

DISEÑO ACUSTICO DE LOS DUCTOS VERTICALES DE EXTRACCION DE HUMOS DEL “CENTRO DE ENTRETENIMIENTO LARCO MAR” EN LIMA, PERU

PACS: 43.50.Gf

Moreno Ruiz, Jorge Néstor¹; Jiménez Dianderas, Carlos Rolando²; Piaggio Henderson, Miguel³
Laboratorio de Acústica, Sección Física, Departamento de Ciencias, Pontificia Universidad Católica del Perú

Avenida Universitaria Cuadra 18 s/n, San Miguel, Lima 32, Perú

Teléfono: (51)(1)4602870 Anexo 239, Fax: (51)(1)4618253

E-mail: jmoreno@pucp.edu.pe¹, cjimene@pucp.edu.pe², mpiaggio@pucp.edu.pe³

ABSTRACT

In order to expel the fumes and hot air from the ventilation systems of the commercial spaces, cinemas and underground parking lots of the “*Centro de Entretenimiento Larco Mar*” (“*Larco Mar* Entertainment Center”) three fumes-extraction vertical ducts were projected. These vertical ducts (chimneys) are located in the Salazar Park level, over the underground parking lots. It was required the sound pressure level emitted through the chimneys not to exceed the 50 dB (maximum level allowed by the Municipal Regulations). There were designed the acoustical isolation of the chimneys walls and the silencers inside them using model scales.

RESUMEN

Con la finalidad de evacuar los humos y aire de los sistemas de ventilación de los diversos locales comerciales, salas de cine y parqueo vehicular subterráneo del “Centro de Entretenimiento Larco Mar” se proyectaron tres ductos verticales de extracción de humos. Estos ductos verticales (chimeneas) están localizados en el “Parque Salazar”, el mismo que se encuentra ubicado sobre el nivel superior de los parqueos subterráneos del centro. Se requirió que el nivel de ruido hacia el exterior de la chimenea no exceda los 50 decibelios (límite máximo permitido por la legislación municipal). Se diseñó el aislamiento acústico en las paredes de las chimeneas y los silenciadores al interior de las mismas haciendo uso de modelos a escala.

DATOS PRELIMINARES

Los tres ductos verticales de extracción de humos (chimeneas) tienen iguales características y dimensiones y están distribuidas sobre el eje longitudinal del complejo “Larco Mar”. Su planta es de forma ojival, aproximadamente $(3.50 \times 6.35) \text{m}^2$ y tienen una sección longitudinal trapezoidal con una altura máxima de 22m (Figura 1). Las chimeneas tienen una estructura interior metálica que mantiene la misma forma en planta pero con menores radios, en realidad es una chimenea interior hecha con una plancha metálica lisa de $e=6\text{mm}$ que tiene en su cara exterior una estructura tridimensional que le sirve de soporte y además permite la fijación de vidrios laminados que son la cobertura exterior final de la chimenea (Figura 2). Cada una de ellas extrae aire recirculado por los respectivos sistemas de aire acondicionado de los locales comerciales, de los tres niveles de parqueo vehicular subterráneo, el aire caliente de las cocinas de los restaurantes y de los grupos electrógenos del complejo, para lo cual tienen interiormente en la base (a nivel del parque) un potente extractor que genera una potencia sonora (L_{WA}) de 96dB. En la extremo superior de la chimenea (boca de expulsión) se dispone una simple rejilla metálica.

Debido a la ubicación de las chimeneas, en y sobre el nivel de área pública del "Parque Salazar", era requerido un adecuado tratamiento acústico hacia el exterior de las mismas, tanto a través de las paredes como de la boca de expulsión. Para el primero caso se diseñó un aislamiento compuesto adicional y para el segundo factor se propusieron silenciadores de características peculiares que serán especificadas posteriormente. Como en el resto de intervenciones acústicas en el complejo "Larco Mar" se tuvieron una serie de limitaciones para la propuesta acústica; en el caso de las chimeneas, éstas fueron aún más críticas. La complejidad para obtener la propuesta acústica debió atender una serie de limitaciones, que restringían radicalmente las alternativas de solución disponibles, entre las que se tuvieron:

- De tipo estructural: Los elementos a utilizar, especialmente los silenciadores, deberían ser lo más ligeros posibles para no incrementar la carga muerta de la estructura metálica de la chimenea y no sobrepasar la sobrecarga proyectada y habilitada de la losa estructural que la soporta.
- De tipo dimensional: Debido a las dimensiones del equipo extractor y del área abierta en la chimenea requerida por aquél para evitar caídas de presión, la propuesta acústica de barrera aislante y de silenciadores deberían tener las secciones mínimas posibles (no mayores a 15cm en las paredes de la chimenea y 10cm en los silenciadores) pues entre la plancha metálica lisa interior y los vidrios exteriores se disponía apenas de 0.60m.
- De tipo electromecánico: Los silenciadores deberían estar constituidos por elementos que ofrezcan la menor resistencia posible al flujo de aire expulsado por el extractor.
- De tipo funcional: Los silenciadores estarían expuestos a partículas residuales de hollín y grasas, por lo que debería considerarse su fácil mantenimiento y limpieza. Además, debía observarse que parte del aire expulsado tendría una temperatura cercana a los 100°C.
- De tipo ambiental: Por la ubicación del Complejo "Larco Mar", enfrentando al mar, se tenía que considerar las inclemencias ambientales pues incidirían en los materiales que pudieran constituir los tabiques de las paredes y los silenciadores. Las características ambientales estaban dadas por temperaturas entre 12°C y 32°C, humedad relativa hasta de 96% y alta gradiente de salinidad.

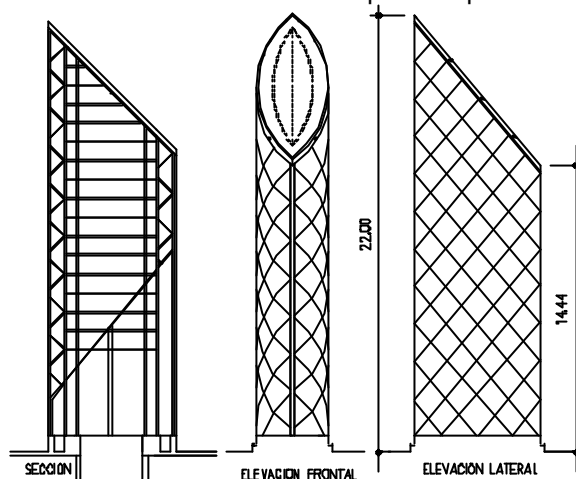


Fig. 1. Ductos verticales de extracción de humos

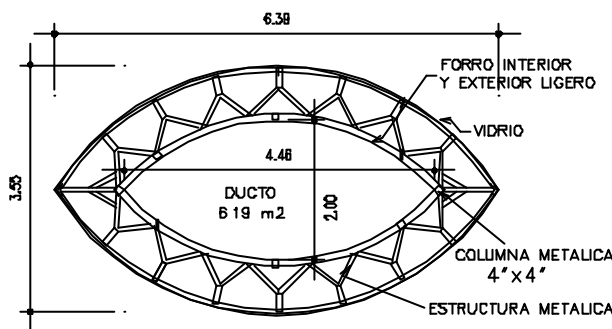


Fig. 2. Sección transversal de ducto vertical de extracción de humos

Control de ruido a través de las paredes de la chimenea

Por la ubicación de las chimeneas, los peatones del parque pueden llegar a estar tan sólo a 2m de distancia de cualquiera de éstas; si es considerado que ellos no deberían percibir el ruido interior de la chimenea a niveles superiores a los 50 dB de acuerdo a la Reglamentación Municipal correspondiente, se obtuvo que las paredes de las chimeneas deberían proveer un aislamiento sonoro (R) mínimo de 56dB. Con este objetivo de diseño y las limitaciones arriba mencionadas, se propuso un tabique compuesto adicional a las paredes interior (estructura metálica) y exterior (vidrio laminado) de las chimeneas (Figura 3). El tabique está compuesto por cuatro planchas aglomeradas de yeso (tablaroca o "drywall") de $e=5/8$ " cada una dispuestas en pares a ambos lados de *screw studs* de $e=3-5/8$ "; en la cavidad resultante se dispone una manta de lana de vidrio de $e=3$ " dejando una delgada cámara de aire de 16mm.

Este tabique tiene un espesor total de 156mm y proporciona un aislamiento acústico (R) teórico de 54dB, sin embargo, este nivel se ve incrementado considerablemente al ser considerada la contribución dada por la plancha adicional de lana de vidrio para alta temperatura de e=1", la plancha metálica lisa de 6mm (chimenea interior), la cavidad de aire de aproximadamente 10cm y el cristal laminado exterior de e=12mm. La ubicación del tabique compuesto adicional fue propuesta sólo para la base de la chimenea por encima del nivel de peatones (h=4.00m).

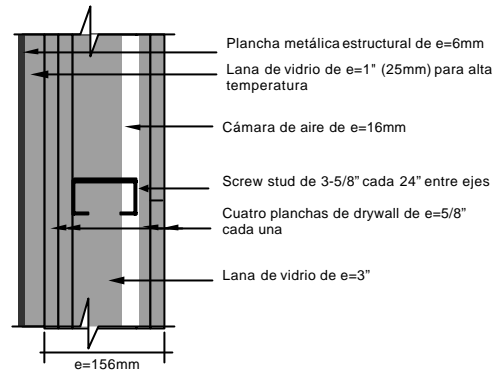


Fig. 3. Sección típica de tabique compuesto adicional en paredes de chimeneas

Control de ruido a través del ducto de expulsión de la chimenea

Se presentaron tres factores condicionantes del ruido emitido a través de la boca superior del cada chimenea: los niveles sonoros generados por el extractor encerrado, contenido sonoro del flujo expelido y el producido por éste al ser expulsado, y, efecto sobre el espectro sonoro de la fuente por acción de las características formales de la chimenea. Lamentablemente para los dos primeros factores no fue posible obtener una atenuación sonora en la fuente pues los equipos se adquirieron previamente a la intervención acústica y por las limitaciones de espacio disponible para habilitar silenciadores de fábrica para los extractores. Con la finalidad de conocer el efecto acústico producido por la geometría de la chimenea se procedió a realizar una evaluación de ésta en un modelo a escala 1:10, detectándose modos a cuyas frecuencias se sintonizarían las unidades silenciadoras y que además eran las adecuadas para atenuar del espectro de potencia acústica del extractor.

El principal elemento que atenúa los niveles sonoros de la chimenea son las unidades silenciadoras que se disponen en su interior. Estas unidades o módulos silenciadores cumplen con todas las limitaciones arriba expuestas y fueron diseñadas luego de un exhaustivo estudio de sus prototipos, inicialmente en modelos a escala 1:10 y luego a escala 1:1, como se explicará posteriormente. El principio acústico de cada módulo silenciador es el uso de resonadores tipo rendija, los mismos que pueden ser sintonizados a una frecuencia determinada. La Figura 4 muestra la configuración típica de cada módulo silenciador. Como se aprecia, consiste en un recipiente metálico rectangular en la que se disponen perfiles metálicos tipo "U" invertidos espaciados entre si, de manera que se forman cuellos que constituyen las rendijas del resonador. Cubriendo cada módulo se tiene una delgada plancha metálica lisa que se comporta como una placa elástica. Esta membrana de cobertura protege de grasa o partículas a las rendijas resonadoras y al ser la única cara expuesta del silenciador al flujo de aire, origina una muy baja caída de presión al haber mínima resistencia.

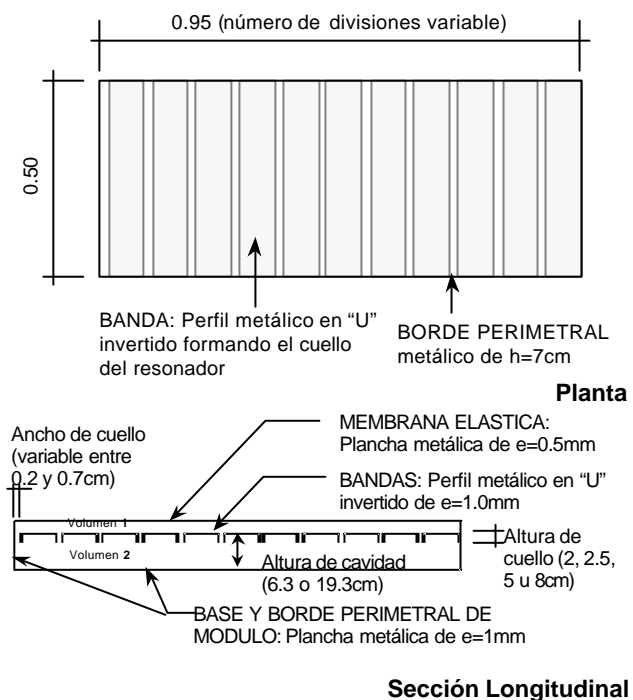


Fig. 4. Configuración esquemática típica de unidades silenciadoras de chimeneas

Se diseñaron nueve tipos de silenciadores, sintonizados entre 67Hz y 368Hz. Ciento veinte módulos (24 unidades de 5 diferentes tipos de silenciador de 7cm de espesor) fueron ubicados a una altura intermedia de las paredes laterales de la chimenea, manteniendo la forma ojival (en planta) de la misma. Adicionalmente, 30 módulos (7 u 8 unidades de 4 diferentes tipos de silenciador de 20cm de

espesor) fueron ubicados a la misma altura que los módulos de las paredes, pero transversalmente en el centro del ducto de la chimenea (en planta).

DISEÑO DE UNIDADES SILENCIADORAS

Las condiciones ambientales y de operación fueron un factor determinante en la selección del tipo de silenciador que debería ser empleado en las chimeneas. En [1] fue comprobado que resonadores de Helmholtz recubiertos con una delgada membrana eran capaces de atenuar significativamente el nivel de presión sonora emitido por una chimenea en una fábrica de papel y que además eran capaces de soportar las condiciones dentro de la misma. Para el caso de la chimenea de este proyecto se buscó además de una buena eficiencia acústica, minimizar el tiempo de fabricación, costos y facilidad de mantenimiento.

Se estudió en modelos a escala 1:10, resonadores de Helmholtz similares a los propuestos en [1], pero se observó que su fabricación a escala real era algo compleja. Se decidió entonces, utilizando el mismo criterio, emplear resonadores de rendija, los cuales son bastantes simples de fabricar si se considera que sólo es un trabajo de doblado de las planchas de aluminio de las que están construidas. Los resonadores se calcularon según [2] y se ensayaron en modelos a escala 1:10 y escala real. La Figura 5 muestra el resultado de mediciones con un *probe microphone* dentro de la cavidad del resonador prototipo a escala 1:10 cuando el sonido incide perpendicularmente al plano que contiene las rendijas, aún sin haber colocado la membrana.

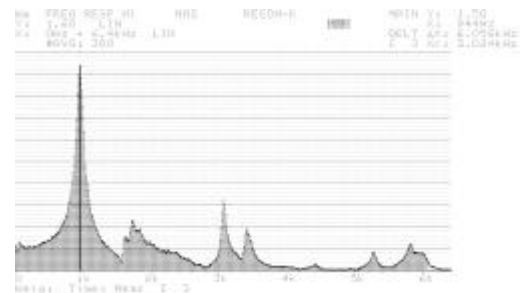


Fig. 5. Función de transferencia típica de un prototipo de unidad resonadora a escala 1:10

Se observa claramente un primer pico de presión correspondiente al resonador y otros picos secundarios correspondientes a modos de la cavidad.

El efecto de la posición de los resonadores respecto al frente de ondas también fue analizado. Se observó que en todos los casos, su efectividad disminuía y se daba un corrimiento de frecuencia cuando el frente de ondas incidía tangencialmente al plano que contenía a las rendijas. La Figura 6 muestra la comparación entre incidencia normal y tangencial. Cuando se coloca una membrana a una cierta distancia del plano que contiene a las rendijas como se muestra en la Figura 4, se crea un resonador secundario (placa-volumen 1) que interacciona con el resonador de rendija (resonadores acoplados). La membrana vibra con el flujo normal o tangencial manteniendo activo al resonador. Al efectuar mediciones, se observó un corrimiento del modo del resonador hacia las bajas frecuencias y la aparición de un segundo pico a la izquierda del anterior con un valle entre ambos (Figura 7). Los resultados concuerdan con una representación del resonador compuesto de la Figura 4 por un circuito eléctrico equivalente del tipo impedancia que describe su comportamiento cuando se considera el volumen 2 limitado por placas rígidas (Figura 8).

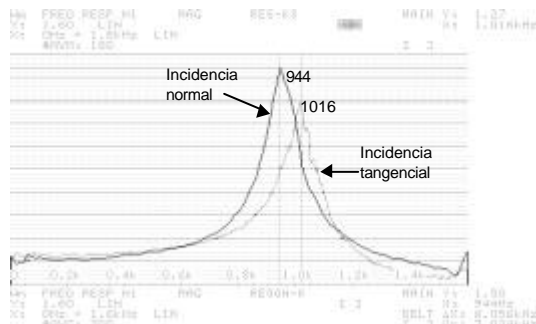


Fig. 6. Comparación de la incidencia del frente de ondas sobre un prototipo de resonador a escala 1:10



Fig. 7. Comportamiento de un prototipo de resonador de rendija a escala 1:10 con y sin membrana elástica superior

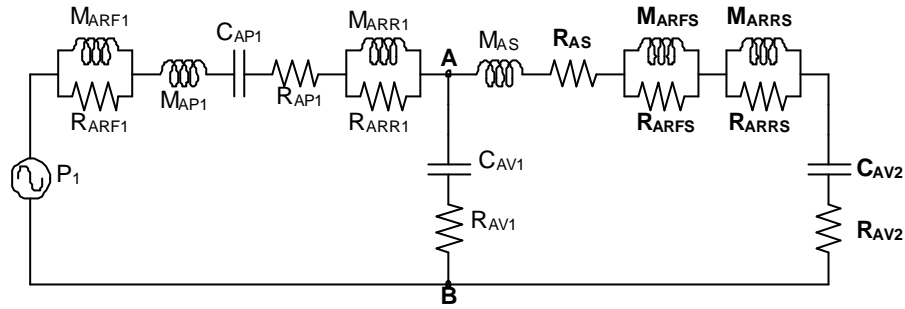


Fig. 8. Circuito eléctrico equivalente de tipo impedancia de un resonador de rendija con membrana elástica superior

donde:

- P_1 = Presión incidente en la membrana elástica
- M_{ARF1} = Masa de radiación frontal correspondiente a la membrana elástica
- R_{ARF1} = Resistencia de radiación frontal correspondiente a la membrana elástica
- M_{AP1} = Masa acústica equivalente de la membrana elástica
- C_{AP1} = Compliancia acústica equivalente de la membrana elástica
- R_{AP1} = Resistencia acústica equivalente de la membrana elástica
- M_{ARR1} = Masa de radiación posterior correspondiente a la membrana elástica
- R_{ARR1} = Resistencia de radiación posterior correspondiente a la membrana elástica
- C_{AV1} = Compliancia acústica debida al volumen 1
- R_{AV1} = Resistencia acústica debida al volumen 1
- M_{AS} = Masa acústica correspondiente a las rendijas
- R_{AS} = Resistencia acústica correspondiente a las rendijas
- M_{ARFS} = Masa acústica de radiación frontal correspondiente a las rendijas
- R_{ARFS} = Resistencia acústica de radiación frontal correspondiente a las rendijas
- M_{ARRS} = Masa acústica de radiación posterior correspondiente a las rendijas
- R_{ARRS} = Resistencia acústica de radiación posterior correspondiente a las rendijas
- C_{AV2} = Compliancia acústica debida al volumen 2
- R_{AV2} = Resistencia acústica debida al volumen 2

La Figura 9 muestra comparativamente las frecuencias de resonancia cuando se calcula la presión sonora entre los puntos denominados A-B del circuito eléctrico equivalente mostrado y el valor medido en la cavidad superior (volumen 1 en Fig. 4) de un prototipo de unidad silenciadora a escala 1:10. Para ambos casos, se nota la presencia de los dos picos de resonancia y un valle intermedio.

Análisis de la Chimenea en un modelo a escala 1:10

Para verificar la efectividad de las unidades silenciadoras se llevaron a cabo una serie de mediciones. Se midió la función de transferencia de la chimenea sin unidades silenciadoras determinándose la presencia de picos a 515, 730, 1400, 1730, 2900, 3250 y 3650 Hz, los que agrupan modos debidos a la geometría misma de la chimenea, tal como se muestra en la Figura 10.

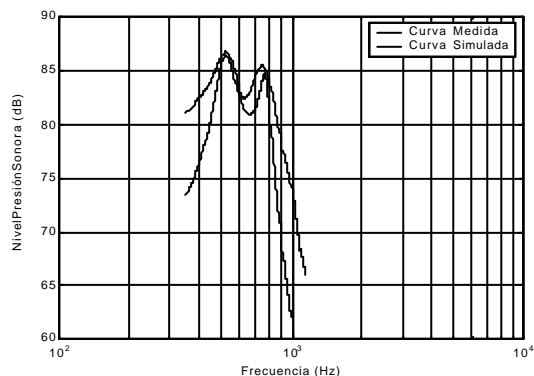


Fig. 9. Comparación de frecuencias de resonancia calculadas y medidas

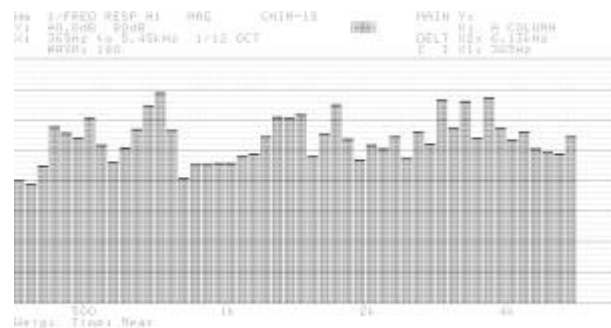


Fig. 10. Función de transferencia del modelo a escala 1:10 de la chimenea sin silenciadores (por 1/12 de octava)

RESULTADOS

La Figura 11 muestra la comparación de funciones de transferencia por tercio de octava de la chimenea sin y con las unidades silenciadoras. Se puede apreciar claramente el efecto de los resonadores en una banda de 1000Hz hasta 6300Hz (100Hz a 6300Hz en escala real 1:1), precisamente la banda donde se encontraron modos acentuados y donde el espectro de potencia sonora de los extractores tenían una mayor contribución. De manera similar, con varios prototipos de unidades silenciadoras a escala real se construyó un ducto y se procedió a realizar las funciones de transferencias, obteniéndose el resultado de la Figura 12. A pesar que ambos gráficos se presentan para distintos anchos de banda, se puede apreciar la similitud entre ellos. Cabe mencionar que en el caso de la Figura 12 el valle sería mucho más pronunciado si la medición hubiera sido hecha con el número total de unidades silenciadoras.

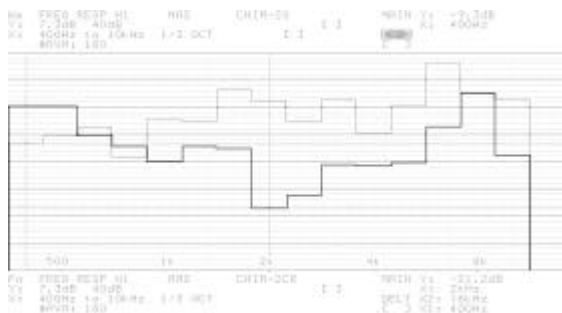


Fig. 11. Comparación de funciones de transferencia del modelo a escala 1:10 de la chimenea sin y con unidades silenciadoras (por 1/3 de octava)

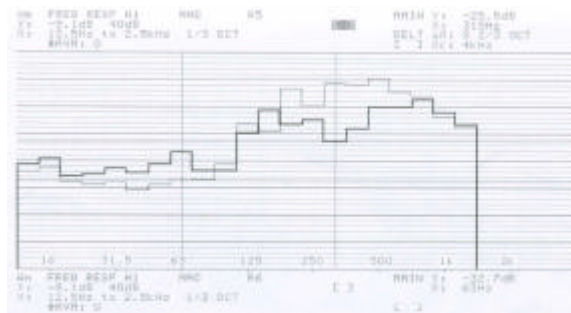


Fig. 12. Comparación de funciones de transferencia del modelo a escala real 1:1 de un ducto hecho con unidades silenciadoras (por 1/3 de octava)

Con la finalidad de verificar la efectividad de la chimenea ya construida, incluidas las unidades silenciadoras, se midió entre la 1 y 2 de la madrugada el nivel de ruido de fondo a nivel de parque (base de la chimenea), así como a diferentes alturas (hasta $h=35m$) desde un edificio que enfrenta al una de las chimeneas, encontrándose en todos los casos que el ruido generado por el oleaje del mar y el poco tráfico vehicular a esa hora era mayor que el ruido emitido por la chimenea. Subjetivamente, no es posible percibir el ruido de los extractores.

CONCLUSIONES

- Silenciadores basados en resonadores de rendija son una alternativa eficiente en el control de ruido de ductos que conducen flujos de aire.
- El comportamiento de los silenciadores es posible de estudiar empleando modelos a escala.
- Utilizando un circuito eléctrico equivalente más completo al empleado en este trabajo, es posible diseñar un resonador de rendija doblemente acoplado a volúmenes limitados por membranas flexibles y optimizar el ancho de banda final.

AGRADECIMIENTOS

A los Sres. Mario Jananpa y José Ruiz por su colaboración en la construcción de los modelos a escala. A Gianfranco Zuazo por su apoyo en la toma y procesamiento de datos.

REFERENCIAS

- [1] Ackermann, U.; Fuchs, H.V. "Noise Reduction in an Exhaust Stack of a Papermill". *Noise Control Engineering Journal*, Volumen 33, Número 2, pp. 57-60 (1989).
- [2] Maekawa, Z.Y; Lord, P. *Environmental and Architectural Acoustics*. E&FN Spon (1993).
- [3] Beranek, L.L. *Acoustic*. Acoustical Society of America, New York (1986).