



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

METODOLOGÍA PARA MEDIR LA POTENCIA ABSORBIDA EN EL EJE Z DEL SISTEMA MANO-BRAZO DEBIDA A IMPACTOS.

PACS: (43.20.Ye Métodos de medida e instrumentación).

Fernández Zacarías, Francisco; Rincon Casado, Alejandro¹; Ayuso Vilacides, Jesús¹; Hernández Molina, Ricardo¹; Cueto Ancela, José Luis¹.

¹Laboratorio de Ingeniería Acústica. Universidad de Cádiz, Puerto Real, Cádiz, España.

Tfno.: 956016140. francisco.fernandez@uca.es, alelelandro.rincon@uca.es, jesús.ayuso@uca.es, ricardo.hernandez@uca.es, jose Luis.cueto@uca.es

Palabras Clave: Analisis modal, Potencia absorbida sistema mano-brazo, Función de transferencia.

ABSTRACT

There are activities focused on several areas that make use of percussion tools, which generate significant vibration peaks, and in some cases. The main objective of this work is to describe a methodology to estimate the power absorbed by the hand-arm system, due to the vibrations transmitted by the percussion tools. It is a methodology that uses modal analysis to solve certain difficulties derived from the movement of the accelerometer placed in the hand of the worker, when the mobile reference system in which the accelerator is supported can show measurement errors.

RESUMEN

Existen actividades enfocadas a distintos ámbitos que hacen uso de herramientas de percusión, la cuales generan picos importantes de vibraciones, y en algunos casos, la frecuencia de la actividad y el tiempo de exposición pueden llegar a ser significativos. El objetivo de este trabajo se centra en describir una metodología para estimar la potencia absorbida por el sistema mano-brazo, debida a las vibraciones transmitidas por herramientas de percusión. Se trata de una metodología que emplea el análisis modal para solventar ciertas dificultades derivada del movimiento del acelerómetro colocado en la mano del trabajador, cuando el sistema de referencia móvil en el cual se apoya el acelerómetro puede arrojar errores de medidas. Para la estimación de la potencia se hará uso de uno de los modelos incluido en la norma ISO 10068.

1. INTRODUCCIÓN

No cabe duda de que existen numerosas actividades que hacen uso de herramientas de percusión, en el ámbito de la construcción, carpintería, actividades deportivas, etc. El uso de esta herramienta significa impactos absorbidos por el sistema mano-brazo (SHA) de corta duración pero de mucha intensidad, con una cadencia de repetición que en algunos casos pueden ser



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

relativamente corta, llegando a ser de hasta 2 golpes por segundo, como es el caso de las fuerzas y cuerpos de seguridad. Por tanto, la pregunta que surge es si este tipo de herramientas pueden ser objeto de lesiones durante su uso.

Se sabe que las vibraciones altamente impulsivas también originan síndromes de dedo blanco [1], por tanto, hay que ser precavido debido a que uno de los problemas de la impulsividad es que la el valor eficaz (rms) de aceleración de la vibración infravalora los picos elevados de corta duración, que pueden ser un peligro, dado que contribuye al desarrollo de la enfermedad inducida por vibraciones [2]. También se han comparado las respuestas biodinámica entre distintas subestructuras observándose que las aceleraciones medidas en la muñeca y el codo están correlacionadas con la aceleración de la herramienta, en el espectro frecuencial ISO [3]. Además de los trastornos en las subestructuras también se están teniendo en cuenta otro tipo de efectos por ejemplo, el daño inducido en los glóbulos rojos por exposición a vibraciones impulsiva[4].

Diversas investigaciones indican que la postura, el tamaño del mango y la fuerza de presión sobre el mango influyen en la potencia absorbida por el sistema mano-brazo [5]–[9]. Sin embargo, no todos con la misma ponderación, siendo los más influyentes el tamaño del mango y la fuerza de empuje [6], [7]. También se ha llegado a la conclusión de que la relación entre la fuerza de contacto y el diámetro del mango es aproximadamente lineal y que en el agarre aparecen fuerzas máxima y mínima ortogonales, siendo la máxima 1.42 veces la mínima, que se ubicada a 78º del eje z(h) [10], es decir, también aproximadamente ortogonal al eje z(h), y que coincide aproximadamente con la dirección de la fuerza de impacto en las defensas policiales. En cuanto a la impedancia mecánica “Z” (relación entre la fuerza y la velocidad), se ha llegado a la conclusión que si bien la la impedancia mecánica en el punto de medida aumenta con la fuerza de la mano y es insensible a las variaciones en la magnitud de excitación y a la postura mano-brazo [8]. Así mismo, sufre variaciones extremas en alta frecuencia, por encima de los 500 Hz [11], que podrían ser debida a las contribuciones de la inercia del mango en las frecuencias más altas y haciendo difícil su completa eliminación mediante la cancelación de masas [11]. En el caso de que se desconozca la dirección de la excitación, algunos investigadores proponen el uso de la impedancia radial única para los ejes x y z, en lugar de las rectangulares propuesta por la normativa ISO 10068 [12].

Sin embargo, cuando queremos determinar la potencia absorbida por actividades derivadas de herramientas de percusión, uno de los problemas que surgen al trabajar con el acelerómetro en la mano del individuo se focaliza en la estimación de la cinemática de la base del acelerómetro antes del impacto. En el estudio cinemático aparecen fuerzas normales y tangenciales, así como sus aceleraciones correspondientes. Este estudio cinemático complica bastante el trabajo sobre todo teniendo en cuenta que los sistemas en si son no baricentricos y que el momento de inercia respecto al eje de rotación varía con la posición de los brazos. No obstante, existen equipos para estimar la cinemática 3D, pero dichos equipos son relativamente costosos, sobre todo teniendo en cuenta que sólo necesitamos la cinemática justo antes del impacto, que representarán las condiciones iniciales del sistema. Por tanto, una solución que simplifica bastante el proceso sería pasaría por *determinar la función de transferencia de la herramienta objeto de estudio mediante análisis modal y, por tanto, la aceleración de entrada al sistema mano-brazo, con el conocimiento previo de la FFT de la fuerza de impacto.*

1.1. Objetivo.

El objetivo de este trabajo se centra en describir una metodología para determinar la potencia absorbida por el sistema mano-brazo, debida a las vibracones resultante de actividades que requieren del uso de herramientas de percusión.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para determinar la potencia absorbida por el SHA en z(h) debido al uso de herramientas de percusión:

- A) Determinar la función de respuesta en frecuencia (FRF) o función de transferencia mediante análisis modal de la herramienta objeto de estudio. A tener en cuenta que el ancho de banda según la normativa ISO 10068 va desde los 10 Hz hasta los 500 Hz, aunque el estudio se puede extender hasta los 1000 Hz.
- B) Registros de la FFT de la fuerza de impacto.
- C) Estimación de la aceleración de entrada en el SHA debido al impacto.
- D) Cálculo de la Respuesta biodinámica (RB).
 - a. Elección del modelo sistema mano-brazo.
 - b. Determinación de la masa aparente (AM) del modelo elegido.
 - c. Cálculo de la potencia absorbida con y sin filtro Wh.

Para llevar a cabo esta metodología es necesario disponer al menos de los siguientes instrumentos:

- Analizador de al menos dos canales, aunque lo deseable sería disponer de 6 canales para el registro simultáneo de los 6 ejes ortogonales en una sola medida. Medida de cada uno de los ejes de aceleración y de fuerza de impacto en sus tres ejes ortogonales. Para el caso que nos ocupa, y como ejemplo práctico, se ha usado un analizador Svan 958 de 4 canales.
- Los transductores para medida de impactos y aceleraciones, a ser posible triaxiales, las características dependerá de la aplicación, sin embargo, el acelerómetro debe ser de baja sensibilidad. Como caso práctico caso se ha usado los transductores de fuerza 1053V4 (Dytran) y 086C03 (PCB), y el acelerómetro triaxial 3023A de 10mV/g.
- Equipos para calibrar la cadena de medida. Para el caso práctico sólo se ha usado el calibrador de vibraciones SV111 (Svantek).
- Equipo de condiciones ambientales para conocer que se trabaja dentro de rango y garantizar la fiabilidad de las medidas.
- Software para análisis de señales: Matlab o cualquier software de tratamiento de datos.

Para el caso práctico se usó una defensa policial de madera, de 316.2 gr, 58 cm de longitud y 2.91 cm de diámetro.

2.1. Qué es la FRF.

Toda estructura tiene al menos una frecuencia natural y oscilará si se le aleja de su posición de reposo. El fenómeno de resonancia ocurre cuando la estructura es excitada a su frecuencia natural. La FRF es una función del plano complejo que representa la respuesta de una estructura en función de la excitación en el dominio de la frecuencia. Por tanto, la FRF permite conocer las frecuencias de resonancia de la propia estructura, es decir, los máximos del módulo de dicha función.

Las herramientas de percusión representan un modelo de múltiples grados de libertad y su estudio dinámico se define mediante la siguiente ecuación diferencial (ed):

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Siendo M la matriz de masa, C la matriz de factores de amortiguamiento y K la matriz de rigidez. Si las condiciones iniciales son nulas la admitancia, es decir la FRF de esta ed., viene expresada de la siguiente forma:

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIAACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = [Ms^2 + Cs + K]^{-1} \quad (2)$$

La representación gráfica de esta función sería la mostrada a continuación, figura 1.

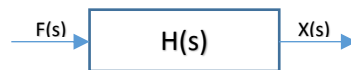


Figura 1. Diagrama de H(s)

La solución general del sistema representado por la expresión (2) viene definida por la siguiente expresión:

$$H(s) = \sum_{k=1}^N \frac{R_i}{s - \lambda_i} + \frac{R_i^*}{s - \lambda_i^*} \quad (3)$$

Siendo R_i las matrices residuos y λ_i , los autovalores de la ecuación diferencial planteada. Bajo el supuesto de amortiguamiento proporcional, también se podría representar de la siguiente forma:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \sum_1^n \frac{\phi_{jr} \phi_{kr}}{s^2 + 2\xi_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} \quad (4)$$

Siendo ω_{ni} los autovalores las raíces del denominador y ϕ la matriz modal.

Para este estudio usaremos la función de transferencia vinculada a la acelerancia, con objeto de analizar la aceleración en el mango de la defensa frente a los impactos. Esta función viene dada por la siguiente expresión.

$$G(s) = \frac{\ddot{x}(s)}{F(s)} = s^2 H(s) \quad (5)$$

Donde $s = j\omega$, una variable del plano complejo

Sin embargo, para conseguir la función de transferencia podemos usar estimadores:

$$H_1(\omega) = \frac{S_{FX}(\omega)}{S_{FF}(\omega)}; H_2(\omega) = \frac{S_{XX}(\omega)}{S_{XF}(\omega)} \quad (6)$$

Siendo $S_{FX}(\omega)$ la densidad espectral de potencia cruzada (PSD) autoespectro cruzado y $S_{FF}(\omega)$ ó $S_{XX}(\omega)$ el autoespectro en $(ms^{-2})^2 s^{-1}$, para el caso de la aceleración. H_1 será más adecuada si tenemos ruido a la salida, y H_2 si lo tenemos a la entrada.

La función de coherencia obtenida para dos registros simultáneos de las señales de salida tiene valores próximos a la unidad para las frecuencias naturales de la estructura [13], [14].

$$\gamma^2 = \frac{H_1(\omega)}{H_2(\omega)} \quad (7)$$

2.2. Análisis modal. Determinación de la FRF.

La cadena de medida para el propósito de este trabajo se muestra en la figura 2. En ésta se puede observar el punto de medida de interés, la mitad del mango de la herramienta, -punto vinculado a la aceleración de entrada al sistema mano-brazo- y el punto de impacto del martillo

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

a aprox. 10 cm del extremo opuesto a uno puesto, ubicación próxima al punto de impacto durante el uso habitual de la defensa.

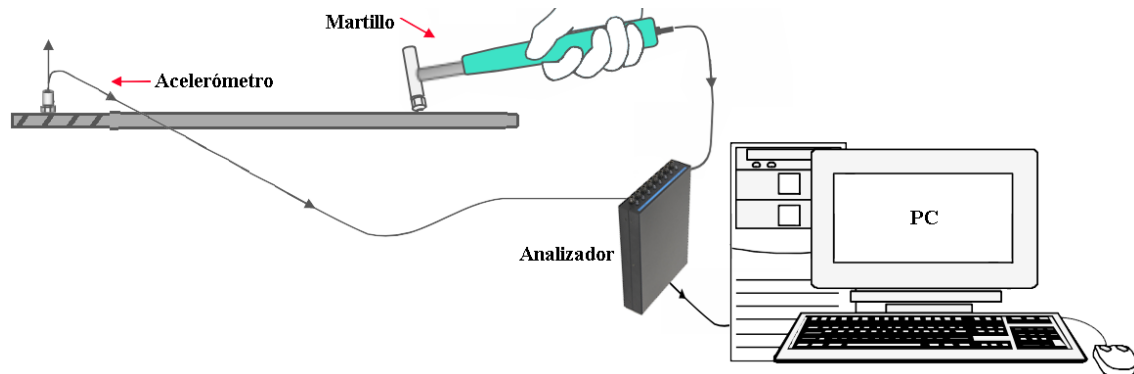


Figura 2. Cadena de medida para análisis modal.

Para este análisis se realizan una serie de golpes, registrando los datos en bruto (wav) en función del tiempo, para posterior análisis en matlab. Debido al ancho de banda de 500 Hz es necesario una frecuencia de muestreo de al menos 1 KHz.

Para determinar la función de transferencia se procede según la ecuación (6) y (7), comprobando que la coherencia esté por encima de 0.75 en las frecuencias de resonancias.

2.3. Registro de la fuerza de entrada

Para registrar la fuerza de entrada es suficiente con realizar un registro en el dominio temporal para convertirlo posteriormente al dominio de la frecuencia, o directamente en FFT para el ancho de banda objeto de estudio, es este caso, desde los 10 Hz hasta los 500 ó 1000 Hz. La figura 3 muestra, a título de ejemplo, el registro de golpes consecutivos simulando una situación real.

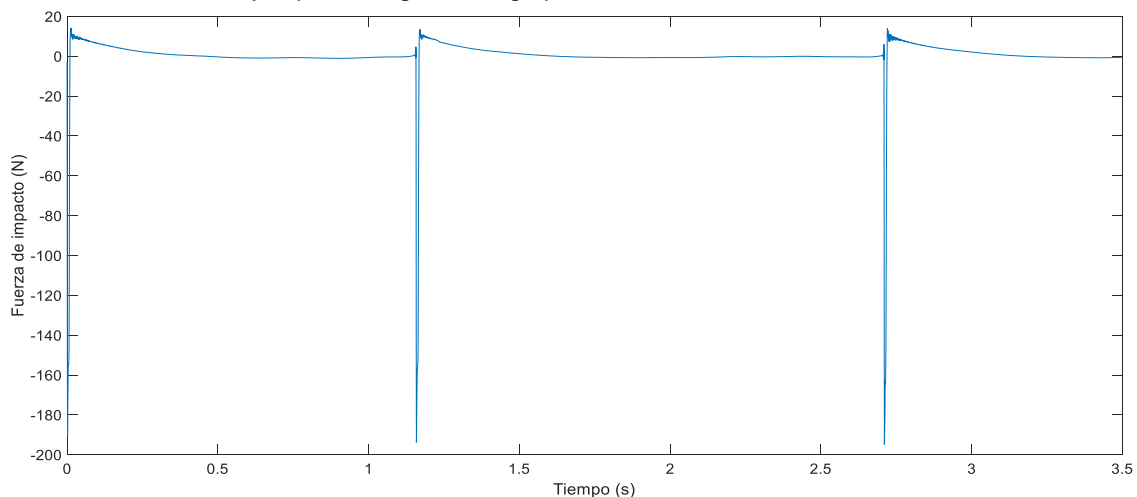


Figura 3. Respuesta de los impactos con la herramienta en el dominio del tiempo.

2.4. Cálculo de la respuesta biodinámica (RB)

Para caracterizar la RB del sistema mano-brazo frente a la vibración se usará un modelo mecánico equivalente para determinar la masa aparente. Aunque es recomendable usar un modelo de orden superior, de al menos 3 grados de libertad como el de la figura 4.a), por

simplicidad, en el ejemplo usaremos uno de 2 grados de libertad, figura 4.b).

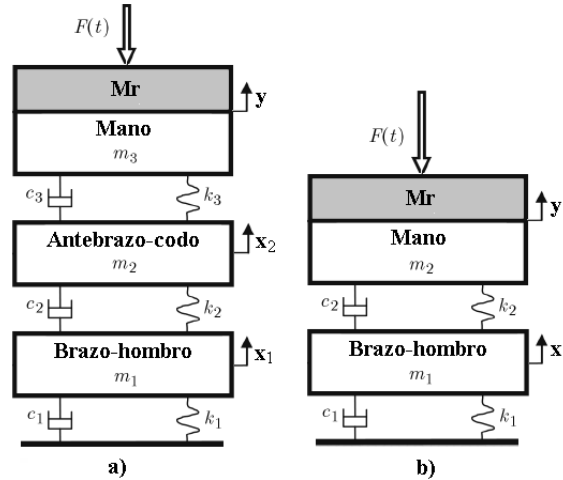


Figura 4. Modelos y herramienta según ISO 10068:2012

El sistema de referencia elegido sería el propuesto en la ISO 10068:2012. El eje z es ortogonal a eje longitudinal del mango de la herramienta, el eje y alineado con el eje del mango de la herramienta, y el eje x ortogonal a ambos. El centro de coordenadas ubicado en el eje de la herramienta.

Si aplicamos la ecuación (1) al modelo de la figura 4.b), obtendremos la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F(t) \\ 0 \end{pmatrix} - m_r \ddot{y} \quad (8)$$

De la cual se deduce que la masa aparente (AM) en función de la frecuencia será:

$$AM = M_h(\omega) = \frac{j\omega c_2 + k_2}{\omega^2} \left[1 - \frac{j\omega c_2 + k_2}{[-\omega^2 m_1 + j\omega(c_1 + c_2) + k_1 + k_2]} \right] - m_2 \quad (9)$$

Con la masa aparente, la impedancia mecánica (MI) puede ser expresada mediante la ecuación:

$$MI(\omega) = j\omega \cdot AM(\omega) \quad (10)$$

Si tenemos en cuenta que la impedancia mecánica está vinculada a la potencia según la siguiente relación:

$$MI = Z_h = \frac{P}{|V|^2} (\cos\theta + j\sin\theta) \quad (10)$$

La parte real de esta potencia compleja refleja la energía absorbida por la estructura, mientras que la parte imaginaria refleja la energía almacenada en los elementos elásticos. Por tanto, la potencia absorbida por el sistema mano-brazo se podrá estimar con la siguiente ecuación:

$$P_h(\omega) = Re[Z_h] \left| \frac{a(\omega)}{\omega} \right|^2 \quad (11)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis modal permite determinar la función de transferencia definida por la expresión (5). En

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

este caso se han empleado los estimadores de la expresión (6). Matlab permite obtener la gráfica de la figura 5 realizando en matlab las operaciones necesarias. En dicha figura se muestra la relación entre la aceleración en el mango de la defensa (elemento objeto de estudio) y la fuerza de entrada, aplicada en el otro extremo, como se muestra en la figura 2.

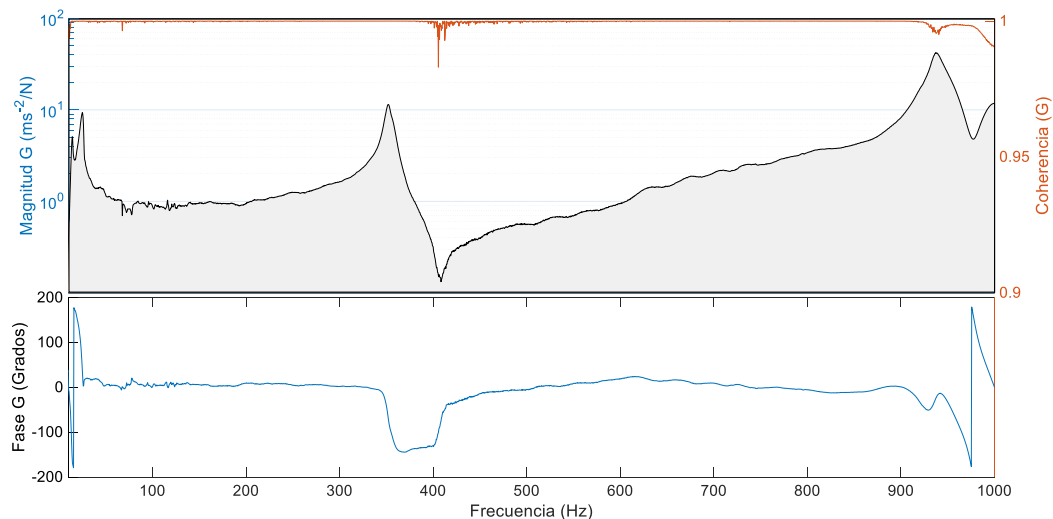


Figura 5. Estimación de la acelerancia $G(\omega)$ para el eje paralelo a la fuerza.

Para estimar conseguir los resultados mostrado en la gráfica de la figura 5 se ha usado el martillo con punta media. La dirección representada en dicha figura corresponde al eje z del acelerómetro, es decir, paralelo a la fuerza de impacto. Este proceso se debe repetir para el eje x e y.

Por otro lado, de la gráfica es posible determinar las frecuencias de resonancia y, por tanto, las frecuencias naturales, así como el ratio de amortiguación. En este caso las frecuencias de resonancia están en 13.6, 24.4, 351.6 y 938.4 Hz. No obstante, podría ocurrir que el punto de medida testeado coincidiera con algún nodo de vibración, ocultando algunas frecuencias de resonancia. Para comprobar esta situación habría que ampliar los puntos de medida, sin embargo, esta profundidad sólo sería interesante si no estamos seguros de cuáles son los puntos de la función de transferencia que se necesitan estimar.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

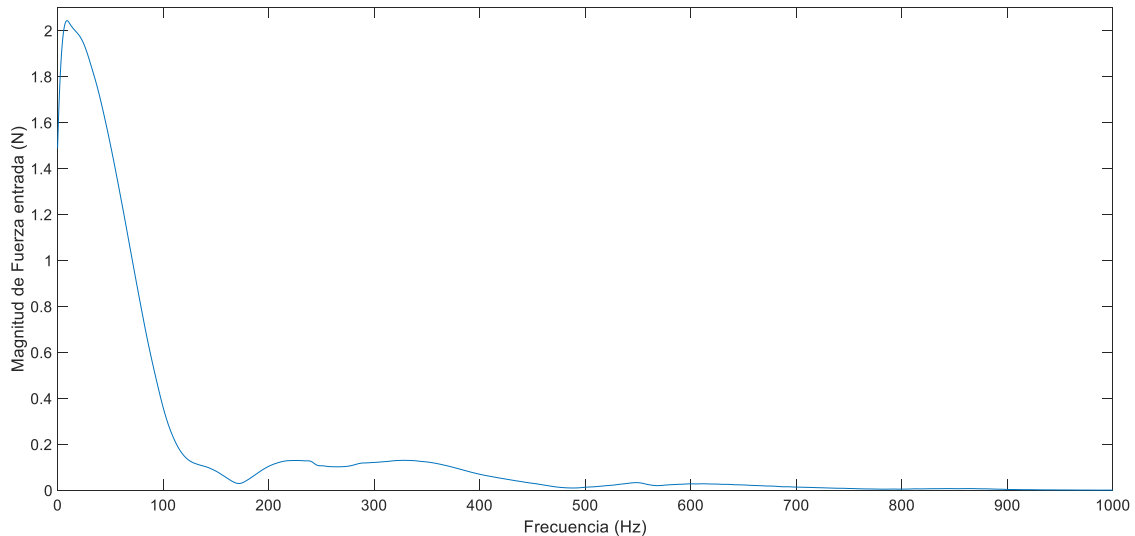
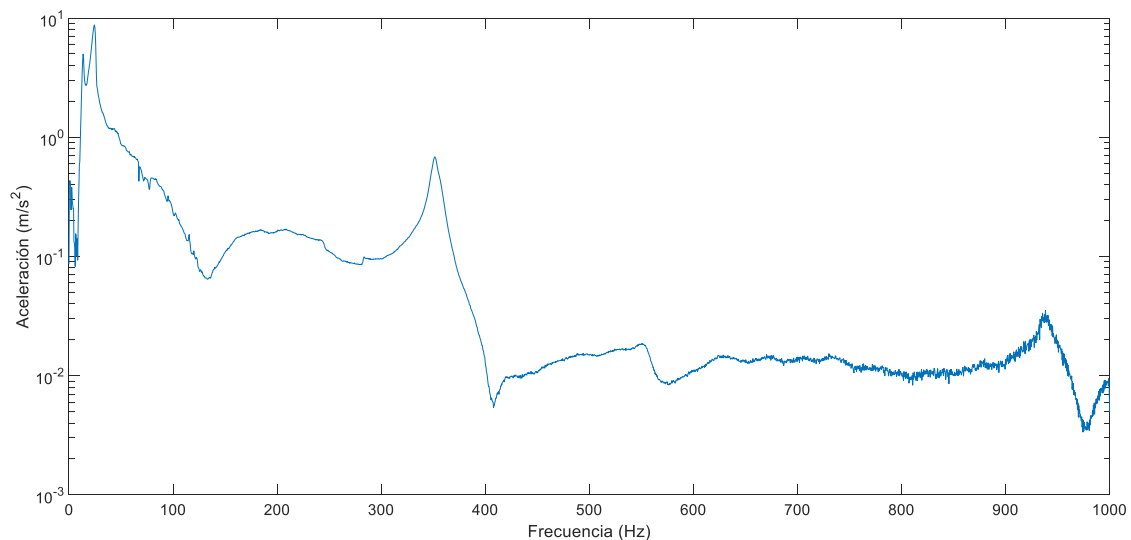


Figura 6. Fuerza de golpeo del objeto de estudio (Fuerza de entrada al sistema).

Aunque es cierto que para determinar la potencia absorbida no es necesario conocer las frecuencias de resonancias y la masa reducida en la función de transferencia obtenida, sin embargo, se trata de un indicador para saber cual peligroso es el material o la composición del instrumento para saber si están próximas a las frecuencias de resonancia del sistema mano-brazo y los valores de potencia que podrían alcanzar.

La gráfica 6 representa la fuerza de golpeo en el dominio de la frecuencia. Esta fuerza se corresponde con la mostrada en la figura 3, sin embargo, ha sido acotada previamente en los límites superiores e inferiores. En la gráfica se puede observar que la energía es relativamente pequeña, sin embargo, el uso de elementos de percusión pueden significar valores de pico de 10 kN, con lo cual la potencia absorbida por el sistema mano-brazo podría ser significativa.

El producto de la fuerza de entrada por la función de transferencia permite obtener la aceleración en el mango, punto de entrada al sistema mano-brazo. La figura 7 muestra su espectro, donde se puede observar que las bajas frecuencias tienen los valores predominantes, siendo poco significativos, en este caso, las altas frecuencias.



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIAACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

Figura 7. Aceleración debida a la fuerza del golpeo reiterada.

En cuanto a la impedancia necesaria para obtener la potencia absorbida (11) la obtendremos por conversión de la masa aparente (9) usando la expresión (10), y teniendo en cuenta los valores numéricos del modelo elegido para este ejemplo, según la norma ISO 10068:2012, consecuentemente la impedancia mecánica según el eje z tendrá la siguiente expresión.

$$IM_{Zh} = \frac{0.09244 s^4 + 196 s^3 + 8.147e04 s^2 + 5.547e06 s + 5e07}{s(1.246 s^2 + 250.5 s + 51000)} \quad (12)$$

La representación gráfica de la expresión (12) se muestra en la figura 8.

La combinación de los datos de las gráficas de las figuras 7 y 8, según la expresión (11) da como resultado la potencia absorbida buscada, que se muestra en la figura 9. La potencia total, en este experimento corresponde aproximadamente a 0.041 W. Sin embargo, cuando la fuerza de entrada es 5 veces mayor (10 kN), la potencia se incrementa casi 24 veces (aproximadamente 1W).

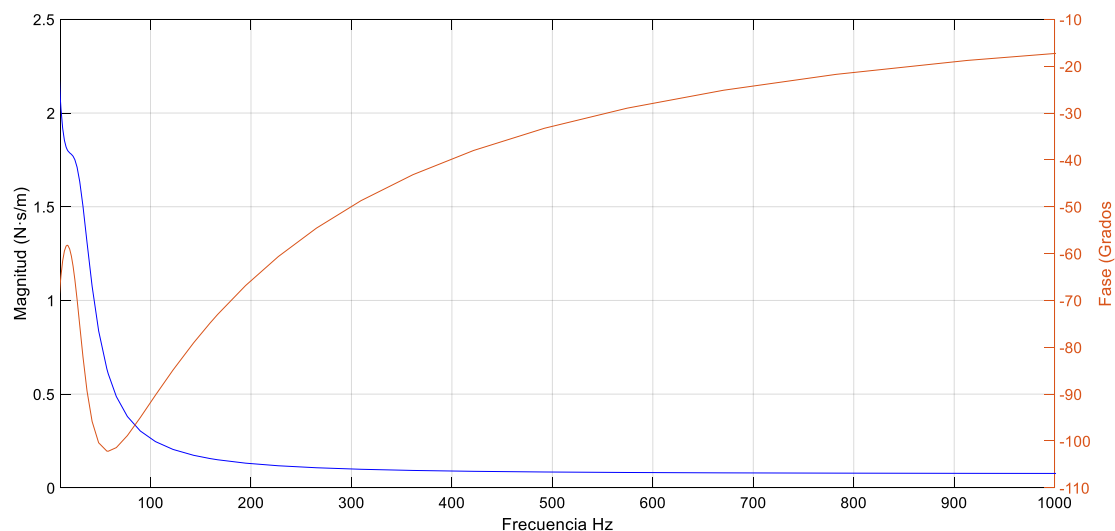


Figura 8. Impedancia mecánica del sistema mano-brazo en la dirección z_h.

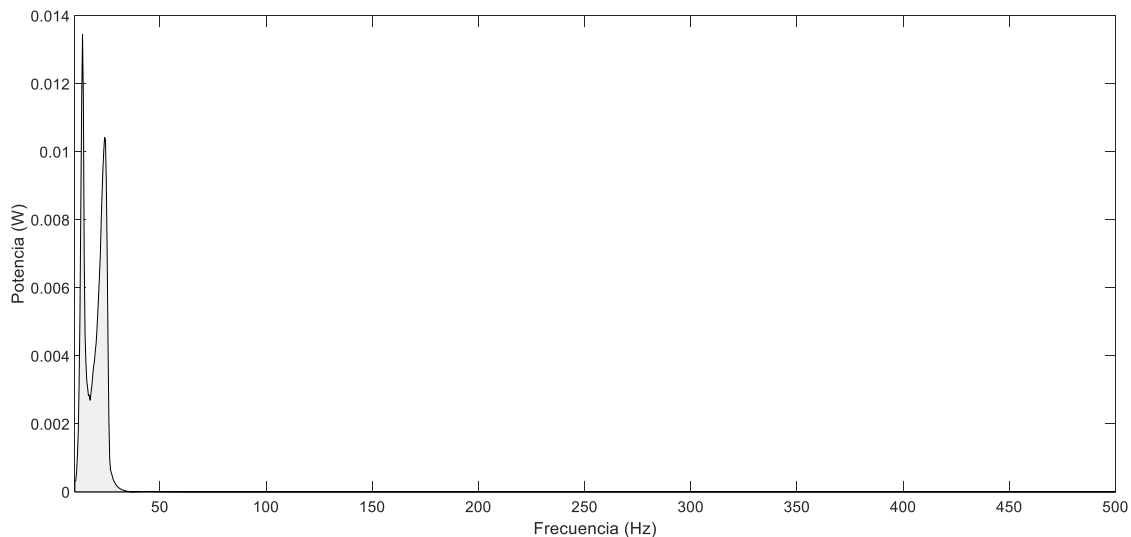


Figura 9. Potencia absorbida por el sistema mano-brazo en la dirección z_h .

4. CONCLUSIONES

Esta metodología permite estimar la potencia absorbida por el sistema mano-brazo en el eje Z_h , durante un impacto con un elemento de relativa esbeltez, como por ejemplo, bate de béisbol, raqueta de tenis, defensa policial, martillo de percusión, etc. Permitiendo evitar los problemas del cálculo de la cinemática 3D. Sin embargo, también es posible aplicarlo a herramientas motorizadas.

La potencia absorbida por el sistema mano-brazo obtenida en el experimento para golpes de aproximadamente 200 N fue de 0.041W, potencia muy pequeña que además se da fundamentalmente en baja frecuencia (10-40Hz), por tanto el filtro W_h no cambia significativamente la potencia obtenida.

Sin embargo, la situación podría llegar a ser crítica si los impactos fuesen provocados por herramientas como martillo y cincel, cuyo espectro tiene mayor energía debido al impacto entre dos objetos metálicos. Por otro lado, la potencia en alta frecuencia va a depender de cada caso particular (tipo de golpe y elemento golpeado).

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Starck and I. Pyykko, "Impulsiveness of vibration as an additional factor in the hazards associated with hand-arm vibration," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 12, no. 4, pp. 323–326, 1986.
- [2] J. Starck, "High impulse acceleration levels in hand-held vibratory tools. An additional factor in the hazards associated with the hand-arm vibration syndrome," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 10, no. 3, pp. 171–178, 1984.
- [3] X. S. Xu, D. E. Welcome, T. W. McDowell, C. Warren, and R. G. Dong, "An investigation on characteristics of the vibration transmitted to wrist and elbow in the operation of impact wrenches," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 39, no. 1, pp. 174–184, 2009.
- [4] H. Ando, K. Nieminen, E. Toppila, J. Starck, and T. Ishitake, "Effect of impulse vibration on red blood cells in vitro," *Scand. J. Work. Environ. Heal.*, vol. 31, no. 4, pp. 286–290, 2005.



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIAACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

- [5] S. A. Adewusi, S. Rakheja, P. Marcotte, and J. Boutin, "Vibration transmissibility characteristics of the human hand-arm system under different postures, hand forces and excitation levels," *J. Sound Vib.*, vol. 329, no. 14, pp. 2953–2971, 2010.
- [6] Y. Aldien, P. Marcotte, S. Rakheja, and P. É. Boileau, "Influence of hand forces and handle size on power absorption of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration," *J. Sound Vib.*, vol. 290, no. 3–5, pp. 1015–1039, 2006.
- [7] Y. Aldien, P. Marcotte, S. Rakheja, and P. E. Boileau, "Influence of hand-arm posture on biodynamic response of the human hand-arm exposed to zh-axis vibration," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 36, no. 1, pp. 45–59, 2006.
- [8] Y. Aldien, P. Marcotte, S. Rakheja, and P.-E. Boileau, "Mechanical impedance and absorbed power of hand-arm under x(h)-axis vibration and role of hand forces and posture.," *Ind. Health*, vol. 43, no. 3, pp. 495–508, 2005.
- [9] D. Welcome, S. Rakheja, R. Dong, J. Z. Wu, and A. W. Schopper, "An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 34, no. 6, pp. 507–518, 2004.
- [10] R. G. Dong, J. Z. Wu, D. E. Welcome, and T. W. McDowell, "A new approach to characterize grip force applied to a cylindrical handle," *Med. Eng. Phys.*, vol. 30, no. 1, pp. 20–33, 2008.
- [11] S. A. Adewusi, S. Rakheja, P. Marcotte, and P. E. Boileau, "On the discrepancies in the reported human hand-arm impedance at higher frequencies," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 38, no. 9–10, pp. 703–714, 2008.
- [12] M. Tarabini, B. Saggin, D. Scaccabarozzi, and G. Moschioni, "Hand-arm mechanical impedance in presence of unknown vibration direction," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 43, no. 1, pp. 52–61, 2013.
- [13] P. Andersen, R. Brincker, B. Peeters, G. De Roeck, L. Hermans, and C. Krämer, "Comparison of system identification methods using ambient bridge test data," *Proc. 17th Int. Modal Anal. Conf. Kissimmee, Florida*, pp. 7–10, 1999.
- [14] B. Peeters and G. De Roeck, "Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 13, no. 6, pp. 855–878, 1999.