

AUTOMATIZACIÓN DEL DISEÑO DE SILENCIADORES REACTIVOS. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO. PARTE II

VICTORIA RASTELLI¹, JENNY MONTBRUN-DI FILIPPO¹, NILA MONTBRUN², VÍCTOR RASTELLI²
YAMILET SÁNCHEZ¹

¹Universidad Simón Bolívar, Departamento de Procesos y Sistemas. Apartado 8900, Caracas. Venezuela

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Mecánica. Apartado 8900, Caracas. Venezuela

Recibido: febrero de 2006

Recibido en forma final revisado: mayo de 2008

RESUMEN

La contaminación por ruido produce grandes daños en el ser humano, tanto fisiológicos como psicológicos, tal como se mencionó en la primera parte de este trabajo, en la cual se desarrolló un programa versátil y amigable para el diseño de silenciadores reactivos llamado Programa para la Automatización del Diseño de Silenciadores Acústicos (PADSA), el cual se utilizó para realizar un análisis de sensibilidad del desempeño de silenciadores de cámara simple. En el presente trabajo dicho programa, fue empleado para completar el análisis de los silenciadores reactivos de doble cámara, con tubo conector tanto externo como interno. A partir de los resultados obtenidos se señalan las conclusiones que también se cumplen para los silenciadores de cámara simple, entre ellas se destacan que, el aumento de la relación de áreas m provoca un aumento en la magnitud de las pérdidas por transmisión, sin modificar la frecuencia de ocurrencia de los máximos y mínimos; que es posible optimizar la escogencia de las longitudes del silenciador que garanticen máximas pérdidas y mínimas longitudes; y que el aumento en la temperatura de operación produce un desfase en el gráfico de pérdidas por transmisión, lo cual compromete seriamente el desempeño del equipo. Además, se determinó que existen relaciones críticas entre la longitud del tubo conector y la longitud de las cámaras que pueden producir una disminución importante de las pérdidas y que para el silenciador con tubo conector interno, la escogencia de la relación entre las longitudes l_c y l_e , dependerá altamente de la forma del espectro y de la posición relativa de las frecuencias críticas a atenuar. Finalmente, se evidenció una mayor efectividad de los silenciadores con tubo conector interno sobre los de conexión externa.

Palabras clave: Silenciadores, Reactivos, Diseño automatizado, Desempeño, Contaminación acústica.

AUTOMATIC DESIGN OF REACTIVE MUFFLERS: PERFORMANCE ANALYSIS PART II

ABSTRACT

Noise pollution may cause important physiological and/or psychological harm to human beings, as mentioned in part one of this work. As such, a versatile and user friendly program, named PADSA, was developed and used to analyze a single chamber muffler performance. In this part, PADSA is used to complete the analysis of reactive mufflers considering double chamber mufflers with both external and internal connection tubes. From these analyses it is observed that, just as in the case of single chamber mufflers, an increase in the relationship of area causes a rise in transmission losses, with no change in the frequency of occurrence of the maximum and minimum values; that the selection of the muffler lengths can be optimized in order to achieve maximum loss with minimum longitude; and a temperature increase produces a phase modification in the transmission loss curve, which affects the muffler performance. Additionally, it was determined that there are critical relationships between the tube connector length and the lengths of the chambers that can produce a significant reduction in transmission losses and that for mufflers with an internal connector, the optimal length is highly dependent on the spectrum to be attenuated. Finally, it is important to mention that mufflers with an internal connector are more effective than those with an external one.

Keywords: Mufflers, Reactive, Automatic design, Performance, Noise contamination.

INTRODUCCIÓN

La contaminación por ruido, debida principalmente al tránsito automotriz y a la actividad industrial, produce daños considerables que pueden tener efectos auditivos y extra-auditivos irreversibles en seres humanos. Dichos daños pueden ser tanto fisiológicos como psicológicos y producen un deterioro importante en la calidad de vida (Hiramatsu *et al.* 2004; Rylander, 2004; Waye *et al.* 2004; Kaku *et al.* 2004; Matsui *et al.* 2004; Magrab, 1975; Recuero, 1999; Seto, 1973; Kuwano *et al.* 2004; Namba *et al.* 2004; Seto, 1973).

Este artículo es la continuación de un trabajo previo en el cual se desarrolló un programa versátil y amigable llamado PADSA, para diseñar silenciadores reactivos que posteriormente se utilizó para realizar un análisis del desempeño de silenciadores de cámara simple. Todo ello, con miras a lograr algún impacto positivo en el control de la contaminación por ruido a través del uso de este tipo de silenciadores.

Además de los silenciadores reactivos de cámara simple, existen también silenciadores reactivos de doble cámara, los cuales contemplan una unión externa o interna de dos o más cámaras de expansión. Con ellos puede lograrse un incremento considerable de las pérdidas por transmisión en todo el rango de frecuencias (Beranek, 1971; Selamet & Radavich, 1996; Selamet *et al.* 2002), en comparación con los silenciadores de cámara simple, por lo que su utilización puede brindar mayores beneficios en el tratamiento del problema ambiental generado por ruido.

De allí que PADSA fue utilizado para completar el análisis de los silenciadores reactivos tomando en cuenta a los silenciadores de doble cámara. Por lo que se realizó el diseño para silenciadores con tubo conector externo o interno modificando parámetros y condiciones que pudieran alterar su desempeño.

En principio se presentaron las características de los silenciadores de cámara doble, una breve descripción de PADSA, con la intención de que el lector comprendiera el alcance del mismo, y finalmente, se utilizó el programa para estudiar el desempeño de los silenciadores en cuestión.

SILENCIADORES REACTIVOS DE CÁMARA DOBLE

Los silenciadores de doble cámara de expansión, llamados también resonadores, son muy utilizados para atenuar el ruido provocado por las fuentes que producen gran impacto en los centros urbanos. Dichos silenciadores, contemplan la unión externa o interna de dos o más cámaras de expansión, gracias a lo cual puede lograrse un incremento

considerable de las pérdidas por transmisión en todo el rango de frecuencias, en comparación con los silenciadores de cámara simple. Esto se debe fundamentalmente al hecho de que el valor de la impedancia para los tubos de entrada y de salida nunca es igual, lo cual hace que se refleje gran parte de la energía acústica de regreso hacia la fuente, o hacia las cámaras (Beranek, 1971; Selamet & Radavich, 1996; Selamet *et al.* 2002). Cabe destacar que, a diferencia de los silenciadores de cámara simple, las pérdidas por transmisión se reducen considerablemente en presencia de flujo de gas, siendo esta reducción más alta en el rango de frecuencias cuando la longitud del silenciador sea igual a un cuarto de la longitud de onda (Beranek, 1971).

El número de variables o parámetros característicos a considerar es mayor que para el caso de los silenciadores de cámara simple, pues, además de la relación de áreas (m), se deben tomar en cuenta las longitudes le y lc , que son la longitud de cada cámara y la mitad de la longitud del tubo conector, respectivamente. A continuación se describen los dos tipos de silenciadores, con tubo conector externo o interno.

Silenciadores con tubo conector externo

Este tipo de silenciadores puede ser esquematizado tal como se muestra en la figura 1, en la cual se aprecia la geometría del mismo. La longitud de cada cámara y la mitad de la longitud del tubo conector, se representan como lc y le , respectivamente, en tanto que el área transversal de la cámara y del ducto, se representan como S_2 y S_1 , respectivamente. La relación entre dichas áreas es el conocido parámetro característico del silenciador conocido como m .

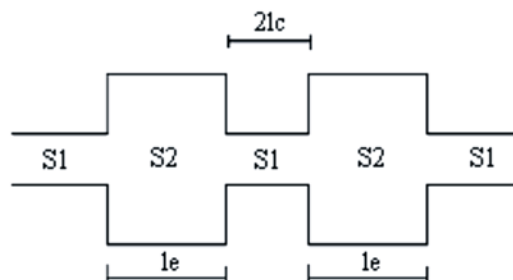


Figura 1. Doble cámara con tubo conector externo.

Estos silenciadores muestran pérdidas por transmisión mucho mayores que para los de cámara simple (Selamet & Radavich, 1996), siendo la frecuencia de corte, f_c , un parámetro importante a considerar, gracias al cual se puede conocer el límite en bajas frecuencias de la zona efectiva de atenuación (Beranek, 1971; Magrab, 1975; Seto, 1973).

El método de cálculo para el diseño del silenciador, utilizado en PADSА, se basó en las ecuaciones teóricas que describen el comportamiento de silenciadores acústicos propuestos por Magrab (1975), las cuales se han validado a través de la experimentación (Davis *et al.* 1965; Rastelli, 2003, 1995, 1994).

En la figura 2 se muestra la validación realizada por Davis *et al.* (1965) en donde puede apreciarse la efectividad del cálculo.

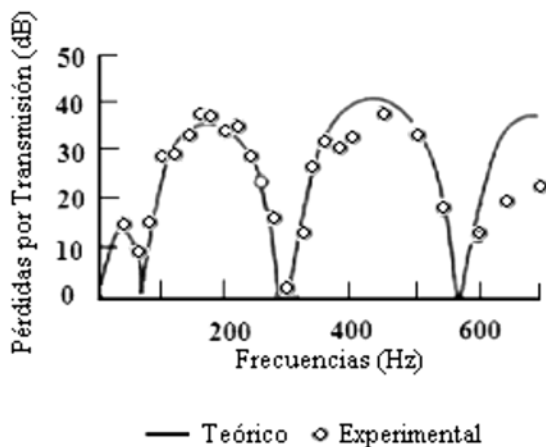


Figura 2. Silenciador con tubo conector externo.

Silenciadores con tubo conector Interno

Este tipo de silenciador, al igual que el modelo anterior, consta de tres parámetros fundamentales, la relación de áreas m , la longitud de cada una de las cámaras le , y la mitad de la longitud del tubo conector lc , tal como puede observarse en la figura 3. Igualmente, presenta mayores pérdidas por transmisión que el anterior, las cuales dependen de la relación entre le y lc . La presencia de una partición en el silenciador, conduce a la aparición de amplios domos de atenuaciones, y el uso del ducto extendido entre las cámaras lleva a un aumento de aproximadamente el doble de la atenuación obtenida en cámaras simples (Selamet *et al.* 1996).

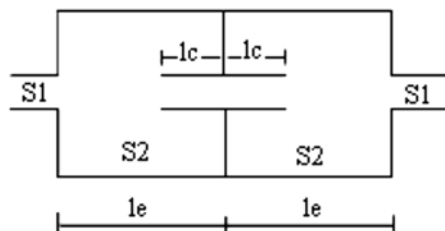


Figura 3. Doble cámara de expansión con tubo conector interno.

Al igual que en el caso anterior, las ecuaciones teóricas utilizadas para describir su comportamiento fueron las propuestas por Magrab (1975) y validadas por Davis *et al.*

(1965); Rastelli, (2003, 1995, 1994). En la figura 4 se muestra la validación realizada por Davis *et al.* (1965) en donde puede apreciarse la efectividad del cálculo.

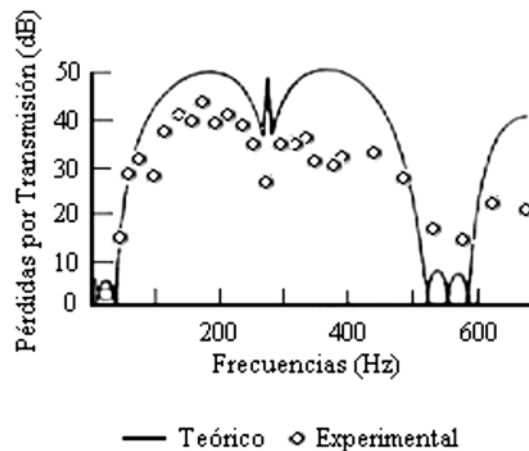


Figura 4. Silenciador con tubo conector interno.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

Para automatizar los cálculos necesarios para el diseño de silenciadores acústicos reactivos, se desarrolló una herramienta computacional o Programa para la Automatización del Diseño de Silenciadores Acústicos (PADSA), utilizando el paquete MATLAB™, a través del cual es posible presentar al usuario una interfaz amigable y de sencilla utilización (Rastelli, 2005, Rastelli *et al.* 2008). A continuación se describirá brevemente la forma en la cual debe ser utilizado PADSА para el diseño de un silenciador reactivo y los resultados que éste arroja.

- Partiendo del espectro inicial y de la reducción en dBA requerida, se selecciona el modelo de silenciador.
- Se identifican las frecuencias críticas del mismo y se seleccionan las dimensiones del silenciador, colocando las frecuencias críticas en coincidencia con los máximos o picos de las pérdidas del silenciador.
- El usuario selecciona el material del cual será construido el silenciador y PADSА calcula su espesor.

Cabe destacar que PADSА provee al diseñador de una herramienta útil en la cual se cubren todos los pasos para diseñar un silenciador; ostenta el comportamiento aproximado en frecuencias que tendrá el aparato una vez construido; permite al usuario cambiar las dimensiones del mismo y observar como es la sensibilidad del producto final a estos cambios, muestra los materiales más comúnmente utilizados en Venezuela para la fabricación de silenciadores; y proporciona el espesor mínimo permisible.

DESEMPEÑO DE SILENCIADORES DE DOBLE CÁMARA DE EXPANSIÓN

Se analizó el desempeño de los silenciadores reactivos de doble cámara ante variaciones en la relación de área, las longitudes de las cámaras y la temperatura ambiental, utilizando PADS A para calcular la reducción de sonido obtenida por el silenciador ante las variaciones propuestas.

Variación de la relación de áreas

Al igual que en los silenciadores de cámara simple, se observó que a medida que m aumentaba, aumentaba el máximo en el gráfico de pérdidas por transmisión, sin modificación en las frecuencias de ocurrencia de los máximos, lo cual era de esperarse debido a la modificación en impedancia acústica. Esto sucedió para los dos tipos de silenciadores, con conector externo e interno, es por ello que se muestra solamente la figura 5 en donde se puede apreciar las variaciones mencionadas para los primeros.

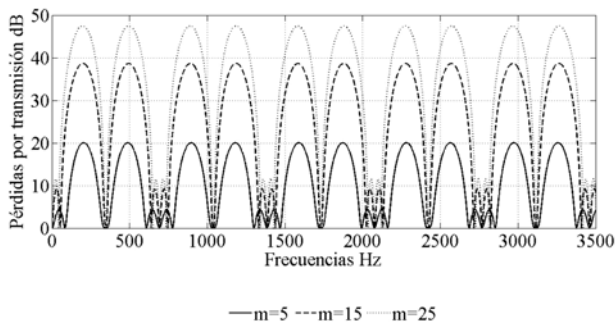


Figura 5. Pérdidas por transmisión para varias m silenciadores de doble cámara con conexión externa.

Variación de la relación de longitudes lc/le

En la figura 6 se muestran las pérdidas por transmisión para un valor fijo de m y diferentes valores de lc y le , tales que se mantiene fija la relación lc/le , para el caso de silenciadores con conector externo. Allí se puede apreciar que, a pesar de que se modifican los valores de las longitudes lc y le , al mantener constantes m y la relación lc/le , la magnitud de las pérdidas no se modifica en magnitud sino en el valor de la frecuencia de ocurrencia. Este comportamiento es similar en el caso de los silenciadores con conector interno.

Por otro lado, al variar la relación lc/le , se encontró que algunas relaciones son más eficientes que otras, produciendo mayores pérdidas por transmisión, lo que produce un mejor desempeño del silenciador. De allí se puede concluir que la longitud del tubo conector interno del silenciador, juega un papel interesante en el desempeño final del mismo, ya que al variar la relación entre su longitud y la de las cámaras, es decir lc/le , se obtiene un comportamiento diferente en los valores de las pérdidas por transmisión, tal

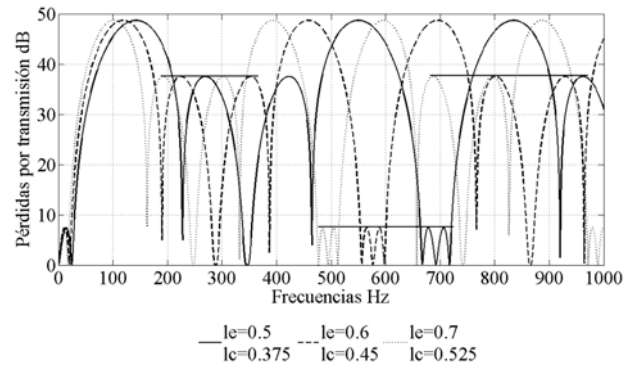


Figura 6. Pérdidas por transmisión para varias longitudes lc y le ($m=25$) en silenciadores de doble cámara con conexión externa.

como se muestra en las siguientes figuras 7 y 8. En estas figuras se compararon tres relaciones para lc/le , manteniendo el parámetro m constante, las cuales fueron colocadas en figuras distintas para apreciar sus diferencias, de ellas se observa que la mejor relación es lc/le igual a 0.75, de igual forma se aprecia que para la relación lc/le igual a 0.5 el gráfico de pérdidas por transmisión, a pesar de superar levemente a la otra relación en el primer pico o domo, reduce considerablemente los picos o domos secundarios, identificados por flechas.

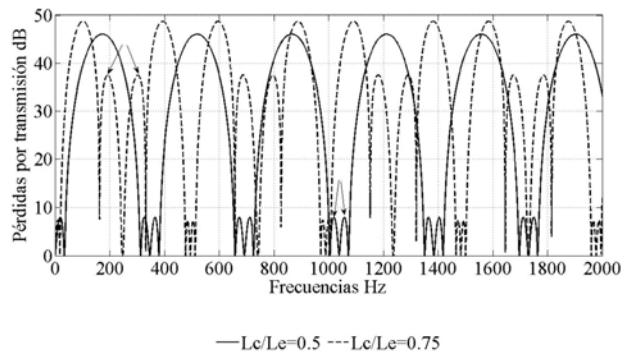


Figura 7. Pérdidas por transmisión con $m=20$, para diferentes relaciones de lc/le en silenciadores con conexión externa.

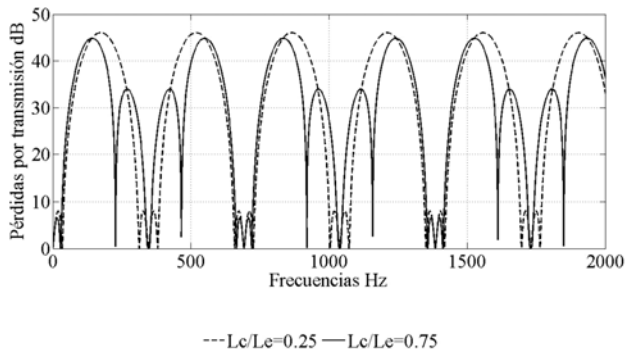


Figura 8. Pérdidas por transmisión ($m=20$) para diferentes relaciones de lc/le en silenciadores de doble cámara con conexión externa.

También se compararon las relaciones de lc/le igual a 0.25 con la de lc/le igual a 0.75, notándose que la diferencia entre ellas era la disposición de sus domos o máximos, ya que la primera presentaba dos domos de gran magnitud seguidos y caía el valor en los terceros, mientras que la segunda presentó dos primeros domos grandes seguidos de unos un poco más pequeños y terminando con unos terceros que caían de forma apreciable.

Este comportamiento se explica a partir de la deducción de la ecuación de onda para tubos de ambos extremos abiertos, ya que el tubo conector externo al igual que la longitud de las cámaras, se ajusta a este modelo (Magrab, 1975). Es decir, si la longitud de la cámara (le) fue diseñada correctamente, haciendo coincidir su longitud con $\ddot{v}/4$, \ddot{v} , $3\ddot{v}/4$ y demás múltiplos impares del cuarto de longitud de onda en las frecuencias críticas a atenuar, entonces el tubo conector $2lc$, debe actuar como filtro para las demás frecuencias que lograron pasar la primera cámara. En otras palabras, si la relación lc/le es igual a 0.5, ocurrirá que la longitud total del tubo, $2lc$, será igual a le , por consiguiente estará sintonizada para bloquear las mismas ondas que no dejó pasar la cámara, lo cual sería inútil, por ello se recomienda no tener este tipo de relación entre le y lc .

Los resultados obtenidos para el caso de silenciadores con tubo conector interno, fueron bastante similares y no se encuentran reportados en este artículo por su extensión (ver Rastelli, 2005). A partir de dichos resultados se puede concluir que para una relación lc/le igual a 0.5, se aprecia una disminución dramática en los domos secundarios, al igual que en el caso anteriormente mencionado, aun cuando, si las frecuencias críticas a atenuar se encuentran cercanas, se pueden hacer coincidir con alguno de los domos de atenuación y se obtienen buenos resultados, pero en el caso de poseer varias frecuencias críticas a atenuar, el desempeño del silenciador se puede ver altamente comprometido. En general, el valor máximo obtenido, a diferencia de lo obtenido para silenciadores con conector externo, sí depende de la relación lc/le , lográndose las mayores pérdidas para lc/le igual a 0.75, las menores para lc/le igual a 0.5 y amplios domos de atenuación al utilizar lc/le igual a 0.25.

A continuación se muestra en la figura 9, en caso de silenciadores con tubo conector externo, la reducción en dBA para varias configuraciones de lc/le , a partir de espectros particulares de ruido, en los cuales se observa que la peor de ellas es lc/le igual a 0.5, lo cual apoya lo explicado anteriormente. Para el caso de los silenciadores con tubo conector interno, las diferencias en la reducción del dBA no son tan marcadas, pero la tendencia es la misma (Rastelli, 2005).

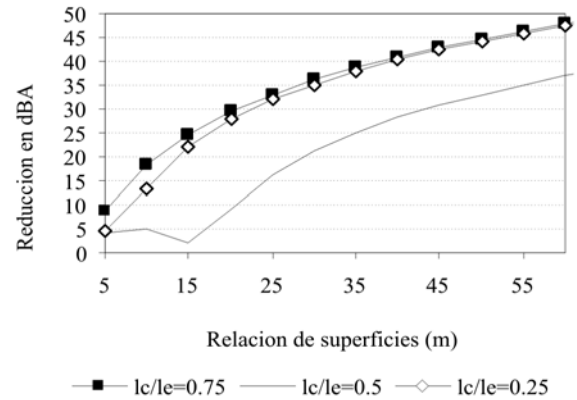


Figura 9. Reducción en dBA ante variaciones del parámetro m para diferentes relaciones lc/le en el silenciador de doble cámara con conexión externa.

Al hacer uso del mismo espectro, se observa en la figura 10 la reducción en dBA obtenida ante variaciones del parámetro m y diferentes relaciones lc/le , para el caso de silenciadores con conector externo. Se puede ver que para diferentes magnitudes de lc , se obtienen las mismas pérdidas por transmisión, es decir, no es necesario aumentar esta dimensión para obtener mayores pérdidas en el silenciador, solo hay que tomar en cuenta su relación con la longitud de la cámara, como se explicó anteriormente. También se observa un comportamiento sinusoidal para todas las relaciones de superficies, esto ocurre a partir de las relaciones entre la longitud del tubo conector y las longitudes de onda \ddot{v} para las frecuencias críticas, ya que al pasar por múltiplos de $(\ddot{v}/2)$ caen las pérdidas generadas por el silenciador y por consiguiente disminuye la reducción en dBA. Para generalizar este comportamiento se realizaron las mismas experiencias para dos espectros particulares, demostrando que la tendencia es la misma, independiente del espectro a tratar, el cual es similar para el caso de los silenciadores con conector interno (Rastelli, 2005).

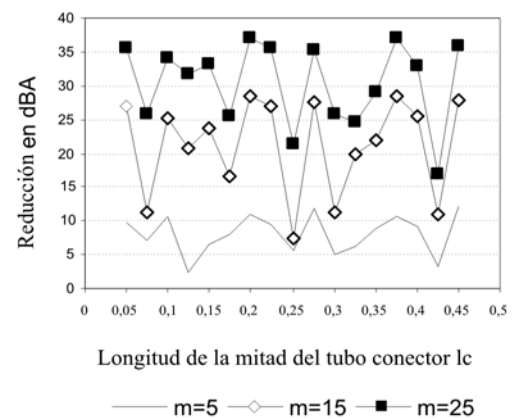


Figura 10. Reducción en dBA ante variaciones del tubo conector ($2lc$) para diferentes m .

Finalmente, la figura 11 muestra la comparación, a temperatura ambiente, con las relaciones (l_c/l_e) más eficientes, y la misma relación de áreas, los silenciadores de doble cámara con conexión externa e interna, en la cual se puede apreciar que el silenciador con conector interno presenta un mejor desempeño para todo el barrido de frecuencias.

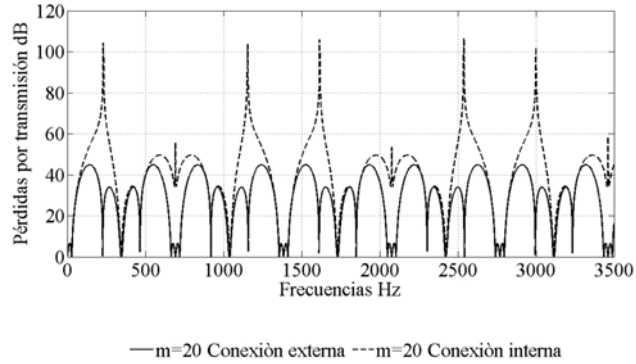


Figura 11. Pérdidas por transmisión para silenciadores con conexión interna y externa.

Variación en la temperatura de operación

Al aumentar la temperatura a la cual trabajaría el silenciador, se produjo cambios importantes en el comportamiento del mismo, pues la temperatura se encontraba directamente relacionada con la longitud de onda λ de las frecuencias. En la figura 12 puede observarse que, al igual que en la cámara de expansión simple, el gráfico de las pérdidas por transmisión para los silenciadores con conector externo tiende a desfasarse a medida que se aumenta la temperatura, desplazamiento que se hace más evidente a frecuencias altas.

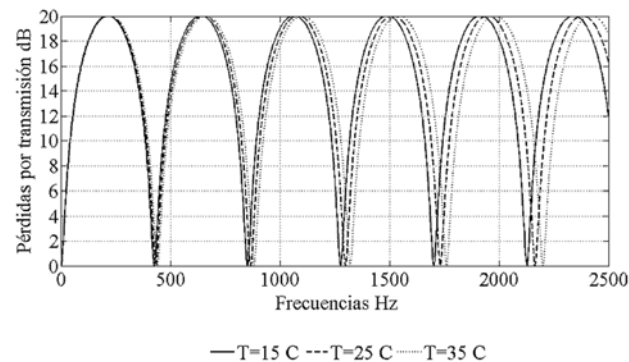


Figura 12. Pérdidas por transmisión ante variaciones en la temperatura de operación.

Comportamiento similar fue observado en los silenciadores con conector interno. Este fenómeno se explica porque la temperatura, al afectar la velocidad del sonido, cambia las longitudes de onda de las frecuencias, y por consiguiente, la relación entre la longitud de la cámara y las longitudes de onda λ de las frecuencias críticas.

CONCLUSIONES

El programa PADS, desarrollado en la primera parte de este trabajo, representa una herramienta computacional, que sustituye el proceso largo e iterativo que contempla el cálculo y diseño de los silenciadores bajo estudio. Gracias al uso del programa fue posible estudiar el desempeño de los silenciadores de doble cámara de expansión y obtener las siguientes conclusiones que pueden muy bien generalizarse.

- El aumento de la relación de áreas (m) provoca un aumento en la magnitud de las pérdidas por transmisión, sin modificar la frecuencia de ocurrencia de los máximos y mínimos.
- La variación individual en la longitud de las cámaras y del tubo conector no produce mayores cambios en el desempeño del silenciador, ya que las pérdidas son en el mismo orden, siendo la relación que guardan ambos parámetros lo que hace la diferencia.
- La relación entre la longitud de la mitad del tubo conector y la longitud de las cámaras igual a 0.5 produce una disminución dramática en numerosos domos en el gráfico de pérdidas.
- Al variar las longitudes de las cámaras, manteniendo constante m , se observa un comportamiento sinusoidal de la reducción en dBA, a partir de lo cual se puede concluir que, el aumento de dichas longitudes no es necesario para lograr una reducción óptima.
- Se evidencia la efectividad de los silenciadores de doble cámara con tubo conector interno sobre los de conexión externa, ya que el gráfico de su comportamiento muestra amplios domos de atenuación y de igual forma, la aparición de numerosos picos de gran atenuación.
- La variación en la temperatura de operación es un parámetro de suma importancia, ya que su aumento produce un desfasaje en el gráfico de pérdidas por transmisión, haciéndose más evidente en frecuencias altas, lo cual compromete seriamente el desempeño del equipo.

REFERENCIAS

BERANEK, L. (1971). *Noise and Vibration Control*, McGraw Hill, Inc, USA.

DAVIS, D., STOKES, G., MOORE, D., STEVENS, G. (1965).

- Theoretical and experimental investigations of mufflers with comments on engine – exhaust muffler design*, NACA, p. 1192.
- HIRAMATSU, K., MATSUI, T., ITO, A., MIYAKITA, T., OSADA, Y., YAMAMOTO, T. (2004). *The Okinawa study: an estimation of noise-induced hearing loss on the basis of the records of aircraft noise exposure around Kadena Air Base*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, pp. 617-625.
- KUWANO, S., NAMBA, S., OKAMOTO, T. (2004). *Psychological evaluation of sound environment in a compartment of a high-speed train*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, pp. 491- 500.
- MAGRAB, E. (1975) *Environmental Noise Control*, John Wiley & Sons, Inc, Canada.
- MATSUI, T., UEHARA, T., MIYAKITA, T., HIRAMATSU, K., OSADA, Y., YAMAMOTO, T. (2004). *The Okinawa study : effects of chronic aircraft noise on blood pressure and some other physiological indices*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, p. 469-470.
- NAMBA, S., KUWANO, S., OKAMOTO, T. (2004). *Sleep disturbance caused by meaningful sounds and the effect of background noise*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, pp. 445-452.
- RASTELLI, V. (1994). *Proyecto de insonorización de los ventiladores de la cámara de sedimentación*, Planta Bigott, Los Ruices, Caracas.
- RASTELLI, V. (1995). *Control de ruido en los ventiladores de la Agencia del Banco Provincial de la Av. Michelena*, Valencia, estado Carabobo.
- RASTELLI, V. (2003). *Diseño de silenciador Reactivo–Disipativo para vapor de agua*, Realizado para la planta Oxinova, estado Anzoátegui.
- RASTELLI, V. (2005). *Automatización del Dimensionamiento de Silenciadores Acústicos*. Trabajo de Grado. Universidad Simón Bolívar, Abril. p. 61.
- RASTELLI, V., MONTBRUN-DI FILIPPO, J., MONTBRUN, N., RASTELLI, V., SÁNCHEZ, S. (2008). *Automatización del Diseño de Silenciadores Reactivos. Evaluación de Desempeño. Parte I*. Enviado a publicación Revista de la Facultad de Ingeniería (UCV, Caracas).
- RECUERO, M. (1999). *Acústica Arquitectónica Aplicada*. Ed. Paraninfo. Madrid.
- RYLANDER, R. (2004). *Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, pp. 471-478.
- SELAMET, A., & RADAVICH, P. (1996). *The effect of length on the acoustic attenuation performance of concentric expansion chambers: an analytical, computational and experimental investigation*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 201, N. 4, pp. 407-426.
- SELAMET A., DENIA, F. & BESA, A. (2002). *Acoustical behavior of circular dual-chamber mufflers*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, p. 967-985.
- SETO, W. (1973). *Teoría y problemas de Acústica*, McGraw Hill, Inc, USA.
- WAYE, K., AGGE, A., CLOW, A., HUCKLEBRIDGE, F. (2004). *Cortisol response and subjective sleep disturbance after low-frequency noise exposure*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, pp. 453-457.