

Diseño de una máquina para pruebas de absorción de vibraciones en metamateriales mecánicos

Design of a device for vibration absorption tests on mechanical metamaterials

J.A. Sotomayor-del-Moral ^a, L.I. Farfán-Cabrera ^b, D.E. Rivera-Arreola ^a, J.G. Benítez-Morales ^a, D. Samayoa-Ochoa ^c, J.B. Pascual-Francisco ^{a,*}

^a Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Mecatrónica, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Zempoala, Hgo., México, 43830.

^b Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, N.L., México, 64849.

^c Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Ciudad de México, México 07738.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un dispositivo para pruebas de absorción de vibraciones en metamateriales mecánicos fabricados por impresión 3D. Se presenta la metodología de diseño para una la máquina de vibración, así como la selección de elementos electrónicos y mecánicos, y la instrumentación del sistema. Asimismo, se propone una metodología experimental para determinar las propiedades de absorción de vibraciones de metamateriales impresos en 3D con materiales poliméricos. Se analiza la absorción de vibraciones de un metamaterial mecánico impresos en material de resina. Por otro lado, se realizan simulaciones de vibración en un software de Ingeniería Asistida por Computadora, para comparar los resultados experimentales obtenidos con la máquina de vibraciones. También se evalúa numéricamente la capacidad de absorción de un metamaterial con geometría fractal. Se discuten las propiedades de absorción de vibraciones de los metamateriales y se analiza sus posibles aplicaciones como atenuadores de vibraciones en diferentes áreas de la ingeniería y la industria.

Palabras Clave: Diseño Mecánico, Máquina de vibraciones, Metamateriales, Absorción de vibraciones.

Abstract

This paper presents the design of a device for vibration damping testing on mechanical metamaterials manufactured by 3D printing. The design methodology for a vibration device, the selection of the electronic and mechanical elements, and the instrumentation of the system is presented. Also, an experimental methodology to determine the vibration absorption properties of metamaterials 3D printed with polymeric materials is proposed. The vibration absorption of a mechanical metamaterial printed on resin is analyzed experimentally. Furthermore, in order to compare the experimental results obtained with the vibration machine, dynamic simulations are carried out with a Computer Aided Engineering software. The numerical evaluation of the vibration absorption of a fractal metamaterial is presented. The vibration absorption properties of metamaterials as well as their potential applications as vibration attenuators in different areas of the engineering and the industry are discussed.

Keywords: Mechanical design, shaking device, metamaterials, damping.

1. Introducción

Los elementos estructurales y mecánicos, como edificios, puentes, vehículos, maquinarias, etc., pueden verse afectadas por las vibraciones y el sonido que se generan por la propagación de ondas mecánicas en un medio elástico (Ledezma-Ramirez, 2015; Ormeño Bazurto, 2019). Estos fenómenos pueden causar daños, fallas o incomodidad en dichos elementos, por lo que se requieren sistemas que puedan

absorber o reducir las vibraciones, mejorando así su rendimiento, eficiencia y vida útil (González *et al.*, 2017; Ibarra, 2024).

Los sistemas tradicionales de absorción de vibraciones y sonido utilizan materiales viscoelásticos, que disipan la energía de las ondas mecánicas mediante la fricción interna. Sin embargo, estos sistemas tienen algunas limitaciones, como una baja eficiencia a bajas frecuencias, una respuesta fija ante

*Autor para la correspondencia: jbpascualf@hotmail.com

Correo electrónico: allan16@micorreo.upp.edu.mx (Jonathan Allan Sotomayor-del-Moral), farfanl@tec.mx (Leonardo Israel Farfán-Cabrera), eduardorivera@upp.edu.mx (Daniel Eduardo Rivera-Arreola), josegerardo@upp.edu.mx (José Gerardo Benítez-Morales), dsamayoa@ipn.mx (Didier Samayoa-Ochoa), jbpascualf@hotmail.com (Juan Benito Pascual-Francisco).

diferentes condiciones de carga y frecuencia, y una alta dependencia de las propiedades del material, que pueden cambiar con el tiempo y la temperatura (Martínez, 2023; Prieto Sánchez, 2023; Quichimbo Vences *et al.*, 2024). Por lo tanto, se han explorado alternativas de materiales para la disipación o absorción de vibraciones. Entre los materiales candidatos para estas aplicaciones están los metamateriales (Ion *et al.*, 2016; Jiao *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). Los metamateriales son materiales artificiales que tienen propiedades físicas que no se encuentran en la naturaleza como un índice de refracción negativo (Palomino Ovando *et al.*, 2008), permeabilidad magnética negativa o una constante dieléctrica negativa (Montañez, 2023). Estas propiedades se deben a la estructura periódica o no periódica de los metamateriales, y no a su composición química (Castellanos *et al.*, 2016). Los metamateriales basados en fractales son un tipo de metamateriales que tienen una estructura autosimilar, es decir, que se repite a diferentes escalas (Hernández *et al.*, 2020). Estos metamateriales pueden tener una alta capacidad de absorción de vibraciones y sonido, debido a la resonancia de múltiples modos en cada escala (Cubillos Polloni, 2020). Sin embargo, para conocer sus capacidades de disipación de energía y absorción de vibración, además de conocer sus propiedades mecánicas efectivas, es necesario realizar pruebas experimentales o de simulación, a fin de evaluar el rango de frecuencias en las que podrían ser más eficaces (Cartes, 2023). Se han reportado algunos trabajos a cerca del estudio de las capacidades de absorción de energía y vibración en algunos metamateriales mecánicos. Por ejemplo, en D'Alessandro *et al.*, 2019, se realizaron pruebas experimentales con metamateriales elásticos, comprobando así su capacidad de absorción de vibraciones de baja frecuencia. Por lo tanto, de acuerdo a la revisión de literatura, los metamateriales impresos en 3D ofrecen una alternativa prometedora para la absorción de vibraciones en estructuras y maquinarias. Al superar las limitaciones de los materiales tradicionales, como los viscoelásticos, los metamateriales personalizables pueden resonar en múltiples modos gracias a su estructura fractal. La evaluación experimental y la simulación son esenciales para optimizar su diseño y aplicaciones en ingeniería.

En este sentido, con la finalidad de contribuir en el estudio del comportamiento de atenuación de vibraciones de los metamateriales, este trabajo tiene como objetivo abordar el diseño de un dispositivo para realizar pruebas experimentales de absorción de vibraciones de este tipo de materiales con miras a aprovechar sus propiedades para aplicaciones como aisladores de vibración en elementos mecánicos. Se aplica la metodología del diseño mecánico (a partir de la etapa de diseño conceptual) para obtener un modelo de CAD de la máquina, mediante el software SolidWorks. El dispositivo se construye y se valida su funcionamiento mediante la realización experimentos con un metamaterial. Asimismo, se reportan resultados preliminares, en simulaciones con software de CAE (Ingeniería Asistida por Computadora, por sus siglas en inglés), sobre el comportamiento dinámico de un modelo de metamaterial fractal. Los resultados experimentales y de simulación demuestran que los metamateriales son capaces de absorber amplitudes de vibración y que la máquina diseñada y fabricada es capaz de generar vibraciones para el estudio de estos materiales.

2. Metodología del diseño

Para el desarrollo del diseño de la máquina para pruebas de absorción de vibraciones en estructuras fractales, se implementó la metodología de diseño mecánico descrito en (Ullman, 2010), principalmente la metodología de diseño a base de funciones. Esta metodología se implementó a partir del diseño conceptual, teniendo en cuenta dos etapas importantes para el desarrollo del proyecto, que son el diseño conceptual y el desarrollo del producto.

2.1. Identificación de la necesidad

En el ámbito industrial existen mecanismos, máquinas y elementos de máquina que requieren aislamiento de vibraciones para su óptimo funcionamiento. Si bien, en la actualidad existen aisladores de vibraciones basados en materiales convencionales viscoelásticos, en los últimos años se ha demostrado que los metamateriales también son una alternativa para disipación de vibraciones mecánicas y que son adaptables a una amplia gama de frecuencias. Sin embargo, para un estudio más completo de sus propiedades de absorción de vibraciones, es necesario evaluar sus características de manera experimental y numérica. En este sentido, la necesidad que se aborda en este trabajo es principalmente la caracterización dinámica de metamateriales desde el punto de vista experimental. Los resultados que se obtengan con este dispositivo permitirán proponer configuraciones específicas de metamateriales para reducir las vibraciones no deseadas en estructuras y maquinarias. Además, al realizar pruebas experimentales y simulaciones, se evalúa el comportamiento dinámico de los metamateriales, lo que permite optimizar su diseño y adaptarlo a diferentes frecuencias y condiciones de carga. En última instancia, este enfoque exploratorio abre la puerta a nuevas soluciones en ingeniería al aprovechar las propiedades únicas de los metamateriales.

2.2. Diseño conceptual

En esta etapa se desarrolla un desglose de funciones necesarias para el funcionamiento de la máquina de pruebas de absorción de vibraciones. Se utiliza la herramienta de caja negra (Figura 1) y caja transparente (Figura 2). En la caja negra se define la función general de la máquina.

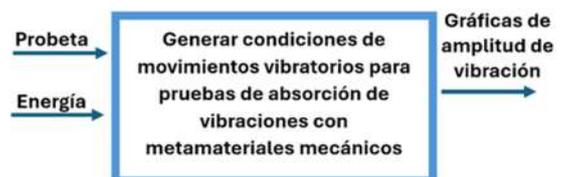


Figura 1: Caja Negra.

En la caja negra y transparente se identifican las entradas y salidas del sistema. La función general se descompone en subfunciones, las cuales servirán para la generación de una Tabla morfológica. Estas subfunciones describen el proceso de funcionamiento interno de la máquina diseñada.

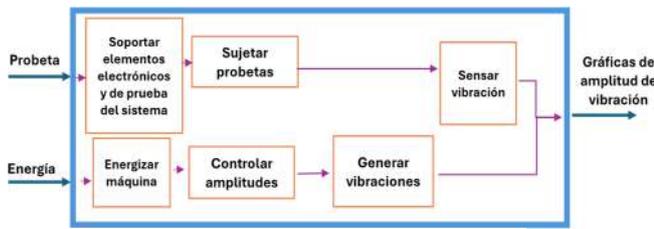


Figura 2: Caja transparente (subfunciones).

Con la finalidad de proponer opciones o conceptos que podrían cumplir con las funciones establecidas en la caja transparente, se usa la técnica de la Tabla morfológica de conceptos (Figura 3). En la Tabla morfológica se muestran conceptos para las subfunciones obtenidas, las cuales ayudarán a obtener una óptima propuesta de diseño conceptual. Si bien, esta herramienta es importante para poder identificar los conceptos, no es suficiente ya que requiere de una herramienta de evaluación de cada uno de estos conceptos. Para ello, en este trabajo se empleó la metodología de las matrices de Pugh. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la matriz de Pugh para la subfunción de sujetar probeta. En la Figura 3, con las líneas color naranja se muestra la combinación de los conceptos elegidos para cada subfunción.

Subfunción	C1	C2	C3
Soportar probetas	Acrílico	Acero	
Energizar máquina	Fuente conmutada	Eliminador	
Controlar amplitudes	rasp berry	PICs	Arduino
Sujetar probetas	Tornillo y tuerca	Mordaza cuña	Cinta 2 caras
Generar vibración	Motor DC	Motor vibrador	Solenoides
Sensor vibración	KY 002	MPU6050	

Figura 3: Tabla morfológica.

Cabe destacar que los criterios de evaluación deben fundamentarse en las necesidades del cliente y/o del diseñador. Los criterios de evaluación no necesariamente deben ser los mismos para la evaluación de todos los conceptos. El procedimiento de Pugh implica asignar un valor de relevancia a cada criterio de evaluación, sumando un total de 100 puntos. Se debe sugerir un *Datum*, que es el concepto que el diseñador cree que es la mejor alternativa. La evaluación de los conceptos implica asignar valores de 1, 0 y -1 a cada criterio. Un valor de 1 indica que el concepto evaluado cumple mejor el criterio que el Datum; un 0 si el concepto evaluado y el Datum cumplen de la misma manera el criterio de selección (empate entre el Datum y el concepto evaluado); se asigna un -1 cuando el concepto no satisface el criterio, lo que significa que es inferior al Datum. Finalmente, se realiza una suma del producto del valor de la importancia del criterio de evaluación con el valor previamente asignado (0, 1 o -1). Si el resultado para un concepto es un número positivo, significa que ese concepto es superior al Datum y, por lo tanto, será el concepto vencedor.

Si el resultado es 0, significa que ese concepto o el Datum pueden utilizarse en el diseño. En cambio, si el resultado es negativo, definitivamente no se debe elegir ese concepto.

Sujetar probeta	Criterios	Mordaza tipo cuña	Tornillo y tuerca
		DATUM	
Costo	10		1
Peso máximo que soporta	30		-1
Dimensiones del dispositivo	5		0
Riesgo de accidentes	10		-1
Calidad	15		-1
Facilidad de instalación	5		0
Esfuerzos que soporta	20		0
Facil mantenimiento	5		1
Total	100	n/a	-40

Figura 4: Ejemplo de matriz de Pugh.

Al concluir la evaluación de cada subfunción, se obtiene la Tabla de los conceptos vencedores. Para este proyecto, en la Tabla 1 se presenta la lista de los diferentes conceptos vencedores. A partir de los conceptos vencedores, se procede a generar el concepto de configuración, es decir, proponer el modelo de cómo se integrarían los elementos seleccionados previamente. Para llevar a cabo esta fase, se utilizó una herramienta de CAD (Figura 5).

Tabla 1: Tabla de conceptos vencedores para cada subfunción.

Subfunción	Concepto ganador
Sujetar probeta	Mordaza cuña
Soportar probeta	Acero
Energizar máquina	Fuente conmutada
Controlar amplitudes	Arduino Solenoides y Motor DC
Generar vibraciones	vibrador
Sensor vibraciones	MPU6050

En el diseño conceptual, con base a la Tabla de conceptos vencedores, se diseñan soportes de acero con resortes. Estos soportes serán útiles para nivelar la placa o inclinarla a un cierto ángulo, dependiendo de la configuración del arreglo experimental que se desee implementar. Cabe destacar de la inclinación de la placa de la máquina es importante para establecer diferentes amplitudes en vibraciones. También se consideraron motores de corriente directa, ya que estos se pueden controlar en velocidad para generar distintas amplitudes. En la base metálica se coloca el sensor MPU6050, el cual nos ayudará para monitorear las amplitudes de entrada y de salida del sistema, y de esta forma se podrá cuantificar la atenuación de la amplitud de vibración. Finalmente, a partir del

diseño conceptual generado se puede desarrollar el prototipo considerando los elementos mostrados.

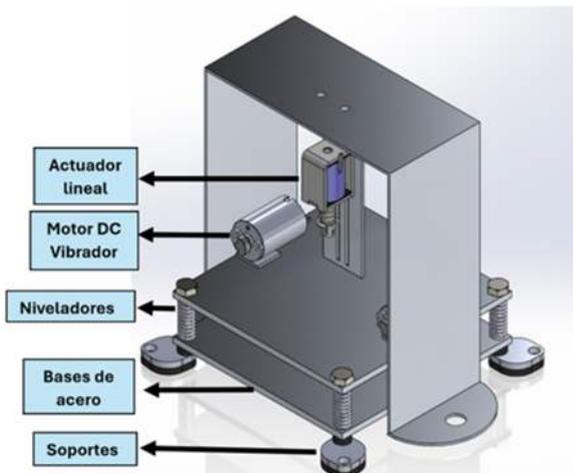


Figura 5: Diseño conceptual.

2.3. Descripción de funcionamiento electrónico

Una de las partes fundamentales del proyecto es la instrumentación del sistema. Este comprende la implementación de la electrónica, sensores y actuadores para la obtención de las amplitudes necesarias para su la experimentación. En primera instancia se selecciona el sensor. Con base a la metodología de diseño que se implementó, el sensor (acelerómetro) a usar es el modelo MPU6050 y la tarjeta de adquisición de datos es el Arduino UNO (Figura 6). Los acelerómetros servirán para poder detectar posición y aceleración del objeto que lo porta. En ese sentido, los acelerómetros serán de utilidad para visualizar los datos de forma gráfica en el IDE de Arduino, y así poder ver las amplitudes que genera la máquina.

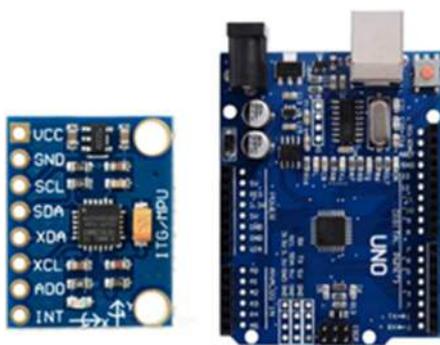


Figura 6: Sensor MPU6050 y Arduino UNO.

Los datos obtenidos a partir del programa son la amplitud respecto al tiempo. Esta amplitud está dada por el programa Grvt_unit. Este se utiliza para convertir los valores de acelerómetro en una medida que involucra la gravedad (g); por lo tanto, esta unidad representa la aceleración debida a la gravedad detectada por el acelerómetro. La unidad típica de la aceleración es $\frac{m}{s^2}$. Otra característica del sensor es la capacidad de poder obtener tres lecturas (de los ejes x , y y z), esto da la

posibilidad de observar la atenuación de vibración en tres direcciones ortogonales. Para la calibración del sensor MPU6050, desde el programa del Arduino, el cual registra las lecturas del sensor, se establecen las referencias (valores cero) para cada uno de los ejes de medición; es decir, se calibra en posiciones $x=0$, $y=0$ y $z=0$. Por lo tanto, las mediciones que se realicen con este sensor son independientes del lugar donde se usen, siempre y cuando se calibre en ceros adecuadamente.

Como se definió anteriormente, se emplea el Arduino UNO como placa de adquisición de datos. Para visualizar los datos de amplitud del sensor, estos se obtienen a partir del Serial Plotter en el IDE de Arduino. El Serial Plotter es una herramienta que toma los datos seriales entrantes y puede visualizar los datos en un gráfico en tiempo real, lo que resulta conveniente para este propósito.

3. Materiales y método

3.1. Arreglo experimental

Para poder comprender aún más el diseño conceptual mostrado en la Figura 5, en la Figura 7 se muestra en un diagrama esquemático del arreglo experimental para las pruebas de absorción de vibraciones mecánicas. En este diagrama se presentan diferentes elementos necesarios para el funcionamiento de la máquina de vibraciones.

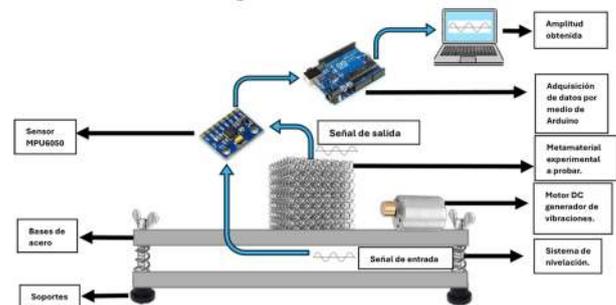


Figura 7: Diagrama de máquina de vibraciones.

La plataforma consta de dos bases de acero de 2 mm de espesor, suficientes para mantener rígida la estructura. Dichas plataformas están conectadas a través de un sistema de nivelación de resortes y mariposas que permitirán nivelar la estructura completa o también colocar a ángulos deseados para los experimentos. El sistema cuenta con un motor DC de 12 V, el cual tiene una masa descentrada en su eje; esta masa, cuando se activa el motor, genera una vibración constante sobre la máquina, la cual será la señal de entrada al metamaterial que se va a analizar. La amplitud de esta vibración se mide con el sensor MPU6050. Cabe destacar que la amplitud de entrada puede variar con el control del motor DC por medio de un control PWM (Modulación por Ancho de Pulso).

La muestra que se analizará es un metamaterial fabricado por medio de tecnología aditiva, este metamaterial se coloca en la parte superior de la máquina. Asimismo, se fija y se coloca el sensor MPU6050 en la parte superior del metamaterial. De esta forma se puede medir la amplitud de

salida del material respecto al tiempo. Por lo tanto, se obtienen tanto la amplitud de entrada y de salida. Esta señal de salida será el parámetro que se usará para determinar cuánta amplitud se redujo a través del material.

3.2. Pruebas de funcionamiento

Para comprobar el funcionamiento de la máquina, primero se obtuvo la condición de funcionamiento con el motor DC de 12v con desbalanceo sobre la base metálica, resultando en una amplitud de pico a pico de $0.41g$ en promedio, lo que resulta en una aceleración de $4.00 \frac{m}{s^2}$. Este parámetro será de utilidad para efectuar simulaciones de las vibraciones en un software especializado CAE y así poder comparar los resultados experimentales. Se realizaron pruebas de vibración sobre un metamaterial fabricado en impresora 3D de resina (TPU) por estereolitografía. Esta tecnología es elegida para su fabricación ya que posee una precisión de impresión de hasta $0.01mm$, lo cual facilita la fabricación de metamateriales de una forma más precisa. El modelo del metamaterial mecánico usado para la prueba experimental se muestra en la Figura 8.

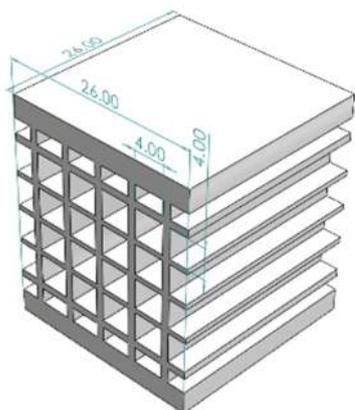


Figura 8: Metamaterial diseñado en CAD.

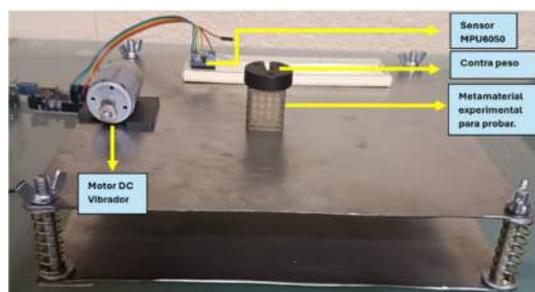


Figura 9: Arreglo experimental construido.

El metamaterial se colocó en la zona céntrica de la máquina de vibraciones, como se muestra en la Figura 9. Cabe mencionar que la aceleración de entrada se mide justo debajo de la muestra y la aceleración de salida se mide en parte superior de la muestra; por lo tanto, ambos sensores de aceleración deben estar alineados (uno debajo del metamaterial y el otro encima). De esta manera, no importa si los resortes de la mesa también absorben ciertas vibraciones, ya que la medición que es de interés es específicamente en el metamaterial. La gráfica de amplitud de entrada (registrada

justo en la superficie inferior de la muestra) se presenta en la Figura 10.

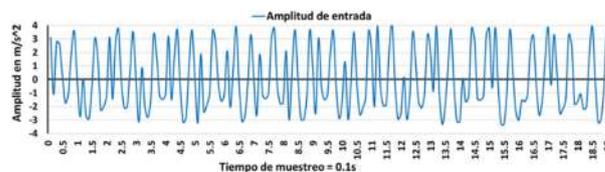


Figura 10: Gráfica de amplitud de entrada, en g .

4. Resultados y análisis

Para cuantificar el grado de absorción de vibraciones del material utilizado, como un estudio preliminar, se hace una comparación entre las amplitudes de entrada y salida medidas con los acelerómetros. Las amplitudes de entrada son registradas por el acelerómetro que está colocado en la parte inferior del metamaterial, mientras que las de salida son medidas por el acelerómetro colocado en la parte superior (Figura 7). Ya que las señales de entrada y salida son periódicas y amplitudes máximas constantes, (Figura 11), se realizó solo una prueba experimental. La diferencia de amplitudes de entrada y salida se traducen como la absorción de vibraciones. Estas amplitudes se muestran en la Figura 11, donde se superpuso la amplitud de entrada con la de salida. En esta gráfica se puede observar la disminución de vibración por medio de las amplitudes dadas en m/s^2 . Se observa que la amplitud máxima de la salida es de $2.84 m/s^2$, lo cual representa una reducción de la amplitud de aproximadamente 27.52% . Por otro lado, se sabe que el estudio de la absorción de vibraciones en elementos mecánicos tiene aplicaciones significativas en la industria. Algunas de estas aplicaciones incluyen el monitoreo de la eficiencia de las máquinas, la atenuación de vibraciones en rotores y la reducción de ruido para mejorar el desempeño de los equipos. En resumen, la absorción de vibraciones es esencial para garantizar el funcionamiento eficiente y seguro de maquinaria industrial, así como para proteger a las personas y los equipos. Por lo tanto, este resultado puede ser significativo para la reducción de amplitudes como las mostradas en la Figura 10. Asimismo, el estudio experimental de las capacidades de absorción de nuevos metamateriales mecánicos permitirá proponer nuevas alternativas de atenuadores de vibración de acuerdo al rango de amplitudes de interés.

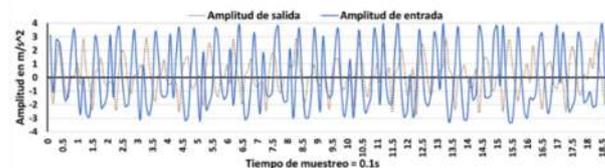


Figura 11: Gráfica de amplitudes de entrada y salida en g .

Con la finalidad de tener un medio de comparación de los resultados experimentales obtenidos, se procede a realizar una simulación de vibraciones con un software de CAE para analizar la absorción de aceleraciones, utilizando el modelo CAD del material, así como sus propiedades mecánicas y las condiciones de amplitud de entrada utilizada en la experimentación. En los parámetros asignados en el software,

se tomó en cuenta la amplitud máxima de entrada de 0.4 g. Se realizó un estudio dinámico lineal armónico, en cuya entrada se introdujo 0.4 g y se obtiene la aceleración en el eje medido, representada con barra de colores. Al igual que en la experimentación, la entrada de la amplitud se colocó en la parte inferior de la muestra y la salida en la parte superior. En la Figura 12 se presenta un ejemplo de los resultados de las aceleraciones obtenidas en la simulación. El color rojo representa las aceleraciones más altas y azul las más bajas. Se puede observar que en la base se tiene la mayor aceleración que corresponde a la amplitud máxima obtenida de manera experimental. De color verde-amarillo, se aprecia que la magnitud es de aproximadamente $2.8 \frac{m}{s^2}$, esto es, $0.28g$. Este dato se aproxima a la amplitud máxima de salida obtenida de manera experimental (Figura 11). Sin embargo, de acuerdo con los resultados numéricos (Figura 12) la máxima atenuación de aceleraciones ocurre en la parte central de material. Para validar esta predicción, en un trabajo futuro se plantea medir de manera experimental las aceleraciones en más regiones del material.

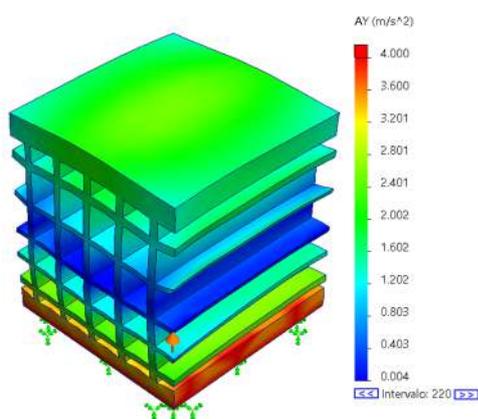


Figura 12: Resultados de los perfiles de aceleración en el metamaterial.

Adicionalmente, se realiza una prueba de simulación en un modelo de metamaterial basado en la carpeta de Sierpinski de tercera interacción, con 20 mm de espesor. Las dimensiones del fractal se muestran en la Figura 13(a). Las condiciones de la simulación (material y amplitud de entrada) son los mismos que la simulación en el primer metamaterial. Los resultados obtenidos de la amplitud de salida se muestran en la Figura 13(b). Se puede observar una atenuación en la amplitud de aceleración a través de la carpeta de Sierpinski. Las mayores atenuaciones ocurren en las esquinas del fractal (que corresponden al color azul). Asimismo, se observa una distribución de amplitudes de salida más o menos homogénea en la superficie superior del fractal, mientras que en las caras del hueco de la primera iteración (el cuadrado más grande) hay menos atenuación. En las regiones con mayor absorción de amplitud, se tuvo una atenuación del 13.8 %, respecto a la amplitud de salida. En las siguientes etapas de esta investigación (como trabajo futuro), se llevarán a cabo experimentaciones en este modelo fractal impreso con manufactura aditiva para comprobar las predicciones de esta simulación numérica.

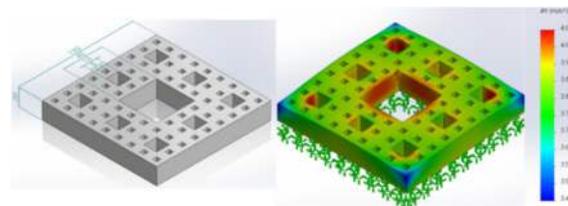


Figura 13: Estudio dinámico a través de la carpeta de Sierpinski.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño de un dispositivo para pruebas de absorción de vibraciones en metamateriales mecánicos. El diseño conceptual de la máquina se basó en la metodología de funciones. A partir del desglose de funciones se estableció una Tabla morfológica de conceptos. La selección de conceptos se realizó mediante evaluaciones basadas en la metodología de Pugh. Después, los elementos seleccionados (mecánicos y electrónicos) se integraron para crear un modelo en CAD del dispositivo, el cual fue manufacturado para realizar pruebas preliminares de funcionamiento. Se realizó una prueba experimental de vibración para conocer la capacidad de absorción de un metamaterial mecánico fabricado por manufactura aditiva con material de resina TPU. De acuerdo a este experimento preliminar, el material estudiado tuvo una absorción de amplitudes de hasta 27.52 %. Este resultado se comparó con un análisis numérico de simulación con un software de CAE y se encontró que en ambos enfoques se obtienen resultados similares. También se realizó una simulación con un modelo fractal basado en la carpeta de Sierpinski, para observar la distribución de la disipación de amplitudes. Se observó que, al menos en la orientación en la que se realizó la simulación, la carpeta de Sierpinski no disipa la amplitud de entrada considerablemente. Para un trabajo posterior, se explorarán simulaciones en diferentes direcciones y en diferentes tamaños del fractal, para determinar si esa geometría realmente puede ser de utilidad para disipación de vibraciones mecánicas. Asimismo, Como trabajo de esta investigación futuro, se estudiarán diferentes tamaños y configuraciones de fractales. Con base en los resultados que se obtendrán, se plantearán posibles aplicaciones en elementos mecánicos industriales para aislamiento de vibraciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de posgrado otorgado al CVU número 656438.

Referencias

- Cartes, G. V. C. (2023). Diseño y evaluación de vigas con remoción periódica de material para la reducción de vibraciones, Universidad de Chile.
- Castellanos, L. M., Lopez, F., & Reyes - Vera, E. (2016). Metamateriales: principales características y aplicaciones. Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 40(156), 395. <https://doi.org/10.18257/racecefyn.345>
- Cubillos Polloni, J. G. (2020). Diseño y optimización de vigas de metamateriales con enrejado quiral para la supresión de vibraciones, utilizando modelo de elementos finitos y algoritmos genéticos. Universidad de Chile.

- D'Alessandro, L., Ardito, R., Braghin, F., & Corigliano, A. (2019). Low frequency 3D ultra-wide vibration attenuation via elastic metamaterial. *Scientific Reports*, 9(1), 8039. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44507-6>
- Gonzalez, R. A. G., Gonzalez-Rodriguez, A., Chacon, J. M., & Castillo, F. J. (2017). Sistema de Absorción de Vibraciones de amplio Espectro basado en un nuevo Muelle de Rigidez variable. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 14(2), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.11.005>
- Hernández, A., López, F., & Ossa, O. (2020). Generación de doble banda en antenas de Microcinta rectangulares utilizando ranuras separadas en secuencia de cantor. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(2), 204–213. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000200204>
- Ibarra, I. J. E. H. (2024). Control Pasivo de Vibraciones en Una Estructura Tipo Edificio Utilizando Múltiples Absorbedores Flexibles. *Tecnológico Nacional*.
- Ion, A., Frohnhofen, J., Wall, L., Kovacs, R., Alistar, M., Lindsay, J., Lopes, P., Chen, H.-T., & Baudisch, P. (2016). Metamaterial Mechanisms. *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 529–539. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984540>
- Jiao, P., Mueller, J., Raney, J. R., Zheng, X., & Alavi, A. H. (2023). Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications*, 14(1), 6004. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41679-8>
- Ledezma-Ramirez, D. F. (2015). Avances en aislamiento de vibración por impacto usando rigidez no lineal. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 16(2), 307-316. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.03.014>
- Martinez, L. R. A. (2023). Diseño y fabricación de ruedas a base de polimeros por medio de manufactura aditiva. *Universidad Tecnológica Centroamericana*.
- Montañez, M. B. (2023). Transporte de ondas en metamateriales elásticos. *Universidad Autónoma del Estado de Morelos*.
- Ormeño Bazaruto, L. A. (2019). Riesgo físico y enfermedades profesionales en trabajadores que operan equipos de vibración en construcciones civiles. *Revista San Gregorio*, (35), 143-156. <https://doi.org/10.36097/rsan.v1i35.946>
- Palomino Ovando, M. A., & Coccoletzi, G. H. (2008). La refracción negativa y los metamateriales: los nuevos materiales para dispositivos ópticos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 1(1), 21-32.
- Prieto Sánchez, A. (2023). Caracterización mecánica de un material viscoelástico mediante probetas fabricadas con impresión 3D. *Universidad de Sevilla*.
- Quichimbo Vines, M. A., & Valdez Moreira, E. D. (2024). Análisis de desempeño estructural en una estructura de hormigón armado con sistemas de disipación sísmica. *Universidad Politécnica Salesiana*.
- Ullman D. G. (2010). *The Mechanical Design Process*. Fourth Ed. McGraw-Hill, New York.
- Zhang, L., Liu, H., Song, B., Gu, J., Li, L., Shi, W., Li, G., Zhong, S., Liu, H., Wang, X., Fan, J., Zhang, Z., Wang, P., Yao, Y., Shi, Y., & Lu, J. (2024). Wood-inspired metamaterial catalyst for robust and high-throughput water purification. *Nature Communications*, 15(1), 2046. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46337-1>