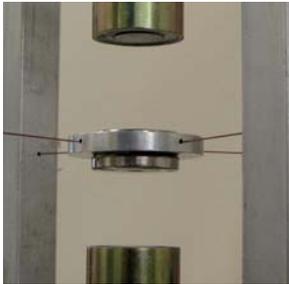


Desarrollo de un sistema con rigidez variable para control de vibraciones usando fuerzas magnéticas

Diego Ledezma-Ramírez^A, Fernando J. Elizondo-Garza^A,
Neil Ferguson^B

^A Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, FIME-UANL
diego.ledezma@gmail.com , fjelizon@hotmail.com

^B Institute of Sound and Vibration Research (ISVR) University of Southampton



RESUMEN

Se presenta el fundamento e implementación de un sistema electromagnético con elasticidad variable desarrollado para el control de vibraciones. El sistema consta de una suspensión mecánica que soporta un imán permanente y dos electroimanes controlados para variar la fuerza magnética, y así controlar la elasticidad. Se presentan los resultados de pruebas experimentales para caracterizar el sistema mecánicamente en términos del cambio de elasticidad y razón de amortiguamiento.

PALABRAS CLAVE

Elasticidad variable, electroimanes, amortiguamiento, control de vibración.

ABSTRACT

The fundamentals and applications of a variable stiffness system is presented. The implementation of such system using a variable stiffness electromagnetic system developed for vibration control purposes is described. The system comprises a mechanical suspension supporting a permanent magnet and two electromagnets controlled to vary the magnetic force thus controlling the stiffness constant. The results of experimental tests are presented in order to characterize the system in terms of stiffness change and damping ratio.

KEYWORDS

Variable stiffness, electromagnets, damping, vibration control.

INTRODUCCIÓN

Típicamente el control de vibraciones se realiza mediante el uso de aisladores pasivos clásicos, donde la rigidez y el amortiguamiento son mantenidos constantes. Este tipo de aisladores tiene la desventaja de que se diseñan para un sistema bajo condiciones específicas y pueden no ser aptos para otro tipo de excitación vibratoria. Debido a esto se han desarrollado sistemas de control activo de vibraciones en los cuales se cambian las características del sistema, ya sea introduciendo un actuador al sistema o modificando sus características estructurales o internas, es decir su rigidez o su amortiguamiento.¹

Los sistemas de control activo pueden producir un aislamiento de vibración más alto en comparación con un sistema pasivo y tienen la capacidad de adaptarse a numerosas situaciones. El nivel de aislamiento que puede ser obtenido depende del parámetro que se varíe, es decir elasticidad, amortiguamiento o ambos, el método de control, el rango del cambio de las características, etc.

En este trabajo se presenta un nuevo sistema de rigidez variable controlado por medio de fuerzas electromagnéticas. El objetivo principal de este artículo es describir el diseño de un dispositivo experimental en el que la rigidez puede ser cambiada en tiempo real. Las características físicas del modelo experimental se estimaron en términos de cambio de la rigidez porcentual y del factor de amortiguamiento equivalente cuando la elasticidad es conmutada entre dos estados de rigidez constante. Además la linealidad de dicho sistema es estudiada por medio de pruebas estáticas y dinámicas.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE RIGIDEZ VARIABLE

Los sistemas con rigidez variable son una opción especialmente importante para la reducción de vibración mediante control activo o semiactivo de la vibración.

El funcionamiento de un dispositivo de rigidez variable es normalmente evaluado en términos del cambio que produce en la frecuencia natural del sistema en el que se encuentra y de la rigidez efectiva. Generalmente los valores mínimos y máximos para estas cantidades se reportan y pueden ser caracterizados con el porcentaje de cambio de la rigidez.

Hay diversos medios para implementar sistemas con rigidez variable en la práctica, cada uno con ventajas y desventajas. Varios métodos y estrategias del uso de rigidez variable se han estudiado y han sido desarrollados para diversas aplicaciones en control de la vibración. El trabajo de Winthrop (2005)² revisó los estudios más notables relacionados con la elasticidad variable.

Algunos de los métodos comunes para obtener sistemas de rigidez variable se basan en el uso de: aleaciones con memoria de forma, materiales piezoeléctricos, elastómeros magnetoreológicos, y

dispositivos mecánicos. Cada uno de estos métodos tiene ciertas ventajas y aspectos a considerar, los cuales serán brevemente descritos a continuación.

Aleaciones con Memoria de Forma

Éstas son las aleaciones metálicas que pueden recuperar cierta forma cuando son sometidas a cambios de temperatura, es decir, pueden recuperarse de tensiones grandes sin deformación permanente,³ a esto se le llama el efecto de memoria de forma.

Los usos en aislamiento de vibración incluyen aisladores, y absorbentes de vibración ajustables que pueden tener reducciones de la rigidez de alrededor del 60%.^{4,5} Sin embargo, eso implica el uso de energía para calentar la aleación y conseguir el efecto de memoria, y el tiempo de respuesta es aún alto comparado con los materiales piezoeléctricos.²

Materiales Piezoeléctricos

Se define la piezoelectricidad como la carga eléctrica generada de una fuerza mecánica, o inversamente, como la deformación mecánica causada por el uso de una carga eléctrica.³ Conectando un material piezoeléctrico en derivación (shunt) capacitiva, la rigidez efectiva se puede cambiar, y si ésta cambia entre circuito cerrado y circuito abierto se pueden variar los valores de la rigidez entre un máximo y un mínimo.^{6,7}

Un uso común es adherir una película o un parche de material piezoeléctrico en una viga voladiza para proporcionar la supresión rápida de la vibración usando la rigidez variable.⁸ Los materiales piezoeléctricos también se han utilizado en absorbentes ajustables.⁹ La ventaja principal es su muy rápida respuesta, que es casi inmediata, pero requiere voltajes muy altos para proporcionar el cambio de rigidez, y éste es sólo de alrededor del 10%.¹⁰

Materiales Magnetoreológicos

Tanto fluidos como elastómeros pueden ser combinados con partículas polarizables que se pueden alinear cuando se someten al efecto de un campo magnético, cambiando así la rigidez efectiva del elastómero. Aunque los fluidos han sido usados en aplicaciones de amortiguamiento variable, los elastómeros pueden ser usados para lograr cambios

en la rigidez.¹¹ Dependiendo de la naturaleza de las partículas utilizadas, algunos investigadores afirman haber alcanzado reducciones en la rigidez de cerca del 90%.¹² Sin embargo, se requiere energizar el material por medio de un campo magnético lo que implica consumo de energía y pérdidas.

Dispositivos Mecánicos

Diversos dispositivos mecánicos de elasticidad variable se han desarrollado, por ejemplo resortes helicoidales con un collarín deslizante que permite cambiar el número de espiras,¹³ resortes de hojas planas con espaciado variable¹⁴ o con curvatura variable.¹⁵

DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE RIGIDEZ VARIABLE USANDO FUERZAS MAGNÉTICAS

Como se indicó en la sección anterior, hay un compromiso entre la razón de cambio de la rigidez y la rapidez con que se realiza el cambio. Los materiales piezoeléctricos pueden realizar un cambio de la rigidez casi inmediatamente pero el rango de la variación no es significativo comparado con los obtenidos con las aleaciones de memoria de forma, que tardan más tiempo para realizar el cambio.

En este artículo se propone una nueva alternativa para superar el compromiso, y conseguir una alta variación de rigidez, muy rápidamente comparado con las estrategias descritas, usando una configuración de bajo costo, y se presentan los aspectos metodológico, experimental y de equipamiento considerados en el diseño del dispositivo desarrollado.

Metodología / experimentación

El diseño se basa en considerar que el tiempo absoluto real en el cual la conmutación de la rigidez se debe realizar dependerá de la frecuencia natural del sistema, dado que el periodo de oscilación determina el tiempo máximo disponible para la conmutación. Por lo tanto es preferible tener un sistema que originalmente tenga una frecuencia natural baja para disponer de un mayor intervalo de tiempo para lograr la transición entre los estados de baja y alta rigidez. Es también deseable que el sistema sea, por simplicidad, lo más cercano posible a un sistema de un solo grado de libertad con bajo amortiguamiento, por ejemplo menor a 5%.

Para obtener un sistema con estas características, un elemento elástico de tipo variable fue concebido y diseñado usando fuerzas electromagnéticas. La idea fundamental detrás del modelo es similar al concepto de levitación magnética. Si se tienen dos imanes alineados con sus polos opuestos frente a frente, como se muestra en la figura 1, la fuerza repulsiva resultante, cuando se configuran adecuadamente, actuará esencialmente como una fuerza de restauración.

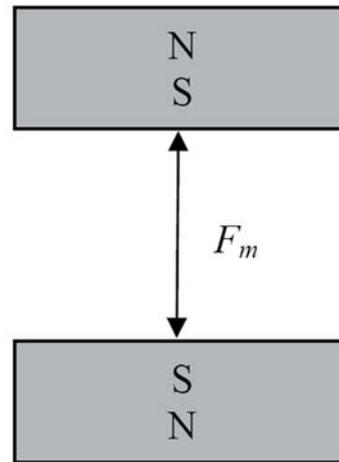


Fig. 1. Concepto de la levitación magnética. Dos imanes cara a cara con la misma polaridad producirán una fuerza repulsiva F_m .

Si se utiliza un electroimán en lugar de uno de los imanes permanentes, el campo magnético puede ser variado, y por lo tanto la fuerza de restauración, que se puede considerar como debida a una rigidez equivalente, puede ser cambiada. Consecuentemente se puede obtener un elemento con rigidez variable, o conmutable, dependiendo del voltaje suministrado al electroimán.

Sin embargo, hay algunas desventajas del sistema simple descrito anteriormente, pues este sistema es altamente no lineal debido a las fuerzas magnéticas implicadas. La fuerza repulsiva no es proporcional a la separación entre los imanes, además puede ser que el sistema se vuelva inestable en el eje de movimiento axial a menos que se implementen algunas restricciones.

Para aprovechar el concepto de resorte magnético y evitar las inconveniencias que introduce, se propone un diseño modificado, que se representa en la figura 2(a). El sistema está constituido por dos imanes

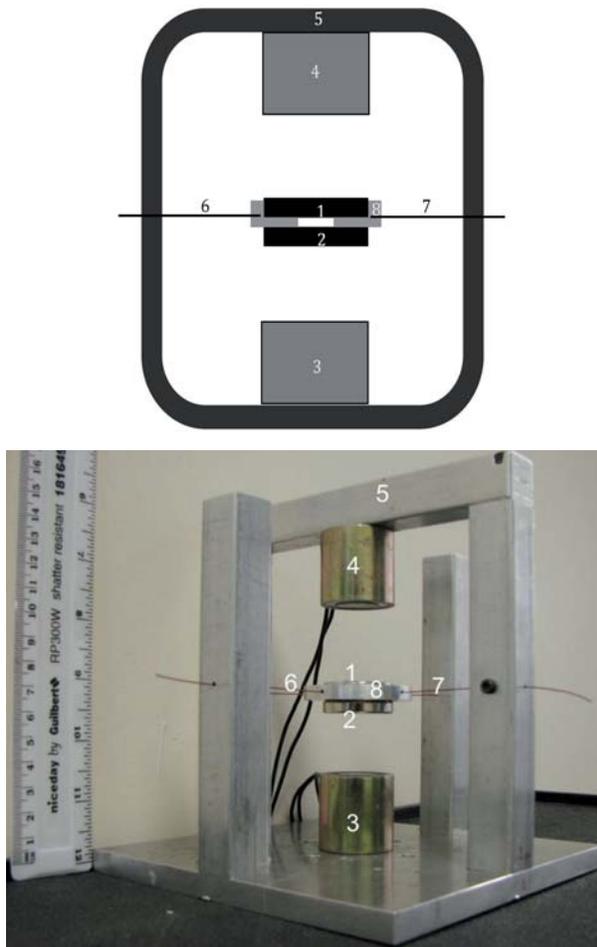


Fig. 2. (a) Diagrama del dispositivo experimental de rigidez variable en posición vertical. Los imanes permanentes {1, 2} se suspenden entre dos electroimanes {3, 4} usando cuatro cables {6, 7} que fijan el ensamble con los imanes permanentes al marco principal {5}. (b) Fotografía del dispositivo implementado.

permanentes, formados por discos de neodimio {1, 2} que se suspenden entre dos electroimanes {3, 4}, en un arreglo simétrico. Los imanes permanentes son sostenidos por un anillo de aluminio {8}, que se suspende usando cuatro cables tensionados, de los cuales solamente dos de ellos se muestran en la figura {6, 7}, los que se fijan al marco principal {5}.

La figura 2(b) muestra una fotografía del sistema. La masa total de los imanes permanentes y del anillo de aluminio es 0.0753 Kg., que es la masa a aislar. Variando el voltaje aplicado a los electroimanes, la fuerza repulsiva cambia, y la rigidez efectiva combinada del sistema se varía. Es importante observar que aunque el sistema mostrado en las figuras se presenta en la posición

vertical, los experimentos fueron hechos con el sistema en posición horizontal para evitar el efecto de la gravedad.

Cuando se apagan los electroimanes, la rigidez efectiva del sistema estará en su estado bajo o más suave. Este ajuste de la rigidez está definido básicamente por dos mecanismos. El primero es dado por los cables, que proporcionan parte de la rigidez efectiva permanente del sistema. El segundo mecanismo se debe a un efecto de reducción de la rigidez producido como resultado de la atracción entre el núcleo de hierro de los electroimanes, cuando están apagados, y los imanes permanentes. Este efecto se pone más de manifiesto cuando los imanes permanentes se acercan a los electroimanes, debido a la naturaleza no lineal de las fuerzas magnéticas.

Se diseñó el sistema de tal manera que los alambres de soporte se puedan cambiar, por otros de diversos materiales y/o grosor, para obtener así diversas características de rigidez.

El estado de alta rigidez se genera cuando se activan los electroimanes. Una vez que los electroimanes se han encendido en la configuración repulsiva, la rigidez aumenta, quedando el sistema en su estado de alta rigidez. Este estado difiere considerablemente del estado de baja rigidez explicado anteriormente, pues en este caso, la fuerza repulsiva entre los electroimanes y los imanes permanentes causa un efecto de endurecimiento.

Los electroimanes utilizados son capaces de trabajar el rango de voltaje de 0 a 24V. Sin embargo, para evitar un calentamiento excesivo se restringió la alimentación a un máximo de 18 V, dado que los electroimanes consumen una corriente considerable de entre 1 y 3 A.

Para los propósitos de este estudio y el análisis subsecuente, solamente los estados extremos de rigidez se consideraron de interés pues corresponden a los que producen el cambio máximo de la rigidez. Esto significa que los electroimanes son sólo encendidos o apagados y por lo tanto, el cambio en la rigidez es casi inmediato.

Un aspecto importante a considerar en este dispositivo es la tensión en los cables de soporte. Se observó durante las pruebas que los alambres tendían a aflojarse durante el desarrollo de las pruebas, por lo que es necesario mantenerlos tensionados mediante

ajustes ocasionales. Este problema también causó variaciones leves en las frecuencias de resonancia y en la razón de amortiguamiento cuando las pruebas fueron repetidas, pues es muy difícil asegurar que la misma tensión se mantenga en los cuatro alambres durante toda la prueba.

Equipamiento

El objetivo principal de estimar las características físicas del sistema se realizó midiendo la respuesta en frecuencia del dispositivo por medio de excitación al azar de banda ancha aplicada a la base. Se midió el pico de resonancia a diferentes voltajes para calcular el cambio efectivo de la rigidez. Estas pruebas fueron realizadas con dos tipos diferentes de alambres de soporte, a saber uno de titanio y otro de nylon.

Los equipos y aparatos usados fueron:

- Analizador de señales, marca Data Physics, modelo SignalCalc Mobilizer.
- Fuente de energía triple, marca Hameg, modelo HM7042-5.
- Acelerómetros, marca PCB, modelo 352C22 (2).
- Excitador electrodinámico, marca Derritron, modelo VP4.
- Amplificador de potencia, marca Cambride Audio, modelo M30.
- Acondicionador de señales, marca PCB, modelo 442C04.

En la figura 3 se muestra un diagrama a bloques de la configuración del equipo. Se usaron dos acelerómetros para adquirir las señales, uno se colocó en la mesa del excitador y el otro en los imanes suspendidos, de tal manera que se pudiera tener simultáneamente la información de la excitación y la respuesta que produce ésta en el sistema vibratorio.

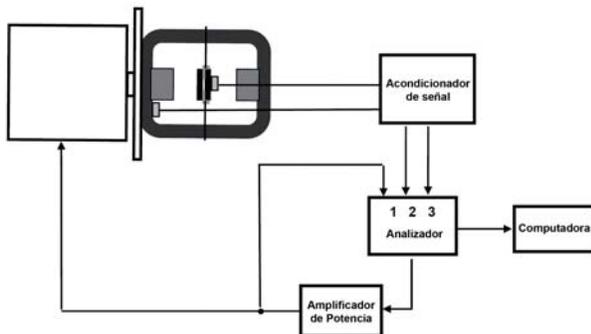


Fig. 3. Diagrama esquemático de la disposición de los equipos usados en las pruebas de laboratorio.

El analizador Data Physics fue utilizado para calcular la función de respuesta a la frecuencia usando las señales de entrada de los acelerómetros. Además, el mismo analizador fue utilizado para enviar la señal al excitador a través de un amplificador de potencia.

Los niveles de señal máximos medidos en la base fueron de alrededor de 0.08 g y 1 g para las ganancias mínima y máxima del amplificador usadas en las pruebas y esta amplitud base fue considerada como referencia para la determinación de la transmisibilidad. Las funciones de respuesta de frecuencia fueron adquiridas usando una ventana tipo Hanning, 1,600 líneas de resolución, un rango de frecuencias de 0 a 200 Hz, 40 promedios, y un traslape de la ventana de datos del 50%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se mencionó anteriormente, hay 3 aspectos importantes a evaluar del dispositivo experimental propuesto, estos son la linealidad del sistema, el rango en que se puede variar la rigidez y las características de amortiguamiento del sistema al vibrar. A continuación se presentarán y discutirán los resultados experimentales obtenidos.

Linealidad

Uno de los problemas potenciales de este dispositivo experimental es la presencia de fenómenos no lineales debido a las fuerzas magnéticas implicadas. Según lo mencionado previamente, el sistema exhibe un comportamiento más flexible cuando se apagan los electroimanes, porque los imanes permanentes son sólo atraídos por el hierro de los electroimanes. En cambio, un efecto de endurecimiento se presenta cuando se encienden los electroimanes, debido a la fuerza magnética repulsiva, la cual es esencialmente no lineal.

Se llevó a cabo una prueba estática simple para determinar la relación fuerza deformación del sistema para comprobar la linealidad del sistema. Se colocaron diversos pesos en el sistema y se midió la deflexión del sistema. La figura 4 presenta los resultados de esta prueba.

Es importante tener presente que durante las pruebas dinámicas los desplazamientos nunca

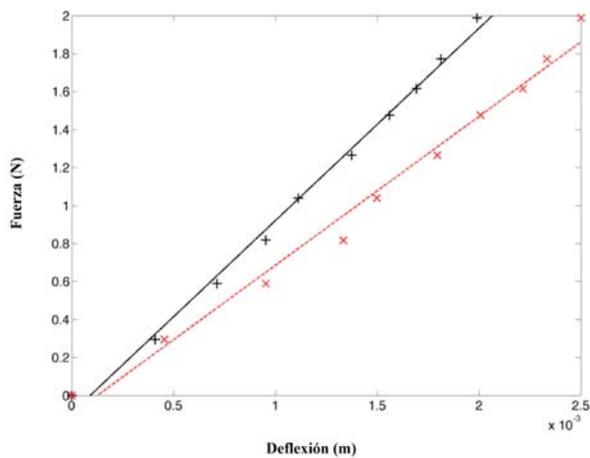


Fig. 4. Ejemplo de gráfica fuerza-deformación para el sistema magnético de elasticidad variable usando cables de nylon como soporte. La línea continua representa el estado de alta elasticidad (electroimanes encendidos) y la línea punteada el estado de baja elasticidad (electroimanes apagados).

fueron mayores a 1 mm, por lo que la prueba estática demuestra que por lo menos en el rango de desplazamientos de interés el sistema se comporta aproximadamente lineal. También se determinó que entre estos límites el sistema se comporta como un modelo de un solo grado de libertad, en base a sus gráficas de respuesta como se podrá observar en las siguientes secciones.

Relación de reducción de rigidez

Las gráficas que se presentan en las figuras 5 a 12 representan la magnitud de transmisibilidad, el ángulo de fase y la coherencia. Las gráficas se presentan en dB para la magnitud (V/V) y en escala lineal para la frecuencia (Hz). La figura 5 corresponde al dispositivo sin los electroimanes. La figura 6 para el caso con los electroimanes colocados en el dispositivo pero apagados. La figura 7 es para los electroimanes energizados con 12 V, y la figura 8 para los electroimanes encendidos alimentados con 18 V, todas estas figuras corresponden al uso de cables de soporte de nylon. Por otro lado las figuras 9 a 12 representan las mismas situaciones pero utilizando cables de titanio.

Se puede observar en las gráficas de coherencia, las cuales son un indicador de la linealidad del sistema, que en el rango de interés el comportamiento tiende a ser lineal, salvo en algunas perturbaciones

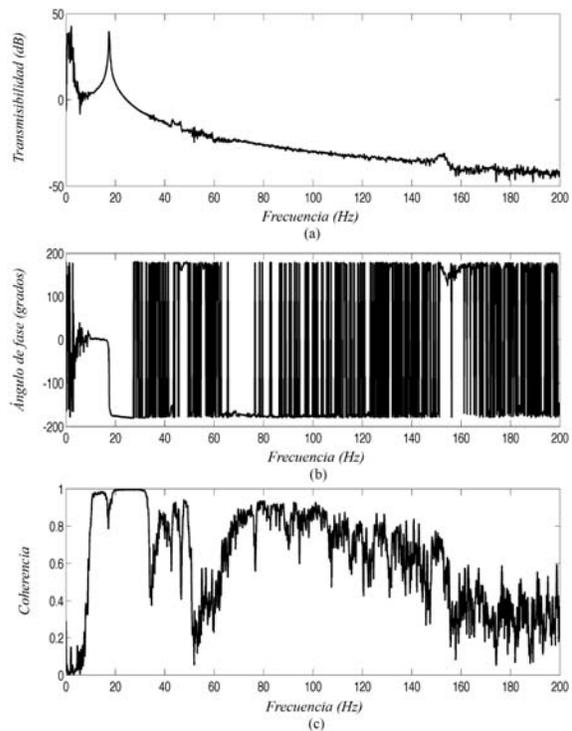


Fig. 5. Transmisibilidad del resorte magnético, sin los electroimanes colocados en el dispositivo, soportados por los alambres de nylon. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

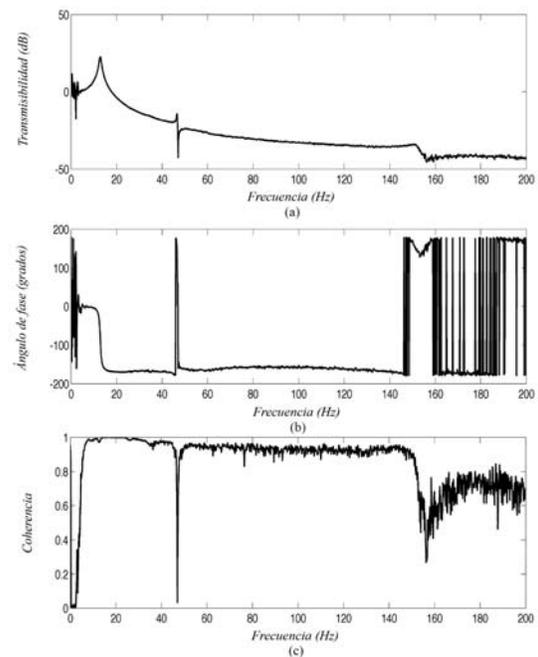


Fig. 6. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes apagados colocados en el dispositivo. El imán permanente es soportado por alambres de nylon. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

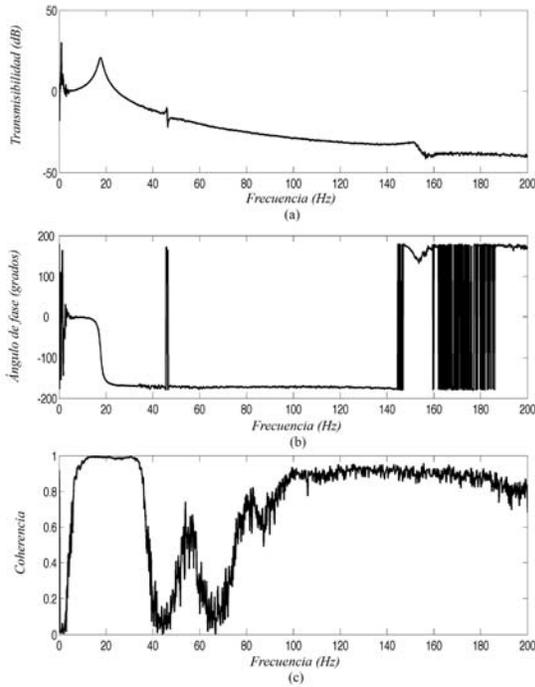


Fig. 7. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes funcionando energizados con 12 V. El imán permanente es soportado por alambres de nylon. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

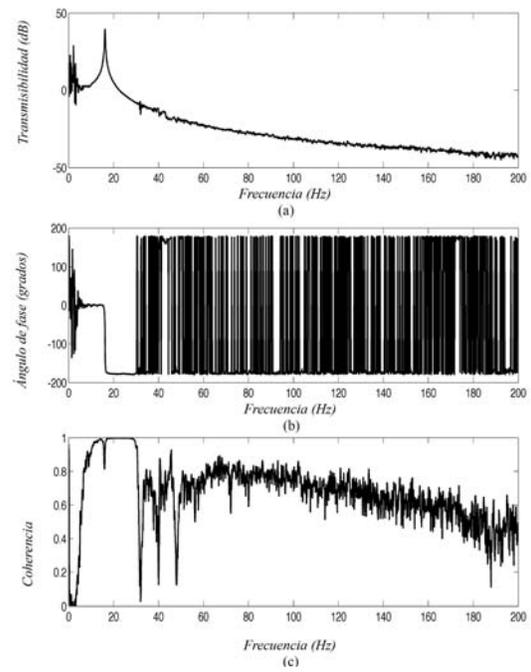


Fig. 9. Transmisibilidad del resorte magnético, sin los electroimanes colocados en el dispositivo, soportado con alambres de titanio. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

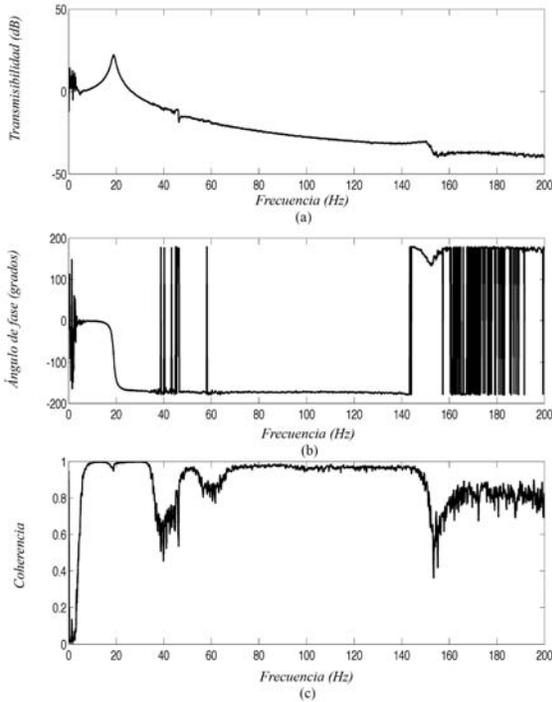


Fig. 8. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes funcionando energizados con 18 V. El imán permanente es soportado por alambres de nylon. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

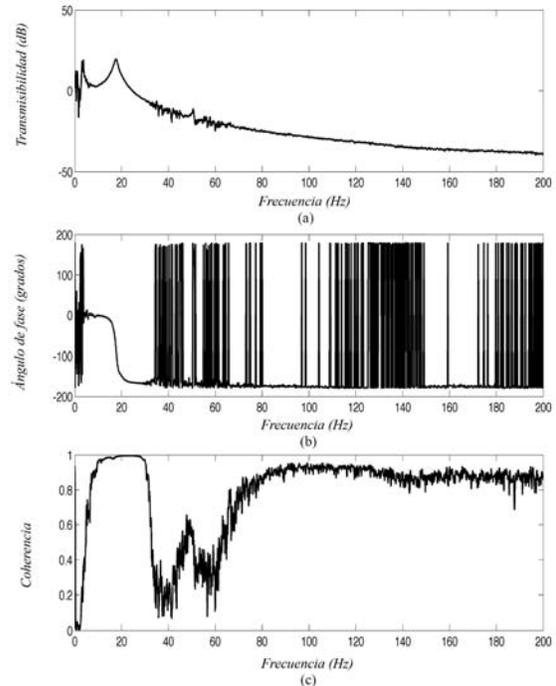


Fig. 10. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes apagados colocados en el dispositivo. El imán permanente es soportado por cables de titanio. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

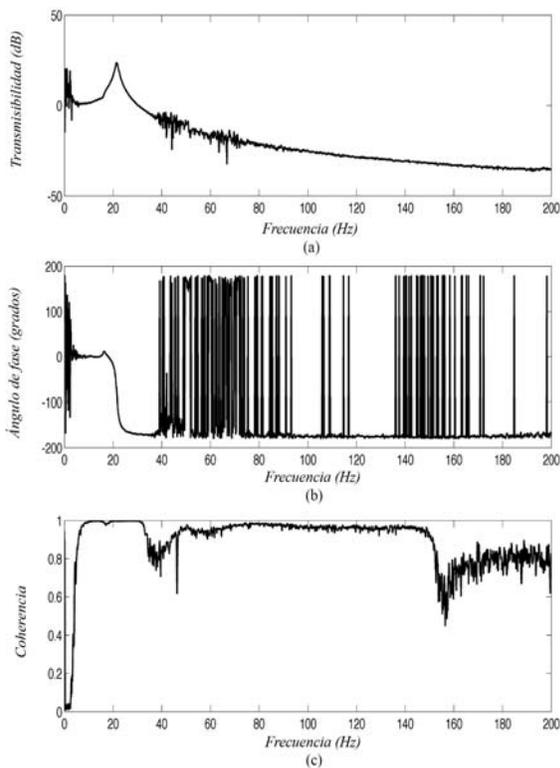


Fig. 11. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes energizados con 12 V. El imán permanente es soportado con alambres de titanio. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

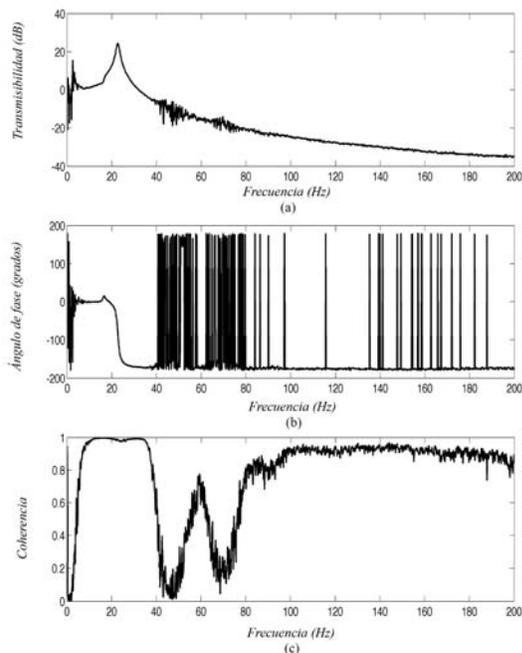


Fig. 12. Transmisibilidad del resorte magnético con los electroimanes energizados con 18 V. El imán permanente es soportado con alambres de titanio. (a) Magnitud. (b) Ángulo de fase. (c) Función de coherencia.

producidas por movimientos laterales los cuales en las gráficas de transmisibilidad tienen amplitudes bajas comparadas con el modo principal. Las figuras 5 y 9 muestran las funciones de respuesta a la frecuencia para el caso en que no se utilizan los electroimanes, cuando el imán permanente está suspendido por alambres de nylon y titanio respectivamente. Estas figuras son usadas para estimar la frecuencia natural del sistema sin la influencia magnética, en este caso aproximadamente de 17.37 Hz para el nylon y de 16.12 Hz para el titanio.

El objetivo principal de estas pruebas es evaluar las características físicas y el comportamiento en términos de la reducción de la rigidez equivalente. Estos parámetros se pueden obtener fácilmente de las gráficas de la transmisibilidad presentados previamente. Las frecuencias naturales alta y baja están relacionadas con el coeficiente de reducción de la rigidez σ por la expresión siguiente:¹⁶

$$\sigma = 1 - \left(\frac{\omega_{off}}{\omega_{on}} \right)^2 \quad (1)$$

Los resultados para las características de sistema en cuanto al cambio de rigidez, que corresponden a las diferentes situaciones, se resumen en la tabla I.

El efecto de la fuerza magnética en el cambio de la rigidez efectiva del sistema es fácilmente visible de la inspección de las gráficas de transmisibilidad. Aunque el efecto es pequeño cuando se utilizan alambres de titanio, hay un cambio de la rigidez de

Tabla I. Características del modelo con rigidez variable para las diversas estrategias de conmutación consideradas.

Configuración		Frecuencia Natural Hz	Rigidez N/m	Relación de reducción de rigidez
Nylon	Sin electromagnetos	17.37	898.0	
	Electromagnetos apagados	12.75	483.3	
	12V	17.75	936.6	0.484
	18V	19.00	1073	0.550
Titanio	Sin electromagnetos	16.12	772.5	
	Electromagnetos apagados	17.62	922.9	
	12V	21.50	1374	0.314
	18V	22.87	1556	0.415

31.4% y 41.5% para los voltajes aplicados de 12 V y de 18 V respectivamente.

En el caso de los alambres de nylon se produce una rigidez residual más suave, y el cambio relativo efectivo de la rigidez usando los electroimanes en este caso es considerablemente más alto, siendo de 48.4% y 55% para 12 V y 18 V respectivamente.

Otro punto de interés es el hecho de que la inclusión de los electroimanes causa el efecto de reducción de rigidez ya mencionado cuando están apagados. La frecuencia natural se reduce drásticamente cuando se colocan los electroimanes en el dispositivo, comparado al caso sin los electroimanes presentes.

Razón de amortiguamiento

La razón de amortiguamiento ζ fue calculada con el método del ancho de banda para la mitad de la potencia del pico de resonancia¹⁷ a partir de la función de respuesta a la frecuencia (FRF) como:

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_n} \quad (2)$$

La figura 13 presenta una comparación final usando la configuración del sistema sostenido con los alambres de nylon. En la gráfica las líneas sólidas y las discontinuas representan el estado apagado del electroimán y el estado encendido energizado con 12 V

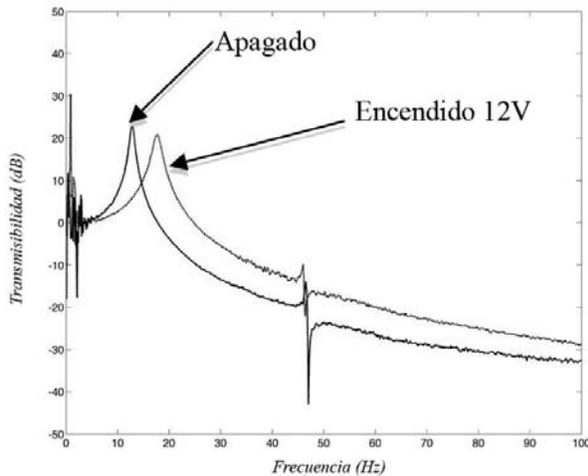


Fig. 13. Magnitud de la transmisibilidad del sistema soportado con alambres de nylon. La línea continua representa el estado apagado (rigidez baja) y la línea de puntos representa el estado encendido energizado con 12 V (alta rigidez).

V respectivamente. Esta situación es considerada la óptima debido al considerable cambio de rigidez que puede obtenerse con la aplicación de un voltaje que no causó sobrecalentamiento.

Los resultados para las características de amortiguamiento del sistema, que corresponden a las diferentes situaciones, se resumen en la tabla II.

Tabla II. Características del modelo con rigidez variable en cuanto a amortiguamiento.

Configuración		Frecuencia Natural Hz	Razón de amortiguamiento
Nylon	Sin electromagnetos	17.37	0.007
	Electromagnetos apagados	12.75	0.034
	12V	17.75	0.045
	18V	19.00	0.039
Titanio	Sin electromagnetos	16.12	0.004
	Electromagnetos apagados	17.62	0.064
	12V	21.50	0.072
	18V	22.87	0.030

Como se esperaba, el sistema tiene un factor de amortiguamiento muy bajo. Se determinaron valores de amortiguamiento en el rango de 0.007 a 0.04 para los alambres de nylon y de 0.004 a 0.07 para el titanio, dependiendo de las diversas configuraciones probadas. Agregando los electroimanes el factor de amortiguamiento efectivo aumentó, así como cuando los electroimanes funcionaban. Este incremento en el amortiguamiento pudo ser un resultado de la formación de corrientes de Foucault (Eddy) debido al elemento conductor que se mueve a través del campo magnético.

Otro aspecto importante a observar es que el factor de amortiguamiento efectivo era más alto para los alambres de titanio, esto posiblemente debido a las propiedades de fluencia de este material y la fricción en las uniones entre el marco metálico y los alambres.

CONCLUSIONES

Se diseñó y desarrolló un dispositivo experimental para funcionar como un elemento de rigidez variable o conmutable basado en fuerzas

electromagnéticas usadas para obtener diferentes condiciones de rigidez.

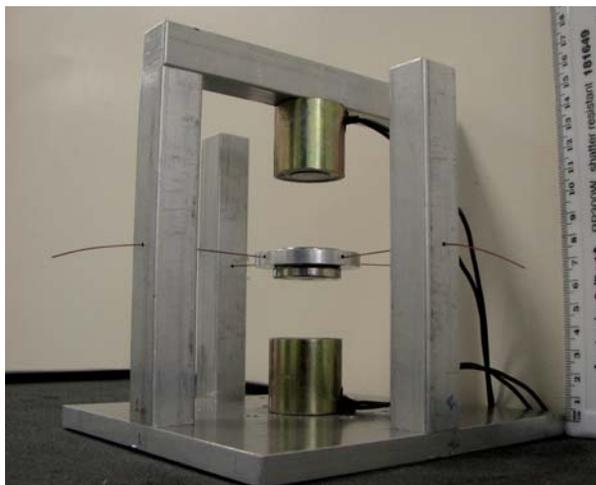
El dispositivo está constituido por un par de imanes permanentes formados por disco suspendidos mediante alambres entre dos electroimanes. La variación de la rigidez es obtenida ajustando el voltaje suministrado a los electroimanes.

En cuanto a la linealidad del sistema ésta se evaluó mediante pruebas estáticas y dinámicas, encontrando que el sistema se comporta aproximadamente lineal en el rango de desplazamientos de interés, es decir para pequeños desplazamientos, menores a 1 mm.

La situación que produjo los mejores resultados en cuanto a cambio de rigidez, se da cuando se usan alambres de nylon para sostener el imán permanente, puesto que el cambio de la rigidez es mayor y el factor de amortiguamiento pasivo inherente era más bajo.

Por otra parte, los parámetros del sistema se han estimado para los estados encendido y apagado de los electroimanes, obteniéndose para las configuraciones estudiadas una reducción de la rigidez de aproximadamente el 50% usando cables de soporte de nylon, con un amortiguamiento pasivo inherente bajo, $\zeta < 0.05$.

El cambio de la rigidez se puede realizar muy rápidamente puesto que depende solamente de encender o apagar los electroimanes. Así, las características del dispositivo desarrollado resultan útiles para su uso futuro en aislamiento vibratorio



mediante control semiactivo, donde una baja rigidez es requerida durante cortos periodos de tiempo, por ejemplo en el caso de control de impactos.

REFERENCIAS

1. Jalili, N., A comparative study and analysis of semi-active vibration-control systems. *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME*, 2002. 124(4): p. 593- 605.
2. Winthrop, M.F., Baker, W.P. and Cobb, R.G. A variable stiffness device selection and design tool for lightly damped structures. *Journal of Sound and Vibration*, 2005. 287(4-5): p. 667-682.
3. Schwartz, M. *Encyclopedia of smart materials*. 2002, John Wiley and Sons.
4. Grant, D., Hayward, V., Design of shape memory alloy actuator with high strain and variable structure control, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, p .2305–2312.
5. Williams, K., Chiu, G., Bernhard, R., Adaptive-passive absorbers using shape-memory alloys, *Journal of Sound and Vibration* 249 (5) (2002) p. 835–848.
6. Lesieutre, G., Vibration damping and control using shunted piezoelectric materials, *Shock and Vibration Digest* 30 (3) (1998) 187.
7. Corr, L.R. and Clark, W.W. Similarities between variable stiffness springs and piezoceramic switching shunts. *AIAA Journal*, 2006. 44(11): p. 2797-2800.
8. Davis, C., Lesieutre, G., An actively tuned solid-state vibration absorber using capacitive shunting of piezoelectric stiffness, *Journal of Sound and Vibration* 232 (3) (2000) p. 601–617.
9. Ramaratnam, A., Jalili, N. Dawson, D.M. Semi-active vibration control using piezoelectric-based switched stiffness. *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, MA, USA, 2004, 6: p 5461-6.
10. Ginder, J., Nichols, M., Elie, L., Tardiff, J., Magnetorheological elastomers: properties and applications, *Proceedings of the SPIE*, vol. 3675, *Smart Structures and Materials*, 1999, pp.131–138.

11. Albanese, M., Cunefare, K., Properties of a magnetorheological semiactive vibration absorber, Proceedings of the SPIE, vol. 5052, Smart Structures and Materials, Damping and Isolation, 2003, p.36–43.
12. Franchek, M.A., Ryan M.W., and Bernhard R.J., Adaptive passive vibration control. Journal of Sound and Vibration, 1996. 189(5): p. 565-585.
13. Walsh, P.L. and Lamancusa, J.S. Variable stiffness vibration absorber for minimization of transient vibrations. Journal of Sound and Vibration, 1992. 158(2): p. 195-211.
14. Bonello, P., Brennan, M.J., Elliott, S.J., Vincent, J.F.V., Jeronimidis, G. Design for an adaptive tuned vibration absorber with variable stiffness element. Proceedings of the Royal Society of London, Series A (Mathematical, Physical and Engineering Sciences): 2005. 461(2064): p. 3955-76.
15. Ledezma-Ramirez, D.F. Shock Isolation using Switchable Stiffness, PhD thesis, University of Southampton, 2008.
16. Harris, C.M., Crede, C.E., Shock and Vibration Handbook. 1996, New York: McGraw-Hill.
17. Kip, F.A. Fundamentals of electricity and magnetism, McGraw-Hill, Kogakusha, Tokyo, 1969.

Ingenierías
en línea

**A TEXTO COMPLETO
DESDE EL NÚMERO 1**

consulta en:
<http://ingenierias.uanl.mx>



Revista EIC

Página Web: <http://www.revistaeic.com>

Correos Electrónicos: eic_otsac94@hotmail.com;
jgbd@walla.com; jgbd@viabcp.com

Dirección Postal:
Director Revista EIC,
Los Químicos 161,
Urb. Ingenieros, La Molina,
Lima 12 - Perú

Telefax: 51-1-348-4427
Celular: 51-1-99-994-8993

MONTERREY CULTURA INDUSTRIAL A.C.



CONOCIMIENTO Y DIFUSIÓN
DE LA CULTURA INDUSTRIAL
DE MONTERREY

<http://www.monterreyculturaindustrial.org>

Editor: Javier Rojas Sandoval