

# Resumen

Los niveles de presión acústica experimentados por los vehículos espaciales durante las fases iniciales del lanzamiento (ignición de motores y despegue) son extremadamente elevados y pueden afectar significativamente a estructuras ligeras transportadas, como paneles solares y antenas. El intenso sonido generado por las fuentes primarias, el motor y el chorro, se ve reforzado por la reflexión en el fondo del canal de evacuación de gases, que actúa como un espejo desde el punto de vista acústico, y devuelve la energía liberada directamente al cohete y a las estructuras que transporta. Esta gran cantidad de energía puede poner en riesgo algunas misiones de lanzamiento, con las consecuencias económicas y de seguridad que ello conlleva. A pesar de la relevancia de este problema, el conocimiento sobre las características de las fuentes, el comportamiento de las instalaciones de suelo en referencia a la dispersión, difusión y absorción del sonido, y las posibles medidas para mitigar el impacto es todavía escaso. En este contexto se desarrollará el objetivo principal de esta Tesis, cuyo propósito es el diseño y optimización de un prototipo de sistema basado en un array de resonadores de Helmholtz para maximizar la absorción y dispersión del sonido a nivel del suelo y, de esta manera, mitigar los niveles de presión sonora generados en estos eventos en el contexto aeroespacial. Los trabajos de esta Tesis se han llevado a cabo en el marco del contrato Networking/Partnership Initiative 441-2015 de la Agencia Espacial Europea.

En primer lugar, se realiza un estudio bibliográfico del estado del arte centrado en la comprensión de las características del ambiente acústico en la plataforma de lanzamiento, así como en sus cercanías. Se incluyen aspectos tales como las fuentes de ruido y sus características, métodos existentes para la mitigación del ruido (principalmente basados en el uso de agua como agente refrigerador y absorbente) y los fundamentos de la absorción perfecta del sonido. Asimismo, se presentan en detalle dos estudios desarrollados previamente en el contexto de la mitigación del ruido de cohetes espaciales, de especial relevancia para este trabajo. El primero de ellos se dedica al estudio del comportamiento de la base de lanzamiento desde el punto de vista acústico mediante la construcción de una maqueta a escala. En el segundo trabajo se estudian las propiedades de los cristales de sonido como elementos difusores de ondas acústicas, así como su posible aplicación para la mitigación del campo acústico en la base de lanzamiento.

Los fundamentos teóricos de la metodología empleada, basada en el Método de Matrices de Transferencia (TMM), se detallan a continuación para problemas en reflexión y en transmisión. Este método se aplica en este trabajo para el análisis de la condición de acoplamiento crítico, a través del cual es posible conseguir absorción perfecta de sonido mediante el balance de las fugas de energía por radiación en el sistema y las pérdidas

intrínsecas del mismo. En base a estos conocimientos se realizará el diseño del sistema de resonadores de Helmholtz para la absorción y dispersión del sonido.

A modo introductorio se muestra la evidencia del acoplamiento crítico de forma analítica, numérica y experimental para la absorción perfecta de sonido en un sistema formado por un único resonador de Helmholtz insertado en una guía de ondas. Para ello se emplea un algoritmo de optimización basado en el TMM para obtener los parámetros geométricos de un resonador de Helmholtz de tal forma que presente absorción perfecta de sonido a la frecuencia de resonancia. El resultado de este proceso de optimización se valida numéricamente utilizando una simulación desarrollada con el Método de Elementos Finitos (FEM) y de forma experimental.

Este mismo procedimiento de diseño y análisis se emplea a continuación para diseñar un sistema con absorción cuasi-perfecta en una banda de frecuencias. El sistema está compuesto por cinco resonadores de Helmholtz en una guía de ondas separados entre sí por cavidades. Mediante la parametrización de la geometría de los resonadores y las cavidades se consigue optimizar el sistema para conseguir la máxima absorción de energía en un rango de frecuencias comprendido entre 400 Hz y 560 Hz. El sistema resultante presenta las resonancias propias de resonadores de Helmholtz, así como de los modos acoplados entre los elementos resonantes y las cavidades de aire. El control de las pérdidas de estos modos permite maximizar el coeficiente de absorción acústico en el rango de frecuencias deseado. Es importante destacar que, en este primer diseño se realiza la caracterización únicamente de sus propiedades de absorción sonora, sin tener en cuenta las de dispersión de ondas acústicas.

Para la medida de la absorción del sonido del sistema se emplea el Método de la Función de Transferencia (TFM) en un tubo de impedancia, en un rango de frecuencias y amplitudes para el cual se considera que la propagación de ondas es plana y en régimen lineal. Tras el estudio se observa un buen acuerdo entre los resultados analíticos y experimentales, habiéndose obtenido un coeficiente de absorción sonora similar tanto en magnitud como en rango de frecuencias con ambos métodos.

Finalmente, se propone estudiar el sistema en campo libre. Esta variación consiste en replicar el sistema de resonadores de Helmholtz en altura, dando como resultado una estructura periódica en una dimensión. Esta replicación tiene un doble objetivo: por un lado, permite crear una estructura periódica y, por otro, reduce los efectos de borde del sistema. En esta configuración, el sistema no se encuentra insertado en una guía de ondas y, por tanto, no se pueden asumir ondas incidentes perfectamente planas. Asimismo, los efectos de borde tienen un papel importante en el campo acústico resultante delante del sistema, por lo que deben ser tenidos en cuenta. Dado que la geometría y distribución de las estructuras resonantes es la misma, sus propiedades en cuanto a la absorción del sonido también se mantienen. Al mismo tiempo, esta distribución periódica en altura permite estudiar el sistema también desde el punto de vista de la dispersión de ondas

acústicas. El comportamiento de este sistema en cuanto a estos dos fenómenos físicos se ha caracterizado en campo libre en una cámara anecoica. En el estudio de este sistema se ha encontrado también un buen ajuste entre el modelo numérico y los resultados experimentales, habiéndose obtenido, como en el caso anterior, un coeficiente de absorción sonora similar tanto en magnitud como en rango de frecuencias.