

MODELADO, SIMULACIÓN Y DISEÑO DE UN FILTRO RESONADOR DE HELMHOLTZ PARA UN SISTEMA DE VENTILACIÓN MECÁNICO

RESUMEN

En esta publicación se presenta el modelado de un resonador de Helmholtz, la simulación de los efectos de este resonador en los niveles de ruido de un sistema de ventilación y el desarrollo de un procedimiento de diseño para este filtro y su adaptación en estos sistemas.

PALABRAS CLAVES: Modelado, simulación, diseño, resonador, ruido.

ABSTRACT

In this publication the modeling of a resonator of Helmholtz, the simulation of the effects of this resonator in the levels of noise of a ventilation system and the development of a design procedure is presented for this filter and their adaptation in these systems.

KEYWORDS: Modeling, simulation, design, resonator, noise.

HÉCTOR Á. GONZÁLEZ

Ms.C Profesor Asistente
Escuela de Tecnología Mecánica.
Universidad Tecnológica de Pereira
hagonza@utp.edu.co

GUSTAVO ADOLFO VÁSQUEZ

Ingeniero Mecánico
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira

DIANA MARIA ARROYAVE

Ingeniero Mecánico
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que la cantidad de ruido ha estado creciendo en los últimos años y que es un aspecto que se ha vuelto cada vez más importante en el confort de las personas y en el desarrollo y aplicación de los procesos tecnológicos y de producción, se ha producido una toma de conciencia también creciente acerca del problema de la contaminación sonora. Hoy en día muchas personas están sometidas constantemente a contaminación sonora en sus lugares de trabajos, por ejemplo quienes laboran en oficinas, laboratorios, fábricas, etc., en donde se necesitan sistemas de ventilación mecánico por diversas razones, como ventilación insuficiente o el transporte de partículas como granos, harinas, agentes contaminantes, entre otros. Una característica común de estos sistemas de ventilación es la emisión de ruido que generan los ventiladores, la cual en ocasiones puede llegar a ser muy molesta o perjudicial para las personas.

El propósito de esta investigación es modelar un resonador de Helmholtz, simular los efectos de este resonador en los niveles de ruido de un sistema de ventilación y desarrollar un procedimiento de diseño para este filtro y su adaptación en estos sistemas. La metodología empleada para llevar a cabo este trabajo consiste en desarrollar unas expresiones matemáticas que describan los efectos del resonador en el sistema de ventilación, posteriormente simular con parámetros reales para poder analizar el comportamiento del sistema y finalmente establecer un procedimiento de diseño. El esquema temático que se desarrolla en el presente trabajo inicia con un marco teórico en donde se hace una descripción de los conceptos fundamentales del sonido y de los ventiladores axiales; seguidamente se procede a hacer un análisis matemático en donde se determinan las ecuaciones que describen el funcionamiento del sistema; luego se efectúa la simulación de estas ecuaciones para casos particulares, de los cuales finalmente se establece

un procedimiento de diseño del resonador y del ducto donde irá instalado.

2. OBJETIVOS

- Modelar el resonador de Helmholtz.
- Simular los efectos del ruido por fuentes aerodinámicas del ventilador sobre el resonador de Helmholtz.
- Establecer un protocolo de diseño de resonadores de Helmholtz para ventiladores axiales.

3. MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

En este trabajo se tuvieron en cuenta conceptos básicos del sonido y sus propiedades, características de los ventiladores y algunos de los fundamentos sobre el ruido producidos en ellos, especialmente el ruido producido por la frecuencia de los álabes.

Además, se desarrolló la ecuación de onda ya que esta describe la propagación del sonido en un medio, en este caso gaseoso. Físicamente, el fenómeno de transmisión de una onda de sonido envuelve el uso de tres leyes para desarrollar la ecuación de onda para fluidos:

1. Ecuación de estado

$$P - P_0 = \beta \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad (1) \quad \text{donde} \quad \beta = \rho_0 \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_{\rho_0}$$

2. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

3. Ecuación de fuerza

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (3)$$

Combinando estas tres ecuaciones se obtiene una única ecuación diferencial con una variable dependiente

$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$ (4) donde $c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}$ es la velocidad del sonido.

Otros conceptos importantes en este trabajo son la impedancia acústica y su relación con la impedancia mecánica y las guías de ondas. La relación entre las impedancias acústica y mecánica está dada por:

$$Z = \frac{p}{U} = \frac{S}{u \times S} = \frac{l}{S^2} \frac{f}{u} = \frac{Z_m}{S^2} \quad (5)$$

Para un ducto circular que contenga aire a temperatura del cuarto, la frecuencia más alta a la cual sólo ondas planas serán propagadas está dada por $f=10l/a$, donde a es el radio de la sección transversal del ducto. Una onda plana propagante puede encontrar un cambio en la impedancia acústica del ducto cuando el ducto (i) se abre al aire libre, (ii) es conectado a otra sección de ducto con diferente sección transversal, (iii) se ramifica en dos tubos, o (iv) termina en algún otro modo. Este cambio de impedancia causa una reflexión parcial y una transmisión parcial de las ondas planas incidentes.

Para lograr un cambio en la impedancia, se insertó un resonador de Helmholtz en el ducto para así atenuar los niveles de ruido del ventilador al que se le agregó el ducto, ver figura 2. Esta disposición tiene múltiples ventajas. Entre ellas se encuentran:

- No hay que esperar a que el sonido se propague para que el filtro actúe.
- Pueden utilizarse otras técnicas para controlar el ruido como revestir con material absorbente el ducto.
- En el análisis del fenómeno de propagación puede ser utilizadas ondas planas en lugar de esféricas si se cumplen ciertas condiciones, entre otros.

El resonador de Helmholtz es un ejemplo simple de un elemento acústico concentrado por lo que este sistema se comporta como si fuera un oscilador armónico con un grado de libertad (ver ecuación 6). Este artefacto consiste en una cavidad rígida de volumen V con un cuello de área S_r y longitud L como se puede intuir en la figura 4. Si se analiza el resonador de Helmholtz como un sistema mecánico análogo (ver figura 1) se debe tener en cuenta que:

- a) $\lambda \gg L$: el fluido en el cuello se mueve como una unidad y constituye el elemento de *masa*.
- b) $\lambda \gg S_r^{1/2}$: la apertura radia sonido como una fuente simple, y en consecuencia proporciona el elemento de *resistencia*
- c) $\lambda \gg V^{1/3}$: la presión acústica dentro de la cavidad proporciona el elemento de *rigidez*.

Donde λ es la longitud de onda

Aunque las pérdidas viscosas en el cuello dan una resistencia adicional, para cuellos de diámetros mayores a

l_{cm} , estas pérdidas por lo general son menores que las asociadas con la radiación y pueden ignorarse con seguridad.

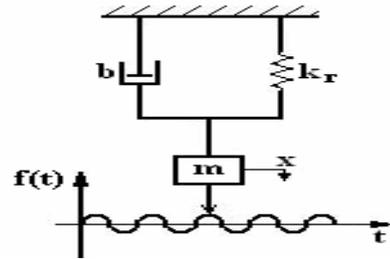


Figura 1. Sistema Mecánico Análogo

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_r x = f(t) \quad (6)$$

$$f = S_r P e^{j\omega t} \quad (7)$$

Utilizando la ecuación 6, se analizará el resonador de Helmholtz calculando los valores del sistema mecánico análogo.

-El fluido en el cuello del resonador tiene una masa efectiva total

$$m = \rho_0 S_r L' \quad (8)$$

$$L' = L + 2(0.85 a_r) = L + 1.7 a_r$$

(Extremo exterior con pestaña)

$$L' = L + (0.85 + 0.6) a_r = L + 1.5 a_r \quad (9)$$

(Extremo exterior sin pestaña)

- El próximo elemento requerido es la rigidez del fluido en la cámara, la cual juega el papel de resorte en el oscilador armónico. Para hallar la rigidez, se requiere comprender como reacciona la cámara de volumen a los cambios de presión. Cuando se presenta un cambio de presión en la cavidad debida a las fluctuaciones en el volumen de aire en el cuello provocadas por una fuerza de excitación externa se presenta un cambio de volumen, lo que conlleva a un cambio en la densidad del fluido. El aumento de presión p (en la aproximación acústica) es

$$p = \rho_0 c^2 \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) \quad \text{ó} \quad p = \frac{\rho_0 c^2 S_r}{V} x \quad (10)$$

La presión es la fuerza dividida por el área, por lo tanto la fuerza $f = p S_r$ requerida para mantener el desplazamiento es

$$f = \frac{\rho_0 c^2 S_r^2}{V} x \quad (11)$$

Y por lo tanto la rigidez efectiva (recordando la ley de Hooke $f = k_r x$) es

$$k_r = \rho_0 c^2 \frac{S_r^2}{V} \quad (12)$$

- Si se supone que el fluido que se mueve en el cuello radia sonido en el medio circundante de la misma manera que un tubo con el extremo abierto, entonces para $\lambda \gg a_r$ la resistencia de radiación es la que se dedujo para guías de

ondas. Se omite por razón de espacio la discusión de guías de onda.

$$b = \rho_0 c \frac{k^2 S_r^2}{2\pi} \quad (13) \quad (\text{con pestaña})$$

$$b = \rho_0 c \frac{k^2 S_r^2}{4\pi} \quad (14) \quad (\text{sin pestaña})$$

La ecuación diferencial resultante para el desplazamiento en el fluido del cuello es entonces

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_r x = S_r P e^{j\omega t} \quad (15)$$

Dado que esta ecuación es análoga a la de un oscilador forzado, su solución se puede obtener por analogía.

$$x = \frac{S_r P e^{j\omega t}}{j\omega \left[b + j \left(\omega m - \frac{k_r}{\omega} \right) \right]} \quad (16)$$

Diferenciando esta expresión se obtiene la velocidad compleja

$$u = \frac{S_r P e^{j\omega t}}{b + j \left(\omega m - \frac{k_r}{\omega} \right)} \quad (17)$$

teniendo en cuenta que $Z_m = \frac{f}{u}$

En particular, la impedancia mecánica de un resonador de Helmholtz es

$$Z_m = b + j \left(\omega m - \frac{k_r}{\omega} \right) = b + jX_m \quad (18)$$

Y la impedancia acústica del resonador es

$$Z = \frac{\rho_0 c k^2}{2\pi} + j \frac{\rho_0 L' \omega_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{S_r} \quad (19)$$

Y la resonancia ocurre cuando la reactancia se hace igual a cero:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_r}{m}} = \sqrt{\frac{\rho_0 c^2 S_r^2}{\rho_0 S_r L' V}} = c \sqrt{\frac{S_r}{L' V}} \quad (20)$$

Como $\omega_0 = 2\pi f_0$

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_r}{L' V}} \quad (21)$$

3.1 Análisis del resonador de helmholtz instalado en un ducto de longitud finita

Como el ducto tiene longitud finita, al tener su extremo abierto y debido al cambio en el medio de propagación del sonido, hace que parte de la potencia de sonido se refleje de vuelta hacia la fuente y que otra parte se irradie al ambiente. Esta reflexión del sonido en el extremo abierto del ducto da como resultado la aparición de ondas estacionarias en el ducto, las cuales a determinadas frecuencias (frecuencias de resonancia) pueden tener valores de amplitud relativamente grandes.

Para estimar el efecto del sistema sobre el nivel de ruido con la inserción del resonador en los patrones de ondas estacionarias en el ducto, es necesario realizar un análisis de la amplitud de respuesta del ducto con y sin el resonador. Para llevar a cabo este análisis, se efectúa una comparación de la amplitud de respuesta del ducto con resonador y sin él, en función de la frecuencia. Como la amplitud de la respuesta del ducto es directamente proporcional a la admitancia de entrada del ducto (el inverso de la impedancia de entrada), es necesario calcular la impedancia de entrada del ducto con y sin el resonador para estimar la amplitud de respuesta.

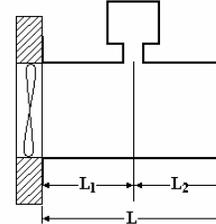


Figura 2. Resonador de Helmholtz instalado en un ducto de longitud finita

Para calcular la impedancia de entrada para un ducto con resonador, es conveniente reemplazar las porciones del ducto y el resonador por sus equivalentes eléctricos correspondientes. En la figura 3 se muestra el circuito eléctrico equivalente del dispositivo de la figura 2. Para calcular la impedancia del sistema en la entrada debemos calcular la impedancia en paralelo Z_p entre la impedancia Z_2 del tubo de longitud l_2 que termina en una impedancia acústica Z_L y el resonador Helmholtz que tiene una impedancia Z_r . Finalmente la impedancia de entrada Z_e es la impedancia del tubo de longitud l_1 que termina en una impedancia Z_p .

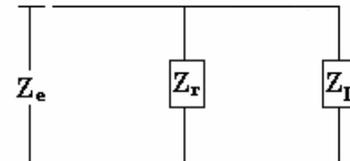


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente

Por lo tanto

$$Z_2 = x \frac{\frac{1}{S^2} \left[\frac{1}{4} (ka)^2 + j0.6ka \right] + j \tan kl_2}{1 + j \frac{1}{S^2} \left[\frac{1}{4} (ka)^2 + j0.6ka \right] \tan kl_2} \quad (22)$$

Ahora se halla la impedancia en paralelo Z_p entre la impedancia Z_2 del tubo de longitud l_2 y la impedancia del resonador de Helmholtz. La cual es

$$Z_p = \frac{Z_2 Z_r}{Z_2 + Z_r} \quad (23)$$

La impedancia de entrada Z_e del sistema por lo tanto, no es más que la impedancia Z_1 del tubo de longitud l_1 que termina en una impedancia Z_p .

$$Z_e = x \frac{\frac{Z_p}{x} + j \tan kl_1}{1 + j \frac{Z_p}{x} \tan kl_1} \quad (24)$$

Reemplazando

$$Z_e = x \frac{\frac{Z_L}{x} + \left(1 + \frac{Z_L}{Z_r}\right) j \tan kl_1 + j \tan kl_2 - \left(\frac{Z_L}{x} + \frac{x}{Z_r}\right) \tan kl_2 \tan kl_1}{1 + \frac{Z_L}{Z_r} + \frac{Z_L}{x} j \tan kl_1 + \left(\frac{Z_L}{x} + \frac{x}{Z_r}\right) j \tan kl_2 - \tan kl_2 \tan kl_1} \quad (25)$$

Se omite por razones de espacio el reemplazo de Z_L por $R_L + jX_L$ y Z_r por $R_r + jX_r$ (sus componentes resistivas y reactivas). Finalmente, como ya se sabe, la admitancia es $Y=1/Z$

4. CÁLCULOS Y RESULTADOS

Una vez determinadas las ecuaciones que representan la amplitud de respuesta de los sistemas estudiados, el paso siguiente es evaluar su comportamiento. Para esto se utilizaron valores reales acordes al ventilador axial 2CC2 354-5YC3 de Siemens. Por lo tanto, del catalogo de Siemens y utilizando la ecuación $f_B = n \times N$, se tiene que

$$n = 1800 \text{rpm} = 30 \text{rev/s}$$

$$d = 350 \text{mm}$$

$$N = 5 \text{ álabes}$$

$$f_B = 30 \text{rev/s} \times 5 = 150 \text{Hz} \quad (26)$$

Lo cual da una frecuencia de paso de los álabes de 150Hz, frecuencia a la cual se debe diseñar el resonador de Helmholtz. La frecuencia más alta a la cual se propagaran ondas planas esta determinada por el radio (a) de la sección transversal del ducto. Este radio está determinado a su vez por el diámetro del ventilador. Del catalogo del fabricante el diámetro de la sección de la carcasa que envuelve los álabes del ventilador (C) es de 356mm. Por lo tanto

$$f = \frac{101}{a} = \frac{101}{0.178} = 567.41 \text{Hz} \quad (27)$$

De acuerdo a esto $f > f_B$, lo cual permite utilizar las expresiones para ondas planas desarrolladas.

4.1 Cálculo de las características del ducto

Ya que el radio del ducto es de 178mm, el área del ducto es

$$S = \pi(0.178 \text{m})^2 = 0.099538221 \text{m}^2 \quad (28)$$

La longitud del ducto no debe ser un número múltiplo de la mitad de la longitud de onda correspondiente a la frecuencia del álabes del ventilador

Por lo tanto,

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344.4 \text{m/s}}{150 \text{s}^{-1}} = 2.296 \text{m} \quad (29)$$

$$\frac{\lambda}{2} = 1.148 \text{m}$$

Es de suma importancia recalcar que el valor de la longitud puede ser menor o mayor que 1.148m pero sin ser múltiplo de este. Por lo tanto a la hora de elegir la longitud del ducto, esta debe estimarse para diferentes valores, mayores y menores que $\lambda/2$. Además debe tenerse en cuenta que el ventilador está extrayendo aire del laboratorio, por lo que una longitud de ducto grande puede interferir o no permitir que se lleve a cabo este proceso. Sin embargo, a bajas frecuencias la pérdida por inserción de un ducto pueden ser negativas, es decir, que la potencia de sonido aumenta al añadir conductos cortos al sistema. La importancia de la pérdida por inserción negativa puede ser determinada solamente conociendo el espectro de potencia sonora del ruido emitido por el ventilador concreto empleado, y realizando una estimación del efecto subjetivo del ruido en el oído humano con y sin la instalación del ducto.

4.2 Cálculo de las características del resonador de helmholtz

Una vez establecida la frecuencia de diseño del resonador de Helmholtz y comprobado que a esta frecuencia las ondas de sonido se comportan como ondas planas, se procede a determinar los parámetros que influyen en el funcionamiento del resonador. El diámetro del cuello del resonador debe ser superior a 1cm con el fin de que las pérdidas viscosas en el cuello no sean significativas, por lo tanto $a_r > 0.5 \text{cm}$ (radio del cuello del resonador). Para este estudio se asumió $a_r = 2 \text{cm} = 0.02 \text{m}$ y $L = 5 \text{cm} = 0.05 \text{m}$, por lo que se tiene que

$$\left[\left[S_r = \pi a_r^2 = \pi (0.02 \text{m})^2 = 1.256637 \times 10^{-3} \text{m}^2 \right] \right] \quad (30)$$

$$L' = L + 1.7a_r = 0.05 \text{m} + 1.7(0.02 \text{m}) = 0.084 \text{m} \quad (31)$$

Tomando en cuenta que la frecuencia de diseño del resonador es igual a la frecuencia de paso de los álabes ($f_0 = f_B$) y que la expresión para f_0 es

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_r}{L'V}} \quad (32)$$

El volumen se encuentra despejando V de esta ecuación en función de la frecuencia de resonancia y de los parámetros asumidos para el cuello del resonador. Por lo tanto,

$$V = \left(\frac{c}{2\pi f_0} \right)^2 \frac{\pi a_r^2}{L + 1.7a_r} \quad (33)$$

Reemplazando valores se tiene entonces

$$V = \left(\frac{344.4 \text{ m/s}}{2\pi \times 150 \text{ s}^{-1}} \right)^2 \frac{\pi (0.02 \text{ m})^2}{0.05 \text{ m} + 1.7 (0.02 \text{ m})} = 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Por lo tanto, 0.002 m^3 corresponde al volumen de una esfera de radio 7.8159 cm o al volumen de un cubo con 12.6 cm de lado. Debido a que es el volumen y no su forma lo que es importante en el diseño del resonador, se recomienda usar una cavidad de volumen cúbica con ánimos de simplificar el proceso de construcción. La figura 4 muestra un resonador de Helmholtz con cavidad de volumen cúbica.

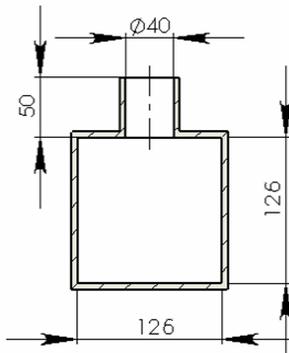


Figura 4. Resonador de Helmholtz con cavidad de volumen cúbica, dimensiones en milímetros.

4.3 Estimación de la longitud del ducto

Para determinar los efectos de insertar un resonador de Helmholtz en un ducto de longitud finita, primero se debe conocer como responde el ducto sin resonador en función de la frecuencia. Hay que tener en cuenta que la longitud del ducto es un parámetro muy importante que debe ser escogido con precaución, debido a que la respuesta del ducto a las diferentes frecuencias, es diferente con la longitud. La admitancia para un ducto sin resonador esta representada por la ecuación

$$|Y_e| = \frac{1}{|Z_e|} = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{(\rho_0 c S^2 - 0.6 \rho_0 c k a \tan kL)^2 + \left(\frac{\rho_0 c}{4} (ka)^2 \tan kL\right)^2}{\left(\frac{\rho_0 c}{4} (ka)^2\right)^2 + (0.6 \rho_0 c k a + \rho_0 c S^2 \tan kL)^2}} \quad (34)$$

Por la importancia que tiene la longitud del ducto en la amplitud de respuesta del sistema, se hizo la comparación para ductos de longitud menor y mayor a 1.148 m ($\lambda/2$), para determinar la longitud más adecuada.

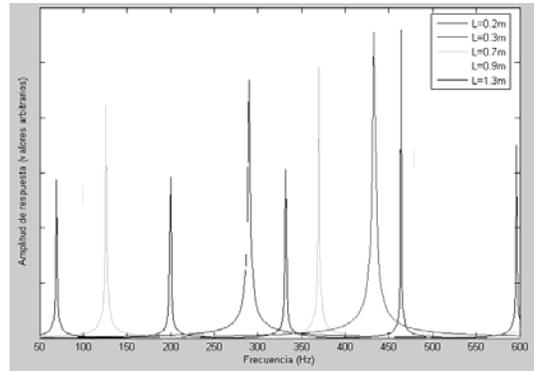


Figura 5. Respuesta del sistema con diferentes longitudes.

Debido a que la amplitud de respuesta para los tubos de 20 y 30cm de longitud presenta menor número de picos que para las longitudes 70, 90 y 130cm, para el rango de frecuencias estudiadas, se escogieron estos primeros valores para compararlos con la respuesta del ducto a la inserción del resonador.

La expresión para la admitancia a la entrada del sistema al ser insertado el resonador en el ducto es

$$|Y_e| = \frac{1}{|Z_e|} = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{(Re_d)^2 + (Im_d)^2}{(Re_n)^2 + (Im_n)^2}} \quad (35)$$

Se hizo la comparación de las gráficas para longitudes de ducto de 20 cm., 30 cm. y 60 cm. y escogió la longitud de 30 cm.

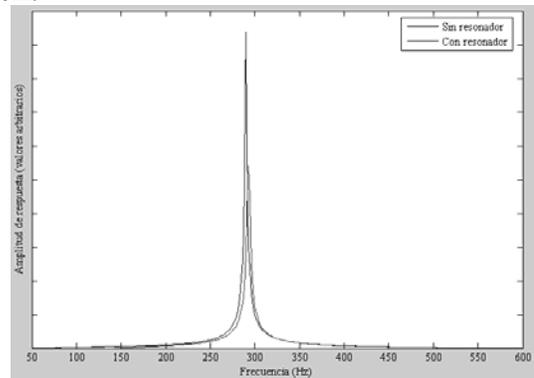


Figura 6. Ducto de longitud 30cm con y sin resonador.

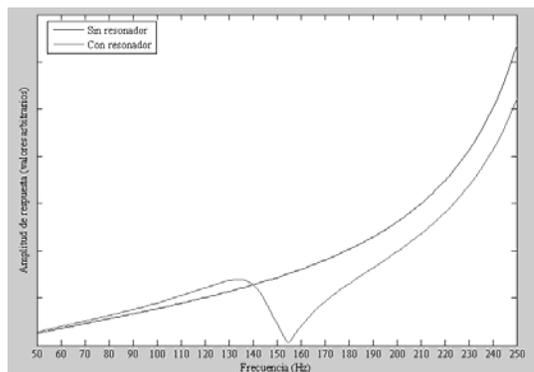


Figura 7. Ducto de longitud 30cm con y sin resonador, rango de frecuencia de 50 a 250Hz.

En las gráficas 6 y 7 se puede ver que la inserción del resonador reduce prácticamente a cero la amplitud de respuesta del ducto sin resonador, en su frecuencia de diseño (150Hz), y disminuye también la amplitud de respuesta notablemente al menos en los primeros picos o modos resonantes dentro del rango de interés. Además se puede observar, que al insertar el resonador aparece un pequeño pico cercano a la frecuencia de 135Hz, lo cual se debe a un comportamiento intrínseco del modelo. Idealmente se espera que la reducción en la amplitud de respuesta sea cero en la frecuencia de diseño del resonador, sin embargo, debido a la manipulación de los parámetros y de las ecuaciones se incurre en un margen de error que hace que esta reducción no sea máxima en exactamente la frecuencia de 150Hz. Debido a que la resonancia afecta la vecindad del punto donde se produce, se puede apreciar que hay una disminución significativa en la amplitud de respuesta del sistema en unos pocos hertz a lado y lado de este punto. Este fenómeno se conoce como resonancia práctica. Debe notarse, que sin importar la longitud del ducto ni la amplitud de respuesta del ducto a cualquier frecuencia, el resonador siempre actúa en su frecuencia de diseño.

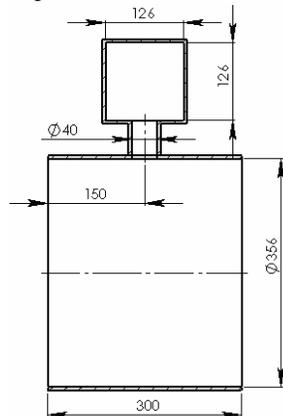


Figura 8. Resonador de Helmholtz instalado en el ducto, dimensiones en milímetros.

Por lo expresado previamente, se elige una longitud de ducto de 30cm (ver figura 8), debido a que con esta longitud se puede apreciar, que el resonador está actuando efectivamente a la frecuencia para la cual fue diseñado, además reduce notablemente la amplitud de respuesta del modo resonante que aparece en el rango de frecuencias de interés. Por lo tanto, se puede concluir que el resonador de Helmholtz si actúa en su frecuencia de diseño y que el hecho de que disminuya o no el nivel del ruido en esta frecuencia, depende exclusivamente del análisis que se obtenga del estudio de espectro de potencia sonora del ruido emitido por el ventilador.

5 CONCLUSIONES

Se desarrollaron expresiones matemáticas que caracterizan el comportamiento del nivel de ruido al insertar un resonador de Helmholtz a un sistema de

ventilación mecánico. Se evaluó, con parámetros reales, los efectos de insertar un resonador de Helmholtz a un sistema de ventilación mecánico empleando las expresiones desarrolladas. Se desarrolló un protocolo de diseño en el cual se establece paso a paso la elección y el cálculo de los parámetros relevantes del resonador de Helmholtz y del ducto en el cual este va instalado, el cual puede ser consultado en el documento original. La impedancia acústica de radiación Z_L no debe ser desestimada de los cálculos debido a que repercute en información incompleta de la amplitud de respuesta. El análisis del comportamiento de los niveles del ruido del resonador, queda incompleto si no se tiene un estudio del espectro de potencia del ventilador. La realización de investigaciones teóricas de este tipo deja inquietudes que no pueden ser resueltas con suposiciones, sino con los resultados de pruebas realizadas a la implementación práctica de estas investigaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] CERTAIN TEED. Noise control in buildings: guidelines for acoustical problem-solving. Disponible en Internet en el sitio: www.certainteed.com
- [2] GONZÁLEZ BETANCOURT, Héctor Alvaro. Control de ruido en sistemas de ventilación mecánica. Disponible en Internet en el sitio: www.utp.edu.co/~hagonza/
- [3] GREENHECK CORPORATION. The basics of fan sound. Disponible en Internet en el sitio: www.greenheck.com/technical/files/engineering/03fall_eng.pdf
- [4] GUIGUET, Andrés y WELTI, Reinaldo. Supresión de modos de vibración acústicos con un resonador Helmholtz. Disponible en Internet en el sitio: www.sbfisica.org.br/rbef/Vol25/Num3/v25_287.pdf
- [5] HARRIS, Cyril M. Manual de medidas acústicas y control del ruido. España: McGraw-Hill, 1995.
- [6] KINSLER, Lawrence y FREY, Austin. Fundamentos de acústica. Mexico: Limusa, 1988.
- [7] RUSSELL, Daniel A. Acoustic High-Pass, Low-Pass, and Band-Stop Filters. Disponible en Internet en el sitio: www.kettering.edu/~drussell/GMI-Acoustics/Filters-frame.html.
- [8] SIEMENS. Ventiladores industriales axiales. Disponible en Internet en el sitio: www.siemens.com.co.