

RESUMEN

La presente Tesis se centra en el desarrollo e implementación de métodos generales y eficientes para el modelado y diseño acústico de componentes de la línea de escape de motores de combustión interna. Merecen una especial atención los silenciadores, que se pueden dividir en configuraciones reactivas y disipativas. Estas últimas pueden llegar a presentar diferencias significativas en el comportamiento acústico debido a las variaciones de temperatura en el interior del material absorbente. La atenuación producida por el silenciador también puede sufrir alteraciones debido a las heterogeneidades que presenta el material asociadas al llenado irregular de la cámara y a la degradación de las fibras producida por el paso del tiempo. Por lo tanto, para obtener una predicción precisa del comportamiento acústico del silenciador considerando todas estas características es necesaria la utilización de técnicas numéricas.

En primer lugar, se lleva a cabo una revisión bibliográfica. Esta recopilación recoge principalmente los modelos unidimensionales y su representación matricial asociada, así como modelos acústicos de materiales absorbentes y superficies perforadas. Merece la pena destacar que las limitaciones inherentes a los modelos de onda plana hacen indispensable la utilización de métodos multidimensionales alternativos, ya que los últimos son válidos para un amplio rango de frecuencias, así como para silenciadores con geometrías complejas.

Además de desarrollar modelos acústicos para simular silenciadores de escape en términos generales, también se explora la posibilidad de utilizar nuevos elementos acústicos. Estos tienen como objetivo ser una alternativa potencialmente interesante a los materiales fibrosos comúnmente utilizados en la práctica, cuyo impacto negativo sobre la salud es una fuente de preocupación en la actualidad. En este sentido, y siguiendo estudios previos, la Tesis considera el uso de superficies microperforadas y profundiza en el estudio de superficies fabricadas mediante sinterización. Estas últimas, en algunos casos, presentan la particularidad de tener una impedancia acústica prácticamente constante, cuyo valor depende, entre otras cosas, del espesor y la porosidad de las placas. Ambos tipos de superficies han demostrado ser una alternativa interesante a los silenciadores disipativos perforados, las superficies microperforadas en el rango de bajas frecuencias y las superficies sinterizadas en el rango de medias y altas frecuencias.

En la presente Tesis se consideran modelos acústicos generales, en los que la ecuación de ondas permite considerar propiedades variables y flujo medio. Así pues, se propone un enfoque en elementos finitos para el análisis acústico de silenciadores disipativos perforados incluyendo un conducto perforado con flujo medio axialmente uniforme y una cámara exterior con material absorbente heterogéneo. La presencia de heterogeneidades puede ser causada, por ejemplo, por el proceso de fabricación, así como por la degradación causada por las partículas de hollín inmersas en los gases de escape. En este primer modelo, se introduce una densidad aparente variable. Por otro lado, las variaciones de las propiedades también pueden ser producidas por los gradientes de temperatura. En este segundo caso, se ha desarrollado un modelo de

elementos finitos mixto para el análisis acústico de silenciadores disipativos perforados que incluye varios efectos simultáneamente: (1) Elevada temperatura y gradientes térmicos en el conducto central y el material absorbente externo; (2) Una conducción central que canaliza flujo medio axial no uniforme. Independientemente de las causas de la heterogeneidad de los medios de propagación, sus propiedades varían con la posición. El material de la cámara exterior se puede caracterizar por medio de sus propiedades acústicas equivalentes (densidad compleja y velocidad del sonido), consideradas dependientes de las coordenadas en el contexto de la presente investigación. Esto se puede lograr gracias a la introducción de una densidad aparente heterogénea (y las correspondientes variaciones de la resistividad) así como al cálculo de la distribución de la densidad si los gradientes térmicos son significativos. Se ha implementado un modelo de elementos finitos para resolver la ecuación de ondas basada en una formulación en presión para un medio heterogéneo sin flujo medio, asociado al problema de propagación del sonido en la cámara exterior. Por otro lado, la ecuación en el conducto central se ha planteado y resuelto en términos de potencial acústico de velocidad que considera la existencia de flujo medio a la par que evita algunos problemas numéricos hallados en estudios previos al utilizar una formulación en presiones. El acoplamiento entre ambas regiones y los correspondientes campos acústicos se ha llevado a cabo mediante un conducto perforado y su correspondiente impedancia acústica, que aquí ha sido adaptada para poder incluir las heterogeneidades del material absorbente y los efectos del flujo medio simultáneamente. Se ha visto que los gradientes de temperatura y las heterogeneidades de la densidad aparente influyen notablemente en la atenuación acústica de un silenciador de automoción y por lo tanto, deben incluirse en los modelos teóricos. En algunas configuraciones particulares puede ser relativamente preciso aproximar los campos de temperatura/densidad aparente utilizando una distribución uniforme con un valor promediado, especialmente para materiales de baja resistividad. Sin embargo, se ha demostrado que esto no siempre es posible y los cálculos de la atenuación se sobrestiman, principalmente debido a las variaciones radiales de temperatura/densidad aparente y las elevadas resistividades del material, si la distribución de temperatura/densidad aparente no se tiene en cuenta.

La utilización de técnicas de optimización para componentes industriales también es relevante, ya que conduce a la producción de elementos con mejores características. Desde un punto de vista práctico, la disminución de material normalmente conlleva una reducción en los costes, lo que es muy importante, por ejemplo, en el sector del automóvil, donde se fabrican grandes series. En actividades relacionadas con el transporte de personas y bienes, el criterio de diseño para conseguir la forma óptima o la máxima reducción de peso de los componentes del vehículo normalmente conlleva un ahorro energético. Es importante destacar que en ciertos sectores (por ejemplo, en las industrias aeronáutica, aeroespacial, de la automoción y naval) el requerimiento de forma óptima y peso mínimo es muy relevante, y en algunos casos, absolutamente indispensable. Los algoritmos evolutivos (AE) son técnicas emergentes debido a su capacidad de obtener una solución, incluso en aquellos problemas en los que los procedimientos de optimización tradicionales tienen dificultades, como restricciones múltiples o datos estocásticos. No obstante, las características favorables de este tipo de algoritmos se consiguen a expensas de llevar a cabo un elevado número de evaluaciones de la función objetivo, lo que puede ser un problema importante desde un punto de vista computacional. Las técnicas de optimización se combinan con el método de elementos finitos en el presente trabajo, siendo el objetivo lograr la máxima atenuación posible en el rango de frecuencias de interés. Se define un problema de optimización de un silenciador multicámara y se llevan a cabo

varios análisis para obtener la configuración más adecuada para cada aplicación que cumpla las restricciones de diseño.

La presencia de heterogeneidades en el material debidas un proceso irregular de llenado de la cámara o a gradientes de temperatura se ha considerado mediante el método de elementos finitos, aunque este enfoque tradicionalmente se ha caracterizado por consumir un elevado tiempo de cálculo. Bajo ciertas suposiciones de uniformidad axial, se han desarrollado varias técnicas con vistas a reducir el coste computacional de un análisis 3D de elementos finitos para silenciadores disipativos con gradientes de temperatura y un conducto central que canaliza el flujo. Estas se basan en la descomposición del campo acústico en un conjunto de modos axiales y transversales dentro de cada subdominio del silenciador, y un procedimiento de ajuste de las correspondientes expansiones modales en las discontinuidades geométricas del silenciador mediante las condiciones de continuidad de la presión acústica y la velocidad axial. Se estudia la eficiencia computacional y precisión de los cálculos para tres técnicas de ajuste, incluyendo colocación en nodos y puntos de Gauss y también ajuste modal con integración ponderada. Todas las técnicas proporcionan resultados precisos de la atenuación del silenciador y logran mejores resultados en cuanto a coste computacional que los cálculos de elementos finitos. Se han encontrado algunas diferencias entre los diferentes métodos en términos de velocidad de cálculo y precisión de la solución. Aunque obtiene más precisión con el método de ajuste modal, el coste computacional requerido aumenta rápidamente con el número de modos. Para un coste computacional dado, la técnica más precisa parece ser el método de colocación puntual en nodos, con una ligera ventaja sobre la colocación en puntos de Gauss.