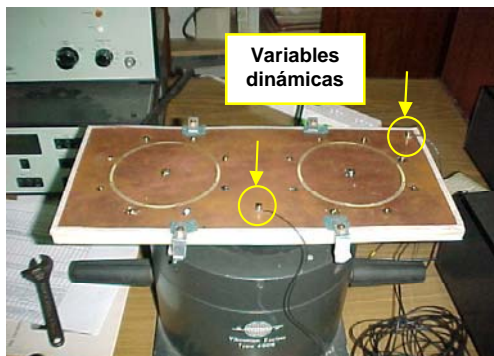


Figura 14: Selección de los materiales de fabricación

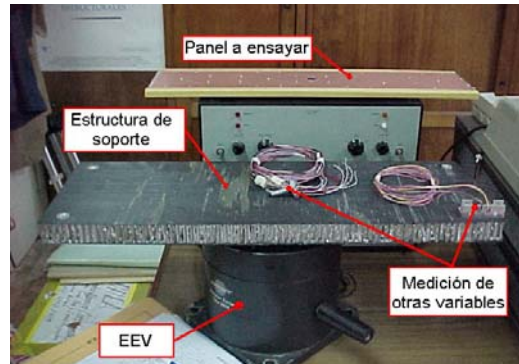


Figura 15: Verificación dinámica de componentes

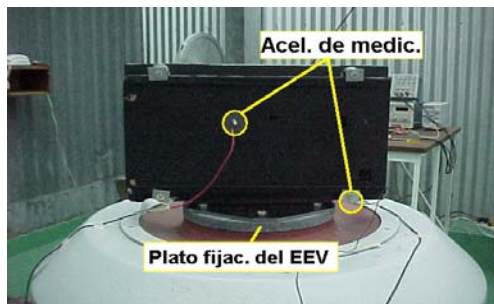


Figura 16: Ensayo de un modelo térmico

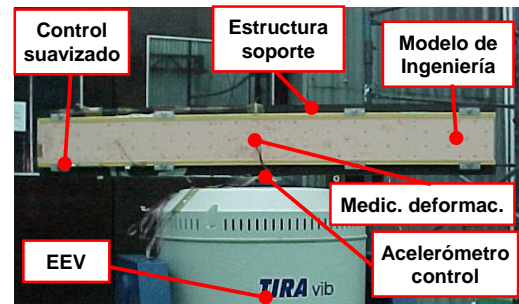


Figura 17: Ensayo de Modelo de Ingeniería

En los primeros ensayos realizados, se midió la respuesta dinámica del conjunto y las deformaciones en algunas de las fijaciones que vinculan el dispositivo con el soporte estructural, permitiendo definir la mejor selección de materiales para fabricar los Módulos Irradiantes y las cargas dinámicas que se producen en la estructura. Ambos

modelos de desarrollo (Figura 14 y 15) fueron excitados con espectros de aceleración indicados por normas de uso espacial. Se utilizaron tres tipos de excitaciones, cada una de ellas con diferentes objetivos.

- ✓ Impacto
- ✓ Barrido de frecuencias de vibraciones senoidales
- ✓ Vibraciones aleatorias

Los dos primeros ensayos, con excitaciones de baja amplitud, se utilizan para determinar los modos y frecuencias naturales de vibración del dispositivo bajo ensayo, con el objeto de caracterizar dinámicamente el componente. Todo cambio estructural en el panel a ensayar puede ser identificado con un cambio en estos parámetros. En tanto, los dos últimos tipos de ensayos con vibraciones de amplitud y composición en frecuencia similares a las que podría soportar en la realidad, se utilizaron para determinar las cargas dinámicas que se producen en el Módulo Irradiante o en alguno de sus componentes.

En el ensayo realizado con el Modelo de Ingeniería (Figura 17), los ensayos de barrido senoidal permitieron demostrar la capacidad del modelo para soportar las cargas cuasiestáticas producidas por el lanzador y representadas como excitaciones de baja frecuencia, en tanto que la excitación aleatoria ha demostrado la capacidad para soportar las excitaciones aleatorias de alta frecuencia que se tienen durante el lanzamiento.

Tal como lo especifican las normas de uso aeroespacial, los ensayos fueron realizados según tres ejes ortogonales. El ensayo presentado en la Figura 16 corresponde a un ensayo de vibraciones realizado sobre un modelo del Módulo Irradiante, el cual fue sometido previamente a un ensayo de ciclado térmico. El ensayo se realizó con el objeto de calificar el procedimiento de soldadura de algunos elementos del Módulo Irradiante.

En el ensayo que se presenta en la Figura 18, se observa el acelerómetro de control y el correspondiente al utilizado para el control de suavizado del espectro de excitación (como el observado en la Figura 7). Para este ensayo fue preciso además diseñar y fabricar una pieza especial de vinculación entre el EEV y el modelo a ensayar. Se utilizó el ensayo para verificar el comportamiento dinámico de algunos componentes utilizando acelerómetros y para evaluar las tensiones que soportaban otros elementos se utilizaron extensómetros eléctricos.

4.3. Sector Nuclear

Se presentan a continuación los ensayos de calificación realizados sobre fuentes selladas de Co-60, fuentes selladas de Co-59 y los ensayos de vibraciones realizados sobre lápices de Zircalloy. Las condiciones generales requeridas para estos ensayos fueron definidas por lo establecido para la Clase 3 de la norma ISO 2919-1999 (E). Según lo requerido por la norma, se excitó cada uno de los dispositivos de acuerdo con lo que se presenta en la Tabla I.

Tabla I: Espectro de excitación ISO 2919-1999 (E)

Eje	Frecuencia [Hz]	Amplitud	Tiempo
Radial	25 a 50	5.0 g_max	3 ciclos
	50 a 90	0.635 mmPap	a 10 min
	90 a 500	10.0 g_max	c/u
Long.	25 a 50	5.0 g_max	3 ciclos
	50 a 90	0.635 mmPap	a 10 min
	90 a 500	10.0 g_max	c/u

En la norma se especifica además que deben determinarse las frecuencias de resonancia presentes en el rango de frecuencias de excitación, para luego realizar un ensayo de vibraciones de 30 minutos de duración excitando la pieza con una amplitud de 10 g en cada una de las frecuencias encontradas. Estos ensayos, dados los requerimientos indicados por la norma y la poca masa del dispositivo, fueron realizados con el EEV de 112 N.

Posteriormente a cada ensayo se inspeccionó visualmente cada pieza para determinar eventuales fallas o roturas mecánicas. En las Figuras { RD "PANNDT 2007 Pablo - Con formato 10 pto.doc" \f }18 y 19 se observan los montajes para ensayo en distintos ejes de una de las piezas ensayadas.



Figura 18: Ensayo de vibraciones en eje longitudinal



Figura 19: Ensayo de vibraciones en eje radial

5. Comentarios finales

Los ensayos de vibraciones controladas en laboratorio, son una importante herramienta de apoyo para la industria ya que permiten simular diferentes condiciones de operación de componentes desarrollados o en servicio. Controlando las cargas dinámicas que se producen en la pieza estudiada, se pueden simular condiciones de operación.

Durante el proceso de calificación o el de aceptación de un producto, el dispositivo ensayado es sometido a ensayos de vibraciones cuyos niveles de excitación pueden superar los límites de operación previstos. También en la etapa de desarrollo, la posibilidad de realizar ensayos con vibraciones controladas, desempeña un rol significativo en la evolución de las distintas fases del proyecto dado que permiten determinar modos de falla, características operativas marginales del diseño y la verificación de los modelos matemáticos de simulación.

Tal como se presentó, los ensayos utilizando vibraciones controladas en laboratorio tienen un rango de aplicación que cubre desde ensayos de desarrollo de dispositivos con requerimientos críticos, tales como los realizados sobre componentes de uso aeroespacial o nuclear, hasta los realizados sobre productos de una línea de producción, como los de la industria automotriz.

Realizando ensayos de vibraciones adecuadamente programados y planificados, se obtiene desde la información necesaria para el desarrollo de nuevos productos o el mejoramiento de productos existentes, hasta la valoración de la calidad de los que salen de una línea de producción.