

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO VIBRATORIO DE DISTINTOS TIPOS DE FIJACIÓN DE TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS

PACS: 43.40.Yq

Búrdalo Salcedo, Gabriel^a; García Ortiz, Eduardo; Cepeda Riaño, Jesús; de Barrios Carro, Mercedes; Soto Fernández, Pablo

Laboratorio de Acústica Aplicada^b

Escuela de Ingenierías Industrial e Informática

Universidad de León. Campus de Vegazana, 24071 León (España)

Tfno-Fax: +34 987 291 777

E-mail: ^agabriel.burdalo@unileon.es; ^bacustica.lab@unileon.es;

WEB: <http://www3.unileon.es/lab/acustica>;

ABSTRACT

When measuring vibration, the different systems of joining the transducer to the test area must be emphasized. The joining way affects the frequency of resonance and, therefore, the transducer useful frequency range. Therefore it is important to ensure that the frequency response is the proper before initiating measures.

In this paper, the frequency response of different joining systems for a triaxial piezoelectric transducer, with the aim of comparing the transmission capacity of each one in identical vibrational excitation conditions.

RESUMEN

A la hora de realizar medidas de la vibración, hay que hacer especial hincapié en los distintos métodos de montaje del transductor sobre la superficie de ensayo. El método de fijación afecta a la frecuencia de resonancia y, por tanto, al rango de frecuencia útil del transductor. Por ello es importante asegurarse de que la respuesta en frecuencia es la adecuada antes de iniciar las medidas.

En la presente comunicación se analiza la respuesta en frecuencia de distintos sistemas de fijación de un transductor piezoeléctrico triaxial, con la intención de comparar la capacidad de transmisión de cada uno de ellos en condiciones idénticas de excitación vibratoria.

1. INTRODUCCIÓN

Antes de iniciar cualquier medida de vibración es importante asegurarse de que la respuesta en frecuencia es la adecuada. Cada uno de los distintos tipos de montaje de un transductor tiene ventajas e inconvenientes. La elección adecuada para un problema de medida concreto depende de varios factores, entre los cuales están los siguientes:

- Efectos del montaje sobre el rango de frecuencias útil del transductor.

- Efecto de la carga de la masa del montaje del transductor sobre la superficie de ensayo.
- Nivel máximo de vibración que puede aguantar el montaje.
- Temperatura máxima de funcionamiento.
- Precisión de medida.
- Posibilidad de repetir las medidas.
- Estabilidad del montaje a lo largo del tiempo.
- Requisito de que la superficie de ensayo no se dañe con los agujeros de los tornillos.
- Requisito de aislamiento eléctrico del transductor.
- Tiempo requerido para preparar el montaje.
- Tiempo requerido para quietar el montaje.
- Dificultad de limpieza del transductor después de su retirada de la superficie de ensayo.
- Dificultad de limpieza de la superficie de ensayo una vez retirado del transductor.
- Destreza requerida para preparar el montaje.
- Coste del montaje.
- Problemas ambientales.

El grado de confiabilidad de la respuesta a altas y bajas frecuencias está afectado directamente por la técnica de montaje seleccionada. En general, una mayor área de contacto superficial entre el sensor y la fuente de vibración dará como resultado una mayor frecuencia. La respuesta de frecuencia está basada en el sensor especificado así como el método de conexión (juntos como un sistema).

En el presente estudio se analiza la respuesta en frecuencia del sistema transductor-conexión, empleando seis métodos distintos de fijación, con la intención de evitar que pasen desapercibidos, en el diagnóstico final, fallos enmascarados por una inadecuada selección del sistema de fijación.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Antecedentes

Con esta base de partida, desde el equipo del Laboratorio de Acústica Aplicada de la Universidad de León se han realizado una serie de mediciones empleando tres posiciones distintas de fuente de excitación realizando 18 medidas por posición con un total de 54 mediciones.

2.2. Fuente de Excitación

Ante la ausencia de equipos generadores de vibraciones definidas y controladas, empleamos como fuente de excitación una máquina de impactos normalizada utilizada en las mediciones de aislamiento acústico a ruido de impactos.

Las especificaciones de la máquina son las siguientes:

Fabricante	Retec Instruments
Modelo	RI-069
Nº Serie	010214-01
Nº de martillos	5 martillos de 500 gramos/martillo
Espaciado longitudinal entre martillos	100 mm
Altura de caída de cada martillo	40 mm
Tiempo que transcurre entre dos martillos	100 ms

Tabla nº1- Especificaciones técnicas de la máquina de impactos

2.3. Instrumentación de Medida

El equipamiento utilizado para la realización de las tareas relativas a esta fase del estudio se detalla a continuación:

- Monitor de vibraciones.
- Acelerómetro triaxial ICP.
- Calibrador de vibraciones.

Monitor de vibraciones: *Marca: SVAN; Modelo: 948.* Se trata de un vibrómetro y analizador Tipo 1. Realiza mediciones en tiempo real de vibraciones en 4 canales simultáneamente. Permite realizar análisis FFT y en tiempo real por banda de 1/1 octava y 1/3 de octava.

Las características más relevantes aparecen detalladas en la siguiente tabla:

Precisión	Tipo 1: ISO 8041 (según ISO 2631-1&2, ISO 5349-1&2), ISO 10816-1.
Modo medidor	RMS, VDV, MTVV, Peak, Peak-Peak, Max, Min, Historial de Tiempo.
Filtros	Wk, Wc, Wd, Wj, Wh, Wm, HP1, HP3, HP10, Vel1, Vel3, Vel10, VelMF, Dil1, Dil3, Dil10, KB.
Rango de medición	0,003 ms ² RMS a 1000 ms ² Peak
Rango de frecuencia	0 Hz-20 kHz

Tabla nº2 – Características del analizador SVAN 948.

Acelerómetro: *Marca: PCB Piezotronics; Modelo: 356A02.* Se trata de un acelerómetro triaxial tipo Shear con una sensibilidad de 10 mV/g ICP (Ver Tabla nº 3).

ESPECIFICACIONES	UNIDADES	ACELERÓMETRO
Sensibilidad de Voltaje	mV/g	10
Rango de Frecuencias (+/-5%)	Hz	0,5 a 3.000
Rango de Frecuencias (+/-10%)	Hz	0,3 a 5.000
Frecuencia Resonante	kHz	≥25
Rango de Medición	+/- g pk	500
Voltaje de Excitación	VDC	20 a 30

Tabla nº 3 – Especificaciones técnicas del acelerómetro 356A02.

Calibrador de vibraciones: *Marca: RION CO LTD; Modelo: VE-10.* Nº de serie: 00131281. Frecuencia de calibración: 159,2Hz. Aceleración: 10 m/s² // Velocidad: 10 mm/s // Desplazamiento: 10µm.

2.4. Mediciones

Al no existir un criterio de índole normativo, todas las mediciones se han llevado a cabo bajo convenios particulares establecidos exclusivamente para nuestro estudio.

El ensayo se dividió en tres fases de medida dependientes de la ubicación de la fuente de vibración.

Dichas fases se resumen a continuación: (Ver Figura nº1)

- Fase de medida nº 1: Máquina de impactos situada sobre la mesa de ensayo.
- Fase de medida nº 2: Máquina de impactos situada sobre el suelo siguiendo la misma proyección perpendicular con respecto a la posición inicial.
- Fase de medida nº 3: Máquina de impactos situada sobre el suelo y alejada de la mesa de ensayo.

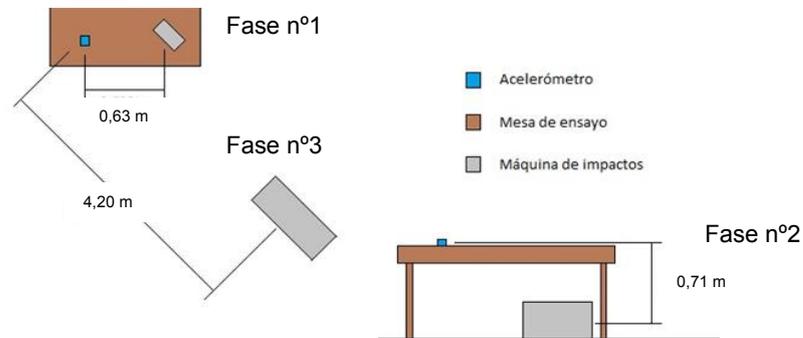


Figura nº 1 – Distribución de las posiciones fuente - acelerómetro

En cada una de las fases, el acelerómetro se fijó, sobre la mesa de ensayo, siempre en el mismo punto y con la misma orientación de sus ejes X, Y y Z.

Los sistemas de fijación del transductor se han modificado para cada una de las posiciones de fuente. Los sistemas empleados han sido los siguientes:

- 1.- Unión roscada con pegatina de doble cara.
- 2.- Unión roscada.
- 3.- Pegatina de doble cara.
- 4.- Cera de abeja (Figura nº2).
- 5.- Cianoacrilato.
- 6.- Silicona fría.



Figura nº 2 – Fijación con cera de abeja

Una vez definidas las posiciones de la fuente de vibraciones y los distintos tipos de unión utilizados se realizaron las mediciones. En total se registraron 3 medidas por cada una de las tres posiciones de fuente y por cada uno de los seis sistemas de fijación, por lo que el total de registros asciende a 54.

La **configuración del analizador** se describe a continuación:

- Calibración: Por sensibilidad.
- Delay: 3 segundos.
- Tiempo de integración: 10 segundos (en la medida de vibraciones es la duración de la medida).
- Constante de tiempo en cada canal: 1 segundo.
- Medida lineal de la amplitud.
- Rango de medida: 17,8 m/s² y 316 m/s².
- Rango de frecuencias: de 0 Hz a 20 kHz.
- Filtros de ponderación: HP1 (filtro paso alto con frecuencia de corte de 1Hz)
- Almacenamiento automático de Buffers asociados. Los valores almacenados son Pico, Pico-Pico, Máximo y RMS.

La **configuración del analizador FFT** es la siguiente:

Si tenemos en cuenta que el rango de frecuencias estudiado está comprendido entre 0 Hz y 20 kHz, para la adquisición de la señal se ha empleado un muestreo de 1.600 líneas, por lo que la resolución espectral con la que se ha realizado el análisis es de 12,5 Hz/línea (ancho de banda). La ventana seleccionada para la obtención de resultados en el dominio de la frecuencia es la de HANNING ya que ofrece una mejor resolución frente a la ventana de FLAT-TOP aunque el error en amplitud sea superior a esta última.

3. RESULTADOS

En este apartado se va a realizar una comparación de los resultados obtenidos en las diferentes mediciones tanto para cada posición de fuente de vibración como para cada una de los diferentes tipos de unión que se emplean. Para realizar las comparaciones nos valdremos de los espectros de las medidas obtenidos aunque previamente se expondrán los criterios establecidos para llevarlo a cabo:

- Teniendo en cuenta que los valores obtenidos en todas las medidas nos ofrecen resultados poco representativos en los ejes X e Y frente a los obtenidos en el eje Z, las comparaciones se van a realizar exclusivamente entre los resultados obtenidos en el eje Z de los espectros de cada medida.
- Al disponer de tres resultados por cada tipo de fijación, las comparaciones se van a llevar a cabo entre los valores medios obtenidos por cada sistema de fijación.
- Se hará una comparación de las medidas de cada tipo de unión, para cada posición de la fuente de vibración.

La secuencia de comparación se establecerá de la siguiente manera:

Fase de medida nº 1.- La fuente vibratoria y el transductor piezoeléctrico se sitúan sobre la mesa distanciados entre sí 0,63 m.

En la tabla adjunta se muestran los valores de los distintos rangos de frecuencia que abarca cada tipo de unión así como el valor de aceleración RMS más elevado registrado.

Tipo de unión	Rango de frecuencia (Hz)	Valor RMS (m/s ²)
Unión roscada + pegatina	400 – 1000	13,289
Unión roscada	400 – 1000	12,853
Pegatina de doble cara	400 – 1400	17,258
Cera de abeja	400 – 1200	12,092
Cianoacrilato	300 – 1200	12,148
Silicona fría	300 – 1200	12,942

Tabla nº 4 - Comparativa de los resultados obtenidos en la fase de medida nº 1

Como podemos observar en la Tabla nº 4 el tipo de unión que tenemos va afectarnos, en mayor o menor grado, al rango de frecuencias en el que se encuentran los valores de aceleración RMS más significativos. Podemos observar que el rango es menor en las uniones roscadas, sin embargo el rango más amplio lo vamos a conseguir con la pegatina de doble cara.

En cuanto al nivel de transmisión de los distintos tipos de unión podemos observar que, de los seis tipos de fijación sometidos a estudio, la pegatina de doble cara es la que ofrece una menor atenuación y como consecuencia una mayor transmisión de la energía vibratoria.

Por otro lado podemos decir que la cera de abeja y el cianoacrilato son los que nos ofrecen una mayor atenuación o una menor capacidad de transmisión de la vibración.

Fase de medida nº 2.- Recordemos que en este caso la fuente vibratoria se sitúa sobre el suelo en el mismo plano perpendicular al de la fase de medida nº 1. El acelerómetro se encuentra a una altura de 0,71 m con respecto al suelo.

Tipo de unión	Rango de frecuencia (Hz)	Valor RMS (m/s ²)
Unión roscada + pegatina	250 – 2800	0,995
Unión roscada	250 – 1400	1,038
Pegatina de doble cara	250 – 2000	1,235
Cera de abeja	275 – 1200	0,885
Cianoacrilato	250 – 1600	1,020
Silicona fría	250 – 5200	1,157

Tabla nº 5 - Comparativa de los resultados obtenidos en la fase de medida nº 2

Podemos observar que el límite inferior de todos los rangos prácticamente se mantiene constante ya que oscila entre 250 y 275 Hz, pero no podemos decir lo mismo del margen superior.

Es de destacar el comportamiento de la silicona fría frente al resto de sistemas de fijación al ofrecemos un rango de frecuencia muy superior al resto de sistemas. Al igual que en la fase de medida nº 1 la cera de abeja sigue ofreciéndonos un rango de frecuencias inferior.

Si atendemos a los niveles de aceleración RMS que se nos presentan, podemos ver que, al igual que en el caso anterior, la pegatina de doble cara nos aporta niveles superiores al que nos ofrecen el resto de dispositivos. Si comparamos las dos fases de medida atendiendo al valor RMS vemos que la silicona fría pasa a ser un tipo de unión que muestra una gran capacidad de transmisión fundamentalmente a altas frecuencias. El resto de uniones podemos decir que ofrecen el mismo comportamiento.

Fase de medida nº 3.- La fuente vibratoria sigue situada sobre el suelo aunque distanciada 4,20 m respecto al transductor piezoeléctrico.

Tipo de unión	Rango de frecuencia (Hz)	Valor RMS (m/s ²)
Unión roscada + pegatina	150 – 4100	0,063
Unión roscada	150 – 4500	0,056
Pegatina de doble cara	150 – 2300	0,072
Cera de abeja	250 – 4000	0,094
Cianoacrilato	125 – 4500	0,071
Silicona fría	100 – 4400	0,084

Tabla nº 6 - Comparativa de los resultados obtenidos en la fase de medida nº 3

En este tercer caso podemos observar que el rango de frecuencias es más amplio que en las fases de medida anteriores.

Queda claro que variando las condiciones de medida los resultados son bastantes dispares si los comparamos entre sí. En este ensayo la cera de abeja es el sistema de fijación que mejor transmite la vibración y por tanto el que menos atenúa. El resto de uniones también han variado su comportamiento denotando que el tipo de condiciones de ensayo afecta a las medidas registradas.

4. CONCLUSIONES

Resulta complejo emitir juicios de valor para cada uno de los sistemas de fijación estudiados debido a la inexistencia de un patrón de referencia con el que comparar los resultados obtenidos. La fuente de vibración empleada resulta efectiva de cara a poder comparar los resultados de las mediciones entre sí, ya que estamos empleando idéntica fuente de excitación en cada medida, aunque resultaría interesante comparar los resultados con un patrón de referencia y evaluar la desviación provocada.

Los aspectos más relevantes a destacar son los siguientes:

- La respuesta a bajas frecuencias puede ser obtenida por cualquiera de los sistemas estudiados anteriormente, porque la frecuencia baja no está basada en la resonancia del sensor de sistema de montaje y del método de fijación. La capacidad de medir vibraciones de baja frecuencia será una función de la capacidad específica del sensor y no el dependiente en la técnica de montaje elegida.
- La frecuencia de resonancia del acelerómetro es modificada sustancialmente, de acuerdo al método de fijación y a su rango útil, se ve modificado.
- La distancia a la que se encuentre la fuente de vibración con respecto al transductor piezoeléctrico, va a afectar al rango de frecuencias en las que aparecen los niveles RMS más significativos. Esto nos indica que cuanto mayor es esa distancia más amplio es el rango en el que se concentran dichos valores.
- En relación con la conclusión anteriormente citada, podemos determinar que el comportamiento vibratorio de los diferentes tipos de unión estudiados depende de la posición en la que se encuentre la fuente vibratoria con respecto al transductor piezoeléctrico, es decir, hay sistemas de fijación que, en mayor o menor medida, presentan una mayor capacidad de transmisión de la energía vibratoria en función de la distancia a la fuente de excitación.
- En el caso de la cera de abeja, es la que menor atenuación de energía vibratoria presenta cuanto más alejada está la fuente de vibración con respecto al transductor. Sin embargo, cuanto más cerca de la fuente se encuentra el transductor, menor es el grado de transmisión. Por el contrario la pegatina de doble cara tiene un comportamiento inverso ya que cuanto más próximo se encuentre el acelerómetro

menor va a ser la atenuación de energía y como consecuencia captan picos de nivel RMS de mayor amplitud que en el resto de los montajes probados.

Desde el Laboratorio de Acústica Aplicada de la Universidad de León se ha elaborado una sencilla clasificación de los sistemas de fijación estudiados en base a su grado de transmisión, la cual no deja de ser una mera orientación y primera aproximación en la elección de los mismos (Tabla nº7). En ella se incluyen los tres sistemas de fijación más efectivos en función de la distancia entre la fuente de vibraciones y el transductor.

Tipo de unión	Sistemas de fijación
Fase de medida nº 1	Pegatina de doble cara. Unión roscada + pegatina. Silicona fría.
Fase de medida nº 2	Pegatina de doble cara. Silicona fría. Unión roscada.
Fase de medida nº 3	Cera de abeja. Silicona fría. Pegatina de doble cara.

Tabla nº 7 - Clasificación de las fijaciones en función del grado de transmisión.

Atendiendo a la tabla anterior podemos concluir que la pegatina de doble cara y la silicona fría, pueden considerarse como las dos uniones que mayor grado de transmisión presentaron frente a los demás sistemas.

Lógicamente cabe destacar que la elección del sistema de fijación depende de multitud de factores, tal y como se mencionó en la introducción, que en algunos casos son incompatibles con las condiciones ideales que se presentan en el estudio.

REFERENCIAS

- [1] Búrdalo Salcedo, Gabriel; García Ortiz, Eduardo; Cepeda Riaño, Jesús; Fuentes Robles, Marcos; de Barrios Carro, Mercedes. *“Diagnóstico de fallos en compresores recíprocos semiherméticos mediante análisis espectral de vibraciones”*. Laboratorio de Acústica Aplicada – Universidad de León. V Congreso Ibero-Americano de Acústica (2008), Coimbra (Portugal).
- [2] C. M. Harris; *Manual de medidas acústicas y control de ruido*. Ed. McGraw-Hill. Madrid (1998).
- [3] García Ortiz, E; Búrdalo Salcedo, G; Cepeda Riaño, J; Fuentes Robles, M; de Barrios Carro, M. *“Analysis of the vibrations in refrigerating compressors. Development of practical case”*. Applied Acoustic Laboratory – University of León. 2007 Congress and Exposition on Noise Control Engineering. *Internoise 2007, Estambul (Turquía)*.