

Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias de la Ingeniería Escuela de Ingeniería Acústica

> Profesor Patrocinante: José Luis Barros R. Instituto de Acústica Universidad Austral de Chile

> Profesores Informantes: Jorge Sommerhoff H. Alfio Yori F. Instituto de Acústica Universidad Austral de Chile

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PATRÓN DIRECCIONAL DE UNA CAJA ACÚSTICA MODIFICANDO LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DE SUS SUPERFICIES

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Licenciado en Acústica y al Título Profesional de Ingeniero Acústico.

HECTOR ALEJANDRO SANTANA GALLARDO VALDIVIA – CHILE 2005

AGRADECIMIENTOS

Llegado el momento final en mi etapa como estudiante universitario, cumpliendo mi objetivo propuesto hace varios años y rumbo a lo que se viene en el futuro, no puedo dejar de agradecer a todos los que de una u otra forma me ayudaron a salir a delante.

Quisiera empezar por mis padres que sin su ayuda y comprensión no podría ser el que soy ahora. Siempre voy a valorar el esfuerzo que hicieron para darme la educación que tengo. Gracias por todo.

A ti Karla, que has sabido soportar el tiempo y la distancia todos estos años, incrementando este amor. Pilar fundamental en los momentos más difíciles y complicados en mi etapa de estudiante, que con tus consejos y sobre todo tu apoyo, pude mantenerme en pie. Gracias por estar conmigo siempre.

A mis hermanos Juan Carlos y Jorge, que con su preocupación, empuje y sobre todo su amistad, pude sacar adelante este informe. Gracias por el ánimo que me dan.

A mis amigos y compañeros de universidad, que con sus conocimientos, apoyo y preocupación he aprendido a valorar la amistad hasta los últimos días de mi vida y aceptarlos como parte de mi familia. Son muchos para nombrarlos, pero cada uno sabe a quien me refiero. Gracias amigos y sabros.

A mi profesor patrocinante José Luis Barros, que más que mi profesor lo considero un amigo desde la primera clase que tuve con él. Su experiencia y conocimientos serán fundamentales en mi desempeño como ingeniero. Gracias por las enseñanzas.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a la persona que trabajó conmigo en la construcción y modelación de los artefactos y utensilios que se ocuparon en este trabajo, a Víctor Cumián, que con una disposición extraordinaria estaba siempre apoyándome y ayudándome. Gracias por tu ayuda.

1 Resumen

En el presente trabajo se estudia experimentalmente el comportamiento de los patrones direccionales de una fuente sonora situada en un bafle, al modificar la impedancia acústica de las superficies exteriores de éste.

Se diseñan distintos tipos de muestras de resonadores (placas perforadas), para obtener una frecuencia de resonancia baja. Posteriormente se construyen las muestras de resonadores y se mide la correspondiente impedancia acústica en el tubo de onda plana, de esta manera se puede verificar experimentalmente la frecuencia de resonancia. Utilizando los resonadores para obtener distintos valores de impedancia acústica se construye una caja acústica o bafle de dimensiones $30 \times 30 \times 40$ cm, dimensiones similares a algunas cajas acústicas existentes en el mercado.

Se realizan mediciones de direccionalidad para distintos valores de impedancia de las superficies exteriores del bafle, confirmándose la variación en la directividad. Sin embargo se comprueba también que el cambio en la directividad es relativamente bajo, si las dimensiones de la caja son menores o similares a la correspondiente longitud de onda.

ABSTRACT

Presently work is studied experimentally the behaviour of the directional patterns of a sound source located in a speaker, upon modifying the acoustic impedance of the external surfaces of this.

Different types of samples of resonators (perforated badges) are designed, in order to obtain a low frequency of resonance. Later on the samples of resonators are built and are measured the corresponding acoustic impedance in the tube of plane wave, this way could be verified the frequency of resonance experimentally. Using the resonators in order to obtain different values of acoustic impedance it are built an acoustic box or speaker of dimensions $30 \times 30 \times 40$ cm, where these dimension is similar to some acoustic existent boxes in the market.

It is carried out measurements of directional patterns for different values of impedance of the external surfaces of the speaker, confirming the variation in the directional characteristic. However it also is proven that the change in the directionality is relatively low, if the dimensions of the box are minor or similar to the corresponding longitude of wave.

2 CONTENIDO

	A	GRAI	DECIMIENTOS	3
1	R	ESUN	1EN	4
	A	BSTR	ACT	5
2	C	ONTI	ENIDO	6
3	0	BJET	IVOS	7
4	I	NTRO	DUCCION	8
5	A	NTEO	CEDENTES BIBLIOGRAFICOS	9
	5.1	Diri	ECTIVIDAD DE UN ALTAVOZ EN UNA CAJA ACÚSTICA CON IMPEDANCIA ACÚSTIC.	A
		FINI	ГА	9
	5.2	RES	ONADORES DE HELMHOLTZ	. 14
6	R	ESUL	TADOS	. 17
	6.1	Овт	ENCIÓN DE LA COMBINACIÓN DE VARIABLES	17
	6.2	MEE	DICIONES EN EL TUBO DE ONDA PLANA	. 19
		6.2.1	Materiales y montaje	20
		6.2.2	Resultados gráficos de las muestras	22
	6.3	MEE	DICIONES DE FUENTE SONORA REAL	. 28
		6.3.1	Materiales y montaje	28
		6.3.2	Patrones direccionales	. 32
7	C	CONCI	LUSIONES	. 40
8	R	EFER	RENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	. 41

3 OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar experimentalmente la directividad de un altavoz montado en un bafle, cuyas superficies externas poseen una impedancia acústica finita.

Objetivos Específicos

- Determinar, teóricamente, las dimensiones adecuadas del resonador tal que la frecuencia de resonancia de éste sea suficientemente baja.
- Construir diferentes muestras de resonadores, medir la impedancia acústica de éstas, para posteriormente escoger el diseño a utilizar en el bafle.
- Diseñar y construir el bafle para el montaje experimental.
- Estudiar la modificación del patrón direccional de una fuente sonora al cambiar la impedancia acústica del bafle.

4 INTRODUCCION

Se ha comprobado teórica y experimentalmente que la característica o patrón direccional de una fuente sonora situada en una caja acústica puede variar al cambiar la configuración o el valor de la impedancia del bafle que rodea a dicha fuente^[1]. En el trabajo realizado anteriormente se utilizó una caja con resonadores de $\lambda/4$ y de dimensiones mucho mayores al altavoz.

El objetivo principal del presente trabajo es comprobar experimentalmente si es posible utilizar otro tipo de resonadores y dimensiones de la caja más pequeñas (similares a las de una caja comercial) para controlar o modificar la directividad del altavoz.

5 ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

5.1 Directividad de un altavoz en una caja acústica con impedancia acústica finita

Este trabajo se basa principalmente en uno elaborado en la Universidad Austral de Chile por el ingeniero acústico Pablo Henríquez donde se estudió el comportamiento direccional de una fuente de ruido o fuente sonora a través de una técnica de simulación denominada Método de Síntesis por Multipolos^[1]. El fundamento de esta técnica es reemplazar el cuerpo que radia la energía por un sistema de varias fuentes simples ubicadas al interior del radiador. Mediante la técnica anterior se analizó el comportamiento direccional de una fuente acústica ubicada en una superficie con distintos valores de impedancia. Se consideró una caja acústica de dimensiones $\{7x67x30 \text{ cm}, \text{ para la modelación matemática se}$ consideró la caja de dimensiones $\{7x67x30 \text{ cm}, \text{ para la modelación matemática se}$ pistón circular de radio $\{710.$

Se analizó el comportamiento para varias longitudes de onda, considerando cinco tipos de impedancia en la superficie. Una de éstas es el caso rígido donde la impedancia teóricamente es de $Z_s = \infty$, pero en la simulación fue caracterizada por un valor muy alto (aproximadamente $100\rho_0c$). El resultado obtenido para $Z_s = \infty$ se comparó con otras cuatro situaciones: $Z_s = 0$, $Z_s = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$ y $Z_s = \rho_0 c$ sobre la cara frontal, además de $Z_s = 0$ en todas las caras alrededor de la fuente. Analizando estos diferentes tipos de casos es donde se encuentra que el patrón direccional varía al cambiar la impedancia de las superficies externas de la fuente. Por ejemplo, la Figura 5-1 muestra los resultados teóricos obtenidos para $\lambda = 4R_s$.



Figura 5-1



Se compara la situación rígida con cuatro diferentes variaciones: (a) $Z_s = 0$ en la cara frontal y $Z_s = \infty$ en las otras caras; (b) $Z_s = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$ en la cara frontal, $Z_s = \infty$ en las otras caras; (c) $Z_s = \rho_0 c$ en la cara frontal, $Z_s = \infty$ en las otras caras; (d) $Z_s = 0$ alrededor de toda la caja en el plano central.

En los casos donde λ es mayor que la longitud máxima de la caja ℓ , se observó una similitud entre los patrones direccionales comparando el caso rígido y los casos donde la impedancia variaba en la cara frontal. Al comparar el caso rígido con el caso de impedancia finita en todas las caras se aprecia una disminución de energía en la parte posterior del

patrón direccional (Figura 5-1 (d)). La Figura 5-2 contiene los resultados obtenidos para el caso en que $\lambda = \frac{1}{2}$ /4.







Diagramas polares simulados para una longitud de onda $\lambda = \frac{1}{2}$ /4. Se compara la situación rígida con cuatro diferentes variaciones: (a) $Z_s = 0$ en la cara frontal y $Z_s = \infty$ en las otras caras; (b) $Z_s = 100 \text{ N} \cdot \text{s/m}^3$ en la cara frontal, $Z_s = \infty$ en las otras caras; (c) $Z_s = \rho_0 c$ en la cara frontal, $Z_s = \infty$ en las otras caras; (d) $Z_s = 0$ alrededor de toda la caja en el plano central.

Al disminuir lambda, a partir de $\lambda = \ell_{u}$ la directividad de la fuente se hace altamente dependiente del valor de la impedancia y no tanto a la distribución de la impedancia en las superficies de la caja.

Para comprobar los resultados obtenidos en las simulaciones se construyó una caja acústica prototipo con las dimensiones simuladas y estudiadas para poder ver las similitudes y diferencias entre los resultados obtenidos. En esta caja acústica se analizó el caso rígido y el caso donde la cara frontal de la caja tenga una impedancia acústica cercana a la impedancia acústica característica $Z_s = \rho_0 c$. Para esto se utilizó una tela que recubría los resonadores en la parte delantera de la caja.

Para conocer las impedancias de estos resonadores, se midió en el tubo de onda plana. El análisis para el caso donde no había ningún recubrimiento de ninguna especie sobre los resonadores, arrojó tres frecuencias de resonancia entre los 250 Hz y 2000 Hz, donde la componente real de la impedancia en las resonancias era cercana a cero. Al colocar la tela sobre los resonadores, se aumentaba el valor de la impedancia y sucesivamente también fue medido en el tubo de onda plana.

Las frecuencias de resonancia obtenidas fueron $f_1 = 341 \text{ Hz}$, $f_2 = 1021 \text{ Hz}$ y $f_3 = 1706 \text{ Hz}$, donde se aprecia que son harmónicos de la forma $f_2 \approx 3f_1$ y $f_3 \approx 5f_1$. Una vez encontradas estas frecuencias de resonancia, se procedió a medir tres distintas situaciones en dichas frecuencias: caso rígido, que situará una cara lisa sobre la cara frontal de la caja; caso de impedancia igual cero, que no pondrá ningún tipo de revestimiento en el frontis de la caja; y el caso de la impedancia cercana a la impedancia acústica especifica $Z_s = \rho_0 c$, donde se colocará una tela delante de los resonadores.

En la frecuencia de resonancia $f_1 = 341 \text{ Hz}$ se apreció una asimetría bastante evidente entre los patrones direccionales comparados (caso rígido v/s caso $Z_s = 0$ y caso rígido v/s $Z_s = \rho_0 c$), sin embargo, el autor, señala diferencias entre los patrones pero de forma mínima.

En la frecuencia de resonancia $f_2 = 1021$ Hz comienza a asomar las consecuencias de una impedancia baja sobre la cara frontal. Mediante diagramas vectoriales y de distribución de nivel de presión, se pudieron apreciar la disminución del flujo de energía acústica tangencial a la superficie que rodea a la fuente sonora.

En la frecuencia de resonancia $f_3 = 1706$ Hz se confirma el efecto de la impedancia baja sobre la cara frontal.

Con estos resultados obtenidos se pudo comprobar la importancia de la impedancia acústica sobre una fuente sonora, aun cuando fueron analizadas algunas longitudes de onda. Siguiendo, a mayor longitud de onda con respecto a la longitud máxima de la caja, el comportamiento de ésta depende más de la distribución de la impedancia que de su valor. Mientras mayor es la zona con una baja impedancia, menos omnidireccional es la radiación de la fuente.

No ocurre lo mismo a menores longitudes de onda. Aquí prevalece la importancia del valor de la impedancia, siendo el valor óptimo para producir una distribución direccional de energía $Z_s = \rho_0 c$ y no el mínimo valor posible.

5.2 Resonadores de Helmholtz

El resonador de Helmholtz consiste en una cavidad de volumen V, que se une al exterior por un tubo de longitud b y radio r, al que se le llama cuello del resonador. A la cavidad se le llama compliancia acústica (C_A) y al tubo se le llama masa acústica (M_A) , y estos componentes acústicos crean el llamado resonador unitario de Helmholtz.



Figura 5-3

Bosquejo de un resonador unitario de Helmholtz.

Donde:

Donde b' es la longitud efectiva del tubo^[2], que es mayor que la longitud física debido a la carga de su masa de radiación. Al juntar muchos resonadores unitarios, se forma un sistema de resonadores llamado resonador acoplado de Helmholtz (Ver Figura 6-1).

La impedancia acústica del resonador acoplado (relación entre amplitud compleja de presión y amplitud compleja de velocidad de volumen $Z_A = \frac{P_U}{U}$) esta dada por:

$$Z_{A} = R + j\omega M_{A} - j\frac{1}{\omega C_{A}} \cdot \left[\frac{Ns}{m^{5}}\right]$$
(5-1)

La impedancia acústica específica del resonador acoplado (relación compleja entre la presión sonora eficaz y la velocidad eficaz de las partículas $Z_s = \frac{P}{u}$) esta dada por:

$$Z_{s} = r_{s} + j\omega m - j\rho_{0}c\cot(k_{0}a) \cdot \left[\frac{Ns}{m^{3}}\right]$$
(5-2)

Donde:

r _s	:	Parte real de la impedancia $\begin{bmatrix} Ns \\ m^3 \end{bmatrix}$.
$Z_0 = \rho_0 c$:	Impedancia acústica característica $\begin{bmatrix} Ns \\ m^3 \end{bmatrix}$.
$m = \rho_0 \frac{(b+1,6r)}{\sigma_B}$:	Masa específica del cuello, con la corrección de extremos correspondiente $\left[\frac{Ns^2}{m^3}\right]$.
b r	:	Largo del cuello $[m]$. Radio del agujero $[m]$.
a	:	Profundidad de la cavidad de aire $[m]$.
$\sigma_{B} = \frac{\pi \cdot r^{2}}{e^{2}}$:	Porosidad de la Placa.
e	:	Distancia entre los centros de los agujeros de las perforaciones de la placa $[m]$.
$k_0 = \frac{\omega}{c}$:	Número de onda $[m^{-1}]$

Por lo tanto, Z_s se puede escribir como:

$$Z_{s} = r_{s} + j \left(\omega \frac{\rho_{0} e^{2}}{\pi \cdot r^{2}} (b + 1.6r) - Z_{0} \cot(k_{0}a) \right). \left[\frac{Ns}{m^{3}} \right]$$
(5-3)

6 RESULTADOS

La etapa de resultados se dividirá en tres fases:

- Primero: Se tratará de encontrar una combinación de variables precisa para la construcción de un resonador acoplado (radio del agujero, distancia entre agujeros, largo del cuello y profundidad de la cavidad), con el fin de obtener una frecuencia de resonancia baja.
- Segundo: Una vez encontrada las combinaciones, se analizarán las muestras confeccionadas con los datos obtenidos en la primera fase mediante el uso del tubo de onda plana. Aquí se podrá ver la frecuencia de resonancia obtenida experimentalmente.
- Tercero: Se escogerá una de estas combinaciones de variables y se confeccionará una caja acústica que permita aplicar los resonadores escogidos a las superficies exteriores de esta y estudiar experimentalmente los efectos sobre la directividad.

6.1 Obtención de la combinación de variables

Los resonadores dependen de algunas variables para su construcción como son el radio del agujero, distancia entre agujeros, largo del cuello y profundidad de la cavidad tras el resonador. Con el fin de encontrar la combinación de variables adecuada para obtener una frecuencia de resonancia baja, es necesario simular lo que podría ocurrir experimentalmente. Para esto se utilizó el software Matlab con el cual, aplicando la ecuación (5-3), se podrá apreciar cual es el comportamiento de dicha relación con distintos valores a tomar. Luego de varios intentos, se encontraron varias combinaciones que podrían ser utilizadas para nuestro propósito. En esta etapa se mantuvo constante el largo del cuello para trabajar con un solo tipo de espesor de material y la profundidad de la cavidad por simplicidad de construcción.

Estudio experimental del patrón direccional de una caja acústica pequeña modificando la impedancia acústica de sus superficies



Figura 6-1

Parámetros considerados en el diseño y construcción de un resonador. a: Profundidad de la cavidad, b: Largo del cuello, e: Distancia entre agujeros y r: Radio del agujero.

A continuación se muestran las frecuencias de resonancia obtenidas correspondientes a las combinaciones de variables escogidas para trabajar.

Profundidad	Largo del	Distancia entre	Radio de los	Frecuencia de	
de la Cavidad	Cuello	Agujeros	Agujeros	Resonancia	
a(mt)	b(mt)	e(mt)	r(mt)	f(Hz)	
0.04	0.0055	0.01	0.001	560	
0.04	0.0055	0.012	0.001	470	
0.04	0.0055	0.01	0.0005	303	
0.04	0.0055	0.012	0.0005	253	

Tabla 1: frecuencias de resonancia obtenidas mediante el software Matlab.

Se puede ver que en la Tabla 1 las frecuencias de resonancia son bajas. Si bien estos resultados son bastante buenos para el objetivo principal, no hay que olvidar que son resultados teóricos que pueden diferir de las mediciones. Esto lleva al segundo paso en este capítulo.

6.2 Mediciones en el tubo de onda plana

Para comprobar lo realizado en la etapa de simulación, se procederá a diseñar y confeccionar muestras con las combinaciones descritas en la Tabla 1. Para esto se utilizarán planchas de trupan de 5.5 mm de espesor y perforadas con agujeros de 1 mm y 2 mm de diámetro. En la Figura 6-2 se observan las muestras a analizar.



Figura 6-2

Muestras utilizadas en el estudio práctico de las combinaciones de variables escogidas. Largo del cuello 0.0055 mt . (a) Muestra 1 distancia entre agujeros 0.01 mt y radio 0.001 mt . (b) Muestra 2 distancia entre agujeros 0.012 mt y radio 0.0005 mt . (d) Muestra 4 distancia entre agujeros 0.012 mt y radio 0.0005 mt .

Para poder analizar dichas muestras, se utilizará un tubo de onda plana^[3]. Este tubo consiste principalmente en un tubo rígido con un altavoz en un extremo y un material de prueba en el otro (en este caso las muestras de resonadores). Al generar una señal de ruido de banda ancha las ondas que se propagan en el interior del tubo serán del tipo "onda plana" en un

rango de frecuencias establecido por el diámetro del cilindro. La Figura 6-3 muestra un diagrama básico del tubo utilizado.



Figura 6-3

Modelo básico de tubo de onda plana

6.2.1 Materiales y montaje

Los materiales e instrumentos utilizados para llevar a cabo las mediciones en el tubo de onda plana se señalan a continuación:

- Tubo de Onda Plana.
- Muestras de Trupan a analizar.
- 2 Micrófonos de Condensador BEHRINGER / ECM8000.
- Preamplificador BEHRINGER / ULTRAGAIN MIC 2200.
- Amplificador de potencia TASCAM PA-20 MK II.
- Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte.
- Computador Personal PENTIUM III.
- Líneas para poder conectar los instrumentos.

Una vez calibrado el sistema, cada uno de los micrófonos de la Figura 6-3 toma una señal que es procesada digitalmente, obteniendo así variada información de las muestras como son el coeficiente de reflexión y la impedancia acústica, entre otros.



(a)

(b)







Tubo de onda plana: (a) Montaje para utilizar el tubo de onda plana. (b) Ubicación de la muestra en el tubo de onda plana. (c) Muestra aprisionada entre el tubo de onda plana y el pistón del mismo mediante pernos.

El objeto de metal que se observa al inferior de la Figura 6-4 (**b**) dentro del tubo, es el que dará la variable de profundidad en la experiencia, ya que es un pistón móvil.

6.2.2 Resultados gráficos de las muestras

Después de la etapa de familiarización con el sistema, se procede a realizar las mediciones sobre las muestras. A modo de comparación se hará una medición sobre una muestra sin perforaciones, o sea, un trozo de trupan de 5.5 mm de espesor.



Figura 6-5

Muestra sin perforaciones, no hay cruce de la parte imaginaria por el cero en frecuencias bajas.

Los valores obtenidos de impedancia acústica de las muestras arrojados por la medición en el tubo de onda plana se muestran en las gráficas siguientes:



Figura 6-6

Impedancia acústica obtenida con una profundidad a de 0.04 mt, largo de cuello b de 0.0055 mt y radio de agujeros r de 0.001 mt. (a) Muestra 1: Distancia entre agujeros e de 0.01 mt. (b) Muestra 2: Distancia entre agujeros e de 0.012 mt.



Figura 6-7

Impedancia acústica obtenida con una profundidad a de 0.04 mt, largo de cuello b de 0.0055 mt y radio de agujeros r de 0.0005 mt. (a) Muestra 3: Distancia entre agujeros e de 0.01 mt. (b) Muestra 4: Distancia entre agujeros e de 0.012 mt.

Se aprecia en la Figura 6-6 y 6-7 que en frecuencias bajas, la parte real de la impedancia tiende a elevarse. Al comparar con la Figura 6-5 (muestra sin orificios) se puede ver que en bajas frecuencias las curvas de impedancia son similares, es decir, los orificios son demasiado pequeños respecto a la longitud de onda y no tienen ninguna influencia en la impedancia. Para comparar el efecto de la variación de impedancia sobre la directividad de la fuente es importante considerar valores de impedancia cercanos a cero, por esto se trata de medir en la frecuencia de resonancia de los resonadores, donde la parte reactiva es por definición igual a cero. Si la parte real o resistiva de la impedancia es elevada, el valor absoluto de la impedancia será grande, aunque la parte reactiva sea igual a cero. Por esto último se ha descartado la muestra 4, cuya parte imaginaria de la impedancia (Figura 6-7 (b)) cruza el cero cuando la parte real ya se esta elevando, además el resultado de la medición de directividad en este rango de frecuencias sería poco confiable debido a la respuesta de frecuencia de la sala anecoica donde se realizan este tipo de mediciones. De las muestras restantes se elige la que tiene frecuencia de resonancia más baja, esto es, la muestra 2 con una frecuencia de resonancia de 495 Hz.

Cabe señalar que en la Figura 6-7 se observa que la parte imaginaria simulada no se ajusta a la parte imaginaria experimental como en la Figura 6-6, pudiéndose deber a que como el radio de los agujeros es muy pequeño cualquier imperfección en la construcción de estos afecta de manera considerable en el resultado. Además de esto, la profundidad de la cavidad detrás de la placa perforada y la corrección de extremos del cuello también influyen en los efectos sobre la impedancia. Por ejemplo, en la Figura 6-8 se observa la impedancia real e imaginaria obtenida en el tubo de onda plana comparada con la parte imaginaria de la impedancia acústica simulada de la muestra 3, pero usando para el cálculo teórico un radio de agujeros mayor a 0.5 mm (en este caso 0.75 mm). En el caso de agujeros muy pequeños, la falta de precisión se puede traducir en un error porcentual de consideración en los diferentes parámetros involucrados (por ejemplo en el radio de los agujeros), pudiendo producir grandes variaciones en el valor de la impedancia calculada.



Figura 6-8

Impedancia acústica obtenida de la muestra 3 con una profundidad a de 0.04 mt, largo de cuello b de 0.0055 mt y distancia entre agujeros e de 0.01 mt La curva teórica se ha calculado asumiendo un radio de agujeros r de 0.00075 mt.

Con la muestra elegida se realizan mediciones de impedancia para distintos valores de profundidad del espacio de aire detrás de la placa perforada (indicado por la letra a). En la Figura 6-6 (b) ya se mostró lo obtenido para la profundidad a = 0.04 mt . A continuación se muestran los resultados logrados para profundidades de a = 0.02 mt y a = 0.005 mt .



Figura 6-9

Impedancia acústica obtenida de la muestra 2 con un largo de cuello b de 0.0055 mt, radio de agujeros r de 0.0005 mt y distancia entre agujeros e de 0.01 mt. (a) Profundidad a de 0.02 mt (b) Profundidad a de 0.005 mt

6.3 Mediciones de fuente sonora real

Para realizar las mediciones, se construyó un dispositivo experimental para medir la directividad de la fuente en campo libre. A continuación se describen las características del tipo de montaje utilizado y los resultados alcanzados.

6.3.1 Materiales y montaje

La señal utilizada para alimentar el sistema es proporcionada por un generador de tonos puros. Esta señal es estabilizada mediante la ganancia del mismo generador para poder entregar siempre la misma cantidad de potencia a la fuente. La caja acústica se ubicará en un plato giratorio donde radiará el sonido, el cual será captado por un micrófono ubicado a 1m de distancia mientras la caja acústica rota. La señal es digitalizada por un conversor análogo – digital para luego ser procesada y almacenada por un computador. El montaje descrito se ubicó en una sala anecoica para simular en lo posible campo libre.

A continuación se detallan los instrumentos utilizados para llevar a cabo las mediciones:

- Oscilador Brüel & Kjær type 1022.
- Micrófono de Condensador BEHRINGER / ECM8000.
- Preamplificador BEHRINGER / ULTRAGAIN MIC 2200.
- Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte.
- Computador Personal PENTIUM III.
- Líneas para poder conectar los instrumentos.



Figura 6-10

Esquema del montaje utilizado para las mediciones

La estructura de la fuente sonora consiste en un bafle alrededor de un parlante de aproximadamente 10 cm de diámetro, el cual se encuentra dentro de otro bafle con caras removibles, estas caras fueron del tipo rígido y con agujeros (resonadores). La Figura 6-11 muestra la formación y estructura de la caja que alberga a la fuente sonora desde el comienzo hasta la que se utilizó.



(a)



(c)



(b)



(**d**)



Construcción del bafle para usar como fuente sonora: (a) Caja acústica que fue tratada para adecuar los resonadores. (b) Ajuste de los vértices que se adhirieron a la caja para poder tener una profundidad de 4 cm. (distancia entre la cara del bafle y el resonador). (c) Vértices fijos al bafle. (d) Caja acústica definitiva con los resonadores instalados.



Figura 6-12

Montaje de la fuente sonora al interior de la sala anecoica sobre la plataforma giratoria.



Figura 6-13

Plataforma giratoria donde se ubicó la fuente sonora para obtener los patrones direccionales.

6.3.2 Patrones direccionales

Luego de corroborar que el sistema de medición este funcionando correctamente, finalmente se obtuvieron los patrones direccionales. Se excitó el parlante con tonos puros centrados en tercios de octava, además de la frecuencia de resonancia y su alrededor. Esto último para averiguar si realmente la frecuencia de resonancia encontrada en la etapa de medición en el tubo de onda plana se acerca a dicha frecuencia. Se midió usando caras rígidas (sin perforaciones) y con resonadores (muestra 2) para compararlas entre si sometidas a una misma situación tanto en la cara frontal como en las caras laterales. En el caso de la cara posterior no se producen variaciones en los niveles de presión sonora ni en la directividad de la fuente, por lo cual no se ha considerado en el análisis. Cabe mencionar que el radio máximo de los patrones direccionales que se expondrán en este informe están determinados por el caso rígido, vale decir, el caso rígido alcanzará los 0 dB en los patrones direccionales, de esta manera se puede comparar en los gráficos tanto la variación de directividad como la variación de nivel de presión sonora. Se expondrán y analizarán los patrones direccionales obtenidos al utilizar los resonadores con profundidad de cavidad a de 0.5 cm , 2 cm y 4 cm.

A continuación se presentan los patrones direccionales obtenidos en el caso de los resonadores con profundidad de 0.5 cm.





Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 0.5 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 315 Hz (b) 400 Hz (c) 500 Hz (d) 630 Hz.





Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 0.5 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 800 Hz (b) 1000 Hz (c) 1180 Hz (Frecuencia de Resonancia) (d) 1250 Hz

Se observa que los patrones direccionales obtenidos utilizando caras rígidas y caras con agujeros en cada frecuencia analizada desde los 315 Hz hasta los 800 Hz son muy similares (ver figuras 6-14 y 6-15) manteniendo aproximadamente su misma forma de radiación pero no así el nivel de presión sonora.

En la Figura 6-15 (**b**) se observa un menor grado de simetría en los lóbulos posteriores. Tanto en la Figura 6-15 (**c**) como en la (**d**), en el sector anterior de los patrones direccionales (0°) el nivel de presión sonora utilizando los resonadores sobrepasa al obtenido con las caras rígidas entre 2 dB a 3 dB aproximadamente.

A continuación se presentan los patrones direccionales obtenidos a 2 cm.



Figura 6-16

Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 2 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 315 Hz (b) 400 Hz (c) 500 Hz (d) 630 Hz.





Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 2 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 676 Hz (Frecuencia de Resonancia) (b) 800 Hz (c) 1000 Hz (d) 1250 Hz.

A esta profundidad todos los patrones direccionales obtenidos son bastante similares, salvo la Figura 6-16 (**a**) que muestra una disminución de energía en la parte posterior al aplicar los resonadores.

Se ve que se sigue manteniendo en la Figura 6-17 (c) y (d), al igual que en la Figura 6-15 (c) y (d), que el diagrama direccional utilizando los resonadores sobrepasa a cuando se usan las caras rígidas, pero la variación es bastante reducida (aproximadamente de 1 dB a 2 dB en los 0°).

A continuación se presentan los patrones direccionales obtenidos a 4 cm.



Figura 6-18

Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 4 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 315 Hz (b) 400 Hz (c) 495 Hz (Frecuencia de Resonancia) (d) 500 Hz.

Estudio experimental del patrón direccional de una caja acústica pequeña modificando la impedancia acústica de sus superficies



Figura 6-19

Comparación de los patrones direccionales de la caja utilizando caras rígidas y con agujeros a 4 cm de profundidad, aplicándole un tono puro. (a) 630 Hz (b) 800 Hz (c) 1000 Hz (d) 1250 Hz.

Se observan patrones direccionales muy similares entre los casos de fuente sonora utilizando caras rígidas y caras con resonadores en las frecuencias analizadas, manteniendo la tendencia de que sobre los 1000 Hz el patrón direccional de los resonadores supera a cuando se usan las caras rígidas a 0° .

En la frecuencia de resonancia a 4 cm de profundidad (495 Hz) se observa una considerable atenuación de la radiación de energía hacia la parte posterior de la fuente sonora. La Figura 6-18 (**d**) muestra una gran similitud en la parte anterior de los diagramas direccionales, atenuándose en el sector posterior. Estos dos casos dan cuenta de un cambio en la directividad de la fuente sonora, si bien se irradia casi la misma presión sonora hacia adelante, disminuye la radiación de energía hacia atrás.

7 CONCLUSIONES

Se ha confirmado experimentalmente que la impedancia acústica de las superficies exteriores de un bafle de dimensiones pequeñas (30 x 30 x 40 cm), en el cual se encuentra montado un altavoz, influye en la radiación sonora. Sin embargo, considerando el objetivo práctico de aprovechar este fenómeno para modificar la directividad de una caja acústica de manera considerable, se puede concluir que es muy difícil lograr resultados notorios con cajas de dimensiones pequeñas respecto a la longitud de onda. Lo anterior implica que para lograr resultados considerables en frecuencias medias o bajas (donde normalmente la directividad es menor) se deberían construir cajas acústicas de grandes dimensiones, lo cual hace poco viable la utilización del fenómeno planteado para fines prácticos o de construcción de cajas acústicas comerciales. Si bien es cierto, los resultados obtenidos utilizando resonadores construidos con placas perforadas (resonadores de Helmholtz acoplados) no son alentadores respecto a la posibilidad de construir cajas comerciales de mayor directividad, queda aún abierta la posibilidad de considerar otro tipo de superficies como por ejemplo resonadores de membranas. Esta última alternativa podría ser tema de estudio para un próximo trabajo.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Henríquez, P. "Aplicación del método de síntesis por multipolos al cálculo de radiación de cajas acústicas". Universidad Austral de Chile. Instituto de Acústica (2004).
- [2] Recuero, M. "Ingeniería Acústica". España. Editorial Paraninfo (1995).
- [3] Astudillo, R. "Diseño y Construcción de un sistema de medición de coeficiente de reflexión complejo e impedancia acústica específica". Universidad Austral de Chile. Instituto de Acústica (2002).