

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

VICTORIA H. RASTELLI¹, JENNY MONTBRUN-DI FILIPPO¹, NILA MONTBRUN²,
VICTOR RASTELLI², YAMILET SÁNCHEZ¹

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

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

Recibido: febrero de 2006

Recibido en forma final revisado: abril de 2008

RESUMEN

El crecimiento urbano descontrolado viene acompañado de un inadecuado incremento en el tránsito automotriz y en la actividad industrial generándose así contaminación por ruido, la cual provoca importantes daños al ser humano, tanto fisiológicos como psicológicos. De allí la necesidad de desarrollar dispositivos que disminuyan los niveles de ruido, como por ejemplo los silenciadores, los cuales están específicamente diseñados con la intención de reducir la transmisión de sonido hacia un lugar en específico. Según su principio de funcionamiento, los silenciadores se dividen en disipativos y reactivos, siendo éstos últimos de gran aplicación en la reducción de la contaminación sónica para sistemas que involucran flujo de gas con partículas. El diseño de silenciadores reactivos es un proceso largo e iterativo, por lo que en la primera parte de este trabajo se propone la automatización del diseño a través del desarrollo de una herramienta computacional versátil y rápida (PADSA), la cual será posteriormente utilizada para realizar un análisis del desempeño de los silenciadores reactivos de cámara simple, quedando para la segunda parte del trabajo el análisis de los silenciadores de cámara doble. PADSA provee una interfaz amigable y propuestas de diseño para el ingeniero sin gran experticia en el área, y a su vez, es útil para modificar valores en los parámetros del silenciador y estudiar su desempeño. A partir del análisis de los parámetros, se logró concluir 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, en tanto que, la variación de la longitud de la cámara modifica la frecuencia de ocurrencia de máximos y mínimos, sin alterar sus magnitudes. Otra conclusión a resaltar es la posibilidad de optimizar la escogencia de la longitud del silenciador tal que se garanticen máximas pérdidas con mínimas longitudes. Finalmente, un aumento en la temperatura de operación produce un desfase en el gráfico de pérdidas por transmisión, lo cual compromete seriamente el desempeño del equipo.

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

AUTOMATIC DESIGN OF REACTIVE MUFFLERS: PERFORMANCE ANALYSIS. PART I

ABSTRACT

Uncontrolled urban development has led to a considerable increase in noise pollution, mainly caused by automobile traffic and industrial activity. This pollution impacts negatively on human beings both physiologically as well as psychologically. Several solutions to the problem of reducing noise levels have included mufflers, which can be absorptive and reactive, according to their working principles. In this study, the design of reactive mufflers, which are commonly used to reduce the noise contamination of systems that involve gas flow, is studied. This design process is relatively large and iterative; therefore, in the first part of this work, a computational tool to carry out that calculus is developed. This tool, named PADSA, is user friendly and was used to analyze and concluded about the simple chamber muffler perform, leaving to the second part of this work the analysis for the double chamber mufflers. As some of these conclusions, the followings can be mentioned. An area relationship increase causes a transmission losses rise, with no change on the frequency occurrence of the maximum and minimum values. A chamber longitude increase modifies the frequency occurrence of the maximum and minimum values with no modification of the transmission losses magnitude. The muffler longitudes can be optimizing in

order to achieve maximum losses with minimal longitudes. Finally, a temperature increase produce a phase modification in the transmission losses curve, which affect the muffler perform.

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

INTRODUCCIÓN

Actualmente el desarrollo de la actividad productiva ha traído un crecimiento urbano descontrolado en las ciudades y en sus zonas periféricas, lo cual ha generado una contaminación por ruido, debida principalmente al tránsito automotriz y a la actividad industrial. En los últimos años se han publicado numerosos artículos referidos a los daños que provoca en el ser humano este tipo de contaminación, la cual, al no ser visible, muchas veces ha sido descuidada, provocando efectos auditivos y extra-auditivos irreversibles en seres humanos (Hiramatsu *et al.* 2004; Matsui *et al.* 2004).

Fisiológicamente, la exposición a ruidos de fuerte intensidad es la principal causa de pérdida parcial o total de audición, rotura de tímpano, tinnitus parcial o permanente y pérdidas en la percepción de ciertas frecuencias sonoras, entre otros daños (Hiramatsu *et al.* 2004; Rylander, 2004; Waye *et al.* 2004; Kaku *et al.* 2004; Matsui *et al.* 2004; Magrab, 1975; Seto, 1973). Psicológicamente, la contaminación por ruido produce esfuerzos adversos en la productividad de los afectados, como irritabilidad, fatiga, cansancio e interferencia en los patrones del sueño (Kuвано *et al.* 2004; Namba *et al.* 2004; Seto, 1973). De allí la necesidad de crear dispositivos, como barreras acústicas, silenciadores o encerramientos acústicos, que tengan como función disminuir los niveles de ruido.

Los silenciadores, motivo de este estudio, son específicamente diseñados con la intención de reducir la transmisión de sonido hacia un lugar en específico, y su forma depende de la instalación donde deben colocarse y de los niveles de atenuaciones deseados (Ballesteros *et al.* 2000 y Munjal, 1997). Cabe destacar que en el control de ruido, dos principios fundamentales son empleados en la acción de atenuar o filtrar el sonido: reflexión y absorción, lo que a su vez divide a los silenciadores en dos grupos, disipativos y reactivos. Los silenciadores disipativos tienen una amplia gama de aplicación en sistemas que involucran flujo de gas con partículas, tales como el venteo de gases a la atmósfera en refinerías e industrias, el cual es causal de grandes fuentes de perturbación sonora, de igual forma en los escapes de vehículos, o para atenuar el sonido de maquinaria recíproca como bombas, compresores, motores de combustión interna, ventiladores y ductos de aire acondicionado (Ballesteros *et al.* 2000; Selamet & Radavich, 1996 y Munjal, 1997).

El proceso de diseño de los silenciadores consta de diversas etapas que se llevan a cabo bajo diferentes criterios y normas, siendo este proceso largo e iterativo. De allí que, en el presente trabajo se propuso automatizarlo a través del desarrollo de una herramienta computacional versátil y rápida, el cual se basó en las mismas ecuaciones que se utilizan en la teoría (Magrab, 1975). Además, el programa desarrollado se utilizó para realizar un análisis de sensibilidad en el desempeño final de dichos silenciadores ante variaciones en sus condiciones. Esto último permite plantear generalizaciones en el diseño de estos equipos acústicos con miras a optimizar relaciones de costo y espacio.

Debido a la extensión e importancia del tema se presenta en dos partes, la primera contiene la descripción detallada del programa y un análisis de los silenciadores reactivos de cámara simple y en la segunda parte, solamente se introdujo brevemente al programa y se realizó un análisis para los silenciadores de doble cámara, considerando sus dos tipos de uniones, es decir, con tubo conector externo e interno. Es importante resaltar la necesidad de realizar un análisis por separado para cada tipo de silenciador, pues, en el caso de los silenciadores de cámara simple, el estudio detallado de su diseño fue útil para lograr una comprensión completa del principio de funcionamiento de este tipo de silenciadores en general, lo cual, posteriormente fue utilizado como fundamento para el análisis de los silenciadores de doble cámara. Adicionalmente, se pretendía comprobar que el desarrollo del tipo de herramienta propuesta, permitiría una selección más adecuada del tipo de silenciador a utilizar.

SILENCIADOR REACTIVO DE CÁMARA SIMPLE

Estos silenciadores fundamentan su principio de acción generando, a través de su forma, una diferencia de impedancia acústica que imposibilita la transferencia del sonido hacia el lugar que se desea atenuar y logra que se refleje gran parte de la energía acústica de regreso hacia la fuente, o hacia las cámaras o secciones del silenciador, lo cual también impide la transmisión del sonido, es por ello que su desempeño se encuentra determinado por su forma geométrica y por las condiciones del medio (Beranek, 1971; Magrab, 1975; Wilson, 1989; Munjal, 1997).

El modelo de estos silenciadores es sumamente sencillo (Beranek, 1971; Magrab, 1975) y su esquema se muestra en la figura 1, en la cual se puede apreciar una tubería de

longitud l , con un abrupto cambio en el área transversal a cada extremo. Su comportamiento puede ser descrito en términos de dos parámetros importantes, el cociente entre el área transversal de la cámara (S_2) y el área transversal del ducto (S_1), conocido como m y la longitud de la cámara de expansión, l . Otra variable muy importante en el funcionamiento de estos silenciadores es la temperatura (T) de operación de los mismos.

Es importante destacar que el valor de las pérdidas por transmisión en un silenciador de una cámara de expansión, no es afectado de manera significativa por la presencia de flujo de gas súper impuestado, siempre y cuando sea menor de 35 m/s (Beranek, 1971).

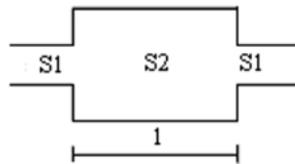


Figura 1. Esquema de la cámara de expansión simple.

Adicionalmente, es importante resaltar que con este tipo de silenciador se logra una importante atenuación que podría estar en el orden de los 40 a 50 dB para una frecuencia determinada, pero tiene la desventaja de que podría amplificar la salida de alguna otra frecuencia hasta en 6 dB. Este tipo de problema se puede solucionar utilizando silenciadores de doble cámara, tal como se explica detalladamente en la segunda parte de este trabajo.

El método de cálculo para el diseño del silenciador, utilizado en el programa a desarrollar, se basa en las ecuaciones teóricas que describen el comportamiento de silenciadores acústicos propuestos por Magrab (1975), el cual ha sido previamente validado de forma experimental por (Davis *et al.* 1965; Rastelli, 1994a, 1995b, 2003c).

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

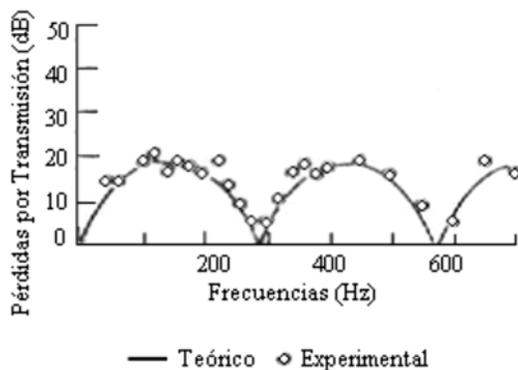


Figura 2. Silenciador de cámara simple.

RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

En la próxima sección se describe el programa desarrollado, resaltando las entradas requeridas por el mismo y los resultados que pudieron obtenerse gracias a su uso.

Descripción del problema

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), que fue realizado utilizando el paquete MATLAB™, gracias al cual es posible presentar al usuario una interfaz amigable y de sencilla utilización (Rastelli, 2005).

El programa PADSA está fundamentado en el método de cálculo propuesto por Magrab (1975) para describir el comportamiento de silenciadores reactivos. A continuación se presenta, en la figura 3, un flujograma del funcionamiento de PADSA, el cual será posteriormente detallado.

Para calcular o dimensionar un silenciador en general, se debe partir del espectro de ruido tomado en el lugar en el cual se desea colocar el dispositivo y seguir los pasos mencionados a continuación.

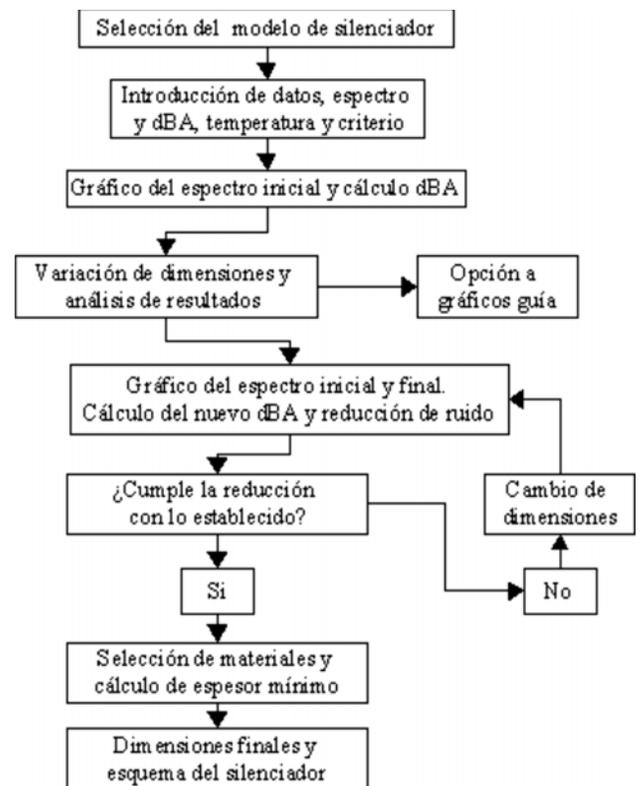


Figura 3. Diagrama de flujos del programa PADSA.

- A partir del espectro inicial, el programa calcula el nivel en dBA de la señal original, en el lugar en el cual se deberá colocar el silenciador.
- Según la aplicación y la reducción en dBA que se desea lograr el usuario selecciona el modelo de silenciador.
- Mediante la observación del espectro obtenido, se identifican las frecuencias críticas del mismo, para priorizar su atenuación.
- Con el valor de la temperatura promedio de operación del silenciador, PADSА calcula la velocidad del sonido.
- Utilizando la ecuación de pérdidas por transmisión del modelo escogido, el usuario procede a seleccionar las dimensiones del mismo, 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 a partir de la presión interna máxima a la cual estará sometido, PADSА calcula su espesor utilizando la teoría de Tresca de recipientes a presión (Beer y Johnston, 1982).

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

Gracias a que PADSА presenta el comportamiento aproximado en frecuencias a la salida, el diseño de silenciadores de cámara simple podrá prever la posible inconveniencia en el aumento de la salida para una frecuencia específica, lo cual permitirá al usuario analizar y decidir respecto al diseño final del silenciador.

DESEMPEÑO DEL SILENCIADOR DE CÁMARA DE EXPANSIÓN SIMPLE

Se analiza el desempeño de los silenciadores reactivos de cámara simple ante variaciones en la relación de área, la longitud de la cámara y la temperatura ambiental, utilizando PADSА para calcular la reducción de sonido obtenida por el silenciador ante las variaciones propuestas.

Variación de la Relación de Áreas (m)

Para una longitud de cámara fija y para variaciones del parámetro m , se calcularon las pérdidas por transmisión proporcionadas por el silenciador, lo cual puede apreciarse en la figura 4. Al aumentar el parámetro en cuestión también lo hacen las pérdidas por transmisión, lo cual es de esperarse debido a la modificación en impedancia acústica. Cabe destacar que la forma de la curva sólo se desplaza hacia arriba con el aumento de m , los puntos máximos o picos ocurren en las mismas frecuencias, lo que debe ser tomado en cuenta al momento de establecer la longitud de la cámara, haciendo coincidir la o las frecuencias críticas con los máximos del gráfico de pérdidas.

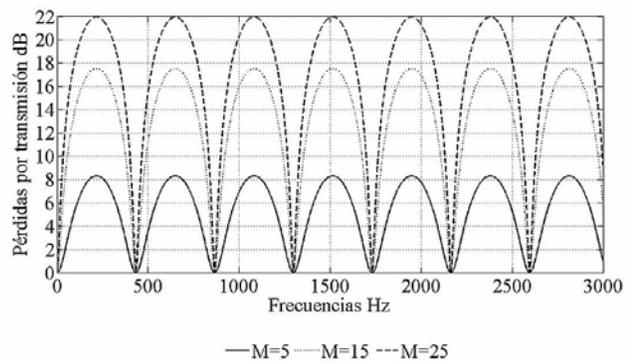


Figura 4. Pérdidas por transmisión (TL) para variaciones de m y $L=0.4$.

En la figura 5 se muestra, para un espectro específico, la reducción en dBA proporcionada por el silenciador ante variaciones del parámetro m para diferentes longitudes de cámara. En la misma se puede apreciar que a medida que m aumenta, la reducción en dBA también lo hace, pero esta relación no es lineal y la tendencia mostrada, para todas las longitudes, es que la variación en dBA es cada vez menor a medida que m aumenta. Se observa que aún cuando haya un incremento en valores iguales, el incremento en la reducción en dBA va siendo más pequeño.

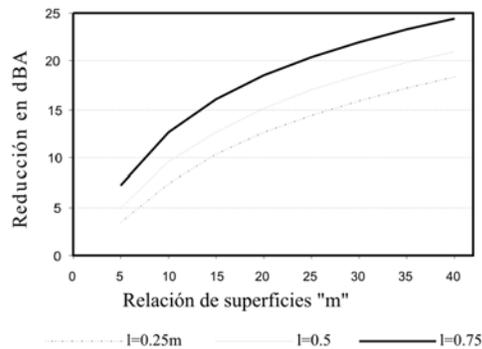


Figura 5. Reducción en dBA ante variaciones del parámetro m para diferentes l .

Basándose en lo anterior se puede concluir que existe una relación de superficie donde la relación beneficio costo alcanza una asíntota para la cual se puede obtener un máximo de atenuación práctico en dBA. Esto fue realizado para diferentes espectros (Rastelli, 2005), obteniéndose resultados semejantes a los mencionados anteriormente.

Variación de la longitud de la cámara (l)

Establecer la longitud de la cámara, es fundamental en el diseño del silenciador pues la o las frecuencias críticas en donde la atenuación debe ser mayor, deben coincidir con los máximos del gráfico de pérdidas. Este procedimiento también es conocido como sintonización del silenciador y a continuación se muestra, en la figura 6, el efecto de modificar dicha longitud sobre el gráfico de pérdidas por transmisión. En dicha figura se puede observar que al aumentar la longitud de la cámara, existe un aumento del número máximos y mínimos que se presentan a medida que varía la frecuencia, incrementando así el número de frecuencias a las cuales se produce la máxima atenuación, pero en la misma medida aumentan los valles en los cuales la atenuación es nula.

Es importante resaltar que el valor máximo para las pérdidas resulta el mismo independiente de la longitud de la cámara, de allí que, la variación de la longitud de la cámara en un silenciador solamente tiene la función de desplazar el gráfico de pérdidas hacia los lados, cambiando la frecuencia de ocurrencia de los máximos y mínimos.

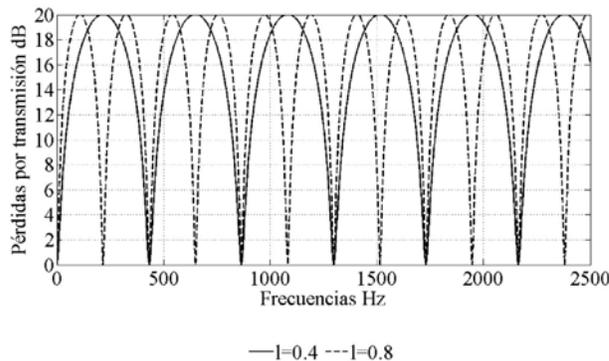


Figura 6. Pérdidas por transmisión para variaciones en la longitud del silenciador (l) manteniendo m constante.

En la figura 7 se muestra, para un espectro específico y a temperatura ambiente, la reducción en dBA proporcionada por el silenciador ante variaciones de la longitud de la cámara para diferentes valores de m . En ella se aprecian diversos puntos donde disminuye considerablemente la reducción en dBA. Igualmente se observa que en diferentes puntos, se puede obtener el mismo valor de las pérdidas por transmisión, sin la necesidad de hacer muy larga la cámara de expansión, es decir, si se sintoniza adecuadamente el

equipo, podría obtenerse muy buenos resultados en reducción en dBA sin incrementar innecesariamente las dimensiones del mismo. Esto fue realizado para diferentes espectros (Rastelli, 2005), obteniéndose resultados semejantes a los mencionados anteriormente.

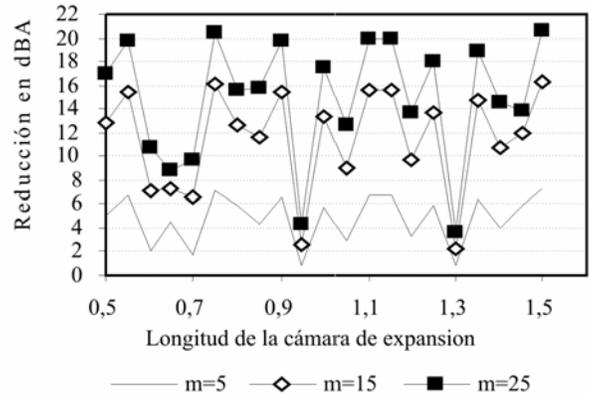


Figura 7. Reducción en dBA ante variaciones del parámetro l para diferentes m .

Variación de la temperatura ambiental

La temperatura a la que trabaja el silenciador es un parámetro importante a considerar, ya que la misma afecta directamente la velocidad del sonido, y por consiguiente el desempeño del silenciador. Por esta razón, se recomienda diseñar el silenciador para la temperatura promedio a la cual trabajaría y considerar fuertemente este parámetro a la hora de cambiarlo de lugar.

En la figura 8 se observa que, al aumentar la temperatura ambiental, para un m y l fijos, el gráfico de pérdidas por transmisión se desplaza ligeramente, lo cual puede comprometer la funcionalidad del silenciador, ya que traslada las crestas y valles de los lugares deseados para los cuales se sintonizó el equipo, y así disminuir la reducción de sonido.

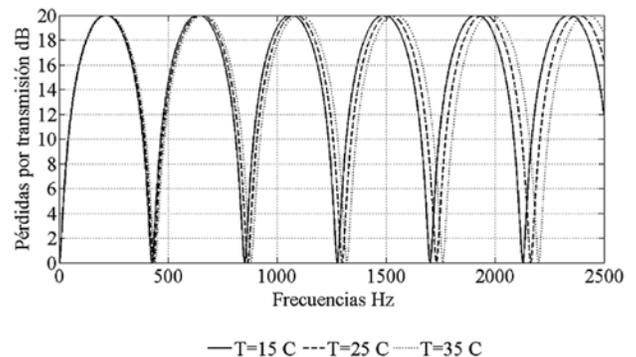


Figura 8. Pérdidas por transmisión para variación en la temperatura de operación ($m=20$ y $l=0.4$).

Cabe destacar que este desfase se hace más evidente en frecuencias altas, ya que ellas poseen longitudes de onda más pequeñas y al desplazarse con mayor rapidez, a causa del aumento en la velocidad de propagación, se magnifica el fenómeno. En otras palabras, se evidencia que un cambio de temperatura afecta más las frecuencias altas (longitudes de onda pequeñas) que las frecuencias bajas.

CONCLUSIONES

Los silenciadores reactivos tienen una amplia aplicación, sobre todo hacia las mayores fuentes de contaminación, como el venteo de gases en refinerías e industrias, en escapes de vehículos, para atenuar el sonido de maquinaria recíproca como bombas, compresores, motores de combustión interna, ventiladores y ductos de aire acondicionado.

El desarrollo de PADS, como herramienta para la automatización en el diseño de silenciadores reactivos, realiza de manera rápida y versátil un cálculo tedioso, además de presentar una interfaz amigable con propuestas para el diseñador que no tiene gran experticia en el área.

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 del aumento de las pérdidas por transmisión con relación al aumento m , va disminuyendo a medida que m aumenta.

La variación de la longitud de la o las cámaras modifica la frecuencia de ocurrencia de máximos y mínimos en el gráfico de pérdidas, sin alterar las magnitudes de las mismas.

El aumento de la longitud de la o las cámaras aumenta la cantidad de domos o picos en la curva de pérdidas, lo cual puede resultar perjudicial ya que aumentará la posibilidad de coincidencia entre una frecuencia particular y un valor nulo de pérdidas por transmisión.

Al variar las longitudes de las cámaras, manteniendo constante a 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.

La variación en la temperatura de operación es un parámetro de suma importancia, ya que su aumento produce un desfase en el gráfico de pérdidas por transmisión, lo cual compromete seriamente el desempeño del equipo.

Con el análisis frecuencial del comportamiento de los silenciadores de cámara simple a través del programa, se podrá evaluar la conveniencia en su selección lo cual representa una importante contribución.

REFERENCIAS

- BALLESTEROS, R., ANTUNA, E., VELARDE, S., PARRONDO, G., JORGE, L. (2000). *Numerical calculation of the attenuation produced by reactive silencers*, Tecní Acústica.
- BEER, F. & JOHNSTON, E. (1982). *Mecánica de Materiales*, editorial McGraw Hill, Bogotá.
- 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, 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, 617-625.
- KAKU, J., HIROE, M., KUWANO, S., NAMBA, S. (2004). *Sleep disturbance by traffic noise: an experimental study in subject's own houses using a portable CD player*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, 459-464.
- 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, 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, 469-470.
- MUNJAL, M. (1997). *Analysis and design of mufflers-An overview of research at the Indian institute of science*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 211, N. 3, 425-433.

- 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, 445-452.
- RASTELLI, V. (1994a). *Proyecto de insonorización de los ventiladores de la cámara de sedimentación, Planta Bigott, Los Ruices, Caracas.*
- RASTELLI, V. (1995b). *Control de ruido en los ventiladores de la agencia del banco Provincial de la Av. Michelena, Valencia, estado Carabobo.*
- RASTELLI, V. (2003c). *Diseño de silenciador Reactivo-Disipativo para vapor de agua*, Realizado para la planta Oxinova, estado Anzoátegui.
- RASTELLI, V. (2005). TESIS
- RYLANDER, R. (2004). *Physiological aspects of noise-induced stress and annoyance*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 277, 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, 407-426.
- SELAMET, A., DENIA, F., BESA, A. (2002). *Acoustical behavior of circular dual-chamber mufflers*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 265, 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, 453-457.
- WILSON, CH. (1989). *Noise Control: measurement, Analysis, and Control of Sound and Vibration*, Harper & Row, Publishers, Inc.