

# Transmisibilidad vibratoria de un sistema de aislación mecánico-pasivo para aplicaciones en RPAS

Karen Riedel-Hornig<sup>1</sup>, Félix Leaman<sup>2</sup>, Frank Tinapp-Dautzenberg<sup>3</sup>, Cristián Vicuña<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales, Universidad de Concepción, Chile. Email: kriedel2017@udec.cl

<sup>2</sup> Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Universidad de Concepción, Chile. Email: fleaman@udec.cl

<sup>3</sup> Laboratorio de Técnicas Aeroespaciales, Universidad de Concepción, Chile. Email: ftinapp@udec.cl

<sup>4</sup> Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Universidad de Concepción, Chile. Email: cristianjvicuna@gmail.com

## Resumen

Este trabajo se enfoca en la aislación de vibración de componentes y equipos electrónicos o mecánicos que operan a bordo de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Se realizaron pruebas experimentales en un excitador mecánico con el fin de caracterizar la respuesta vibratoria de un sistema de aislación mecánico-pasivo ajustable con aisladores instalados en diferentes configuraciones espaciales y determinar el efecto de la disposición en el aislamiento de las vibraciones. Como resultado, se determinaron las curvas de transmisibilidad del sistema de aislación para cuatro configuraciones con cuatro aisladores del tipo bola de suspensión para un barrido frecuencial entre 5 Hz y 220 Hz, rango en que se producen las mayores excitaciones dinámicas en un RPAS comercial de pequeño tamaño. Se concluyó que la disposición de los aisladores mecánicos puede afectar significativamente la efectividad en el aislamiento de las vibraciones y, por lo tanto, deben ser correctamente seleccionados y dispuestos en base al rango de la frecuencia operacional.

**Palabras clave:** Aislación de vibraciones; Sistema de estabilización mecánico-pasivo; aisladores; RPAS.

## Abstract

This work focuses on the vibration isolation of electronic or mechanical components and equipment that operate on board RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Experimental tests were carried out on a shaker to characterize the vibration response of an adjustable passive-mechanical isolation system with isolators installed in different spatial configurations and to determine the effect of the arrangement on vibration isolation. As a result, the transmissibility curves of the isolation system were determined for four configurations with four suspension ball type isolators for a frequency sweep between 5 Hz and 220 Hz, range in which the largest dynamic excitations occur in a small commercial RPAS. It was concluded that the arrangements of the mechanical isolators can significantly affect the effectiveness of vibration isolation and, therefore, they must be correctly selected and arranged based on the operating frequency range.

**Keywords:** Vibration isolation; Passive-mechanical stabilization system; isolators; RPAS.

## 1. Introducción

En las industrias aeroespacial, automotriz y náutica [1, 2, 3, 4] existen grandes desafíos en desarrollar nuevas tecnologías y métodos para la aislación de vibración de componentes mecánicos y electrónicos. Las máquinas de estas industrias están expuestas a condiciones adversas y fuerzas dinámicas que generan vibraciones que producen disconformidades, pérdidas de rendimiento y

en algunos casos son un peligro latente para la operación. Es por esto que es indispensable estudiar las vibraciones a las cuales se encuentran expuestas y desarrollar sistemas de aislación como, por ejemplo, con aisladores mecánicos que permitan mitigar las vibraciones transmitidas.

Un tema de estudio que se encuentra en desarrollo es la aplicación de sistemas de aislación de vibración

mecánicos en equipos y sensores abordo de RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). El avance tecnológico de los RPASs es un tema de gran interés actualmente debido a su variedad de aplicaciones y usos en áreas científicas, tecnológicas, agrícolas, dentro de otras [5,6]. Los RPASs pueden ser equipados con múltiples equipos y sensores, siendo sistemas de adquisición de imagen los más comúnmente utilizados [7,8]. Sin embargo, durante el vuelo, los RPASs están expuestos a diferentes fuentes de vibración debido a las condiciones de vuelo, maniobras de vuelo, componentes mecánicos móviles y factores externos. Si las vibraciones experimentadas durante vuelo se transmiten a los equipos y sensores a bordo, estas pueden afectar negativamente su rendimiento y en casos severos dañarlos físicamente.

En particular, cuando las vibraciones son transmitidas a las cámaras a bordo, se producen borrosidades en la imágenes del tipo *motion blur* y desencuadre de la escena, alterando la definición de las imágenes resultantes [8, 9]. Esto dificulta tanto el mapeo de la escena como también el reconocimiento de patrones (*pattern recognition*) y seguimiento de objetivos con las imágenes. Para abordar esta problemática, se han propuesto diferentes métodos de estabilización de imagen que permitan mitigar el efecto de las vibraciones sobre las cámaras en RPAS. Estos métodos se pueden clasificar en: digitales, ópticos y mecánicos, los cuales pueden operar de forma conjunta para alcanzar mejores resultados [8, 10].

Los métodos de estabilización de imagen digitales son utilizados cuando las imágenes ya han sido procesadas y presentan borrosidades. Estos métodos corrigen el efecto de *motion blur* en las imágenes capturadas estimando el desplazamiento inducido por la vibración y realizando las correcciones adecuadas a través de técnicas y algoritmos digitales. Sin embargo, este método presenta la limitante del campo de visión captado por la cámara. De presentarse vibraciones con gran amplitud, se puede perder el rastro de un punto de referencia, y en consecuencia no es posible realizar las correcciones digitales [11].

Los métodos de estabilización óptica corresponden a mecanismos internos de la cámara que controlan y modifican la trayectoria óptica del lente [12]. La ventaja de estos métodos es que la imagen proyectada en el lente es estabilizada antes de transformarse en información digital.

Los métodos de estabilización mecánica corresponden a la primera oportunidad para eliminar borrosidad en las imágenes, previo al procesamiento de datos y reducir las posibilidades de daño a los componentes

ópticos. Para aislar las vibraciones se implementa un mecanismo que permita contrarrestar los desplazamientos inducidos por las vibraciones. La implementación de estos métodos tiene la ventaja de que pueden operar en un amplio rango de frecuencia y de amplitud [9, 10]. Dependiendo de su forma de actuar, estos métodos se clasifican en activos o pasivos. Los métodos de estabilización mecánica activa atenúan las vibraciones mediante la implementación de sistema de control activo, mientras que los métodos pasivos corresponden a mecanismos convencionales diseñados con materiales viscoelásticos. Resultados anteriores sugieren que sistemas mecánico pasivo permiten la reducción de las vibraciones durante el vuelo hasta en un 90% [13].

Este trabajo se enfoca en la aislación de vibración de componentes y equipos electrónicos o mecánicos que operan a bordo de RPAS, por ejemplo, cámaras y sensores. Es un tema sumamente relevante, ya que dependiendo de la severidad vibratoria experimentada durante vuelo se pueden generar daños en los componentes y alteraciones en los datos adquiridos, comprometiendo negativamente la misión de vuelo. Así, es importante determinar la transmisibilidad del sistema en los rangos de frecuencia operacionales con el objetivo de seleccionar un sistema adecuado y así lograr una mejor calidad de las imágenes captadas y de los datos obtenidos. En específico, se realizaron pruebas empíricas en laboratorio donde se registró la respuesta vibratoria de un sistema de aislación mecánico-pasivo ante una excitación de entrada conocida y controlada. Se estudiaron las características de aislación en distintas configuraciones de aisladores mecánicos-pasivos, siendo un experimento altamente reproducible y aplicable en otros problemas de sistemas mecánicos de mayor complejidad. En la literatura [2, 3], si bien se han realizado pruebas experimentales con sistemas de aislación, existe poca documentación respecto a cómo diferentes disposiciones de los aisladores mecánicos afectan la efectividad en el aislamiento de las vibraciones.

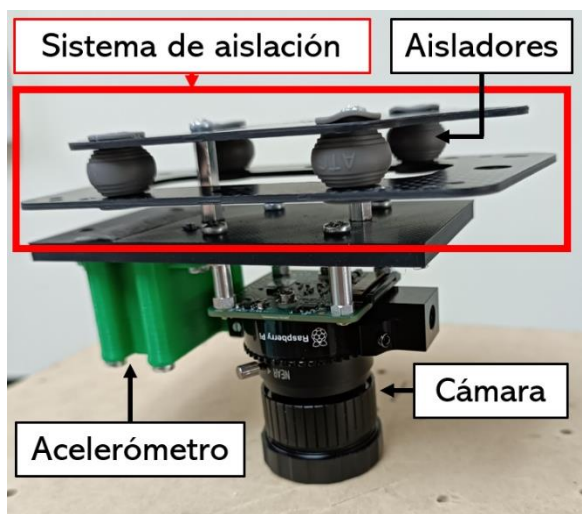
## 2. Método

Se realizó una caracterización de la respuesta vibratoria de un sistema de aislación ajustable con aisladores mecánicos-pasivos del tipo bola de suspensión. Este tipo de aisladores se encuentran comercialmente disponibles y son comúnmente utilizados en aplicaciones de RPAS debido a sus características, ya que son ligeros, pequeños, de bajo costo, con alta confiabilidad y no requieren de una fuente de alimentación. A continuación, se documenta el procedimiento realizado en la pruebas experimentales y el procesamiento de los datos adquiridos. Se determinaron las curvas de transmisibilidad de los sistemas de aislación de vibración estudiados y se definió una configuración adecuada en base a un

criterio de selección para ser implementada en RPAS comerciales de pequeño tamaño.

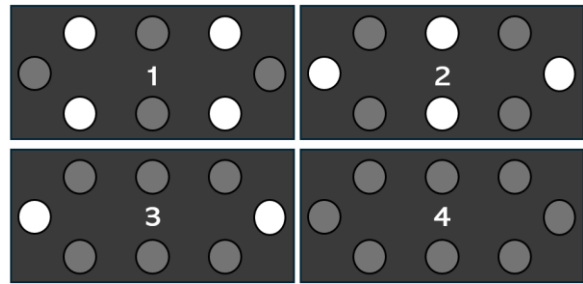
## 2.1. Pruebas experimentales

El sistema de aislación propuesto se diseñó con dos placas perforadas de fibra de carbono, en las cuales se instalaron los aisladores en cuatro distintas configuraciones espaciales. Al sistema de aislación se le ensambló una cámara, de tal forma que los aisladores del sistema de aislación actúen en compresión. En la Figura 1, se detallan los componentes del sistema de aislación mecánico-pasivo con cuatro aisladores y una cámara montada.



**Figura 1.** Sistema de aislación de vibraciones mecánico-pasivo ajustable. Fuente: elaboración propia.

Para efectos del alcance de este trabajo se considera únicamente el estudio del montaje de cuatro aisladores de bola de suspensión de tamaño diferente, los cuales se diferencia visualmente por su color: amarillo (A), rojo (R), negro (N) y gris (G). Los cuatro aisladores estudiados se montaron en cuatro configuraciones espaciales cada uno en el sistema de aislación de vibraciones ajustable. Las cuatro configuraciones estudiadas se presentan ilustrativamente en la Figura 2 y se le asigna a cada una un número de identificación. En la Figura 2, los agujeros de color gris representan la ubicación de los aisladores en el sistema de aislación y aquellos agujeros de color blanco corresponden a espacios donde no se ubica un aislador para dicha configuración. Adicionalmente, a modo de ejemplo en la Figura 3 se muestra la Configuración N°3 con aisladores G y la Configuración N°4 con aisladores R respectivamente.

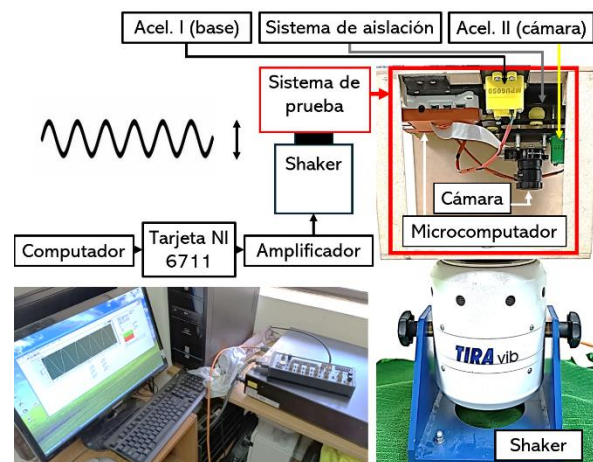


**Figura 2.** Configuración de montaje de los aisladores en el sistema de aislación mecánico-pasivo con i) Configuración N°1, ii) Configuración N°2, iii) Configuración N°3 y iv) Configuración N°4. Fuente: elaboración propia.



**Figura 3.** A la izquierda: Configuración N°3 con aisladores G. A la derecha: Configuración N°4 con aisladores R. Fuente: elaboración propia.

La determinación de la transmisibilidad vibratoria se realizó a partir de pruebas experimentales en condiciones de laboratorio con un excitador mecánico (*shaker*) modelo TIRAvib s 51110 para luego registrar las vibraciones experimentadas en una carga útil que reposa sobre el sistema de aislación. Para efectos de este estudio, la carga útil corresponde a una cámara de un RPAS montada sobre el sistema de aislación mecánico-pasivo ajustable y un sistema de medición de vibraciones que opera en conjunto con un microcomputador modelo Raspberry Pi 4B y dos acelerómetros digitales triaxiales modelo MPU6050. El montaje de las pruebas experimentales realizadas en condiciones de laboratorio se presenta en la Figura 4.



**Figura 4.** Montaje de las pruebas experimentales de medición de vibración en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

En específico, se aplicó una excitación en un barrido sinusoidal de 5-220 Hz, ya que es el rango operacional donde se encuentran las principales excitaciones dinámicas y, se alcanzan las mayores amplitudes en un RPAS comercial de pequeño tamaño. Se midieron las aceleraciones percibidas en la estructura soportante o base (entrada) y en la ubicación de la cámara montada bajo el sistema de aislación de vibraciones (salida). Luego, al analizar en frecuencia las respuestas vibratorias obtenidas se graficaron las curvas de transmisibilidad para detectar las zonas de frecuencia donde ocurre aislación y, las zonas donde ocurre amplificación.

## 2.2. Curva de transmisibilidad

La transmisibilidad describe como el movimiento es transmitido desde la base o estructura hacia el cuerpo másico, que en este caso corresponde a la cámara. La transmisibilidad queda expresada según la Ecuación (1), donde  $T$  corresponde a la transmisibilidad y  $A$  es la amplitud. Se cumple que: si  $T > 1$  entonces existe una amplificación en la amplitud de la señal vibratoria medida en la cámara, si  $T < 1$  entonces existe una reducción en la amplitud de la señal medida en la ubicación de la cámara, y si  $T = 1$  tanto la amplitud vibratoria de la señal en la base y en la cámara poseen la misma magnitud.

$$T = \frac{A_{salida}}{A_{entrada}} = \frac{A_{cámara}}{A_{estructura}} \quad (1)$$

Las vibraciones nunca se pueden eliminar completamente del sistema, por lo que se debe minimizar esta relación para el rango de frecuencia que se desea aislar las vibraciones. Se requieren sistemas de aislación de vibraciones que puedan proporcionar pequeños valores de transmisibilidad en todas las frecuencias contenidas en el espectro de Fourier del desplazamiento aplicado a su estructura. En la selección de un sistema de aislación de vibraciones se debe considerar los siguientes criterios para que el sistema opere de forma eficaz.

- I. La frecuencia natural del sistema de aislación de vibraciones debe ser baja.
- II. La transmisibilidad debe ser baja en zonas de resonancia del sistema.
- III. La  $T$  debe disminuir rápidamente con la frecuencia a frecuencias mayores que la frecuencia natural de vibrar del sistema.

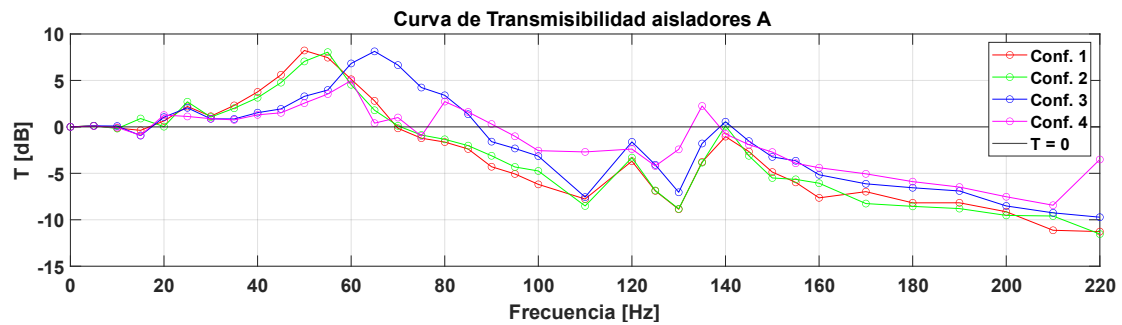
De lo anterior, es sumamente importante determinar las curvas de transmisibilidad del sistema de aislación en las diferentes configuraciones considerando los rangos de frecuencia operacionales para determinar las zonas de aislación y seleccionar un adecuado sistema de aislación en base a los criterios mencionados. Esto con

el objetivo final de lograr una mejor calidad de las imágenes captadas durante el vuelo, así como de los datos obtenidos por sensores a bordo.

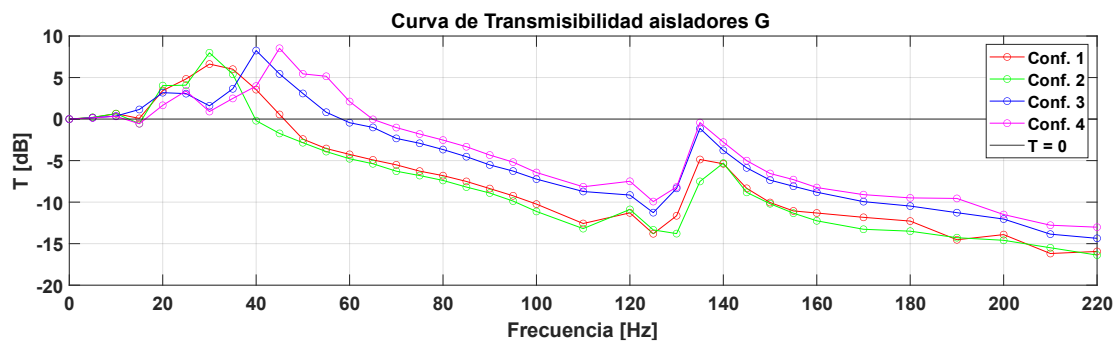
A continuación, se explica la metodología empleada para determinar la curva de transmisibilidad de los sistemas de aislación. Una vez realizadas las pruebas experimentales se creó una base de datos con el registro de las mediciones de vibración obtenidas a partir de los dos acelerómetros digitales montados en la estructura soportante y el otro en la ubicación de la cámara para las distintas configuraciones y los distintos aisladores. El procedimiento correspondiente al procesamiento de datos se explica a continuación. Los datos de las mediciones de vibración obtenidos se procesaron utilizando la Transformada de Fourier (TF), con la finalidad de separar las componentes de frecuencia de la función original. Posteriormente, se determinaron los espectros de amplitud para cada una de las pruebas de medición realizadas y se recuperaron los valores de amplitud de la estructura y de la ubicación de la cámara a la frecuencia de excitación que correspondiera. Conociendo el valor de la amplitud en la estructura y en la cámara es posible determinar la transmisibilidad para el barrido frecuencial. De esta forma se determinaron las curvas de transmisibilidad para cada configuración con los diferentes aisladores estudiados en los tres ejes (X, Y, Z). La curva de transmisibilidad se presenta en el eje de ordenadas en escala logarítmica dB y la frecuencia se presenta en el eje de abscisas en Hz. Los resultados se documentan en la Sección 3 únicamente para el eje vertical Z. Para visualizar los cambios entre una medición y otra de mejor manera se decide graficar la transmisibilidad en escala logarítmica, por lo que para valores mayores a cero se tiene una amplificación de la vibración en la ubicación de la cámara y para valores menores a cero se tiene una reducción de la vibración. En las curvas de transmisibilidad obtenidas se delimita con una línea continua cuando  $T = 0$ . Los valores que se encuentran bajo la línea continua corresponden a una zona de aislación de las vibraciones percibidas por la cámara y los valores que se encuentran sobre esta línea corresponden a zonas de amplificación de la vibración. Para las aplicaciones en RPASs comerciales de pequeño tamaño es de especial interés mantenerse en la zona de aislación en las banda de frecuencia de 150-200 Hz, debido a que es el rango operacional donde pueden alcanzar mayores amplitudes por la rotación de la hélices, principal fuente de excitación dinámica.

## 3. Resultados y discusión

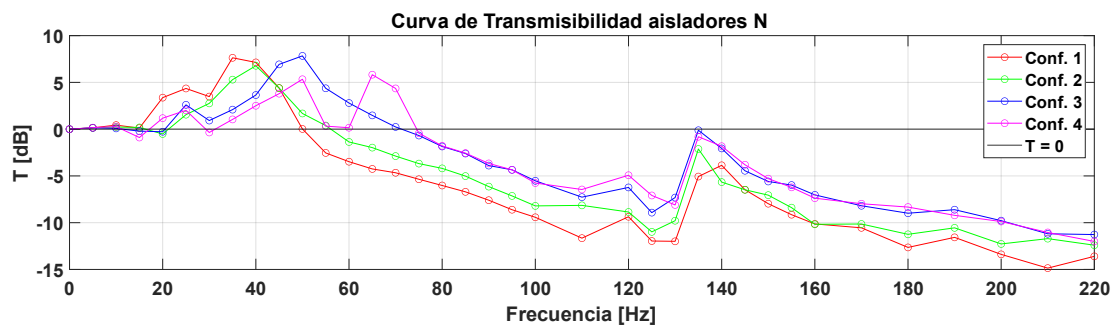
Los resultados de las curvas de transmisibilidad obtenidas para los cuatro aisladores estudiados se presentan en las Figuras 5, 6, 7 y 8, correspondientes a los aisladores A, R, G y N, respectivamente, en las cuatro configuraciones.



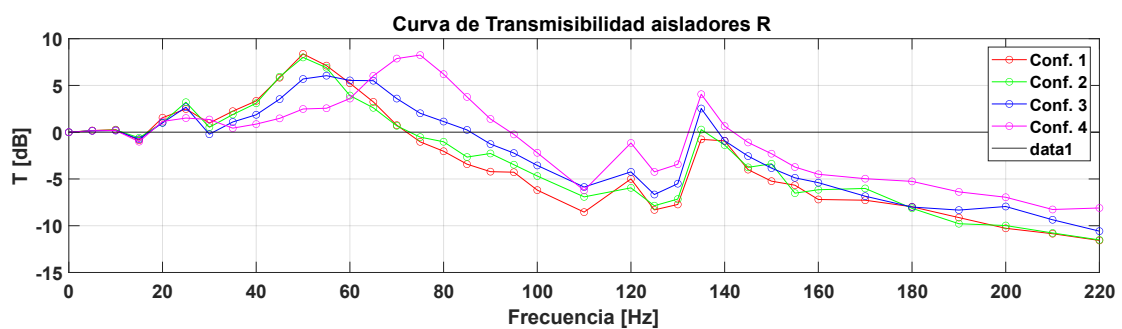
**Figura 5.** Curva de Transmisibilidad de aisladores A para las distintas configuraciones del sistema de aislación.



**Figura 6.** Curva de Transmisibilidad de aisladores G para las distintas configuraciones del sistema de aislación.



**Figura 7.** Curva de Transmisibilidad de aisladores N para las distintas configuraciones del sistema de aislación.



**Figura 8.** Curva de Transmisibilidad de aisladores R para las distintas configuraciones del sistema de aislación.

Cabe destacar que los resultados que se documentan corresponden únicamente a las curvas de transmisibilidad obtenidas a partir de las mediciones de vibración en la dirección vertical, que corresponde a la dirección en la que el excitador mecánico excita al sistema conjunto. A partir de las curvas de transmisibilidad es posible detectar las zonas de aislación ( $T < 0$ ) y amplificación ( $T > 0$ ) en el barrido frecuencial entre 5 Hz y 220 Hz con el sistema de aislación mecánico en las configuraciones estudiadas.

De los resultados obtenidos se desprende que:

Independiente de los aisladores implementados, existe una tendencia en el comportamiento a lo largo del barrido frecuencial de que ambas configuraciones con menor cantidad de aisladores (Configuración 1 y 2) poseen menores valores de transmisibilidad. Esto se observa, ya que en la Configuración 1 y 2 el valor de la transmisibilidad se mantiene por debajo de la línea referencial ( $T = 0$ ), es decir en la zona de aislación. Lo anterior ocurre en ambas configuraciones por un rango frecuencial mayor con los diferentes aisladores estudiados, obteniendo valores menores de la transmisibilidad en comparación a las configuraciones con mayor cantidad de aisladores.

Para el caso de la Configuración 3 y 4, el rango en el cual existe reducción de las vibraciones es más acotado. Esto se debe a que al implementar mayor número de aisladores el montaje es más rígido, y en consecuencia existe mayor transmisión de las vibraciones desde en la estructura soportante hacia la cámara.

Los aisladores mecánicos poseen propiedades de amortiguamiento y rigidez permitiendo el desplazamiento de la cámara en la dirección vertical y también de forma lateral. En consecuencia, debido a las características de diseño del sistema de aislación de vibraciones existe una frecuencia natural asociada al modo de vibrar en la dirección vertical y una al modo de vibrar en la dirección lateral. Esto se observa donde ocurren zonas resonantes en las curvas de transmisibilidad de los aisladores en las diferentes configuraciones.

En particular, se observa que los aisladores *G* posee una frecuencia natural menor en comparación a los aisladores *A*, *N* y *R*.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos se selecciona una alternativa para ser implementada. Considerando los criterios mencionados en la Sección 2.2, se selecciona el sistema cuya frecuencia natural es menor, en el cual la transmisibilidad idealmente sea baja en las zonas donde ocurre resonancia y cuya transmisibilidad decrezca rápidamente luego de una

zona resonante. Para obtener un valor bajo de la frecuencia natural se pueden considerar dos posibilidades: i) aumentar la masa del sistema y/o ii) considerar un sistema con rigidez baja. Debido a las condiciones de operación y capacidad de los RPASs es necesario contar con un equipamiento de bajo peso, por lo que la alternativa i) no sería propicia para estas aplicaciones. En base a las curvas de transmisibilidad se observa que los aisladores *G*, Figura 6, poseen menores valores de frecuencia natural en comparación a los otros aisladores caracterizados en este estudio. Luego, la mejor alternativa para implementar un sistema de aislación de vibraciones en un RPAS de pequeño tamaño corresponde a la Configuración N°2 con los aisladores *G*, ya que satisfacen de mejor manera los criterios para un sistema de aislación eficaz.

#### 4. Conclusiones y trabajos futuros

A continuación, se documentan las conclusiones establecidas a partir de los resultados obtenidos en este trabajo, así como posibles investigaciones futuras a desarrollar.

##### 4.1. Conclusiones

En este trabajo se realizaron pruebas empíricas en condiciones de laboratorio con un excitador mecánico a modo de caracterizar la respuesta vibratoria de un sistema de aislación mecánico-pasivo ajustable con aisladores del tipo bola de suspensión disponibles comercialmente y que fueron montados en cuatro diferentes configuraciones espaciales. Con el excitador mecánico se aplicó una excitación sinusoidal para un barrido frecuencial entre 5 Hz y 220 Hz, ya que es el rango operacional donde se encuentran las principales excitaciones dinámicas y, se alcanzan las mayores amplitudes en un RPAS comercial de pequeño tamaño. Se midieron las aceleraciones percibidas en la estructura principal y en la ubicación de la cámara montada bajo el sistema de aislación de vibraciones. Luego se realizó un procesamiento de los datos, se determinó las curvas de transmisibilidad y se seleccionó la configuración más adecuada en base a los resultados.

Se determina que, para seleccionar un adecuado y eficaz sistema de aislación de vibraciones se deben considerar los siguiente criterios:

- I. La frecuencia natural del sistema de aislación de vibraciones debe ser baja.
- II. La transmisibilidad debe ser baja en zonas de resonancia.
- III. La transmisibilidad debe disminuir rápidamente con la frecuencia a frecuencias



mayores que la frecuencia natural de vibrar del sistema.

En base a las curvas de transmisibilidad obtenidas empíricamente y con los criterios de selección de un sistema de aislación eficaz, se propuso un sistema de aislación de vibraciones para ser implementado en aplicaciones de RPAS de pequeño tamaño, siendo este el sistema de aislación de vibraciones con el montaje de cuatro aisladores grises de bola de suspensión con menor rigidez.

De esta forma, se concluye que la disposición y cantidad de los aisladores mecánicos implementado en un sistema de aislación afectan la efectividad en el aislamiento de las vibraciones y no pueden ser seleccionados arbitrariamente. Se debe llevar a cabo un estudio para seleccionar el sistema en base al rango de la frecuencia operacional según la aplicación y según los criterios de eficacia de la transmisibilidad.

#### 4.2. Trabajos futuros

Como trabajo futuro queda la evidente continuación de esta investigación que corresponde a la implementación del sistema de aislación mecánico pasivo seleccionado en un RPAS a modo de verificar la reducción real de las vibraciones percibidas por la cámara durante vuelo.

De igual manera, es importante considerar en un trabajo futuro el estudio de la aplicación de aisladores de diversos materiales y formas como, por ejemplo: láminas de Sorbothane, láminas Kyosho Zeal, espuma de silicona, dentro de otros.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Concepción por el financiamiento y facilitar las instalaciones que permitieron el desarrollo de esta investigación.

#### 6. Referencias

- [1] H.T. Shi, M. Abubakar, X.T. Bai, Z. Luo, "Vibration isolation methods in spacecraft: A review of current techniques.", *Advances in Space Research*, vol. 73, no. 8, pp. 3993–4023, 2024. [PDF]. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.01.020>.
- [2] H. U. Oh, K. J. Lee, M. S. Jo, "A passive launch and on-orbit vibration isolation system for the spaceborne cryocooler," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 324–331, 2013. [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2012.11.013>.
- [3] K. C. Panda, "Dealing with Noise and Vibration in Automotive Industry" *Procedia Eng.*, vol. 144, pp. 1167–1174, 2016. [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.092>.
- [4] Y. Li, et al, "Improved hybrid isolator with maglev actuator integrated in air spring for active-passive isolation of ship machinery vibration" *J. Sound Vib.*, vol. 407, pp. 226–239, 2017. [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.07.007>.
- [5] E. A. Bolch, E.L. Hestir, S. Khanna, "Performance and feasibility of drone-mounted imaging spectroscopy for invasive aquatic vegetation detection" *Remote Sensing*, vol. 13, no. 4, 2021. [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.3390/rs13040582>.
- [6] H. Abdel-Maksoud, "Combining uav-lidar and uav-photogrammetry for bridge assessment and infrastructure monitoring" *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 17, no. 144, 2024 [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-024-11897-5>.
- [7] M. B. Dunbar, I. Caballero, A. Román, G. Navarro, "Remote Sensing: Satellite and RPAS (Remotely Piloted Aircraft System)" *Marine Analytical Chemistry*, pp. 389–417, 2023 [PDF]. Doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14486-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14486-8_9).
- [8] C. Dahlin-Rodin, F. A. Alcantara-Andrade, A. R. Hovenburg, T. A. Johansen. "A survey of practical design considerations of optical imaging stabilization systems for small unmanned aerial systems", *Sensors*, vol. 19, no. 21, 2019 [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.3390/s19214800>.
- [9] J. Windau, L. Itti, "Multilayer real-time video image stabilization". *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2397–2402, 2011 [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1109/IROS.2011.6094738>.
- [10] M. Verma, C. Collette, "Active vibration isolation system for drone cameras". *Springer, Singapore, Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Problems*, pp. 1067–1084, 2021.
- [11] Z. Duric, A. Rosenfeld, "Image sequence stabilization in real time," *Real-Time Imaging*, vol. 2, no. 5, pp. 271–284, 1996 [PDF]. Doi: <https://doi.org/10.1006/rtim.1996.0029>.
- [12] R. Y. Park, J. M. Pak, C. K. Ahn, and M. T. Lim, "Image stabilization using FIR filters," *ICCAS 2015 - 2015 15th Int. Conf. Control. Autom. Syst. Proc.*, no. Iccas, pp. 1234–1237, 2015 [PDF]. Doi: 10.1109/ICCAS.2015.7364819.

[13] A. Imam, R. Bicker, “Design and construction of a small-scale rotorcraft uav system. 2014 [PDF]. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212569615>.