

Análisis acústico de un silenciador híbrido de escape mediante la técnica de Ajuste Modal

Ángelo Castillo¹, Stefania Nisi¹, Manuel J. Martínez²

¹ Estudiantes Universidad Metropolitana

² Profesor Universidad Metropolitana

RESUMEN

El ruido proveniente de los motores de combustión interna se ha convertido en una fuente de contaminación sonora, motivo que es de preocupación por sus efectos perniciosos sobre los individuos de una sociedad. El objetivo principal de esta investigación es el diseño de un silenciador híbrido de escape que mejore la atenuación en todos los rangos de frecuencia, especialmente a bajas frecuencias. Este análisis se efectúa por medio de la técnica de Ajuste Modal. Inicialmente se expresa matemáticamente la ecuación de ondas y a continuación se describe de forma breve las diferentes técnicas de análisis para lograr su resolución, en base a las diferentes hipótesis a ser planteadas: propagación unidimensional donde se considera la hipótesis de Onda Plana y método de la Matriz de Transferencia, o multidimensional teniendo en cuenta a los métodos numéricos como Elementos Finitos o analíticos como Ajuste Modal. Se reseñan las ventajas e inconvenientes de ellas y una vez seleccionada la técnica de Ajuste Modal se procede al análisis acústico de una configuración geométrica híbrida inicial, resonador lateral con material absorbente. Se observa que dada la geometría inicial se aprecia un pico central de atenuación, cuestión favorable para la atenuación. Posteriormente se propone otra configuración, añadiéndole una cámara anular externa, en la parte exterior de la cámara disipativa. Se comprobó que la atenuación mejoraba significativamente a bajas y rangos de media frecuencia. La disminución de material absorbente en la cámara central generó una disminución de la atenuación en el rango de media y alta frecuencia.

Palabras clave: silenciador híbrido, atenuación, Ajuste Modal, Elementos Finitos, cámara anular externa.

Acoustic Analysis of an exhaust hybrid silencer by means of Modal Matching Technique

Ángelo Castillo¹, Stefania Nisi¹, Manuel J. Martínez²

¹ Estudiantes Universidad Metropolitana

² Profesor Universidad Metropolitana

ABSTRACT

The noise from internal combustion engines have turned in an noise contamination source. This is a reason that concerns to the society by its harmful effects on people. The main objective of this work is designing an exhaust hybrid silencer that performs acoustic attenuation along all frequency ranges, especially to lower frequencies. This analysis is made by means Modal Matching Technique. First a sound wave equation is described and then a short description of different analysis techniques for its resolution is made, taking into account several hypothesis such as one-dimensional propagation regarding Plane Wave and Transfer Matrix method, or multidimensional propagation where numerical and analytic methods are considered such as Finite Element method and Modal Matching technique. Advantages and disadvantages of each technique are noticed, and when Modal Matching technique is selected an initial acoustic analysis is made in a lateral resonator with dissipative material. Given the initial geometrical values a strong resonance peak is observed over medium frequency range. Later, a new geometric configuration is proposed adding an annular external chamber that surrounds the dissipative chamber. A better attenuation behavior is observed over lower frequency ranges despite the decreasing of attenuation levels over medium and high frequency ranges. Reduction of dissipative material volumes carries a decreasing of attenuation levels on that frequency ranges.

Keywords: hybrid silencer, attenuation, Modal Matching, Finite Elements, external annular chamber.

Análisis acústico de un silenciador híbrido de escape mediante la técnica de Ajuste Modal

Ángelo Castillo¹, Stefania Nisi¹, Manuel J. Martínez²

¹ Estudiantes Universidad Metropolitana

² Profesor Universidad Metropolitana

1. Introducción

Debido al incremento exponencial del tránsito automotriz y la actividad industrial, la contaminación acústica figura desde hace unas décadas como un problema real e importante que afecta a la sociedad. Según Rastelli, Montbrun-Di Filippo, Montbrun y Sánchez (2008), la exposición de sonidos por encima de 85 dB por periodos prolongados de tiempo puede generar diversos trastornos fisiológicos en las personas. Por tanto, deben desarrollarse estrategias de análisis y ensayos que

contribuyan a la disminución de los niveles sonoros emitidos tanto por los silenciadores de escape de los vehículos como por los equipos industriales. En este trabajo se evalúa la atenuación acústica de silenciadores híbridos de escape por medio de la técnica de Ajuste Modal y propone un nuevo diseño.

2. Objetivos

2.1.General

Diseñar un silenciador híbrido de escape para un motor de combustión interna alternativo mediante la técnica de Ajuste Modal.

2.2.Específicos

- Describir los tipos de geometrías de silenciadores híbridos de escape empleados para la atenuación acústica.
- Analizar la atenuación acústica de silenciadores híbridos mediante el método de la Matriz de Cuatro Polos.
- Analizar la atenuación acústica de silenciadores híbridos mediante el método de Elementos Finitos, MEF.
- Analizar la atenuación acústica de silenciadores híbridos mediante el método de Ajuste Modal.

3. Marco Teórico

3.1.Ecuación de Ondas y planteamiento de la solución

El comportamiento de una onda acústica puede describirse matemáticamente por medio de una ecuación diferencial, ecuación de ondas, expresada en derivadas parciales de segundo orden, donde su solución puede obtenerse a través de varios modelos matemáticos. Munjal la expresa como:

$$\nabla^2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

la cual depende de la presión acústica P . Si se considera que la onda de presión tiene un comportamiento armónico en el que $P = P e^{(j\omega t)}$ su sustitución en la ecuación (1) proporciona la ecuación de Helmholtz (Munjal, 1987):

$$\nabla^2 P + k_0^2 P = 0 \quad (2)$$

donde $k_0 = \omega/c_0$ es el número de onda, P la amplitud de la presión acústica compleja, $\omega=2\pi f$ la frecuencia angular y j la unidad imaginaria. La velocidad acústica es obtenida de la ecuación de Euler (Denia, F. D. 2004):

$$U = \frac{-1}{j\rho_0\omega} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3)$$

La resolución de la ecuación de ondas (1) puede llevarse a cabo suponiendo hipótesis de propagación unidimensional (modelo de Onda Plana y planteamiento de la técnica de la Matriz de Transferencia) o hipótesis de propagación multidimensional donde se plantean modelos de resolución basados en técnicas numéricas como los métodos de Elementos Finitos, Diferencias Finitas o de Elementos de Contorno, o modelos de resolución por medio de técnicas analíticas como los métodos de Ajuste Modal, Excitación Puntual o de Colocación por Puntos (Martínez, M. J., 2010).

3.2. Impedancia acústica

La impedancia acústica, Z , se define como la razón entre la presión acústica de un medio y su velocidad acústica. En las superficies perforadas de conductos por donde fluyen los gases de combustión también se establecen relaciones de impedancia. Se consideran como parámetros geométricos el diámetro de los orificios, d_h , el espesor del conducto perforado, t_h , la porosidad del conducto (relación de superficie perforada y superficie sin perforar), σ ; es decir, una sucesión de pequeños orificios colocados bastante cerca unos de otros (Dickey, Selamet y Novak, 2000). y por otro, de la existencia o no de material absorbente en la parte exterior del conducto, que a su vez generan una impedancia debido al material absorbente, Z . Desde el punto de vista matemático, en el modelado de la impedancia a través de conductos perforados con material absorbente es frecuente utilizar una expresión que considera estos parámetros (Denia, F. D. 2004):

$$\zeta_p = \frac{1}{\sigma} \left(6 \cdot 10^3 + jk_0^2 \left(t_h + 0,425 \left(1 + \frac{Z}{Z_0} \frac{\kappa}{k_0} \right) d_h F(\sigma) \right) \right) \quad (4)$$

donde ζ_p es la impedancia del conducto perforado, κ es el número de onda del material absorbente, k_0 el número de onda del aire, Z_0 la impedancia acústica del aire y $F(\sigma)$ es una función de corrección que tiene en cuenta el efecto de la cercanía de los orificios.

3.3. Método de la Matriz de Transferencia

Se basa en la hipótesis de propagación unidimensional de ondas. Considera una matriz de cuatro polos (2 x 2) como representación de un elemento acústico o región de un silenciador que relaciona las variables de estado (presión y velocidad acústicas) a ambos lados de un componente de un sistema acústico (Munjal, 1987). Matemáticamente:

$$\begin{Bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

3.4. Método de Elementos Finitos (MEF)

Los métodos de cálculo basados en la hipótesis de propagación multidimensional ofrecen resultados más precisos debido a que consideran los efectos tridimensionales de la propagación de ondas cuando se presentan diferentes secciones transversales. En la ecuación de ondas (Ilustración) su

resolución se basa en el planteamiento de modelos que ofrezcan una solución aproximada. Entre ellos se destaca el método de Elementos Finitos, donde un dominio continuo se discretiza en formas geométricas simples denominadas elementos finitos. Formulando las ecuaciones gobernantes y las restricciones correspondientes se genera un sistema de ecuaciones cuya solución proporcionará el comportamiento aproximado del continuo. (Martínez, M. J., 2016). El método de Elementos Finitos es una metodología que proporciona resultados precisos. No obstante, el tiempo de cómputo asociado se incrementa a medida que el número de elementos se incrementa, esto es, donde el incremento de los grados de libertad N implica un incremento en el tiempo de cálculo en N^3 (Peat, Rathi, 1995).

3.5. Método de Ajuste Modal

Para disminuir el tiempo de cálculo asociado al empleo de las técnicas numéricas se recurre al planteamiento de técnicas modales basadas en las características modales de la propagación en cada una de las regiones que conforman un silenciador y posteriormente llevando a cabo el acoplamiento de las discontinuidades geométricas teniendo en cuenta las condiciones de continuidad del campo acústico de éstas (Denia, F. D., 2004), (Kirby, R., 2003).

3.6. Atenuación acústica

Para determinar el desempeño acústico de un silenciador se cuentan principalmente con tres parámetros: Índice de Pérdidas por Inserción (IL), Índice de Pérdidas por Transmisión (TL) e Índice de Diferencias de Nivel (LD) (Munjal, 1987). El índice utilizado en este trabajo es el TL el cual es independiente de la fuente de ruido y se obtiene mediante la expresión:

$$TL = 10 \log \left(\frac{S_1 |P_1|^2}{S_2 |P_2|^2} \right) \quad (6)$$

donde S_1 y S_2 son las superficies transversales de los conductos de entrada y salida del sistema acústico, P_1 es la presión acústica incidente y P_2 la presión acústica transmitida. Este índice se expresa en decibelios con escala de ponderación A, dB(A).

4. Resultados y discusión

4.1. Comparación de resultados atenuación acústica de métodos de Matriz de Transferencia y Elementos Finitos.

De acuerdo a lo descrito en el Marco Teórico, el método de la Matriz de Transferencia no tiene en cuenta los efectos multidimensionales de los cambios de área, bruscos o progresivos. Para ello se propone una geometría para comparar los resultados de ambas técnicas, ver Figura 1.

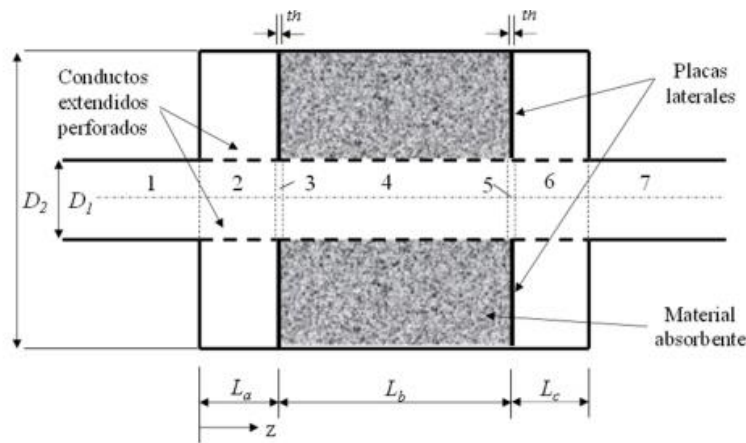


Figura 1. Resonador lateral híbrido con conductos extendidos y conducto central con orificios (M. J. Martínez, 2010). Esta configuración híbrida, combinación de características reactivas o de reflexión de ondas y disipativas donde la energía de la onda acústica es debilitada por su paso a través del material absorbente, consta de dos cámaras laterales o resonadores y una cámara central, limitada por un conducto central perforado, donde está confinado el material absorbente. Los datos geométricos que han servido como base de comparación son, Tabla 1 (Castillo, Nisi, 2017):

Tabla 1. Dimensiones de los parámetros geométricos de la Figura 1 (Castillo, Nisi, 2017).

Geometría	D1 (m)	D2 (m)	La (m)	Lb (m)	Lc (m)	LT (m)	Resistividad (Rayl/m)
1	0,049	0,1644	0,06	0,13	0,06	0,2518	4896

La comparación del TL resultante de ambas metodologías se expone en la Figura 2. Se aprecia una diferencia en los resultados ofrecidos por ambas metodologías. La matriz de cuatro polos no tiene en cuenta el pico de resonancia asociado a las dos cámaras laterales del silenciador en aproximadamente a 1700 Hz. Esto descarta el empleo del método de la Matriz de Transferencia.

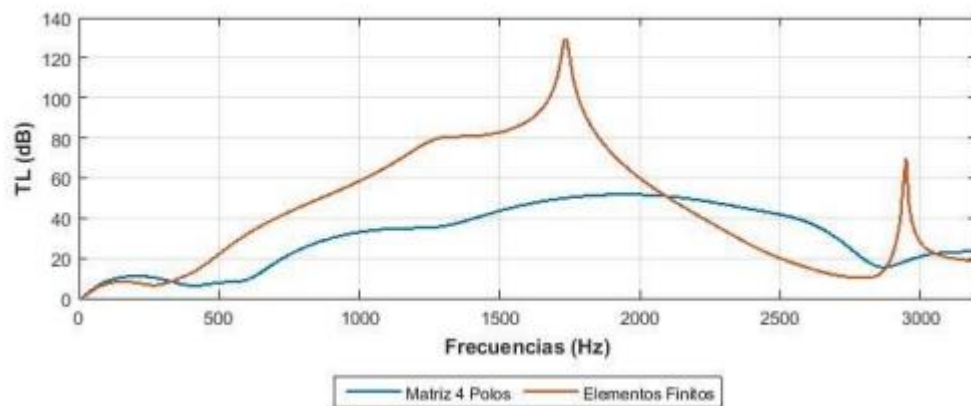


Figura 2. Comparación del comportamiento acústico, TL, de la geometría 1 obtenido por ambas metodologías

(Castillo, Nisi, 2017).

4.2. Comparación de resultados atenuación acústica de métodos de Elementos Finitos y Ajuste Modal.

Escogiendo como base de comparación la geometría expuesta en la Figura 1 y sus datos de la Tabla 1, el comportamiento acústico obtenido por ambas metodologías se describe en la Figura 3. Se aprecia que ambas metodologías ofrecen resultados similares. Por tanto, por lo expuesto en la sección 3.5 se selecciona al método de Ajuste Modal como técnica para la realización de los análisis del comportamiento acústico de silenciadores. En cuanto al resultado hay que indicar que el pico central es consecuencia de la simetría del silenciador; una diferencia en la longitud de las cámaras laterales se vería reflejada en la aparición de un pico de resonancia adicional. La atenuación a frecuencias medias es buena debido al volumen de material absorbente existente.

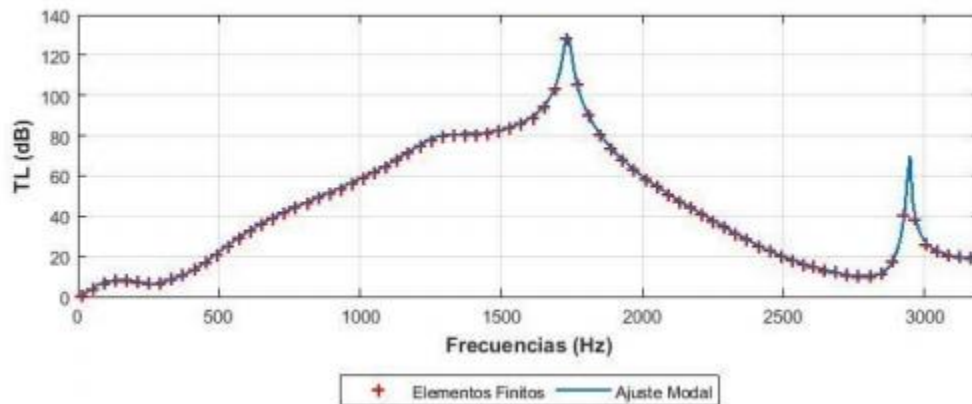


Figura 3. Comparación comportamiento acústico, TL, de la geometría 1 por medio de los métodos de Elementos Finitos y de Ajuste Modal (Castillo, Nisi, 2017).

4.3. Propuesta de diseño de geometría

Para la mejora de la atenuación, sobre todo a bajas frecuencias, se propone incrementar la atenuación acústica por medio de mecanismos de reflexión de ondas. Para ello, se propone añadir una cámara anular que rodee la parte central del silenciador. Esto podría generar picos de resonancia que mejorasen en comportamiento acústico del silenciador. La Figura 4 exhibe lo descrito.

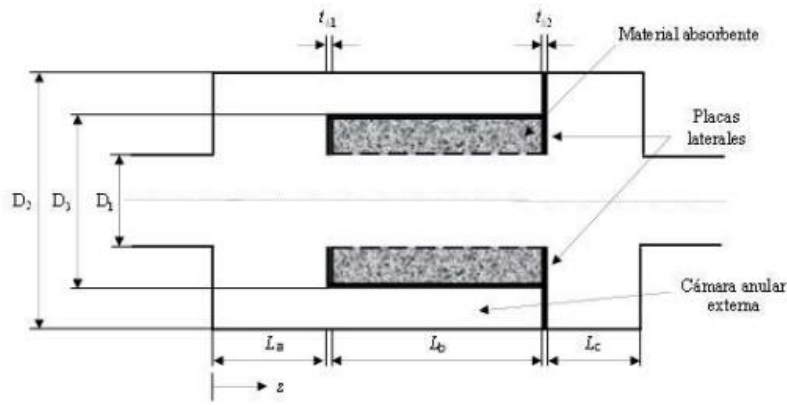


Figura 4. Geometría de un resonador lateral con cámara anular externa (Castillo, Nisi, 2017).

Para conocer la atenuación acústica, la Tabla 2 resume los datos geométricos más relevantes. El resto de los parámetros se consideran similares a los indicados en la Tabla 1.

Geometría	Longitud cámara central L_b (m)	Longitud total LT (m)
A	0,08	0,2018
B	0,13	0,2518
C	0,18	0,3018

Tabla 2. Parámetros geométricos del silenciador propuesto. Diámetro interno cámara $D_3=0,144$ m. (Castillo, Nisi, 2017).

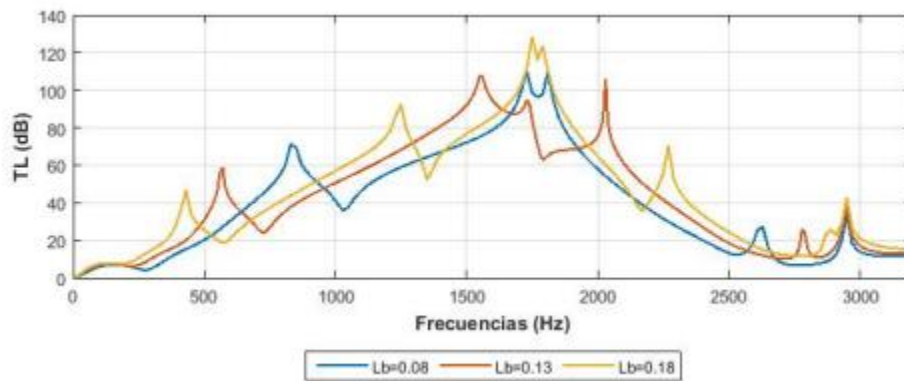


Figura 5. Comportamiento acústico, TL, del resonador lateral con cámara anular con diversas geometrías. (Castillo, Nisi, 2017).

En la Figura 5 se aprecia la aparición de picos de resonancia a frecuencias inferiores en comparación con la geometría de la figura 1. Esto es un indicio de que se mejora la atenuación en el rango de bajas y medias frecuencias. Si se compara los resultados de la geometría B (Figura 5) con el de la geometría 1 (Figura 3) se aprecia que, aunque el valor del pico de resonancia central es menor, existen nuevos picos de resonancia que mejoran la atenuación acústica. La disminución del valor de ese pico está relacionado con la menor cantidad de material absorbente existente en la nueva configuración.

5. Conclusiones

Los silenciadores híbridos son el resultado de combinar comportamientos acústicos reactivos (reflexión de ondas) y disipativos (absorción de energía acústica). El método de la Matriz de Transferencia, asociado a la hipótesis de Onda Plana, no considera efectos multidimensionales debido a los cambios de secciones transversales, por tanto no predice la aparición de picos de resonancia. El método de Elementos Finitos ofrece resultados muy precisos, con comprobaciones contrastadas con ensayos experimentales (F. D. Denia, 2004), (Picazo, 2006), (M. J. Martínez, 2010). El método de Ajuste Modal a tenor de lo expresado en la Figura 3 también converge de manera significativa, en cambio, el tiempo de cálculo asociado es menor en comparación al método de Elementos Finitos. La colocación de una cámara anular exterior de la manera planteada incrementa la aparición de picos de resonancia, a las frecuencias de resonancia, del silenciador. Esto mejora la atenuación en general, no obstante, existe una ligera desmejora del comportamiento a frecuencias medias debido a la existencia de menor volumen de material absorbente.

6. Bibliografía

- Castillo A., Nisi, S. (2017) *Análisis de un silenciador híbrido de escape mediante la técnica de Ajuste Modal*. (Tesis de pre-grado), Universidad Metropolitana.
- Denia, F. D. (2004) *Modelado del comportamiento acústico de silenciadores de escape mediante técnicas analíticas y métodos de Elementos Finitos*. (Tesis doctoral), Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Dickey, N. S., Selamet, A., Novak, J. M. The effect of high amplitude sound on the attenuation of perforated tubes silencers. *Journal of Acoustical Society of America*, 2000: (108), 1068- 1081.
- Kirby, R. Transmission loss predictions for dissipative silencers of arbitrary cross sections in the presence of mean flow. *Journal of Sound and Vibration*, 2003: (114), 200-209.
- Martínez, M. J. (2010) *Modelado analítico numérico y caracterización experimental de silenciadores de escape híbridos*. (Tesis doctoral), Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Martínez, M. J. Atenuación acústica de silenciadores de escape. Comparación de diferentes geometrías. *X Congreso de Investigación y Creación Intelectual de la Universidad Metropolitana* (2016).
- Munjal, M. L. Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design. New York: Wiley & Sons, Inc. 1987.
- Peat, K. S., Rathi, K. L. A finite element analysis of the convected wave motion in dissipative silencers. *Journal of Sound and Vibration*, 1995: (184 (3)), 529-545.
- Picazo, M. I. (2006) *Modelado acústico de silenciadores con material absorbente*. (Tesis doctoral), Universidad Politécnica de Valencia, España.
- Rastelli, M., Montbrun, Sánchez. Automatización del diseño de silenciadores reactivos. Evaluación de desempeño, parte II. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela*, 2008: (23), 75-81.