



# Universidad Austral de Chile

---

Facultad de Ciencias de la Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Acústica

**Profesor Patrocinante**  
**José Luis Barros Rojas**  
**Instituto de Acústica**  
**Universidad Austral de Chile**

**Profesor Informante**  
**Jorge Cárdenas Mancilla**  
**Instituto de Acústica**  
**Universidad Austral de Chile**

**Profesor Informante**  
**Alfio Yori**  
**Instituto de Acústica**  
**Universidad Austral de Chile**

## **ESTUDIO DE LA FACTIBILIDAD DE APLICAR UN SILENCIADOR A UNA SIERRA SECCIONADORA VERTICAL**

**Tesis presentada como parte de los requisitos para  
Optar al grado de LICENCIADO EN ACÚSTICA  
Y al título profesional de INGENIERO ACÚSTICO**

**CARLOS ALBERTO SCHMALZ CAÑAS**  
**VALDIVIA CHILE**

**2004**

# Agradecimientos.

Al finalizar una etapa muy hermosa e importante en mi vida, en la cual tuve la gran oportunidad de convertirme en un profesional y más aun, la oportunidad de conocer, compartir y convivir con muchas personas situaciones gratas, se me hace necesario mirar hacia atrás y agradecerles a muchos de ellos.

Quisiera agradecer a mis compañeros que entregaron su amistad, apoyo y ayuda en todo momento, a mis profesores en general, que entregaron el máximo para ser un mejor profesional, en especial a mis profesores Jorge Cárdenas, Alfio Yori que colaboraron en la corrección de mi tesis y al profesor José Luis Barros quien fue el mentor y el que entrego todo su profesionalismo y amistad mas allá de sus obligaciones para poder finalizar con éxito mi trabajo, también quisiera agradecer a Víctor Cumian, que gracias a su amabilidad, creatividad e increíble habilidad, me ayudo a realizar mis mediciones, inclusive en momentos que estuvo en juego su integridad física, además de ayudarme a solucionar todo problema técnico.

Sin duda quisiera agradecer y dedicar mi trabajo a mis padres, quienes hicieron posible mi paso por la universidad.

Y por sobre todas las cosas, agradecer a Dios por darme la vida y la felicidad de ver mi gran sueño y anhelo de ser un Ingeniero Acústico.

# Índice.

<b>1.-</b>	<b><u>Resumen.</u></b>	<b>5.-</b>
1.1.-	<u>Summary.</u>	6.-
<b>2.-</b>	<b><u>Objetivos.</u></b>	<b>7.-</b>
2.1.-	<u>Objetivos Generales.</u>	7.-
2.2.-	<u>Objetivos Específicos.</u>	7.-
<b>3.-</b>	<b><u>Introducción.</u></b>	<b>8.-</b>
<b>4.-</b>	<b><u>Marco Teórico.</u></b>	<b>9.-</b>
4.1.-	<u>Ecuación de Ondas Acústicas.</u>	9.-
4.1.1.-	<u>Ecuación de Movimiento.</u>	9.-
4.1.2.-	<u>Ecuación de Continuidad.</u>	10.-
4.1.3.-	<u>Ecuación de Estado Termodinámico.</u>	10.-
4.1.4.-	<u>Obtención de la Ecuación de Ondas Acústicas.</u>	11.-
4.1.5.-	<u>Solución Armónica a la Ecuación de Onda.</u>	12.-
4.2.-	<u>Resonadores.</u>	13.-
4.2.1.-	<u>Resonadores de Helmholtz.</u>	14.-
4.2.2.-	<u>Resonadores de <math>\lambda/4</math>.</u>	17.-
4.3.-	<u>Silenciadores.</u>	18.-
4.3.1.-	<u>Ecuación Característica.</u>	19.-
4.3.2.-	<u>Condiciones de contorno.</u>	20.-
4.3.3.-	<u>Ecuación de Atenuación <math>D_h</math>.</u>	23.-
<b>5.-</b>	<b><u>Mediciones de Espectros Característicos.</u></b>	<b>28.-</b>
5.1.-	<u>Espectro Característico Sierra Seccionadora Vertical</u>	
	<u>Striebig Standard II.</u>	28.-
5.1.1.-	<u>Instrumentos Utilizados.</u>	30.-
5.1.2.-	<u>Descripción de las mediciones.</u>	30.-

5.1.3.-	<u>Resultados Obtenidos.</u>	31.-
5.2.-	<u>Espectro Característico Sierra Seccionadora de Prueba.</u>	38.-
5.2.1.-	<u>Sierra Seccionadora de Prueba.</u>	38.-
5.2.2.-	<u>Instrumentos y materiales utilizados.</u>	39.-
5.2.3.-	<u>Montaje usado para las mediciones.</u>	41.-
5.2.3.-	<u>Resultados Obtenidos.</u>	42.-
<b>6.-</b>	<b><u>Impedancia Acústica Específica de los</u></b>	
	<b><u>Resonadores Acoplados.</u></b>	<b>45.-</b>
6.1.-	<u>Calculo de Impedancia Acústica Específica.</u>	45.-
6.2.-	<u>Medición de Impedancia Acústica Específica.</u>	45.-
6.3.-	<u>Muestras Construidas.</u>	48.-
6.4.-	<u>Resultados de Impedancia para los Resonadores.</u>	49.-
<b>7.-</b>	<b><u>Atenuación estimada de los Silenciadores.</u></b>	<b>54.-</b>
<b>8.-</b>	<b><u>Silenciadores de Prueba.</u></b>	<b>57.-</b>
8.1.-	<u>Silenciador 1.</u>	57.-
8.2.-	<u>Silenciador 2.</u>	59.-
<b>9.-</b>	<b><u>Mediciones y Resultados.</u></b>	<b>61.-</b>
9.1.-	<u>Instrumentos y materiales utilizados.</u>	61.-
9.2.-	<u>Montaje usado para las mediciones.</u>	62.-
9.3.-	<u>Configuración de los Silenciadores.</u>	63.-
9.4.-	<u>Resultados Obtenidos.</u>	65.-
9.5.-	<u>Resumen resultados obtenidos.</u>	85.-
<b>10.-</b>	<b><u>Conclusiones.</u></b>	<b>88.-</b>
<b>11.-</b>	<b><u>Bibliografía.</u></b>	<b>90.-</b>

# 1.- Resumen.

En este trabajo se estudia la factibilidad de construir un silenciador para una sierra seccionadora vertical. Para esto se utiliza un modelo matemático para un conducto bi-dimensional, a partir del cual, resolviendo la ecuación de valores propios, se puede estimar la atenuación producida en un conducto cuyas superficies internas poseen un valor determinado de impedancia acústica específica.

Se monta una sierra seccionadora de prueba con un espectro característico semejante al de una sierra seccionadora vertical (marca Striebig modelo Standard II) y se determina en que frecuencias conviene maximizar la atenuación.

Utilizando dos modelos de silenciador, uno con resonadores de Helmholtz y el otro con resonadores de  $\lambda/4$ , se realizaron mediciones con la sierra de prueba al momento del corte bajo distintas configuraciones de tipo y ubicación del silenciador.

Para disminuir las vibraciones producidas por el motor, y de esta manera evaluar el efecto real del silenciador sobre la propagación del sonido en su interior, se reemplaza el disco de la sierra por una unidad de driver, mediante el cual se reproduce una grabación del sonido de una sierra o ruido blanco. Esto permite obtener resultados mas razonables en comparación al análisis teórico del conducto bi-dimensional, confirmando que los resultados utilizando la sierra no fueron satisfactorios debido a la vibración del sistema completo.

## 1.1.- Summary.

In this work the feasibility is studied of building a muffler for a mountain vertical circular saw. For this a mathematical model is used for a bi-dimensional conduit, starting from the one which, solving the equation of own values, it can be considered the attenuation taken place in a conduit whose internal surfaces possess a certain value of specific acoustic impedance.

A mountain test seccionadora is mounted with a characteristic spectrum similar to that of a mountain vertical seccionadora (Striebig Standard II model marks ) and it is determined in that frequencies suit to maximize the attenuation.

Using two muffler models, one with resonators of Helmholtz and the other one with resonators of  $\lambda/4$ , were they carried out mensurations with the test mountain to the moment of the cut low different type configurations and location of the muffler.

To diminish the vibrations taken place by the motor, and this way to evaluate the real effect of the muffler on the propagation of the sound in their interior, the disk of the mountain is replaced by a driver unit, by means of which reproduces a recording of the sound of a mountain or white noise. This allows to obtain results but reasonable in comparison to the theoretical analysis of the bi-dimensional conduit, confirming that the results using the mountain was not satisfactory due to the vibration of the complete system.

## **2.- Objetivos.**

### **2.1.- Objetivos Generales.**

Estudiar la factibilidad teórica y experimental, para el diseño y construcción de un silenciador que tenga como función principal, atenuar los niveles de ruidos producidos por una sierra seccionadora vertical al momento del corte.

### **2.2.- Objetivos Específicos.**

Medir en bandas de tercios de octava, el espectro característico de una sierra seccionadora vertical al momento del corte.

Realizar, un montaje que simule una sierra seccionadora vertical (sierra seccionadora de prueba), a la cual se le medirá su espectro característico al momento del corte.

Mediante un modelo matemático simplificado estudiar las posibles atenuaciones producidas por un silenciador.

Diseñar y construir, distintos prototipos de silenciadores a utilizar en la sierra seccionadora de prueba.

Cuantificar y evaluar las atenuaciones logradas por los distintos prototipos de silenciadores utilizados en la sierra seccionadora de prueba.

### 3.- Introducción.

Una de las técnicas para atenuar los altos niveles de ruido radiados por una fuente es la utilización de silenciadores.

Como su nombre lo indica, una sierra seccionadora vertical (descripción referida a una sierra seccionadora vertical marca STRIEBIG modelo STANDARD II <sup>[1]</sup>) es un conjunto de componentes que conforma un sistema utilizado para seccionar con gran exactitud tableros de madera, metal y plástico en forma dimensionada, gracias a su motor y disco de sierra, ambos montados sobre una parrilla de aluminio desplazable y fijada en carriles de guía, los que simultáneamente están empotrados en un panel de apoyo orientado en posición vertical, esta puede realizar cortes en forma horizontal, vertical y angular. Este tipo de sierra permite realizar cortes perfectos sin necesidad de que el operario vea la sierra en el momento del corte, esta característica hace posible insertar algún elemento alrededor de la sierra para intentar atenuar los niveles de ruido.

La atenuación producida en un conducto o canal, esta determinada básicamente por la propagación del modo menos amortiguado en la dirección del numero de onda complejo ( $k_x$ ), el cual puede modelarse matemáticamente resolviendo la ecuación de valores propios o ecuación característica <sup>[2]</sup>.

La impedancia acústica específica <sup>[3]</sup> de las superficies internas de un conducto (silenciador), juega un papel importante en la atenuación. Una baja impedancia acústica específica en una de sus superficies, se puede traducir en un decaimiento en la propagación de los distintos modos, una forma de obtener una superficie de baja impedancia, es construirla en base a resonadores.

En este trabajo se intentará reducir los niveles de ruido emitidos por una sierra utilizando estructuras en base a resonadores de helmholtz (o resonadores acoplados) y resonadores de  $\lambda/4$ .



## 4.- Marco Teórico.

En este capítulo, se entregan los antecedentes teóricos necesarios para entender el funcionamiento del tipo de silenciadores a utilizar (conducto con superficies internas de impedancia determinada), abarcando desde los aspectos de la acústica física más importantes para este trabajo, hasta la obtención de una ecuación que permita estimar la atenuación de un silenciador.

### 4.1.- Ecuación de Ondas Acústicas.

Las ondas acústicas, pertenecen al conjunto de las ondas elásticas. Estas se generan por movimientos locales dentro en un medio elástico continuo, el cual capta la oscilación y la transmite a sus alrededores. La propagación dependerá de las características físicas del medio, por lo que su elasticidad e inercia son factores relevantes.

Para una onda acústica, el medio de transporte es el aire, este es asumido con ciertas características particulares para establecer un modelo matemático. Por eso se considera un medio continuo, homogéneo, de elasticidad perfecta, fluidez perfecta y de inercia térmica interna constante. De esta forma, el medio en reposo queda determinado por su presión  $P_0$ , su temperatura  $T_0$  y su densidad  $\rho_0$ . Además se asume que el análisis se realiza lejos de la fuente sonora (campo lejano), sin la existencia de reflexiones.

Bajo estas condiciones, se deduce la ecuación de ondas acústicas unidimensional en coordenadas rectangulares, a partir de tres ecuaciones:

#### 4.1.1.- Ecuación de Movimiento.-

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_0 \left( \frac{\partial u}{\partial t} \right). \quad (\text{Ec. 4.1.-})$$

Esta ecuación, se deduce de la 1ª ley de Newton y representa el equilibrio dinámico de las fuerzas en el medio. Esta relaciona la variación de presión espacial  $\partial P/\partial x$  con la aceleración de la partícula  $\partial u/\partial t$ , en un medio de densidad  $\rho_o$  el cual ve alterado su estado de reposo <sup>[5]</sup>.

### 4.1.2.- Ecuación de Continuidad.

$$\frac{\partial \delta}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x}. \quad (\text{Ec. 4.2.-})$$

Esta expresión, se basa en ley de conservación de la masa y da cuenta del movimiento de un fluido cuando existen cambios de dilatación y compresión sobre una unidad de volumen imaginario. Para esto, se relaciona la velocidad de partícula  $u$  y la densidad instantánea  $\rho$  en términos del parámetro  $\delta$ , que se conoce como *Condensación*, este cuantifica el grado de alteración en la densidad instantánea del medio, con respecto a la densidad del medio en reposo <sup>[5]</sup>.

### 4.1.3.- Ecuación de Estado Termodinámico.

$$P = B \cdot \delta. \quad (\text{Ec. 4.3.-})$$

Esta ecuación, vincula los cambios de densidad (en términos de la condensación “ $\delta$ ”) con la presión  $P$  ejercida por una onda sonora,  $B$  por definición se denomina módulo de compresión adiabática. La determinación de la ecuación de estado proviene de la ley de gases ideales de Charles-Boyle <sup>[5]</sup>.

#### 4.1.4.- Obtención de la Ecuación de Ondas Acústicas.

Con estas tres ecuaciones, es posible determinar la ecuación de ondas acústicas unidimensional <sup>[5]</sup>. Combinando la ecuación (4.2.-) con la ecuación (4.3.-) y diferenciando respecto al tiempo, se obtiene:

$$\left(\frac{1}{B}\right) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2} = -\frac{d^2 u}{dx dt} \quad (\text{Ec. 4.4.-})$$

Ahora, diferenciando la ecuación (4.1.-) con respecto a  $x$ , se tiene:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = -\rho_o \left(\frac{d^2 u}{dt dx}\right) \quad (\text{Ec. 4.5.-})$$

Igualando las ecuaciones (4.4.-) y (4.5.-), resulta:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = -\left(\frac{\rho_o}{B}\right) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2} \quad (\text{Ec. 4.6.-})$$

Donde  $c = \sqrt{B/\rho_o}$ , es por definición la velocidad de propagación del sonido <sup>[6]</sup>. Por lo tanto, la ecuación de ondas acústicas, en una sola dimensión y coordenadas rectangulares, tiene la siguiente forma:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = -\left(\frac{1}{c^2}\right) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2} \quad (\text{Ec. 4.7.-})$$

Para efectos del conducto bi-dimensional o silenciador bi-dimensional, se considerara la ecuación de ondas acústicas bi-dimensional en coordenadas rectangulares, esto es:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{d^2 P}{dy^2} = -\left(\frac{1}{c^2}\right) \cdot \frac{d^2 P}{dt^2}. \quad (\text{Ec. 4.8.-})$$

#### 4.1.5.- Solución Armónica a la Ecuación de Onda.

La ecuación (4.7.-), presenta una solución que considera la presión como una función de variable dependiente  $P(x,t)$ , la que por su deducción en coordenadas rectangulares, modela la trayectoria de una onda plana a través de la trayectoria  $x$  [6], tal que:

$$P(x,t) = \left(P_+ e^{-jk_x x} + P_- e^{jk_x x}\right) e^{j\omega t} = P(x) e^{j\omega t}. \quad (\text{Ec. 4.9.-})$$

donde  $P_+$  representa la amplitud compleja de la onda de ida y  $P_-$  representa la amplitud compleja de la onda de vuelta.

Considerando, una solución general bi-dimensional, para una onda que se propaga libremente a lo largo de un conducto infinito y sin reflexiones, se tiene:

$$P(x, y, t) = \left(P_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_y y}\right) e^{j\omega t} = P(x, y) e^{j\omega t}. \quad (\text{Ec. 4.10.-})$$

Diferenciado la ecuación (4.10.-) dos veces respecto a sus variables independientes  $(x, y, t)$  respectivamente, y reemplazando, estas mismas en la ecuación (4.8.-), se obtiene:

$$\left(\frac{\partial^2 P(x, y)}{\partial x^2}\right) e^{j\omega t} + \left(\frac{\partial^2 P(x, y)}{\partial y^2}\right) e^{j\omega t} = -\left(\frac{\omega^2}{c^2}\right) P(x, y) e^{j\omega t}.$$

Eliminando, la dependencia temporal  $e^{j\omega t}$ , y reemplazando  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ , número de onda, se obtiene la ecuación de Helmholtz [3], esto es:

$$\left(\frac{\partial^2 P(x, y)}{\partial x^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 P(x, y)}{\partial y^2}\right) + k_0^2 P(x, y) = 0. \quad (\text{Ec. 4.11.-})$$

Si se considera, el medio en el conducto sin pérdidas y sin flujo, entonces, la presión sonora  $P(x, y)$  en el interior del conducto debe cumplir con la ecuación (4.11.-) (Ecuación de Helmholtz), la cual no considera el factor temporal  $e^{j\omega t}$ .

$k_x$  y  $k_y$ , corresponden al número de onda complejo <sup>[6]</sup> en dirección  $x$  e  $y$  respectivamente y cumplen la relación:

$$k_0^2 = k_x^2 + k_y^2. \quad (\text{Ec. 4.12.-})$$

Por separación de variables, se obtiene una solución para  $P(x, y)$  de la ecuación (4.11.-), donde  $P_0$  es la amplitud máxima de la presión sonora, esto es:

$$P(x, y) = P_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_y y}. \quad (\text{Ec. 4.13.-})$$

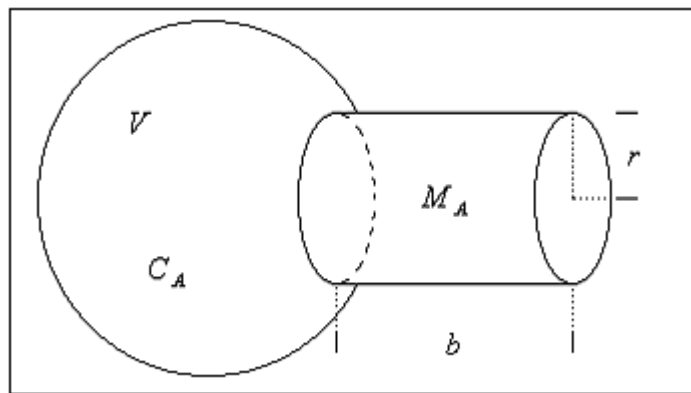
La ecuación (4.13.-), es solución de la ecuación de Helmholtz (4.11.-), esta solución describe y entregara información de la presión sonora al interior del modelo bi-dimensional para el conducto o silenciador.

## 4.2.- Resonadores.

A continuación, se describen las características de los distintos tipos de resonadores acoplados a utilizar en la construcción de los silenciadores de prueba, estos son: resonadores de Helmholtz <sup>[4]</sup> y resonadores de  $\lambda/4$  <sup>[6]</sup>.

## 4.2.1.- Resonadores de Helmholtz.

El resonador de Helmholtz, consta de una cavidad de volumen  $V$ , que se comunica al exterior por medio de un tubo de longitud  $b$  y radio  $r$ , llamado cuello del resonador. La cavidad corresponde a una compliancia acústica ( $C_A$ ) y el tubo a una masa acústica ( $M_A$ ). Ambos componentes acústicos forman un sistema llamado resonador unitario de Helmholtz.



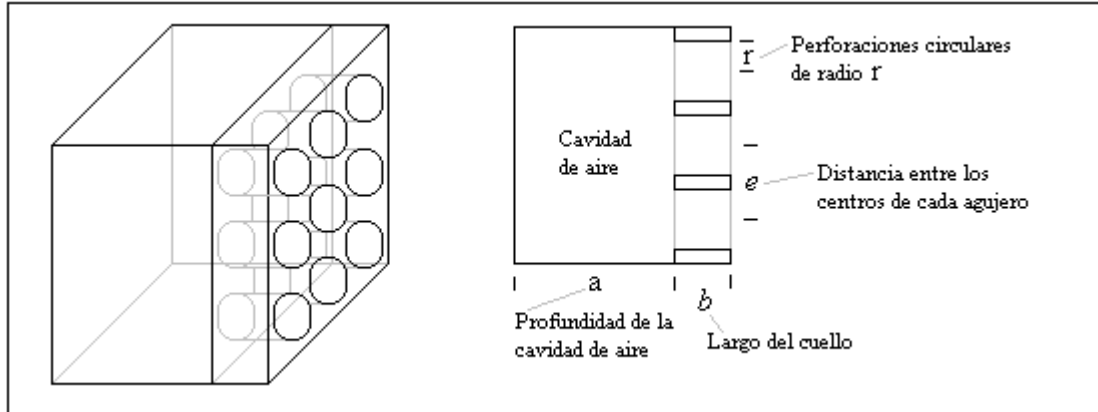
**Fig. 4.1.-** Bosquejo de un resonador unitario de Helmholtz, se observa la compliancia acústica ( $C_A$ ) y la masa acústica ( $M_A$ ), componentes acústicos de un resonador unitario.

Con:

$$C_A = \frac{V}{\rho_0 c^2} \left[ \frac{m^4 s^2}{Kg} \right] \quad \text{y} \quad M_A = \frac{\rho_0 \cdot b'}{\pi \cdot r^2} \left[ \frac{Kg}{m^4} \right]$$

donde  $b'$  es la longitud efectiva del tubo, equivalente a la longitud verdadera  $b$  más su correspondiente corrección de extremos <sup>[5]</sup>.

Debido, a que la absorción de un resonador unitario de Helmholtz, es proporcional a  $\lambda^2$ , es necesario utilizar una gran cantidad de ellos para absorber las frecuencias altas. La manera mas fácil y económica de construir un sin número de resonadores unitarios de Helmholtz, es acoplarlos en un sistema llamado resonador acoplado de Helmholtz.



**Fig. 4.2.-** Bosquejo de un sistema de resonador de Helmholtz, se observan sus principales componentes: radio de las perforaciones ( $r$ ), distancia entre los centros de los agujeros ( $e$ ), largo del cuello ( $b$ ) y profundidad de la cavidad de aire ( $a$ ).

La absorción del resonador acoplado, se debe, a que la presión sonora de las ondas que inciden sobre el resonador, hace vibrar la masa de aire en el cuello. El aire, en el volumen interior del resonador, actúa como componente elástico del sistema. En la frecuencia de resonancia del sistema, las partículas de aire en el cuello vibran con mucho vigor. En esta frecuencia, la fricción de las partículas de aire sobre la superficie del cuello, transforman una considerable cantidad de energía acústica en energía calórica, produciendo un incremento de la absorción. Esta energía absorbida, puede aumentarse aun más, si se eleva en forma artificial la resistencia del cuello.

Para el resonador acoplado, la impedancia acústica (relación compleja entre la presión sonora eficaz, y la velocidad eficaz de volumen,  $Z_A = P/U$ ) esta dada por:

$$Z_A = R + j\omega M_A - j\frac{1}{\omega C_A}. \quad \left[ \frac{Ns}{m^5} \right]$$

Para, el silenciador con variación de impedancia en las superficies internas del conducto, se empleo un resonador del tipo amortiguador de resonancia <sup>[2]</sup>, este se entiende por un sistema de resonancia del tipo masa-resorte, donde la masa, se representa a través

del aire de las perforaciones de una placa (superficie interna superior del conducto o silenciador) y el resorte por el volumen de aire detrás de ella.

Para, la impedancia acústica específica <sup>[3]</sup> (relación compleja entre la presión sonora eficaz y la velocidad eficaz de las partículas,  $Z_{res} = P/u$ ) del amortiguador de resonancia se tiene

$$Z_{res} = r_{res} + j\omega m - j\rho_0 c \cot(k_0 a). \quad [Ns/m^3]$$

Donde:

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

Por lo tanto,  $Z_{res}$  se puede escribir como:

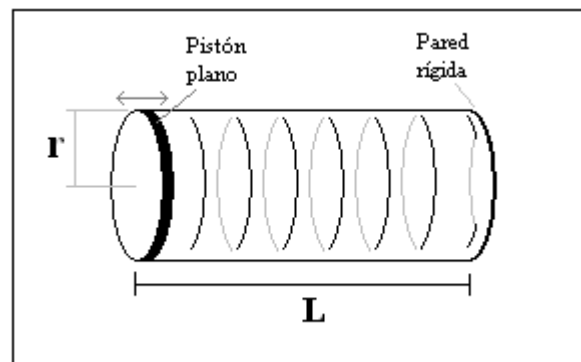
$$Z_{res} = r_{res} + j \left( \omega \frac{\rho_0 e^2}{\pi r^2} (b + 1,6r) - Z_0 \cot(k_0 a) \right). \quad [Ns/m^3] \quad (\text{Ec. 4.14.-})$$



## 4.2.2.- Resonadores de $\lambda/4$ .

Cuando el sonido se propaga en un tubo de paredes rígidas con una longitud de onda mayor que el radio  $r$  del mismo, el movimiento acústico es esencialmente plano <sup>[6]</sup>. Las propiedades de resonancia en tubos excitados por un extremo y cerrados por el otro tienen una aplicación importante para la medición en laboratorio de las impedancias acústicas y propiedades de absorción de los materiales.

El resonador de  $\lambda/4$  a utilizar, se puede describir matemáticamente como el caso de un tubo de radio  $r$  y longitud  $L$ , el cual en uno de sus extremos es excitado por un pistón plano y en el otro extremo presenta una pared rígida.



**Fig. 4.3.-** Bosquejo de un resonador de  $\lambda/4$  conformado por un tubo, en uno de sus extremos un pistón plano excitador y en el otro extremo una pared rígida.

Si el pistón vibra armónicamente a una frecuencia lo suficientemente baja para que solo se propaguen ondas planas, la impedancia acústica específica  $Z_{tub}$  dentro del tubo tendrá la siguiente forma <sup>[6]</sup>:

$$Z_{tub} = -j\rho_0 c \cot(k_0(L-x)). \quad [Ns/m^3] \quad (\text{Ec. 4.15.-})$$

Donde:

$$\begin{aligned} Z_0 = \rho_0 \cdot c & : \text{ Impedancia acústica característica } [Ns/m^3]. \\ k_0 = \omega/c & : \text{ Número de onda } [m^{-1}]. \\ L & : \text{ Largo del tubo } [m]. \end{aligned}$$

Si se desea saber la impedancia acústica específica  $Z_{tub}$ , en el extremo en que el tubo se encuentra descubierto (donde se encuentra el pistón plano), la ecuación (4.15.-) se transforma en:

$$Z_{tub} = -jZ_0 \cot(k_0 L). \quad [Ns/m^3] \quad (\text{Ec. 4.16.-})$$

### 4.3.- Silenciadores.

El cálculo, diseño y construcción de silenciadores, constituyen un área de aplicación muy importante de la ingeniería acústica. El control de ruido, en automóviles, ventiladores, sistemas de aire acondicionado, etc., es prácticamente impensable sin la incorporación de silenciadores.

Existe abundante literatura sobre silenciadores, en casi todos los libros sobre acústica o control de ruido, se puede encontrar un capítulo sobre el tema. Sin embargo en general, se consideran aproximaciones para bajas frecuencias, bajo condición de onda plana, es decir que no se propagan los modos superiores. Algunos autores, han considerado los modos superiores, en el caso de los silenciadores reactivos con cambios bruscos de sección transversal.

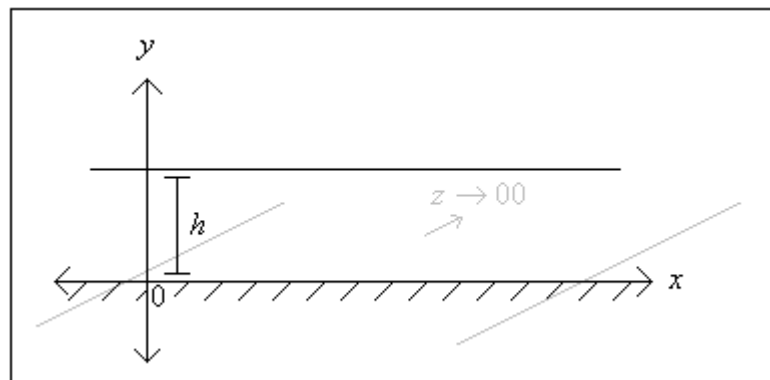
En el cálculo, de atenuación sonora en conductos o tubos de sección transversal constante revestidos internamente con material absorbente, se acostumbra a aplicar el principio del modo menos amortiguado, es decir, el decaimiento del nivel a lo largo del tubo está determinado por el modo menos amortiguado y un silenciador de longitud finita

$L$ , puede ser considerado como una sección con longitud  $L$  de un tubo de longitud infinita [2].

Los distintos modos de un conducto, pueden obtenerse resolviendo numéricamente la ecuación característica (o de valores propios) del correspondiente problema de contorno [2], lo cual en el caso de un conducto de sección transversal constante es relativamente sencillo.

### 4.3.1.- Ecuación Característica.

Como se ha mencionado anteriormente, con el objeto de reducir la complejidad de los cálculos, se considerará el conducto o silenciador como bi-dimensional, donde, la dimensión del conducto o silenciador en dirección normal al plano  $xy$ , será considerada como infinita (**Fig. 4.4.-**), de esta manera, se reduce el problema de la ecuación característica (o de valores propios) a los modos transversales en dirección  $y$ , además, se despreciará la influencia de temperatura y superposición de flujo [2].



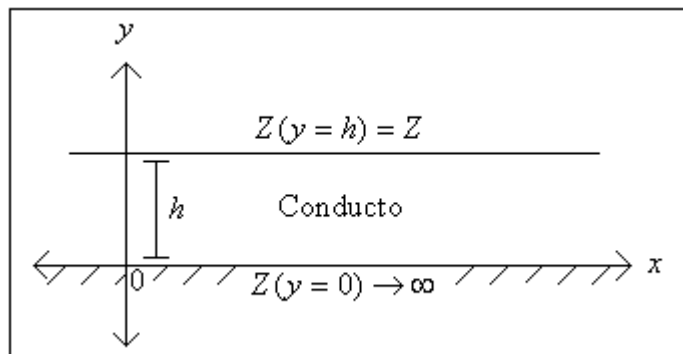
**Fig. 4.4.-** Bosquejo del conducto o silenciador acústico bi-dimensional de altura  $h$ . Se observa que la dimensión normal al plano  $xy$  del conducto es de longitud infinita  $z \rightarrow \infty$ .

Para encontrar los distintos modos del conducto, es necesario obtener y resolver la ecuación característica, la cual a partir de la ecuación (4.13.-), debe satisfacer las condiciones de contorno en las superficies internas del mismo <sup>[2]</sup>, esto es, para  $y = 0$  e  $y = h$ .

### 4.3.2.- Condiciones de contorno.

**Condición 1.** La superficie interna del conducto, correspondiente a  $y = 0$ , se considerará con una impedancia específica infinita. Esto implica que la componente  $y$  de la velocidad de partículas debe ser cero en  $y = 0$  <sup>[2]</sup>,  $Z(y = 0) \rightarrow \infty \Rightarrow u_y(y = 0) = 0$  (**Fig. 4.5.-**).

**Condición 2.** La superficie interna del conducto, correspondiente a  $y = h$  ( $h$  es la altura del conducto), tendrá la impedancia acústica específica compleja independiente del espacio  $Z$  <sup>[2]</sup>. Esto implica  $Z(y = h) = Z$  (**Fig. 4.5.-**).



**Fig. 4.5.-** Bosquejo del modelo bi-dimensional, para el conducto o silenciador acústico con las respectivas condiciones de borde de impedancia acústica específica en  $y = 0$  e  $y = h$ .

Considerando, la siguiente ecuación (4.17.-), la cual entrega información de la velocidad de partículas <sup>[3]</sup>, se procede:

$$u_y(x, y) = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \left( \frac{\partial P(x, y)}{\partial y} \right). \quad (\text{Ec. 4.17.-})$$

Diferenciando la ecuación (4.13.-) respecto a  $y$ , resulta:

$$\left( \frac{\partial P(x, y)}{\partial y} \right) = -jk_y P_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_y y}.$$

Reemplazando esta en la ecuación (4.17.-) y recordando la condición 1, se obtiene:

$$u_y(x, y) = \frac{1}{j\omega\rho_0} jk_y P_0 e^{-jk_x x} e^{-jk_y y} \Big|_{y=0} = 0.$$

Desarrollando esta última, se consigue:

$$u_y(x, y) = \frac{k_y P_0}{\omega\rho_0} e^{-jk_x x} [\cos(k_y y) - j\text{sen}(k_y y)] \Big|_{y=0} = 0.$$

Para que esta ecuación, cumpla con la condición 1, implica que  $u_y(x, y)$  debe ser de la siguiente forma:

$$u_y(x, y) = -j \left( \frac{k_y P_0}{\omega\rho_0} \right) e^{-jk_x x} \text{sen}(k_y y).$$

Reemplazando esta última en la ecuación (4.17.-) y desarrollando, se obtiene una solución de  $P(x, y)$  que satisface la condición 1 [2], esto es:

$$P(x, y) = P_0 \cos(k_y y) e^{-jk_x x}. \quad (\text{Ec. 4.18.-})$$

Esta nueva expresión, es solución de la ecuación de Helmholtz (4.11.-) y simultáneamente, cumple con la primera condición de contorno.

Considerando ahora la condición de contorno 2, y recordando que la impedancia acústica específica <sup>[3]</sup> esta dada por  $Z(x, y) = P(x, y)/u_y(x, y)$ , se obtiene:

$$Z(x, y = h) = j \frac{P_0}{\left( \frac{k_y P_0}{\omega \rho_0} \right) \tan(k_y y)} \Bigg|_{y=h} = Z .$$

Evaluando en  $y = h$  y recordando que  $k_0 = \omega/c$ , se obtiene una ecuación que permite determinar los valores propios del número de onda  $k_y$  <sup>[2]</sup>, esto es:

$$k_y h \tan(k_y h) = j \frac{k_0 h}{Z/\rho_0 c} . \quad (\text{Ec. 4.19.-})$$

Sean  $W$  y  $\beta$  las siguientes variables auxiliares:

$$W = W_r + jW_i = k_y h \quad \text{y} \quad \beta = \beta_r + j\beta_i = \frac{k_0 h}{Z/\rho_0 c}$$

Incorporando las variables auxiliares  $W$  y  $\beta$  en la ecuación (4.19.-), se obtiene una nueva ecuación característica <sup>[2]</sup> (o de valores propios), esto es:

$$W \tan(W) = j\beta . \quad (\text{Ec. 4.20.-})$$

Las soluciones para dos casos extremos,  $|Z| \rightarrow \infty$  y  $Z = 0$ , se obtienen analíticamente de manera muy simple.

Cuando,  $|Z| \rightarrow \infty$ , esto implica que  $\beta \rightarrow 0$ , la ecuación (4.20.-) se transforma en

$$\tan(W) = 0$$

y las soluciones posibles para  $W$  son,  $W = n\pi$ , con  $n = 0,1,2,\dots$ , esto se traduce en:

$$W = k_y h = W_r + jW_i = n\pi, \quad \text{con } n = 0,1,2,\dots$$

En el otro caso extremo, cuando  $|Z| = 0$  <sup>[2]</sup>, implica que  $\beta \rightarrow \infty$ , por lo tanto, la ecuación (4.20.-) se transforma en:

$$\tan(W) \rightarrow 00$$

y las soluciones posibles para  $W$  son,  $W = \frac{\pi}{2} + n\pi$ , con  $n = 0,1,2,\dots$ , esto se traduce en:

$$W = k_y h = W_r + jW_i = \frac{\pi}{2} + n\pi, \quad \text{con } n = 0,1,2,\dots$$

### 4.3.3.- Ecuación de Atenuación $D_h$ .

A partir de los valores propios  $W$  y con la ayuda de la ecuación (4.12.-) donde  $k_0^2 = k_x^2 + k_y^2$ , se pueden determinar los números de onda complejos en la dirección de propagación  $k_x$ , cuya parte imaginaria representa el amortiguamiento del correspondiente modo <sup>[2]</sup>:

$$k_x h = \pm \sqrt{k_0^2 h^2 - W^2}. \quad \text{(Ec. 4.21.-)}$$

Ya que los valores de  $W$  en los casos extremos son reales,  $k_x$  es real o imaginario, entonces, se tiene en teoría, una propagación totalmente libre de amortiguamiento cuando  $k_0^2 h^2 > W^2$ , de otra manera, solo se tienen modos incapaces de propagarse en la dirección  $x$ , los así llamados campos cercanos [2].

Del producto  $k_x h$  en la ecuación (4.18.-) para una longitud  $x = x - x_0 = h$ , con  $x_0 = 0$ , se obtiene el amortiguamiento  $D_h$  en [dB] del conducto o silenciador bi-dimensional del correspondiente modo a lo largo de una longitud  $x$  igual al alto  $h$  del mismo [2], esto es:

$$D_h = 20 \log e^{|I_m \{k_x h\}|}.$$

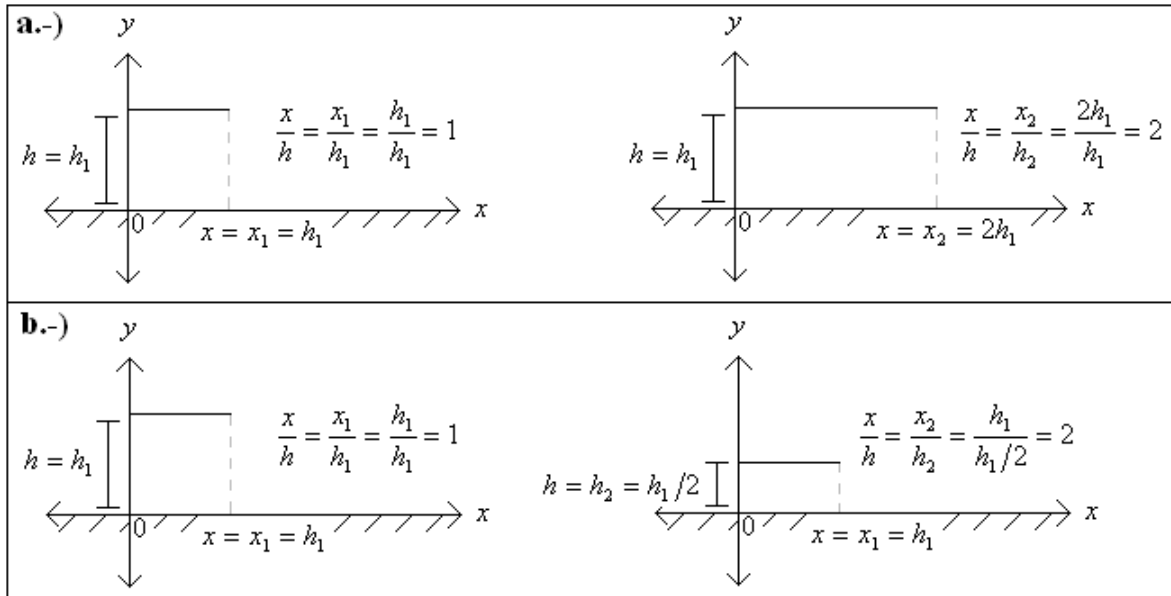
Recordando que:  $\log(x) = \log(e) \ln(x)$ , la ecuación se transforma en:

$$D_h = 8,7 |I_m \{k_x h\}|. \quad (\text{Ec. 4.22.-})$$

Se observa claramente en (4.22.-) que, si se desea aumentar la atenuación al doble, al triple, al cuádruple, etc., es necesario hacer el largo del conducto o silenciador bidimensional lo mas grande posible respecto a  $h$ .

Como se muestra en la siguiente figura, se puede aumentar al doble la relación entre el largo  $x$  y la altura  $h$ , duplicando la longitud o reduciendo la altura a la mitad.





**Fig. 4.6.-** Bosquejo ejemplo para obtener el doble de relación entre el largo  $x$  y la altura  $h$  para el modelo bi-dimensional del conducto o silenciador. (a) Se aumenta el largo  $x$  al doble. (b) Se disminuye la altura  $h$  a la mitad.

Observación: Es claro que, la atenuación del conducto varía con la relación entre la distancia  $x$  y el alto  $h$  (Fig. 4.6.-), así sucesivamente se obtienen:

$$x = h/2 \quad \Rightarrow \quad D_{h/2} = 8,7 |I_m \{k_x h/2\}| = 4,35 |I_m \{k_x h\}| \quad [dB]$$

$$x = h \quad \Rightarrow \quad D_h = 8,7 |I_m \{k_x h\}| \quad [dB]$$

$$x = 2h \quad \Rightarrow \quad D_{2h} = 8,7 |I_m \{k_x 2h\}| = 17,4 |I_m \{k_x h\}| \quad [dB]$$

$$x = 3h \quad \Rightarrow \quad D_{3h} = 8,7 |I_m \{k_x 3h\}| = 26,1 |I_m \{k_x h\}| \quad [dB]$$

Por lo tanto, mientras mayor es la relación ( $x/h$ ), mayor es la atenuación obtenida, lo cual se logra manteniendo una altura  $h$  determinada y aumentando el largo  $x$  del silenciador, o

aun mejor, para una determinada longitud  $x$  del silenciador, disminuir la altura interna  $h$  del mismo.

Si  $|W| \gg k_0 h$ , entonces es valido que <sup>[2]</sup>:

$$D_h = 8,7W_r \text{ [dB]}$$

es decir, la parte real de  $W$  da cuenta de la atenuación. En cambio, en las frecuencias altas, por lo general  $|W| \ll k_0 h$ , la atenuación se hace rápidamente muy pequeña. Considerando que aproximadamente <sup>[2]</sup>:

$$k_x h = \sqrt{k_0^2 h^2 - W^2} = k_0 h \sqrt{1 - \frac{W^2}{k_0^2 h^2}} \approx k_0 h \left( 1 - \frac{W^2}{2k_0^2 h^2} \right).$$

Por lo tanto, la atenuación obtenida es <sup>[2]</sup>:

$$D_h = 8,7 \frac{W_r W_i}{k_0 h} = 1,4 \frac{W_r W_i}{h/\lambda_0} \text{ [dB]}.$$

Cuando  $|W| \ll k_0 h$ , cuenta el producto de la parte real con la imaginaria de  $W$ . Según Cremer <sup>[7]</sup> se encuentra la máxima atenuación, cuando:

$$\beta_{opt} = 2 + j1,6 \quad \text{y} \quad W_{opt} = \pi(0,7 + j0,379)$$

entonces, se obtiene como atenuación optima:

$$D_h = 19,1 \text{ [dB]}.$$

Este valor es prácticamente irrealizable, ya que pequeños cambios en la frecuencia, en las dimensiones del conducto o silenciador, o cambios en la impedancia de los resonadores que componen el mismo, producen grandes variaciones en la atenuación <sup>[7]</sup>.

Si  $W$  es solución de la ecuación de valores propios **(4.18.-)**, entonces lo es también  $-W$ . Solo son de interés, las soluciones en el primer cuadrante, es decir, con  $W_r \geq 0$  y  $W_i \geq 0$ . Entonces  $W^2$  cumplirá  $W_i \geq 0$  y

$$k_x h = \begin{cases} +\sqrt{k_0^2 h^2 - W^2}; W_i \neq 0 \\ +\sqrt{k_0^2 h^2 - W^2}; W_i = 0, W_r \leq k_0 h \\ -\sqrt{k_0^2 h^2 - W^2}; W_i = 0, W_r > k_0 h \end{cases}$$

estará en el cuarto cuadrante, con lo cual las partes real  $k_{xr}$  e imaginaria  $k_{xi}$  de  $k_x$  cumplen la condición de que  $k_{xr} \geq 0$  y  $k_{xi} \leq 0$  como debe ser del punto de vista físico.

La ecuación de valores propios **(4.18.-)** no es solucionable analíticamente, de tal manera que se deben utilizar soluciones gráficas o métodos numéricos <sup>[2]</sup>.

El cálculo a través de métodos numéricos para la atenuación del modelo bi-dimensional de un conducto, es conveniente para aquellos conductos en donde sus características de impedancia y sección transversal en las paredes internas del mismo permanecen constantes, y solo el modo menos amortiguado juega un papel importante en el cálculo de la atenuación <sup>[2]</sup>. En resumen, solo es necesario encontrar el número de onda axial del modo menos amortiguado y obtener la atenuación mediante la ecuación **4.22**.

## 5.- Mediciones de Espectros Característicos.

Antes de construir cualquier silenciador, es necesario determinar la característica del sonido radiado por una sierra seccionadora vertical al momento del corte.

### 5.1.- Espectro Característico Sierra Seccionadora Vertical Striebig Standard II.

A continuación, se presentan características de la sierra seccionadora vertical marca Striebig modelo Standard II <sup>[1]</sup>, estas son:

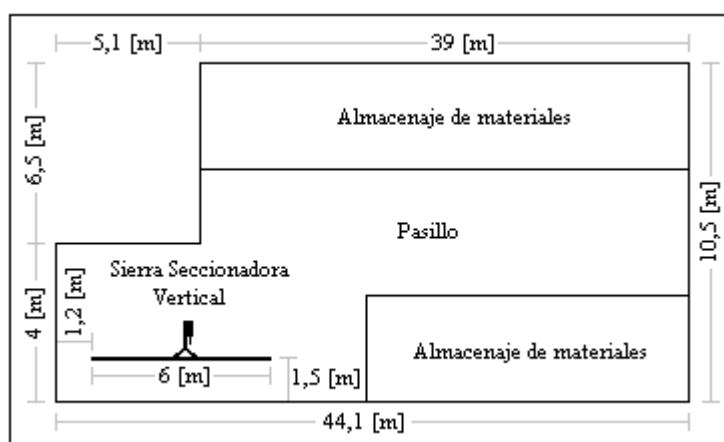
Peso de la máquina	:	aprox. 800 [Kg].
Profundidad de corte	:	80 [mm].
Potencia motor de sierra	:	5,5 [Kw].
Diámetro del disco de sierra	:	300 [mm].
Perforación del disco	:	30 [mm].
Número de revoluciones del disco	:	4750 [Rpm].
Valor de conexión	:	7,0 [Kw].
Conexión a la red eléctrica	:	3x400 V/50 Cic. (Tensiones y frecuencias especiales sobre demanda).

Valores de ruido según DIN 45635 parte 1659.

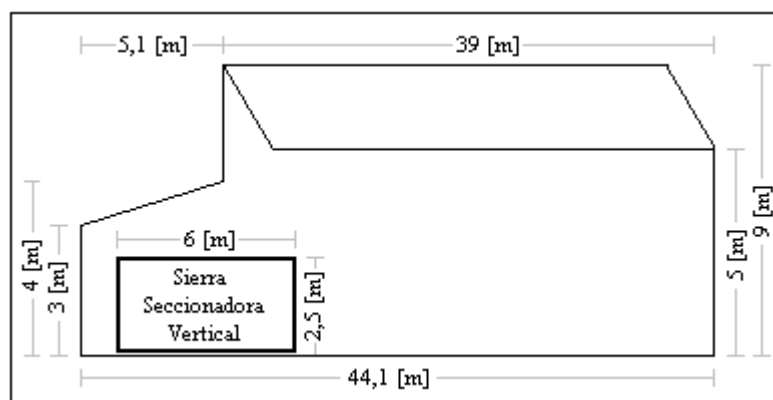
Marcha de relantí.	:	74 [dB <sub>A</sub> ]
Trabajo.	:	77 [dB <sub>A</sub> ]

Para determinar el espectro característico al momento del corte de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II, se efectuaron mediciones de ésta en plenas faenas, las respectivas mediciones fueron realizadas, en el galpón de Placa Centro Puerto Montt.

El galpón de Placa Centro Puerto Montt (**Fig. 5.1.-**), básicamente consta de dos áreas de distintas dimensiones, las que entre si, están acopladas sin una pared divisora interna, conformando así un recinto acústicamente reverberante. En una de estas áreas se encuentra la sierra seccionadora vertical y la otra corresponde al almacenaje de materiales.



(a)



(b)

**Fig. 5.1.-** Bosquejo aproximado del galpón placa centro Puerto Montt. (a) Vista superior.  
(b) Vista lateral.

### 5.1.1.- Instrumentos Utilizados.

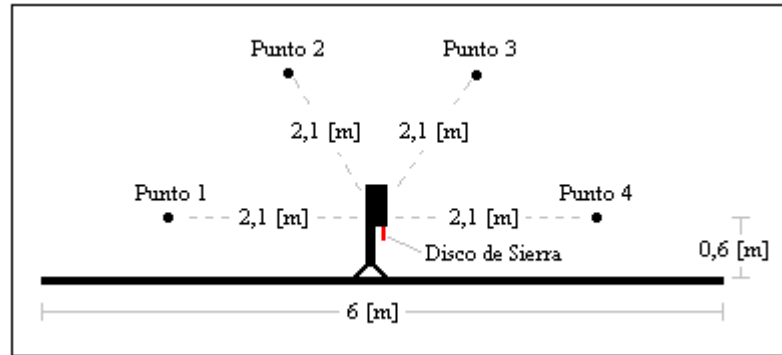
Para medir el espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II, se usó el sistema de medición Larson Davis 824, el cual cuenta con; sonómetro tipo 1 Larson Davis 824, preamplificador Larson Davis PRM902, micrófono de condensador Larson Davis 2541 ½" free fiel, filtro de viento, calibrador Larson Davis CA250 con adaptador de ½" y software Larson Davis utility. (Fig. 5.2.-).



**Fig. 5.2.-** Sistema de medición Larson Davis 824. (a) Componentes del sistema: sonómetro, micrófono, preamplificador, calibrador y otros. (b) Sistema de medición armado.

### 5.1.2.- Descripción de las mediciones.

Las mediciones se realizaron con filtro de tercios de octava, ponderación A y respuesta lenta (Slow), estas se efectuaron en cuatro puntos distintos describiendo un semicírculo al rededor del disco de sierra (Fig. 5.3.-). En los cuatro puntos de medición, la distancia entre el micrófono del sonómetro y el disco de sierra, era igual a 2,1 [m], además, se realizaron mediciones del ruido de fondo existente al interior del galpón con y sin faenas respectivamente. Estas últimas fueron realizadas en el sector donde se encuentra montada la sierra seccionadora vertical.



(a)



(b)

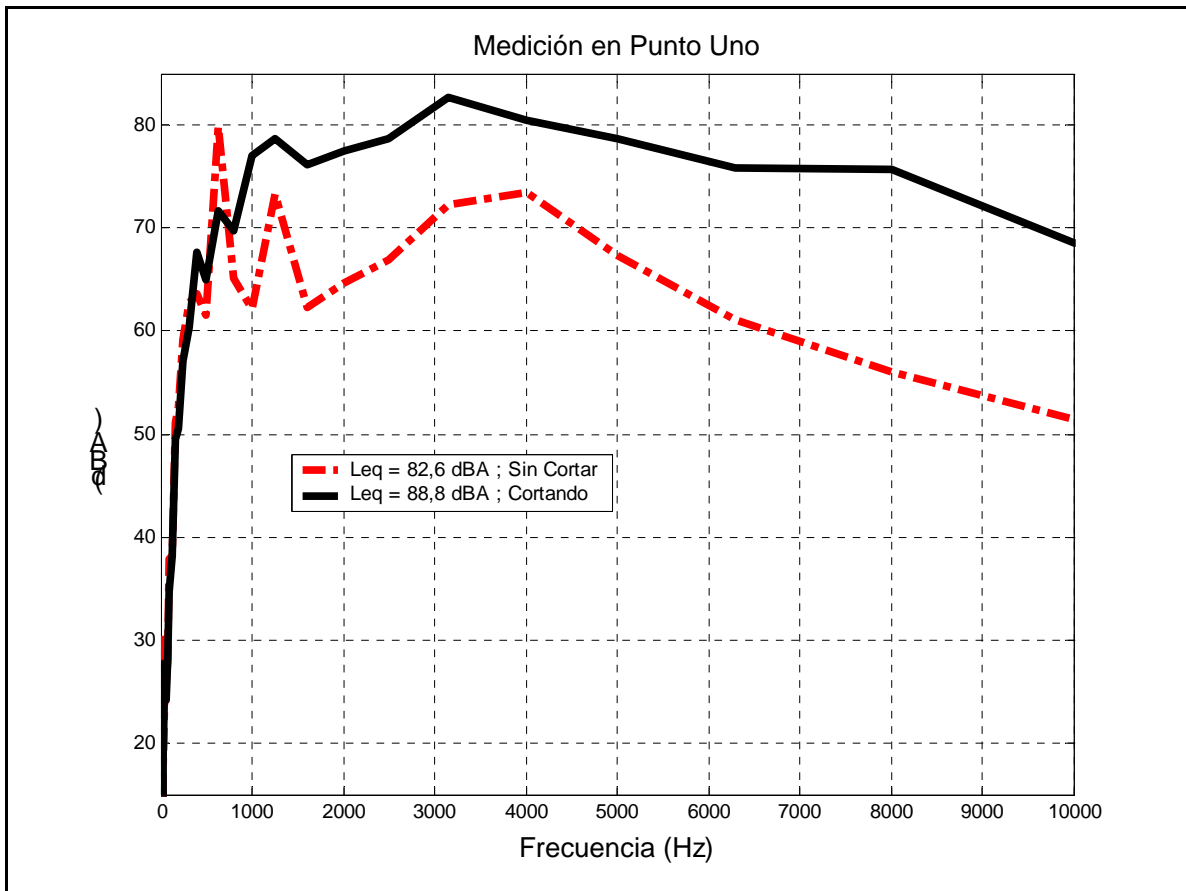


(c)

**Fig. 5.3.-** Mediciones del espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II, realizadas en galpón Placa Centro Puerto Montt. (a) Esquema de los cuatro puntos de medición. (b) Medición al momento del corte. (c) Medición al momento del corte.

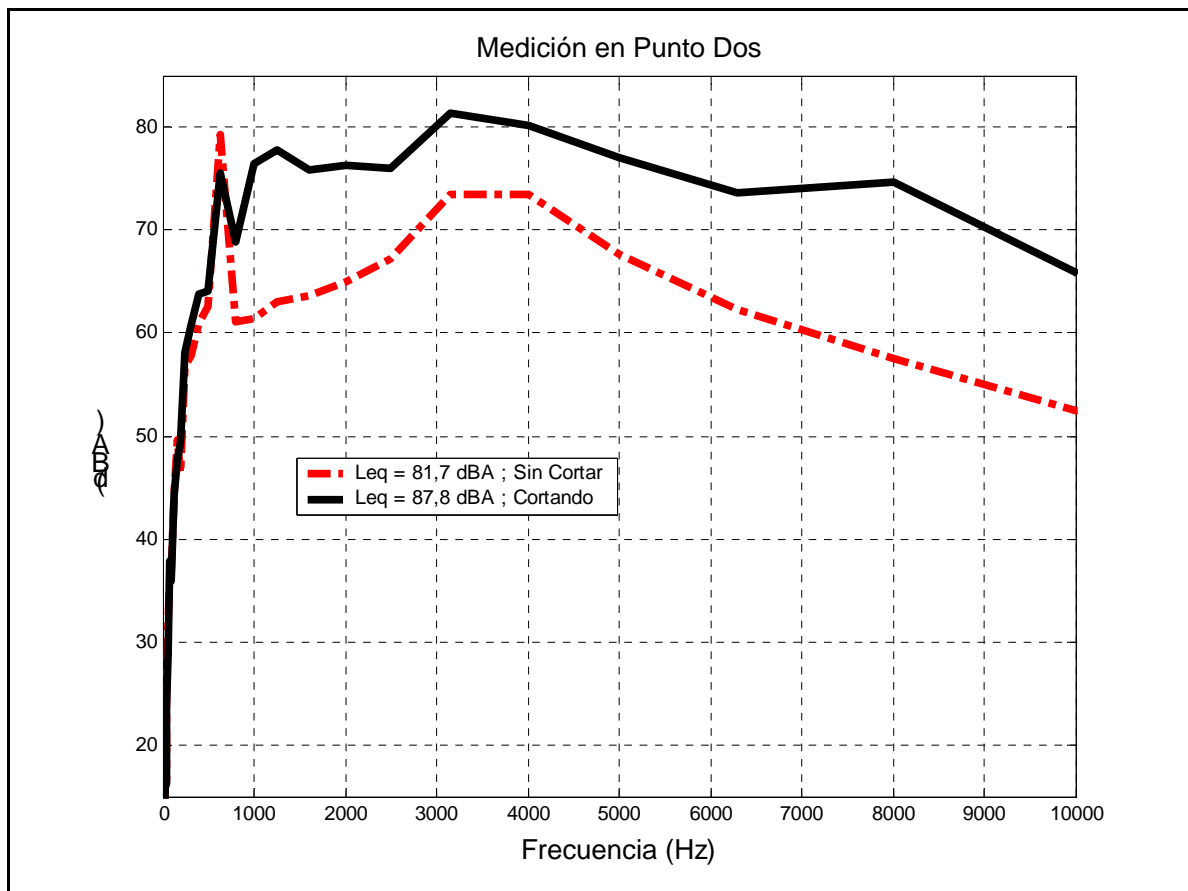
### 5.1.3.- Resultados Obtenidos.

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas en cada uno de los cuatro puntos descritos anteriormente, estas corresponden a la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II <sup>[1]</sup>, al momento del corte y cuando la sierra se encuentra en normal funcionamiento, pero sin realizar corte alguno. Las mediciones fueron efectuadas en el galpón de Placa Centro en Puerto Montt.

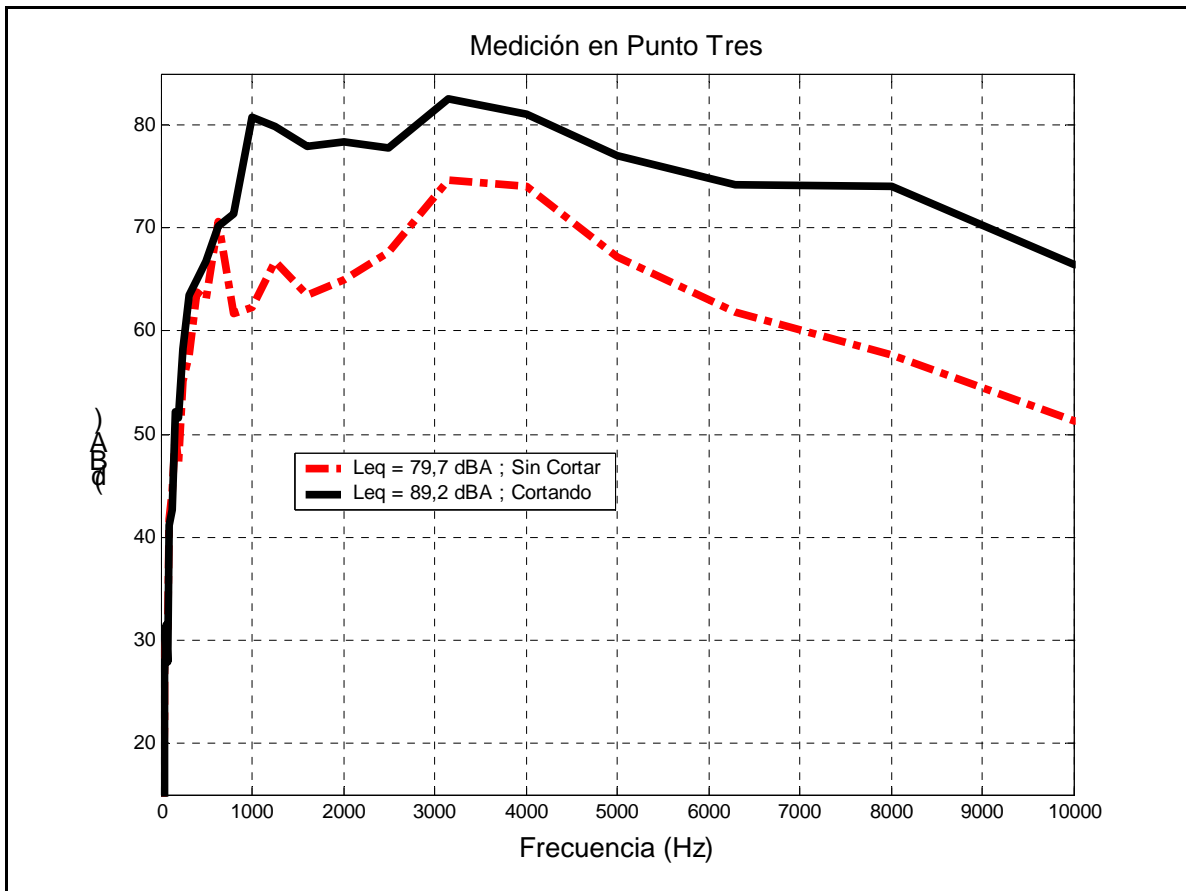


**Fig. 5.4.-** Medición del espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II para el punto 1. (—) Al momento del corte ( $Leq = 88,8 \text{ dB}_A$ ). (---) Cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno ( $Leq = 82,6 \text{ dB}_A$ ).

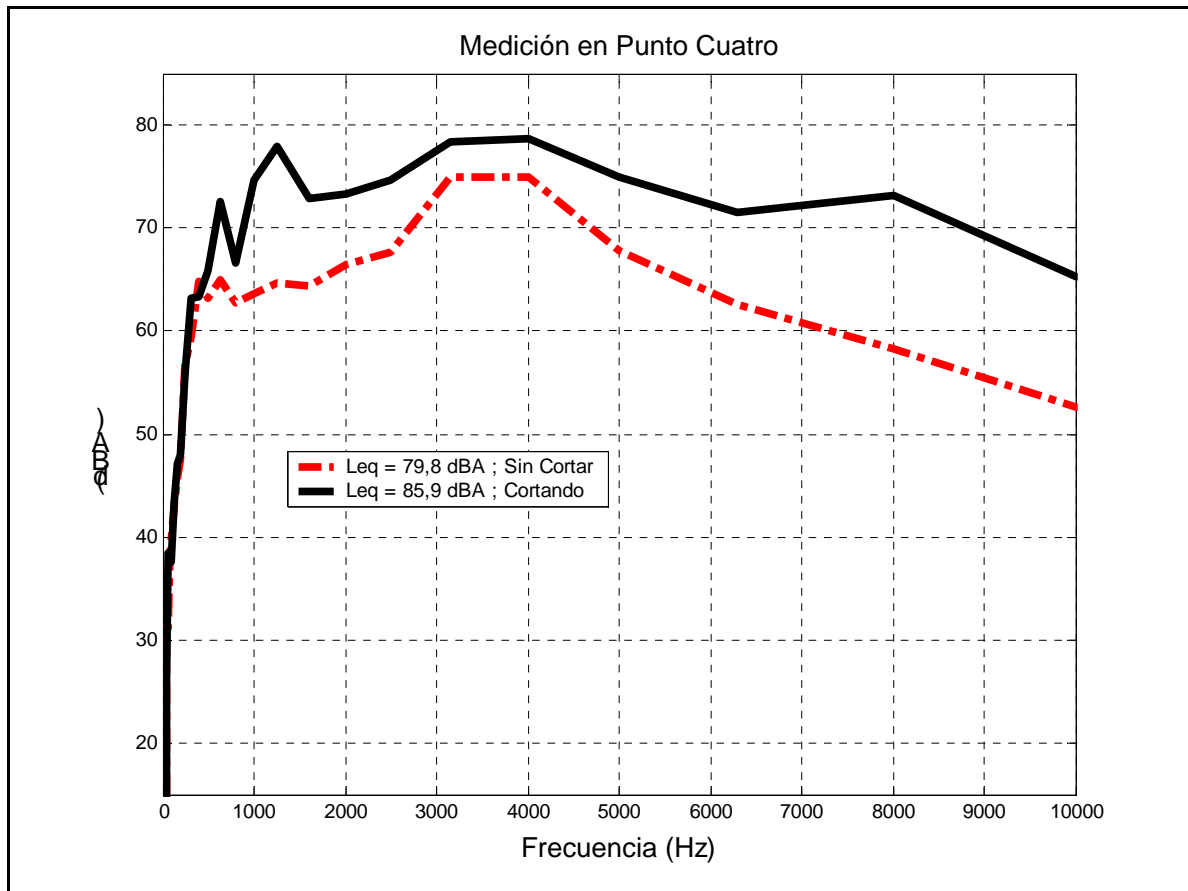




**Fig. 5.5.-** Medición del espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II para el punto 2. (—) Al momento del corte ( $Leq = 87,8 \text{ dB}_A$ ). (---) Cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno ( $Leq = 81,7 \text{ dB}_A$ ).

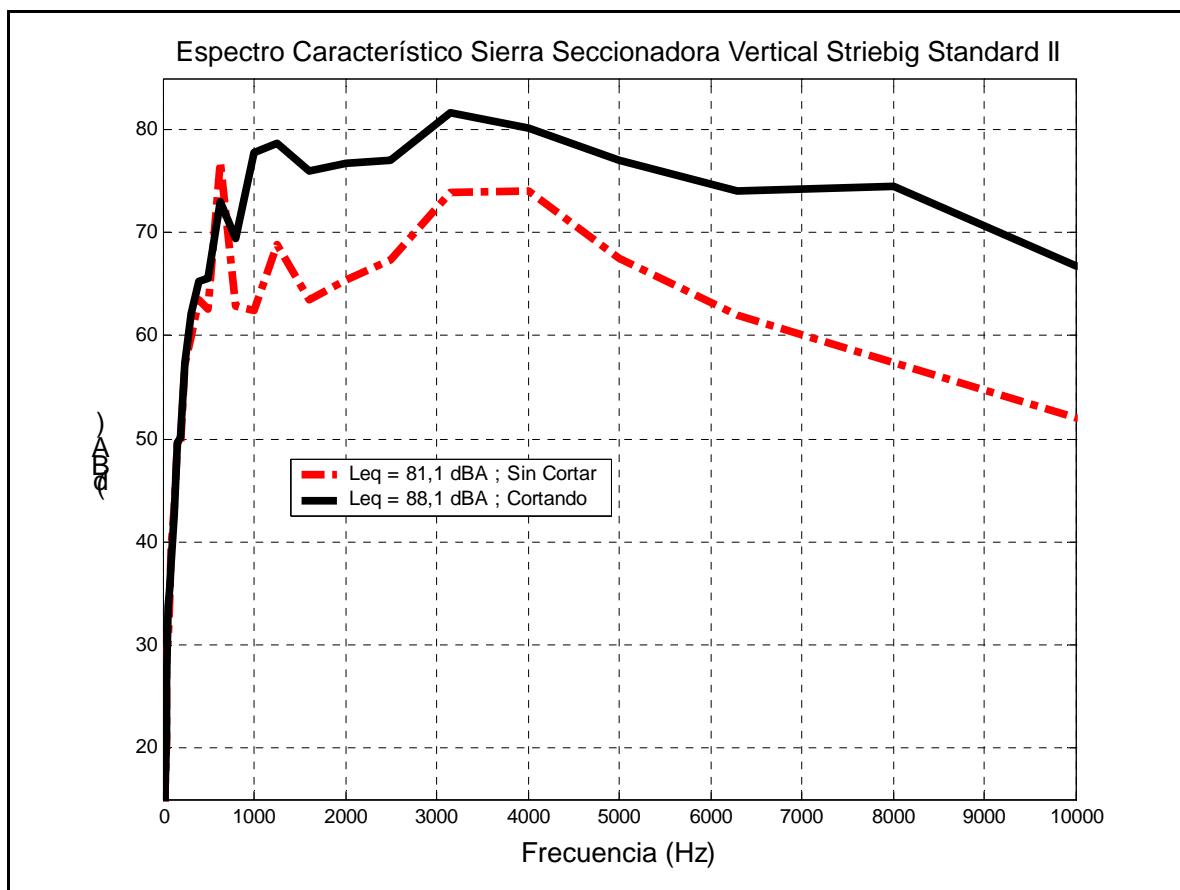


**Fig. 5.6.-** Medición del espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II para el punto 3. (—) Al momento del corte ( $Leq = 89,2 \text{ dB}_A$ ). (---) Cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno ( $Leq = 79,7 \text{ dB}_A$ ).



**Fig. 5.7.-** Medición del espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II para el punto 4. (—) Al momento del corte ( $Leq = 85,9 \text{ dB}_A$ ). (---) Cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno ( $Leq = 79,8 \text{ dB}_A$ ).

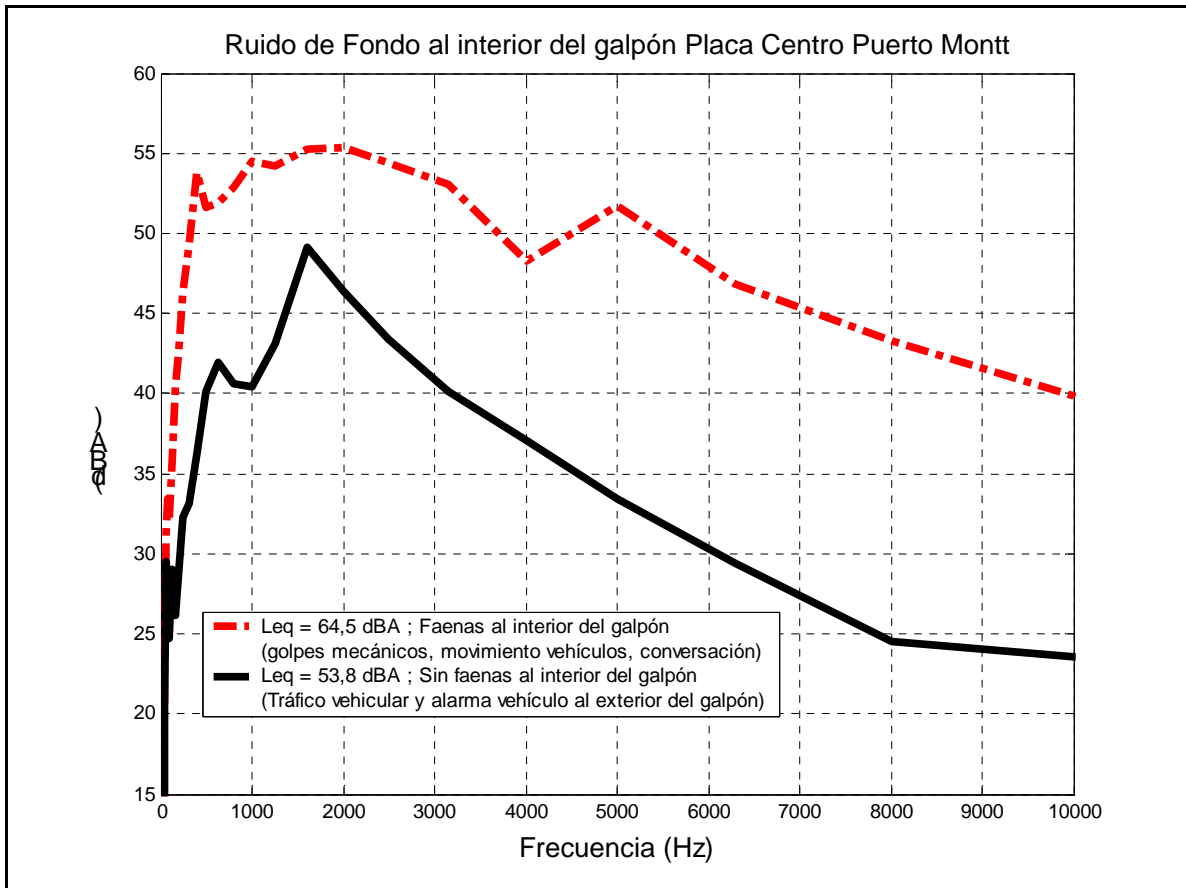
A continuación, se muestra el espectro característico obtenido de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II <sup>[1]</sup>, éste resulta del promedio energético de las mediciones realizadas en los cuatro puntos mostrados anteriormente (**Fig. 5.4.-, 5.5.-, 5.6.-, 5.7.-**). Estas curvas corresponden al momento del corte y cuando la sierra se encuentra en normal funcionamiento y sin realizar corte alguno.



**Fig. 5.8.-** Espectro promedio de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II. (—) Al momento del corte ( $Leq = 88,1 \text{ dB}_A$ ). (---) Cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno ( $Leq = 81,1 \text{ dB}_A$ ).

Se observa claramente, que el espectro característico de la sierra, al momento del corte (**Fig. 5.8.-**) muestra una gran concentración de energía sonora en un considerable ancho de banda, el cual comienza a decaer sobre los 8.000 [Hz].

A continuación, se muestran curvas obtenidas del ruido de fondo al interior del galpón Placa Centro Puerto Montt, al momento de faenas (golpes mecánicos, movimiento de vehículos, conversación) y sin faenas (tráfico y alarma de vehículos al exterior del galpón) (**Fig. 5.9.-**), estas se realizaron cuando la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II se encontraba en off.



**Fig. 5.9.-** Mediciones correspondientes al ruido de fondo, con y sin faenas. (■■■) Con faenas (golpes mecánicos, movimiento de vehículos, conversación;  $Leq = 64,5 \text{ dB}_A$ ). (—) Sin faenas (tráfico y alarma de vehículos al exterior del galpón;  $Leq = 53,8 \text{ dB}_A$ ).

## 5.2.- Espectro Característico Sierra Seccionadora de Prueba.

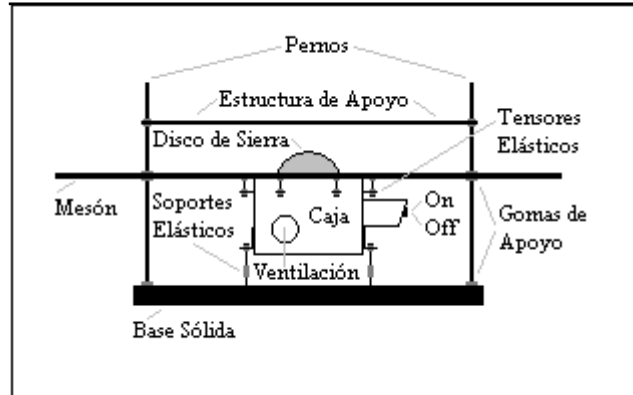
Para determinar el espectro característico de la sierra seccionadora de prueba al momento del corte, es necesario realizar un sin numero de mediciones, las que posteriormente obtenidos sus respectivos niveles, serán energéticamente promediados.

### 5.2.1.- Sierra Seccionadora de Prueba.

Para facilitar y hacer más versátil las pruebas con los distintos silenciadores a construir, se modifica una sierra de uso personal, de forma tal, que pueda cumplir con las funciones básicas de una sierra seccionadora vertical.

La sierra modificada corresponde a una sierra marca TOP CRAFT modelo TTS720<sup>[8]</sup>, la cual se debe conectar a una tensión nominal de 230 [V]-/50 [Hz], esta posee una potencia eléctrica de 720 [w] y hace girar el disco de sierra a 2950 [rpm] (equivalente a 49,16 [Hz]), el propio disco que posee 20 dientes, tiene un radio de 10,25 [cm] por un espesor de 0,24 [cm], además este tiene un agujero en el centro de 1,6 [cm] de diámetro por donde atraviesa el eje de transmisión. Según DIN 3744, la emisión sonora de la sierra es igual a 70 [dB<sub>A</sub>].

El montaje de la sierra seccionadora de prueba (**Fig. 5.10.-**), consta básicamente de un encierro rígido (caja de madera) para el motor, el cual se encuentra montado a través de soportes elásticos a una base sólida. Por medio de tensores elásticos, se acopla a la parte superior de la caja un mesón rígido, por donde se deslizan las muestras de madera a cortar. El disco de sierra unido por un eje de transmisión al motor, se ubica al exterior de la caja, este atraviesa el mesón por medio de una ranura. En cada uno de los cuatro extremos de la base sólida, sobresalen y atraviesan el mesón, unos pernos que sostienen la estructura que sirve de apoyo a los silenciadores acústicos a probar.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 5.10.-** Montaje sierra seccionadora de prueba. (a) Bosquejo montaje sierra seccionadora de prueba. (b) Se observa el mesón por donde se deslizan las muestras y la estructura de apoyo para los silenciadores. (c) Se observa la base sólida, el encierro rígido del motor, el mesón y estructura de apoyo para los silenciadores.

## 5.2.2.- Instrumentos y materiales utilizados.

A continuación, se presenta una lista con los instrumentos y materiales utilizados para las mediciones realizadas, se presentan características de algunos de ellos.

- Muestras de madera Masisa de 12 [mm].

- Computador Personal Pentium III.
- Dos líneas balanceadas, cables de energía, conectores RCA, etc.
- Programa FFT Sierra.
- Un Micrófono de Condensador BEHRINGER / ECM 8000.
- Preamplificador BEHRINGER / ULTRAGAIN MIC 2200.
- Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte.

### **Programa FFT Sierra.**

Este programa, creado en base al software Test-Point 3.0 <sup>[9]</sup>, sirve para analizar datos medidos y transferidos a través de la tarjeta convertora A/D. En este caso entrega la función FFT de los voltaje medidos, el programa permite seleccionar parámetros tales como; la frecuencia de sampleo ( $f_s$ ), el número de muestras ( $N$ ), la cantidad de promedios, e indica la correspondiente resolución ( $f_s/N$ ), los valores utilizados fueron;  $f_s = 40$  [KHz],  $N = 16384$ , se realizaron entre 10 y 100 promedios y una resolución de 2,441 [Hz], este último quiere decir que entrega una componente espectral en volts a cada 2,441 [Hz] en el rango comprendido de 0 [Hz] a 20 [KHz].

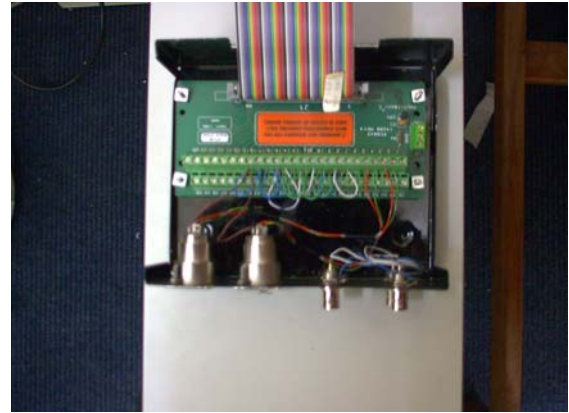
### **Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte.**

La tarjeta multicanal A/D DAS-1802HR/HR-DA <sup>[10]</sup> (**Fig. 5.11.-**), es la encargada de digitalizar las señales análogas provenientes del preamplificador. Esta consiste en una tarjeta inserta en la tarjeta madre del computador, del cual, salen por medio de un cable serial los terminales de entradas a los canales. Esta tarjeta cuenta con distintas ganancias de entrada a sus canales, las que pueden ser controladas desde un comando particular en test-point 3.0, como también, la frecuencia de muestreo y el número de muestras consideradas en el análisis. Para las mediciones realizadas, se utilizó ganancia 1 (gain = 1), esto significa que la señal preamplificada, mantiene su magnitud al ingresar a la tarjeta a/d. Con esta ganancia los canales soportan como máximo 10 [V<sub>pp</sub>] de entrada.





(a)



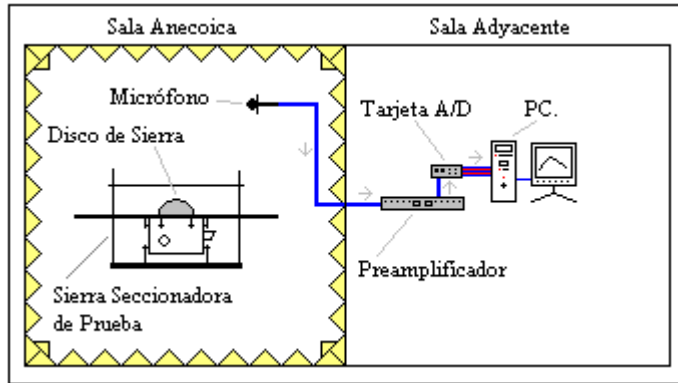
(b)

**Fig. 5.11.-** Extensión de los canales de la tarjeta multicanal A / D DAS-1802 HR/HR-DA.  
(a) carcasa metálica cerrada. (b) carcasa metálica abierta.

### 5.2.3.- Montaje usado para las mediciones.

El ruido emitido al momento de los cortes realizados por la sierra seccionadora de prueba, es recepcionado por el micrófono de condensador, este transmite la señal análoga capturada al preamplificador, el cual regula los voltajes de entrada y salida. Luego, este envía la señal regulada a la tarjeta conversora A/D, la que se encarga de digitalizar la señal análoga recibida (**Fig. 5.12.-**).

Los cortes realizados por la sierra seccionadora de prueba, fueron efectuados al interior de la sala anecoica.



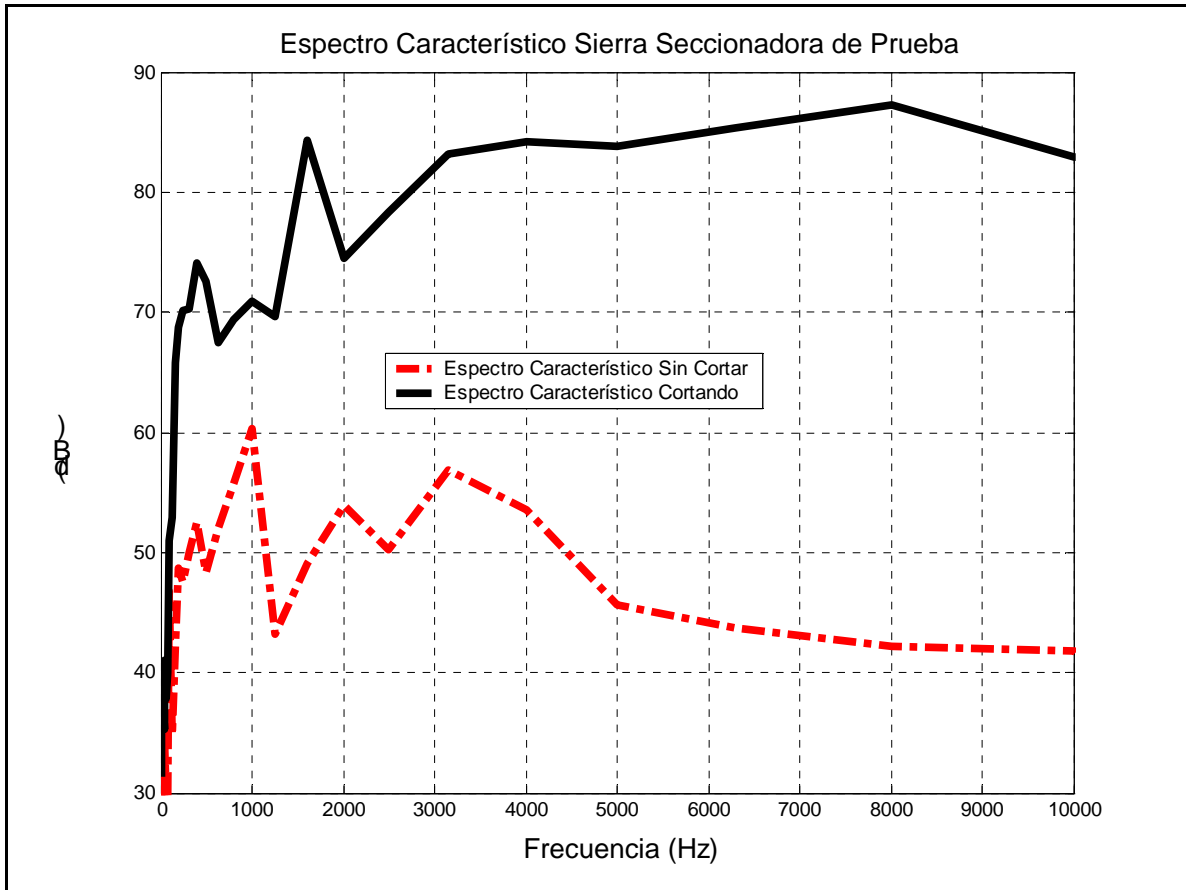
**Fig. 5.12.-** Esquema utilizado para las mediciones del espectro característico de la sierra seccionadora de prueba.

### 5.2.3.- Resultados Obtenidos.

A continuación, se muestra el espectro característico de la sierra seccionadora de prueba en funcionamiento al momento del corte (cortando madera masisa de 12 [mm]) y sin cortar, este último se refiere cuando la sierra seccionadora de prueba se encuentra en normal funcionamiento, pero sin realizar corte alguno (**Fig. 5.12.-**).

El espectro característico de la sierra seccionadora de prueba, resulta del promedio energético de los niveles medidos en [dB], estos niveles se obtienen al usar la ecuación **5.1.-**, donde el valor medido corresponde a la componente espectral medida en volts. Para realizar las curvas comparativas en forma sencilla, se utilizó como referencia el mínimo valor de voltaje medido, esto es  $2,3304 \times 10^{-5} [V]$ .

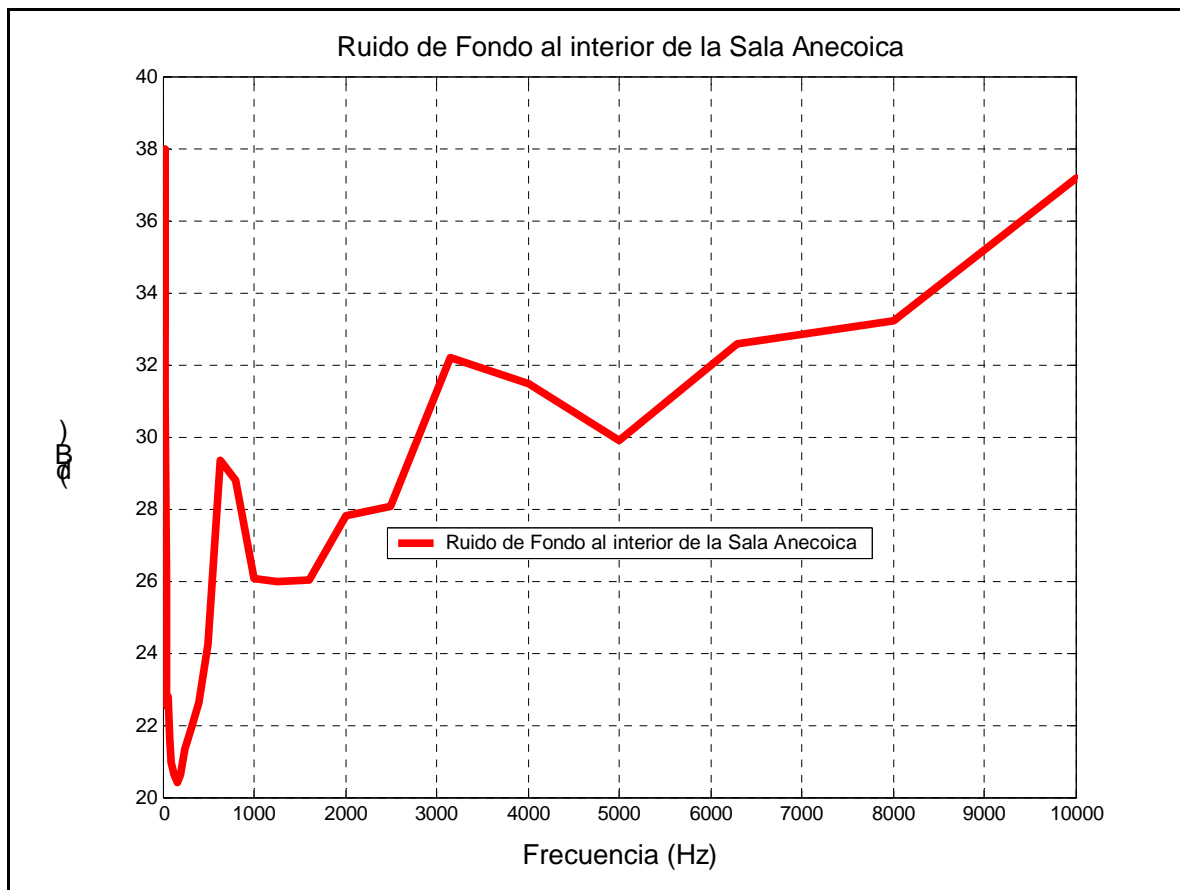
$$\text{Nivel Medido} = 10 \log \left( \frac{\text{Valor Medido}^2}{\text{Valor de Referencia}^2} \right) \quad [dB] \quad (\text{Ec. 5.1.-})$$



**Fig. 5.12.-** Espectro característico de la sierra seccionadora de prueba. (—) Promedio al momento del corte. (---) Promedio cuando la sierra se encuentra en pleno funcionamiento y sin realizar corte alguno. El valor de referencia, corresponde al mínimo valor medido ( $2,3304 \times 10^{-5} [V]$ ).

Se observa claramente, que el espectro característico de la sierra seccionadora de prueba, al momento del corte (**Fig. 5.12.-**), presenta una gran cantidad de energía sonora para un considerable ancho de banda, el cual comienza a decaer sobre los 8.000 [Hz]. Se observa que este tiene semejante comportamiento al espectro característico de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II (**Fig. 5.8.-**), esto indica que del punto de vista de este trabajo, la sierra seccionadora de prueba a usar, es un buen prototipo de la sierra seccionadora vertical Striebig Standard II.

A continuación, se muestra la curva obtenida del ruido de fondo al interior de la sala anecoica (**Fig. 5.13.-**). El valor de referencia, corresponde al mínimo valor medido ( $2,3304 \times 10^{-5} [V]$ ).



**Fig. 5.13.-** Mediciones del ruido de fondo al interior de la sala Anecoica. El valor de referencia, corresponde al mínimo valor medido, ( $2,3304 \times 10^{-5} [V]$ ).

## 6.- Impedancia Acústica Específica de los Resonadores Acoplados.

Como se mencionó y estudió anteriormente, la atenuación de los silenciadores depende de las impedancias acústicas específicas ( $Z_{res}$ ) y ( $Z_{tub}$ ) de los resonadores. Por lo tanto, para determinar las dimensiones de los resonadores a utilizar, es necesario calcular y medir las correspondientes impedancias.

### 6.1.- Calculo de Impedancia Acústica Específica.

El cálculo de las impedancias acústicas específicas para ( $Z_{res}$ ) [2] y ( $Z_{tub}$ ) [6], se basan en la ecuación 4.14.- y 4.16.- respectivamente, para realizar este de forma sencilla y rápida, se utilizó un programa computacional, en el cual asignándole distintos valores a los parámetros involucrados, se obtienen las curvas de impedancia de los distintos resonadores.

$$Z_{res} = r_{res} + j \left( w \frac{\rho_0 e^2}{\pi r^2} (b + 1,6r) - Z_0 \cot(k_0 a) \right). \quad [Ns/m^3].$$

$$Z_{tub} = -jZ_0 \cot(k_0 L). \quad [Ns/m^3].$$

### 6.2.- Medición de Impedancia Acústica Específica.

Para medir las impedancias acústicas específicas de los resonadores acoplados, se utilizó el método del tubo de onda plana [11].

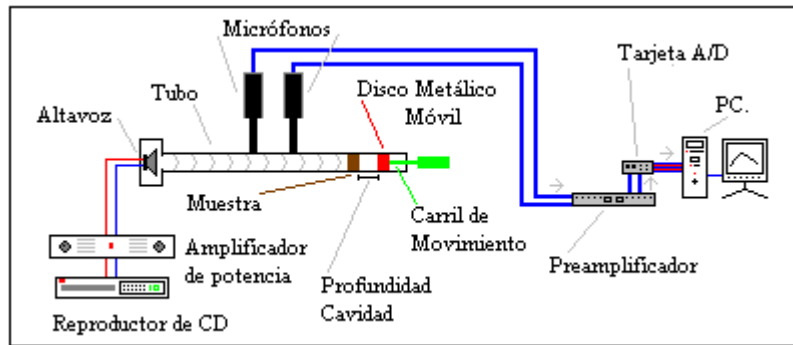
Un tubo de onda plana o tubo de impedancia, consiste en un cilindro de dimensiones específicas, que permite generar ondas acústicas planas en un rango de frecuencias determinado. Principalmente consiste en un tubo rígido equipado con un altavoz en un extremo y un material de prueba en el otro (resonadores), el que al ser excitado por un ruido de banda ancha (ruido blanco), produce ondas planas en su interior en un rango de frecuencias determinado <sup>[11]</sup>.

Las señales rescatadas por medio de un par de micrófonos ubicados al interior del tubo, son procesadas digitalmente, esto permite calcular el coeficiente de reflexión complejo y las impedancias acústicas específicas ( $Z_{res}$ ) y ( $Z_{tub}$ ) en la superficie de los resonadores.

En el montaje del sistema del tubo de onda plana (**Fig. 6.1.-**), se utilizaron los siguientes instrumentos y materiales <sup>[11]</sup>.

- Computador Personal Pentium III.
- Un Altavoz.
- Cuatro líneas balanceadas, cables de energía, conectores RCA, etc.
- Un CD “Ruido Blanco”.
- Dos Micrófonos de Condensador BEHRINGER / ECM 8000.
- Preamplificador BEHRINGER / ULTRAGAIN MIC 2200.
- Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte.
- Software para medir impedancia acústica específica <sup>[11]</sup>.
- Reproductor de CD HARMAN / KARDON HD7325.
- Amplificador de potencia TASCAM.

En la siguiente figura, se muestra el montaje del sistema de medición de impedancia acústica específica ( $Z_{res}$ ) y ( $Z_{tub}$ ).



(a)



(b)

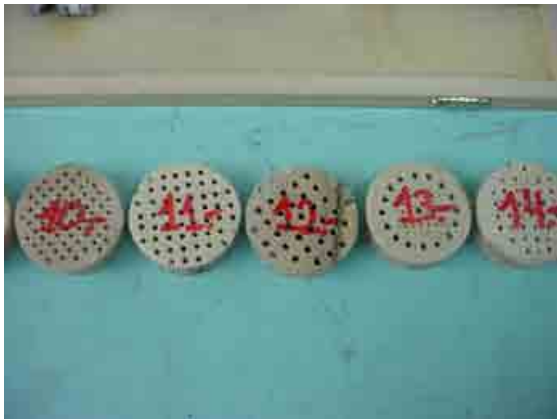


(c)

**Fig. 6.1.-** Sistema para medir la impedancia acústica específica (a) Montaje usado para las mediciones. (b) Se observan; pc, reproductor de cd, amplificador y preamplificador (c) Se observan los tubos usados, un micrófono, algunos resonadores de muestras, etc.

## 6.3.- Muestras Construidas.

Los resonadores acoplados de Helmholtz <sup>[4]</sup> construidos, son de forma cilíndrica. Estos tienen variedades en cuanto al largo del cuello (b), separación entre los centros de los agujeros (e) y distinto radio de los agujeros (r), en tanto, la profundidad de la cavidad de aire (a), es controlada por un disco metálico móvil, el que por medio de un perno que sirve de carril de movimiento, este se desplaza al interior del tubo en forma perpendicular a sus paredes (**Fig. 6.1.-**).



(a)



(b)

**Fig. 6.2.-** Resonadores de Helmholtz construidos. (a) se observan algunos resonadores construidos. (b) Se visualiza como insertar los resonadores en el tubo de onda plana.

Así mismo, los resonadores de  $\lambda/4$  <sup>[6]</sup> aquí utilizados y analizados, son tubos cilíndricos de PVC que tienen un radio ( $r$ ) igual a 1,4 [cm], un largo ( $L$ ) igual a 5,5 [cm] y una distancia entre los centros de cada tubo ( $e$ ) igual a 3,2 [cm], (**Fig. 6.3.-**).





(a)



(b)

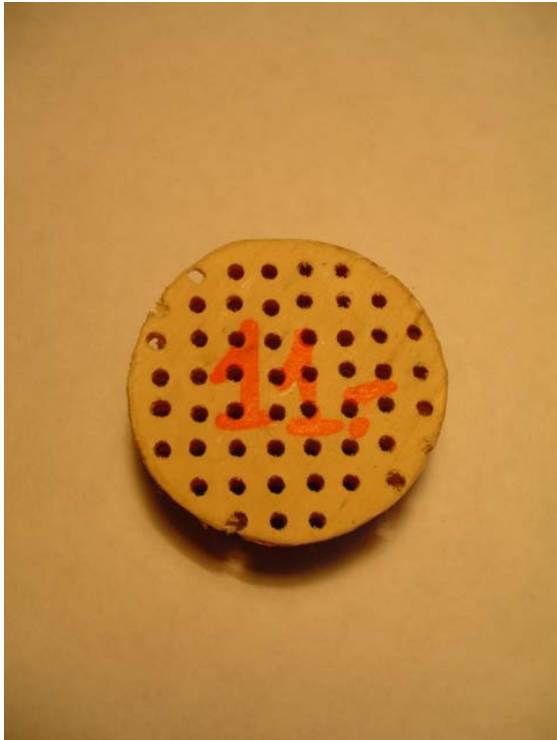
**Fig. 6.3.-** Resonadores de  $\lambda/4$ . (a) Se observa el resonador de  $\lambda/4$  analizado (b) Se visualiza como insertar el resonador de  $\lambda/4$  en el tubo de onda plana.

## 6.4.- Resultados de Impedancia para los Resonadores.

El resonador de Helmholtz analizado, corresponde a la N° 11 (**Fig. 6.4.-**), la cual posee las siguientes características:

$r_{res} = Z_0/4$	:	100	$[Ns/m^3]$ .
$Z_0 = \rho_0 \cdot c$	:	401	$[Ns/m^3]$ .
$b$	:	18	$[mm]$ .
$r$	:	1,25	$[mm]$ .
$e$	:	5	$[mm]$ .
$a$	:	Variable para cada gráfica.	

Observación: En la ecuación **4.14.-**, la parte real de la Impedancia ( $r_{res}$ ) no es simple de calcular numéricamente, en las graficas se asigno un valor aproximado a  $Z_0/4$ .



(a)

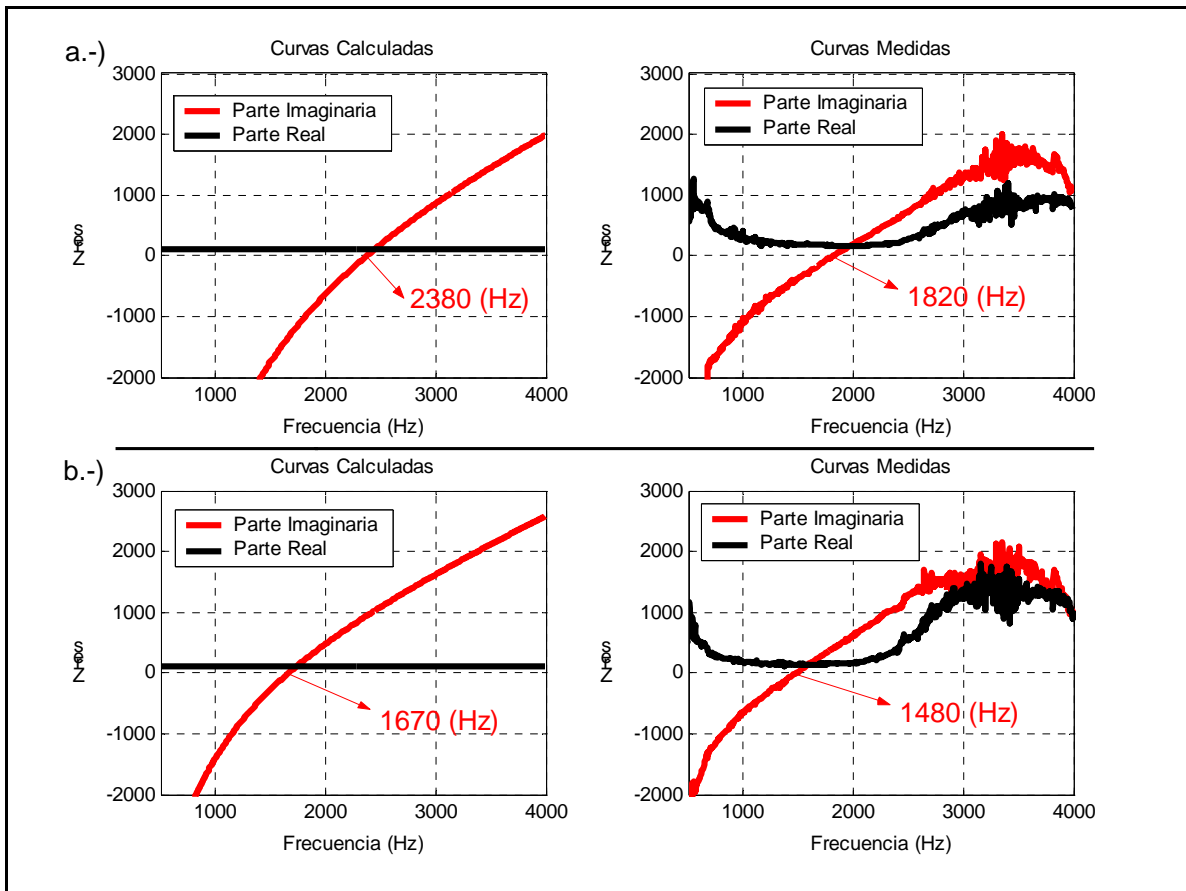


(b)

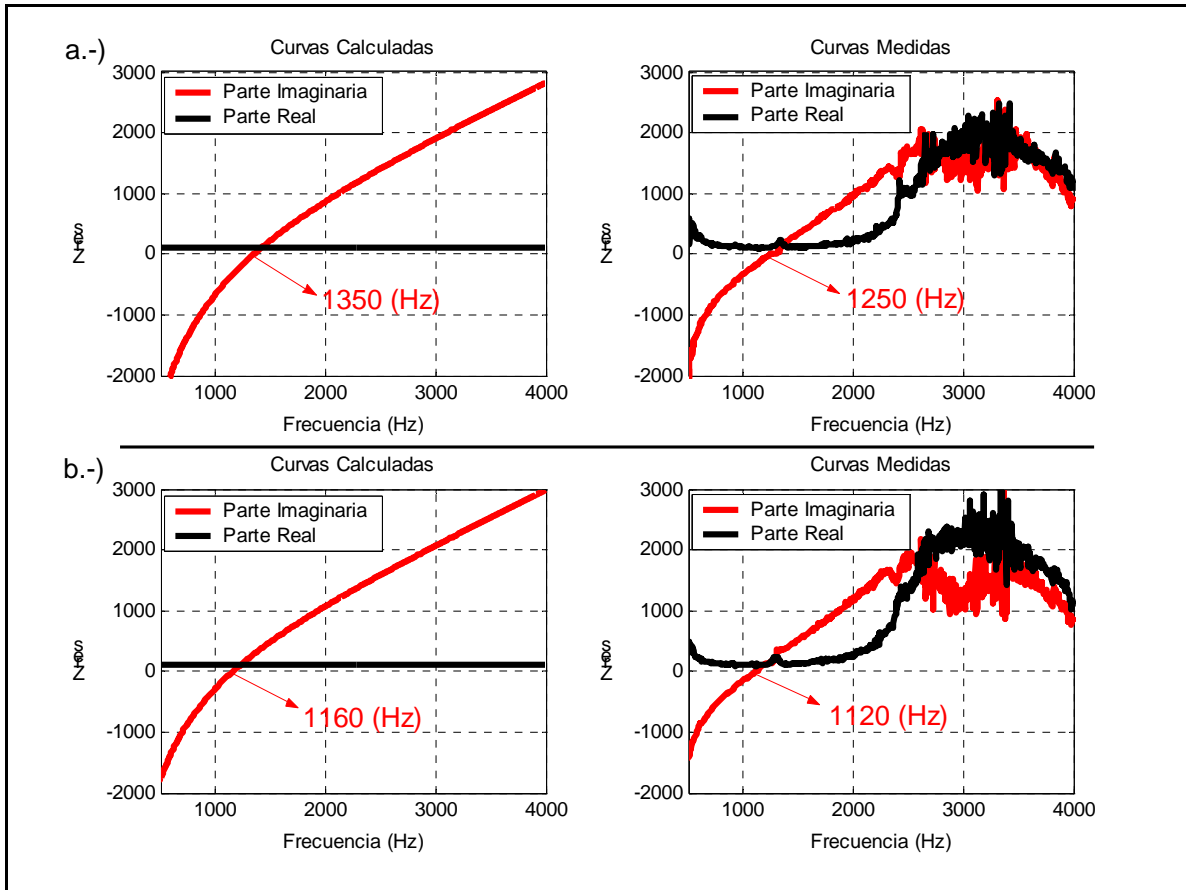
**Fig. 6.4.-** (a) y (b). Se observan dos vistas distintas de la muestra analizada N° 11.

La frecuencia de resonancia de los resonadores acoplados, queda determinada cuando la parte imaginaria de la impedancia acústica específica se anule.

A continuación, se muestran curvas comparativas para la impedancia acústica específica calculada con la ecuación 4.14.- y la impedancia acústica específica medida con el método del tubo de onda plana para la muestra N° 11. Para cada gráfica, se indica su frecuencia de resonancia correspondiente.

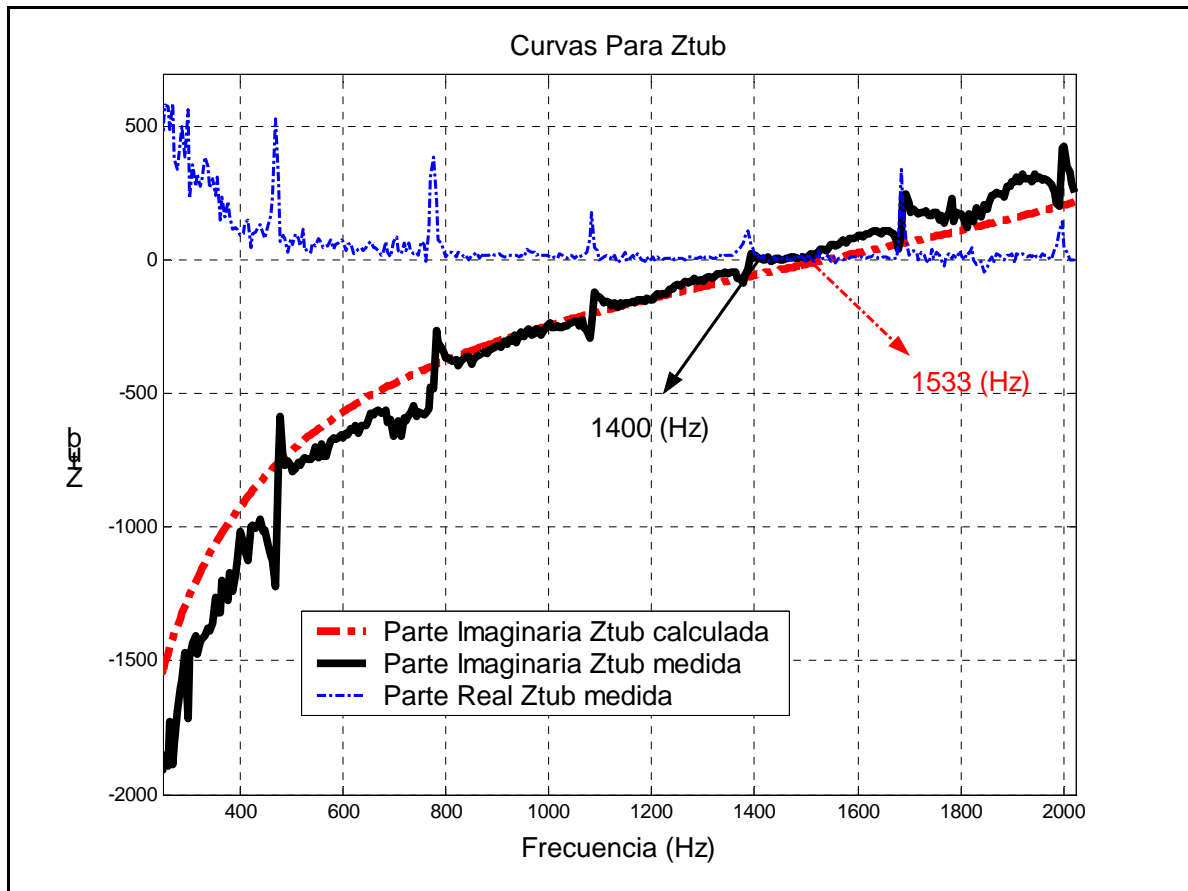


**Fig. 6.5.-** Curvas comparativas entre la impedancia acústica específica calculada con la ecuación 4.14.- (izquierda) y curvas medidas con el sistema del tubo de onda plana (derecha) para el resonador de Helmholtz N° 11. Se indica la frecuencia de resonancia para cada caso. La unidad para  $Z_{res}$  es el  $[Ns/m^3]$ . (a) Muestra N° 11 con una profundidad de la cavidad de aire igual a 5 [mm]. (b) Muestra N° 11 con una profundidad de la cavidad de aire igual a 10 [mm].



**Fig. 6.6.-** Curvas comparativas entre la impedancia acústica específica calculada con la ecuación 4.14.- (izquierda) y curvas medidas con el sistema del tubo de onda plana (derecha) para el resonador de Helmholtz N° 11. Se indica la frecuencia de resonancia para cada caso. La unidad para  $Z_{res}$  es el  $[Ns/m^3]$ . (a) Muestra N° 11 con una profundidad de la cavidad de aire igual a 15 [mm]. (b) Muestra N° 11 con una profundidad de la cavidad de aire igual a 20 [mm].

Seguidamente, se muestran curvas comparativas para la impedancia acústica específica calculada con la ecuación 4.16.- y la medida con el método del tubo de onda plana para los resonadores de  $\lambda/4$ . La parte real que aparece en la impedancia medida, entre otros se debe a disipación de energía al momento de la medición. Para cada caso se indica la frecuencia de resonancia, la que queda determinada cuando la parte imaginaria de la impedancia se anule.



**Fig. 6.7.-** Curvas comparativas de impedancia acústica específica calculada con la ecuación 4.16.- y medidas con el sistema del tubo de onda plan para el resonador de  $\gamma/4$ , Se indica la frecuencia de resonancia para cada caso. La unidad para  $Z_{tub}$  es el  $[Ns/m^3]$ .  
 (---) Curva correspondiente a la impedancia calculada. (—) Parte imaginaria de la impedancia medida. (···) Parte real de la impedancia medida.

## 7.- Atenuación estimada de los Silenciadores.

Asumiendo un modelo bi-dimensional para el conducto o silenciador con su pared interna superior compuesta por resonadores, como el descrito en el capítulo (4.3.-), se procede a calcular la atenuación estimada para los silenciadores. Esta variará dependiendo de la relación entre la longitud  $x$  y la altura  $h$  del silenciador <sup>[2]</sup>.

Considerando, un silenciador con una longitud  $x = 20$  [cm] y distintas alturas  $h$ , con  $h = 1$  [cm], 2 [cm], 3 [cm] y 4 [cm], se obtienen, distintas atenuaciones por la relación entre el largo y alto del conducto o silenciador, esto se calcula de la siguiente forma.

$$h = 1 \text{ [cm]} \Rightarrow x = 20h \Rightarrow D_{20h} = 8,7|I_m \{k_x 20h\}| = 174|I_m \{k_x h\}|. \quad [dB]$$

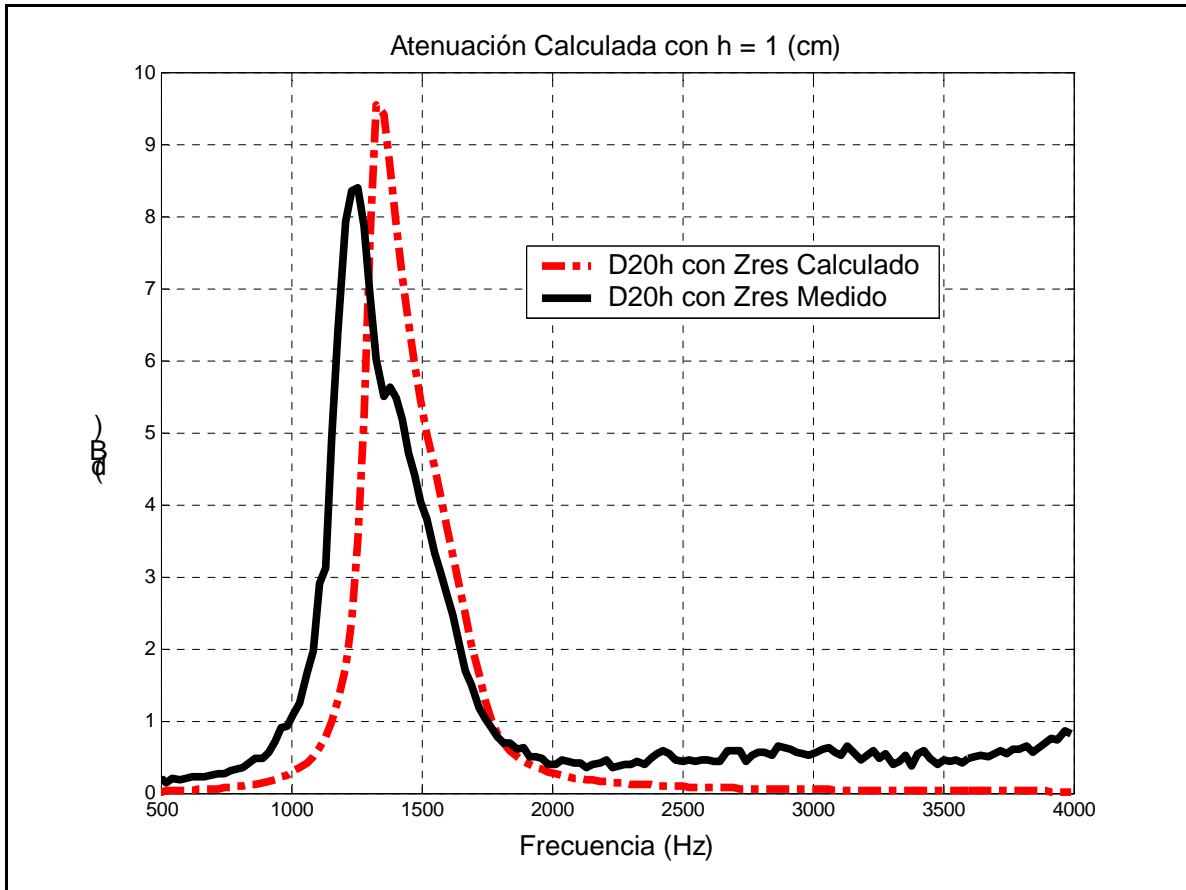
$$h = 2 \text{ [cm]} \Rightarrow x = 10h \Rightarrow D_{10h} = 8,7|I_m \{k_x 10h\}| = 87|I_m \{k_x h\}|. \quad [dB]$$

$$h = 3 \text{ [cm]} \Rightarrow x = 6,6h \Rightarrow D_{6,6h} = 8,7|I_m \{k_x 6,6h\}| = 57,4|I_m \{k_x h\}|. \quad [dB]$$

$$h = 4 \text{ [cm]} \Rightarrow x = 5h \Rightarrow D_{5h} = 8,7|I_m \{k_x 5h\}| = 43,5|I_m \{k_x h\}|. \quad [dB]$$

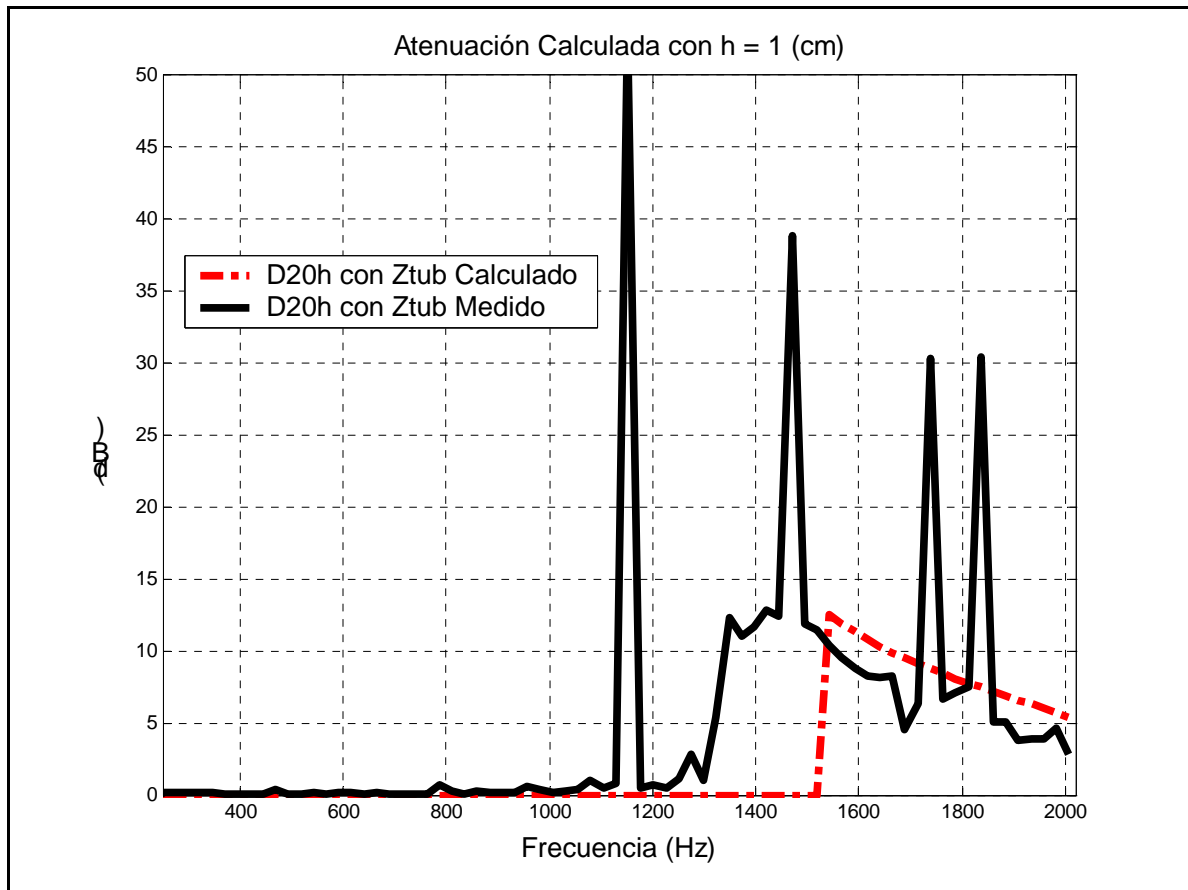
A continuación, se muestran las curvas de atenuación calculadas <sup>[2]</sup>. Para estas, se usan las expresiones anteriores y se considera el número de onda  $k_x$  del modo menos amortiguado.

En las graficas que a continuación se presentan, solo se usan las curvas de impedancia correspondiente a resonadores de Helmholtz que presentan una profundidad de la cavidad de aire ( $a$ ) igual a 15 [mm].



**Fig. 7.1.-** Curvas de atenuación  $D_{20h}$  calculadas para el modelo bi-dimensional de un conducto o silenciador acústico de 20 [cm] de largo y una altura  $h = 1$  [cm]. Calculada en base a la impedancia ( $Z_{res}$ ) del resonador N° 11 (Fig. 6.4.-) con una profundidad de la cavidad de aire igual a 15 [mm]. (—) Atenuación  $D_{20h}$  con ( $Z_{res}$ ) medida (Fig. 6.6.- (a)). (---) Atenuación  $D_{20h}$  con ( $Z_{res}$ ) calculada (Fig. 6.6.- (a)).

A continuación, se muestran las curvas de atenuación calculadas. Para estas se considera el número de onda  $k_x$  del modo menos amortiguado. Solo, se usan las curvas de impedancia correspondiente a resonadores de  $\lambda/4$  con una longitud ( $L$ ) igual a 5,5 [cm].



**Fig. 7.2.-** Curvas de atenuación  $D_{20h}$  calculadas para el modelo bi-dimensional de un conducto o silenciador acústico de 20 [cm] de largo y una altura  $h = 1$  [cm]. Calculada en base a la impedancia ( $Z_{tub}$ ) del resonador de  $\lambda/4$  con una longitud ( $L$ ) igual a 5,5 [cm]. (Fig. 6.3.-). (—) Atenuación  $D_{20h}$  con ( $Z_{tub}$ ) medido (Fig. 6.7) (---) Atenuación  $D_{20h}$  con ( $Z_{tub}$ ) calculada (Fig. 6.7).

En la figura 7.1.- se observa claramente que la frecuencia correspondiente a la máxima atenuación lograda, está en las cercanías de la frecuencia de resonancia donde la parte imaginaria de las impedancias acústicas específicas ( $Z_{res}$ ) y ( $Z_{tub}$ ) se anulan (Cap. 6.4.-).



## 8.- Silenciadores de Prueba.

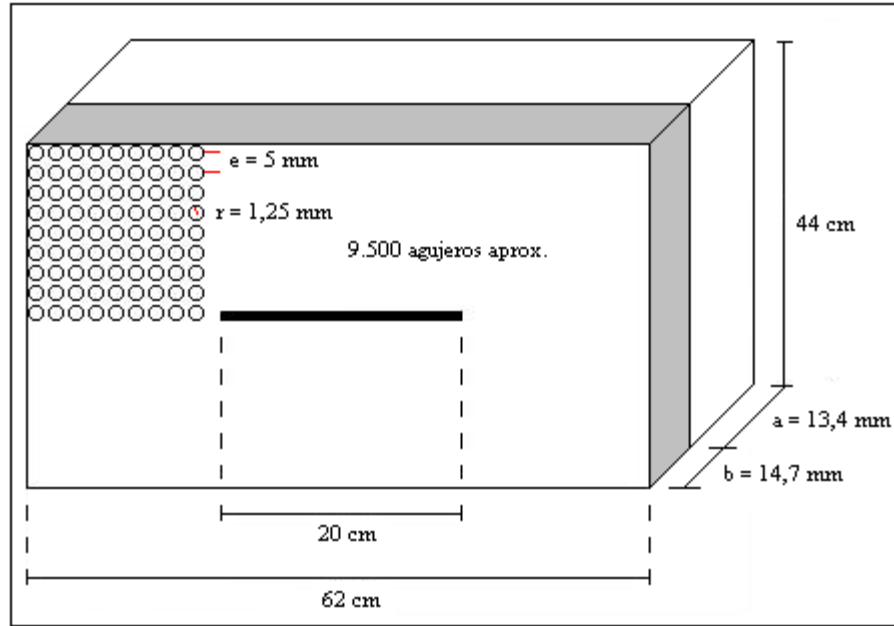
Se construyeron dos silenciadores de prueba, denominados Silenciador 1 y Silenciador 2, los cuales están constituidos básicamente por resonadores <sup>[4]</sup>.

### 8.1.- Silenciador 1.

Éste, esta construido en madera terciado con una superficie total de 62 X 44 [cm<sup>2</sup>], el cual presenta en la cara donde están los resonadores de Helmholtz <sup>[4]</sup> una ranura de 20 X 2 [cm<sup>2</sup>], por la cual atraviesa el disco de sierra. Las características de los resonadores que conforman el silenciador 1 (**Fig. 8.1.-**), son las siguientes:

$b$	: Largo del cuello.	=	14,7	[mm].
$r$	: Radio del agujero.	=	1,25	[mm].
$a$	: Profundidad de la cavidad de aire.	=	13,4	[mm].
$e$	: Distancia entre los agujeros.	=	5	[mm].
$f_0$	: Frecuencia de resonancia.	=	1533	[Hz].

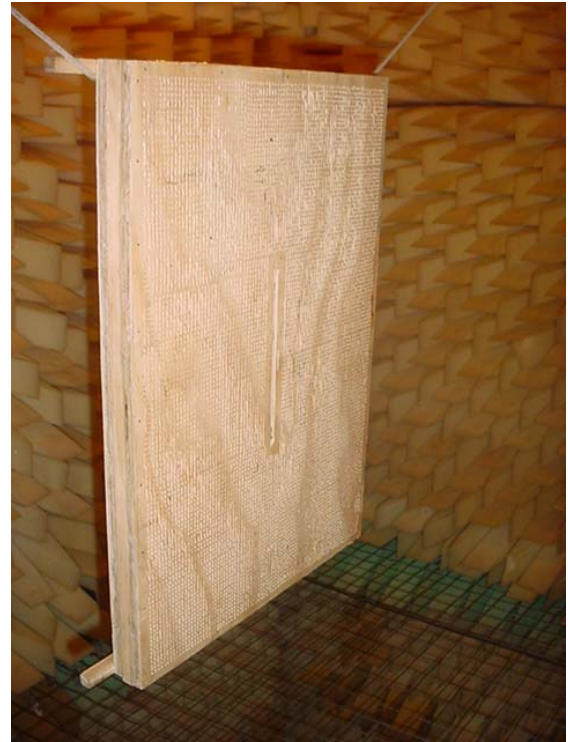
La frecuencia de resonancia se calcula con la ecuación **4.14.-**, esta sucede cuando la parte imaginaria de la impedancia acústica específica se anule. Debido a sus características geométricas, los resonadores acoplados de Helmholtz que conforman el silenciador 1, debieran tener una impedancia similar a la obtenida para el resonador acoplado N° 11, con una profundidad de la cavidad de aire ( $a$ ) igual a 15 [mm] (**Fig. 6.6.- (a)**).



(a)



(b)



(c)

**Fig. 8.1.-** Silenciador 1. (a) Bosquejo de las medidas geométricas que caracterizan al silenciador 1. (b) Se observan los resonadores más la ranura por donde atraviesa el disco de sierra. (c) Se observa el silenciador 1 desde otro ángulo.

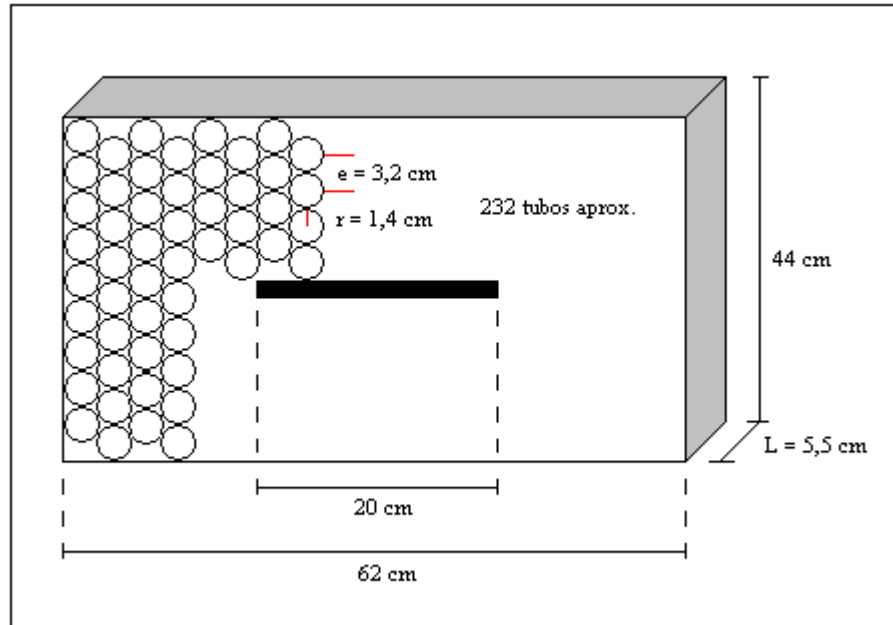
## 8.2.- Silenciador 2.

Este Silenciador 2, esta construido con resonadores de  $\lambda/4$  <sup>[6]</sup>, los cuales son de tubos de PVC, estos van insertos en un cajón rígido de madera terciado, la parte posterior de este tiene una superficie total de 62 X 44 [cm<sup>2</sup>], el cual presenta en la superficie descubierta una ranura de 20 X 3 [cm<sup>2</sup>]. Para comparar resultados con el silenciador 1, el silenciador 2 (**Fig. 8.2.-**) es sintonizado para una frecuencia de 1533 [Hz]. Las características de los resonadores de  $\lambda/4$  que conforman el silenciador 2, son las siguientes:

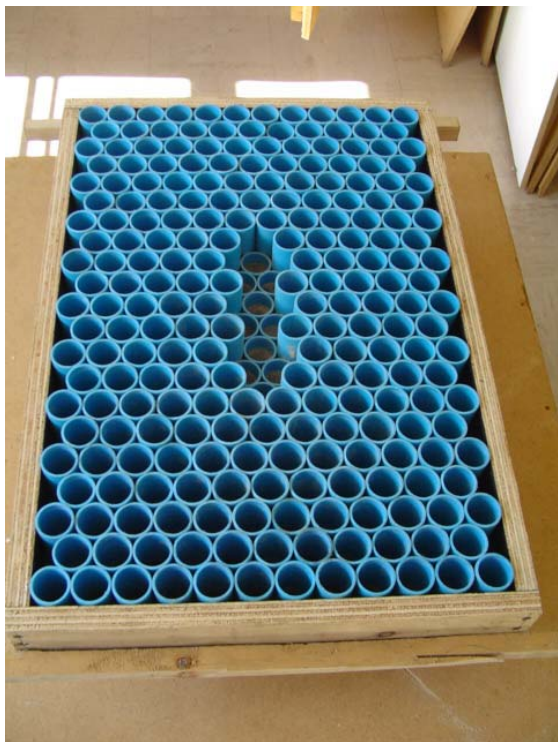
L	: Largo del los tubos de PVC.	=	5,5	[cm].
r	: Radio del los tubos de PVC.	=	1,4	[cm].
e	: Distancia entre los agujeros.	=	3,2	[cm].
$f_0$	: Frecuencia de resonancia.	=	1533	[Hz].

La frecuencia de resonancia se calcula usando la ecuación **4.16.-**, esta sucede cuando la parte imaginaria de la impedancia acústica específica se anule en la superficie descubierta del tubo.

Una manera sencilla de determinar la frecuencia de resonancia para los resonadores de  $\lambda/4$ , es obtenida al hacer el largo de los tubos de PVC igual a  $\lambda/4$  de la frecuencia de resonancia a sintonizar (1533 [Hz]), esto es, 5,5 [cm]. Con esta distancia, se logra cancelar la presión sonora en la superficie descubierta del tubo de PVC, esto debido al desfase de 180° producido por la onda incidente en la superficie del tubo y la onda reflejada en el fondo rígido del tubo, lo que implica, que la impedancia acústica específica se anule en la superficie para 1533 [Hz].



(a)



(a)



(b)

**Fig. 8.2.-** Silenciador 2. (a) Bosquejo de las medidas geométricas que caracterizan al silenciador 2. (b) Se observan los resonadores de  $\lambda/4$  más la ranura por donde atraviesa el disco de sierra. (c) Se observa el silenciador 2 desde otro ángulo.

## 9.- Mediciones y Resultados.

Una vez, contruidos los silenciadores acústicos de prueba (silenciador 1 y silenciador 2), se procede a realizar el montaje correspondiente y a posterior las mediciones de la sierra seccionadora de prueba al momento del corte con las distintas configuraciones de los silenciadores montados.

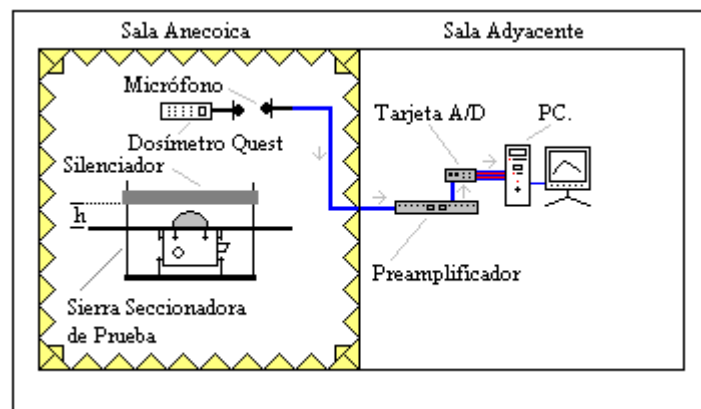
### 9.1.- Instrumentos y materiales utilizados.

A continuación, se presenta una lista con los instrumentos y materiales utilizados en las mediciones, se presentan características de algunos de ellos.

- Sierra Seccionadora de Prueba.
- Silenciador 1.
- Silenciador 2.
- Muestras de madera Terciado de 15 [mm].
- Un Micrófono de Condensador BEHRINGER / ECM 8000.
- Preamplificador BEHRINGER / ULTRAGAIN MIC 2200.
- Tarjeta A/D DAS-1802HR/HR-DA de Keithley Metrabyte <sup>[10]</sup>.
- Reproductor de CD HARMAN / KARDON HD7325.
- Amplificador de potencia TASCAM.
- Computador Personal Pentium III.
- Programa FFT Sierra.
- Dos líneas balanceadas, cables de energía, conectores RCA, etc.
- Dos CD: Ruido Blanco y sierra circular grabada al momento del corte.
- Un Driver marca Show.
- Un dosímetro M-27 Quest Technologies <sup>[12]</sup>.
- Un sonómetro 2900 Quest Technologies <sup>[13]</sup>.

## 9.2.- Montaje usado para las mediciones.

Básicamente, es el mismo montaje usado para medir el espectro característico de la sierra seccionadora de prueba (Fig. 5.10.-), con la salvedad, que a éste se le añaden uno por uno los silenciadores y sus distintas configuraciones. En cada medición realizada, se varió la altura  $[h]$  entre el mesón y el silenciador. Se usó el dosímetro Quest para determinar el nivel de presión sonora [NPS] al interior de la sala Anecoica, el micrófono de éste, se ubico a la misma altura que el micrófono de condensador Behringer.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 9.1.-** Montaje usado para realizar las mediciones al momento del corte. (a) Bosquejo del montaje realizado. (b) Momento del corte con la sierra seccionadora de prueba y silenciador 1. (c) Momento del corte con la sierra seccionadora de prueba y silenciador 2.

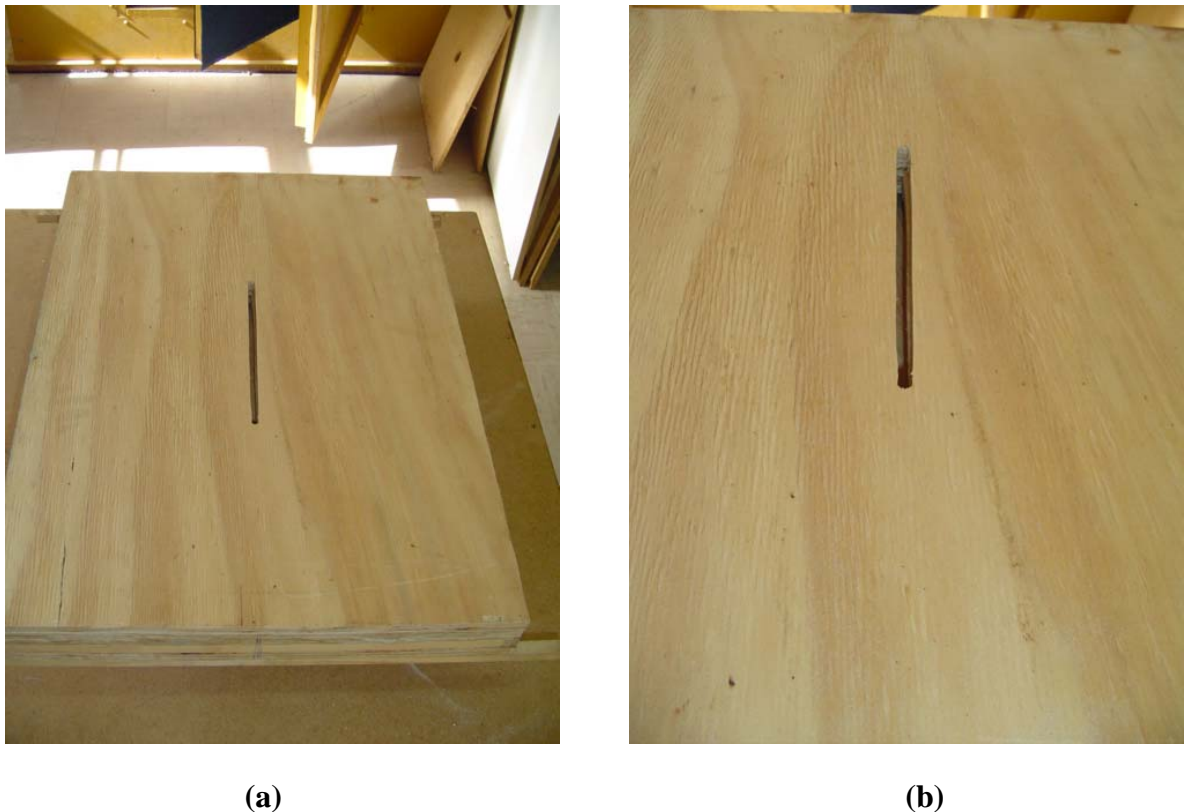


### 9.3.- Configuración de los Silenciadores.

- **Silenciador 1 Tapado.**

Con la finalidad de simular un conducto rígido, se realizan mediciones en donde se tapan los resonadores de Helmholtz del silenciador 1 con una placa de madera terciada de 15 [mm] de espesor (**Fig. 9.2.-**).

Las mediciones con esta configuración, permitirá comparar el efecto real de los resonadores respecto al conducto rígido.



**Fig. 9.2.-** Silenciador 1 tapado. (a) Vista general del silenciador 1 tapado con una placa de madera terciada de 15 [mm] cubriendo los resonadores. (b) Vista cercana del silenciador 1 tapado. Se observa la ranura por donde atraviesa el disco de sierra.

- **Silenciadores 1 y 2.**

Se realizan mediciones con el silenciador 1 y con el silenciador 2, ambos con sus resonadores totalmente descubiertos.



(a)



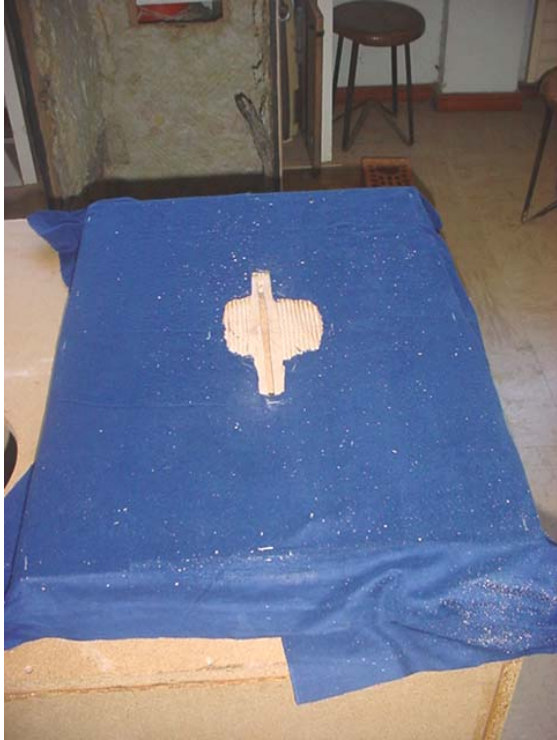
(b)

**Fig. 9.3.-** (a) Silenciador 1 con sus resonadores de Helmholtz descubiertos. (b) Silenciador 2 con sus resonadores de  $\lambda/4$  descubiertos.

- **Silenciadores 1 y 2 cubiertos con Tela.**

Para considerar el efecto que se produce al aumentar la parte resistiva de la impedancia, se realizan mediciones en donde se cubren los resonadores de los silenciadores 1 y 2 con una tela delgada (**Fig. 9.4.-**).





(a)



(b)

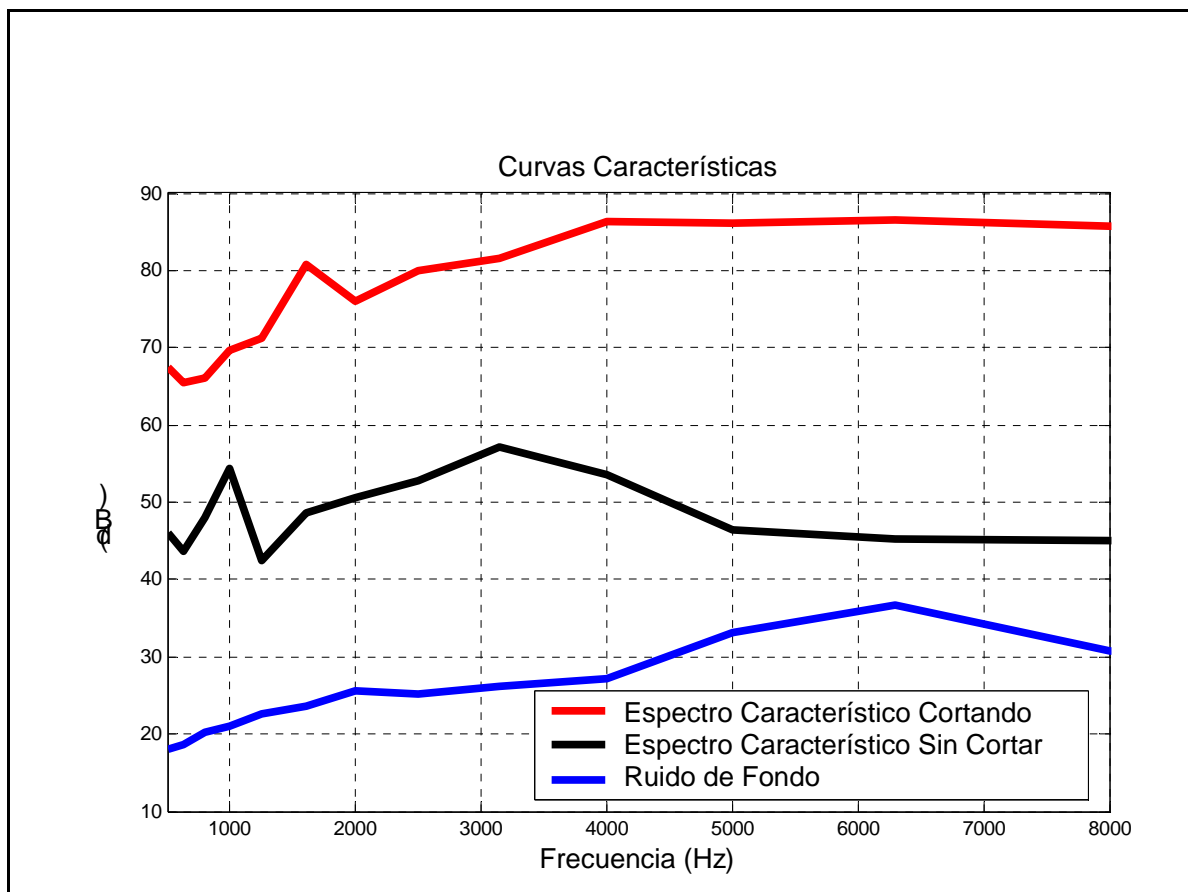
**Fig. 9.4.-** (a) Silenciador 1 con sus resonadores de Helmholtz cubiertos por una tela delgada. (b) Silenciador 2 con sus resonadores de  $\lambda/4$  cubiertos por una tela delgada.

## 9.4.- Resultados Obtenidos.

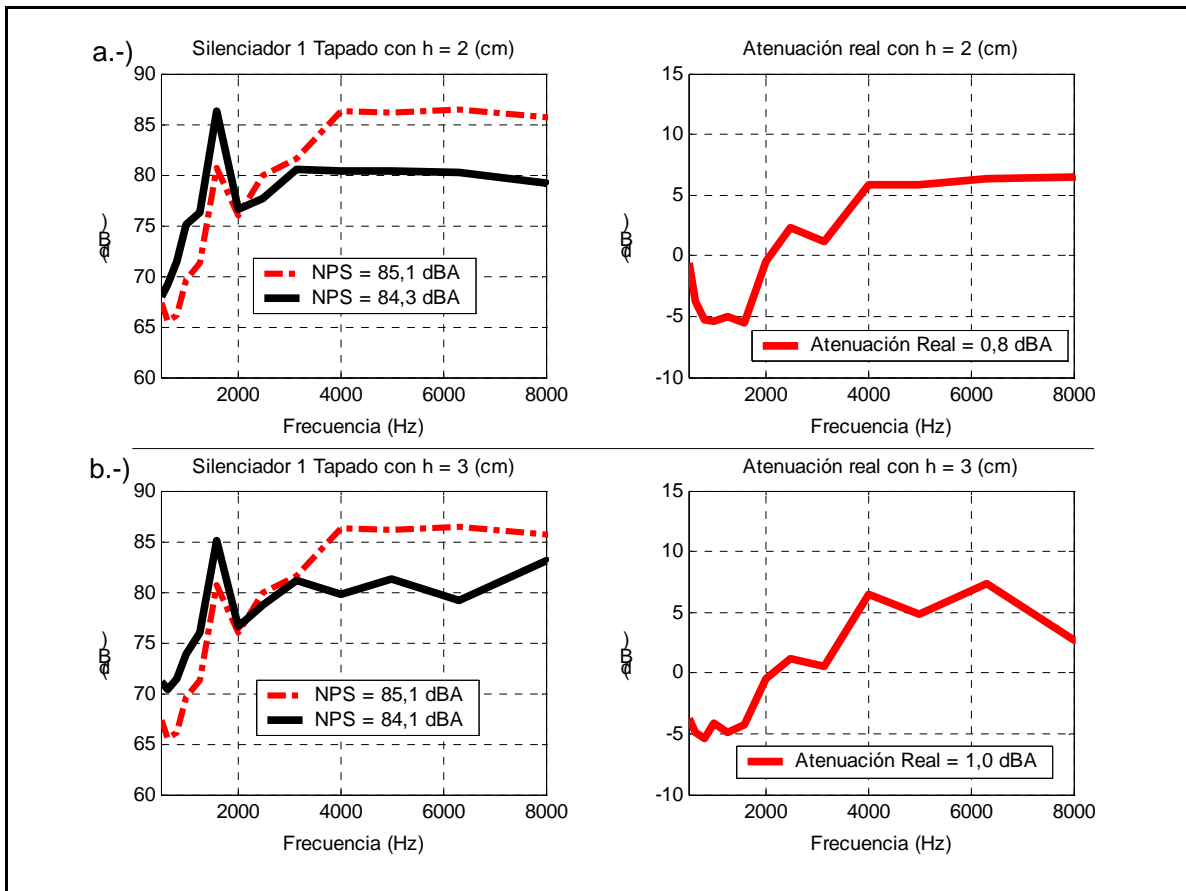
A continuación, se muestran las curvas obtenidas en las distintas mediciones realizadas al interior de la sala anecoica. En cada gráfica, se especifica el silenciador y configuración usada por el mismo, la altura ( $h$ ) a la que se ubicó el silenciador, el nivel de presión sonora [NPS] medido por el dosímetro Quest en dBA y respuesta lenta (Slow). Paralelamente, a cada gráfica, se mostrará la curva de atenuación real obtenida, esta resulta al hacer la diferencia entre el espectro característico medido al momento del corte sin silenciador alguno montado y la curva obtenida para cada configuración al momento del corte.

Para realizar las curvas comparativas en forma sencilla, se utilizo como referencia el mínimo valor de voltaje medido, en este set de mediciones ( $8,3609 \times 10^{-11} [V]$ ).

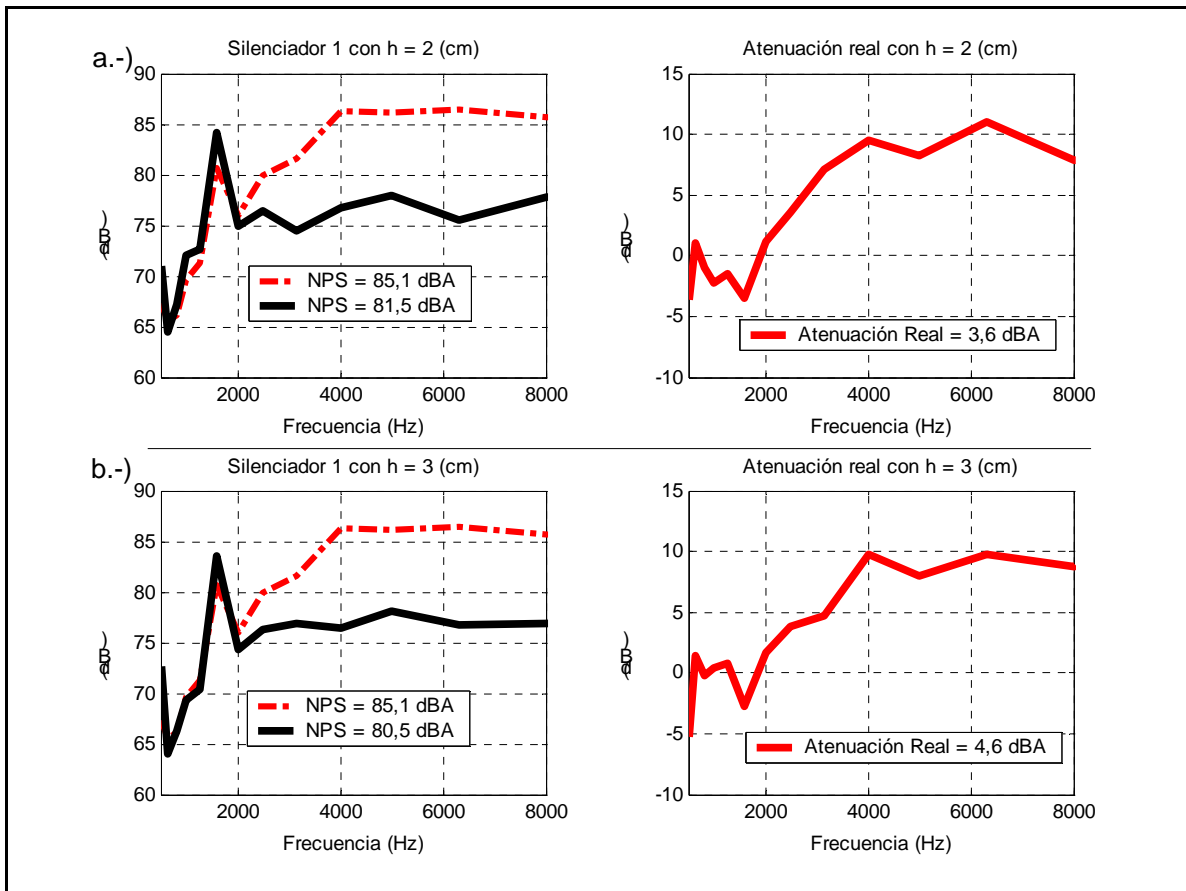
Las primeras curvas que se muestran (**Fig. 9.5.-**), corresponden a los espectros característicos medidos al interior de la sala anecoica, estas son: espectro característico de la sierra seccionadora de prueba al momento del corte, espectro característico de la sierra seccionadora de prueba funcionando pero sin realizar corte alguno y el ruido de fondo.



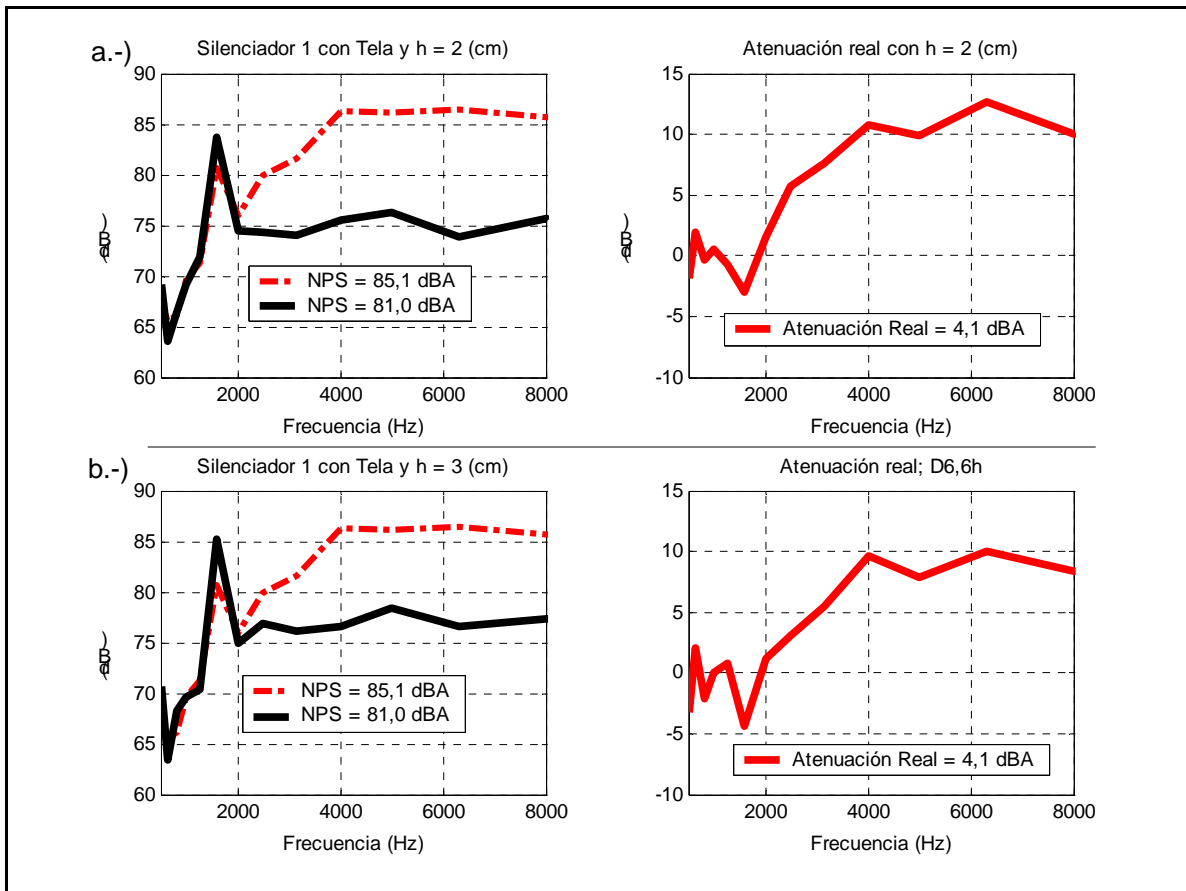
**Fig. 9.5.-** Curvas características al interior de sala anecoica. (—) Espectro característico al momento del corte. (—) Espectro característico de la sierra seccionadora de prueba sin realizar corte alguno. (—) Ruido de fondo al interior de la sala anecoica. El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $8,3609 \times 10^{-11} [V]$ ).



**Fig. 9.6.- Silenciador 1 tapado. (a)** (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 1 tapado y h igual a 2 [cm] (NPS = 84,3 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 0,8 dBA). **(b)** (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 1 tapado y h igual a 3 [cm] (NPS = 84,1 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 1,0 dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $8,3609 \times 10^{-11}$  [V]).



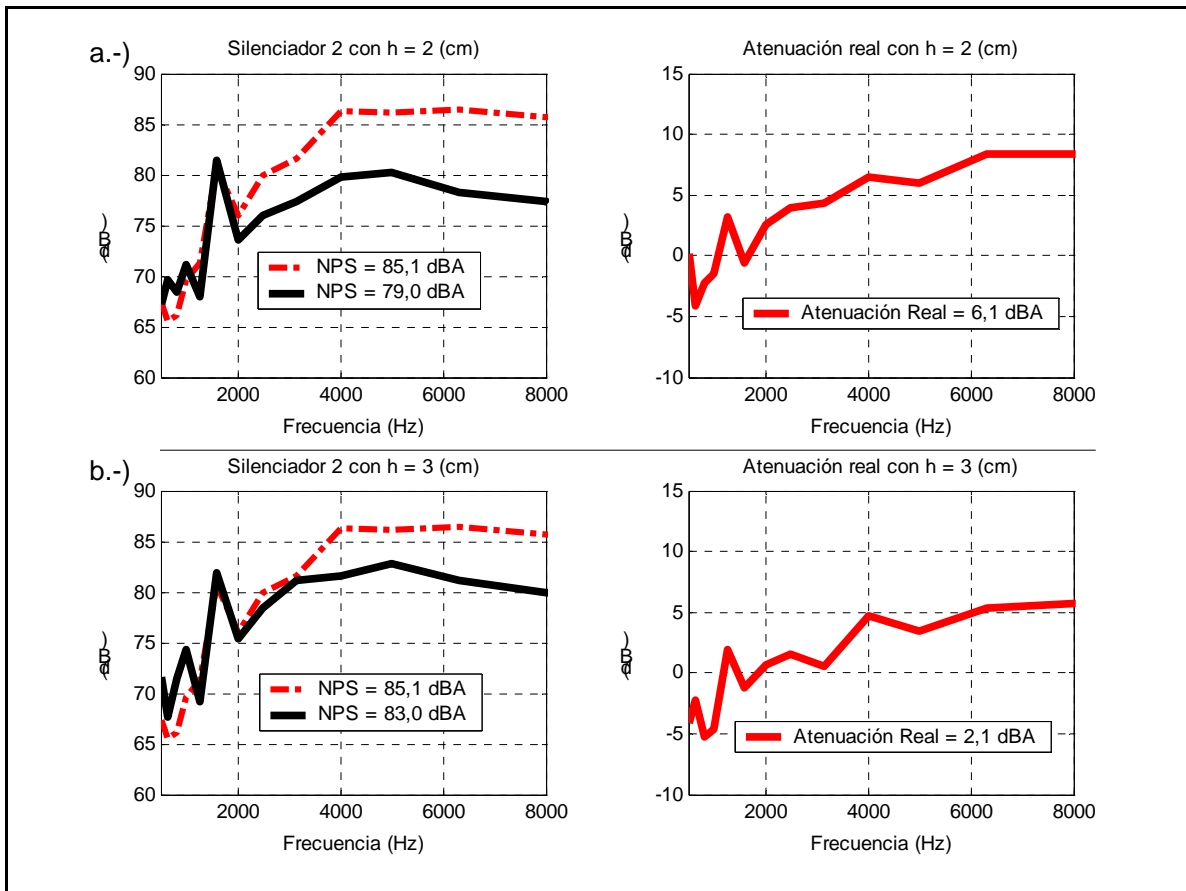
**Fig. 9.7.- Silenciador 1. (a) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 1 y h igual a 2 [cm] (NPS = 81,5 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 3,6 dBA). (b) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Espectro al momento del corte con el silenciador 1 y h igual a 3 [cm] (NPS = 80,5 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 4,6 dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $8,3609 \times 10^{-11} [V]$ ).**



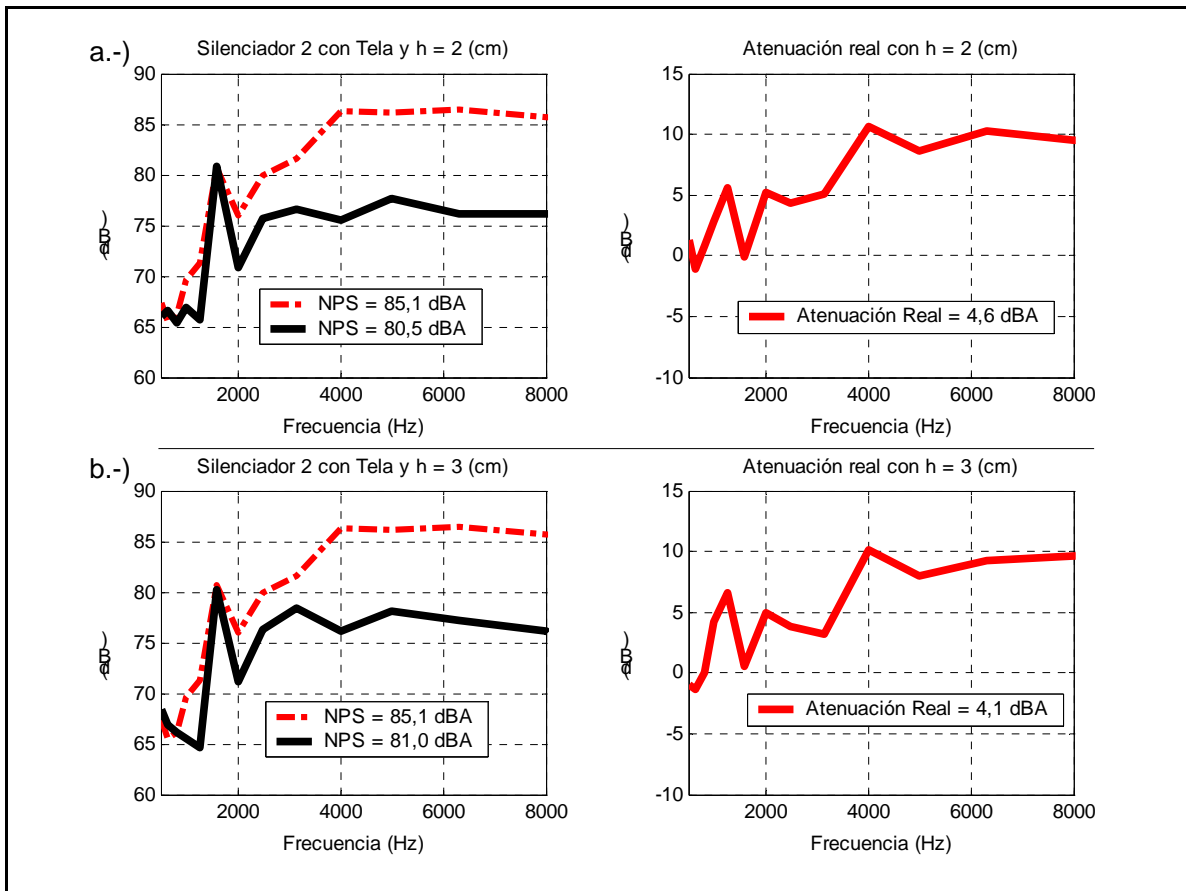
**Fig. 9.8.-** Silenciador 1 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico ( $NPS = 85,1$  dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 81,0$  dBA). (—) Curva de atenuación real ( $NPS = 4,1$  dBA). (b) (---) Espectro característico ( $NPS = 85,1$  dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 3 [cm] ( $NPS = 81,0$  dBA). (—) Curva de atenuación real ( $NPS = 4,1$  dBA).

El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido,

$$(8,3609 \times 10^{-11} [V]).$$



**Fig. 9.9.- Silenciador 2.** (a) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 2 y  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 79,0 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 6,1 dBA). (b) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 2 y  $h$  igual a 3 [cm] (NPS = 83,0 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 2,1 dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $8,3609 \times 10^{-11}$  [V]).



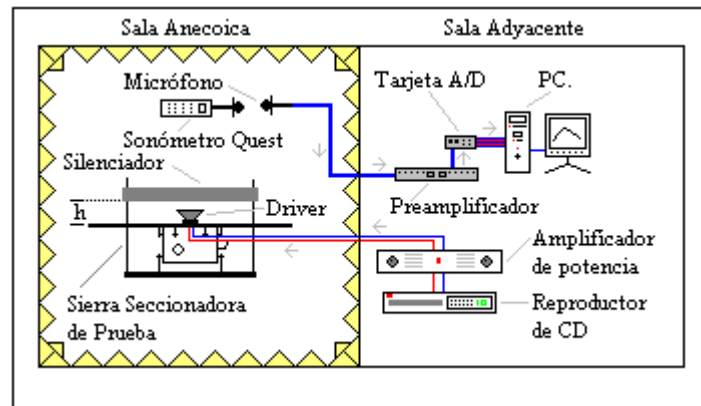
**Fig. 9.10.-** Silenciador 2 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 81,0 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 4,1 dBA). (b) (---) Espectro característico (NPS = 85,1 dBA). (—) Al momento del corte con el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 3 [cm] (NPS = 81,0 dBA). (—) Curva de atenuación real (NPS = 4,1 dBA).

El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido,

$$(8,3609 \times 10^{-11} [V]).$$

Al observar las atenuaciones reales obtenidas anteriormente, se puede ver que estas no presentan un comportamiento como el esperado para las atenuaciones calculadas, en donde se asumió un modelo bi-dimensional para el conducto o silenciador (**Capítulo 7.-**). No obstante, se puede asumir, que estas grandes diferencias fueron producto de las vibraciones en el montaje de la sierra seccionadora de prueba cuando esta realizó los cortes.

Al no contar con un instrumento para medir vibraciones, que permitiera cuantificar el efecto real del sonido radiado por la estructura completa al vibrar, se reemplazó el disco de sierra por una unidad de driver.



(a)



(b)



(c)

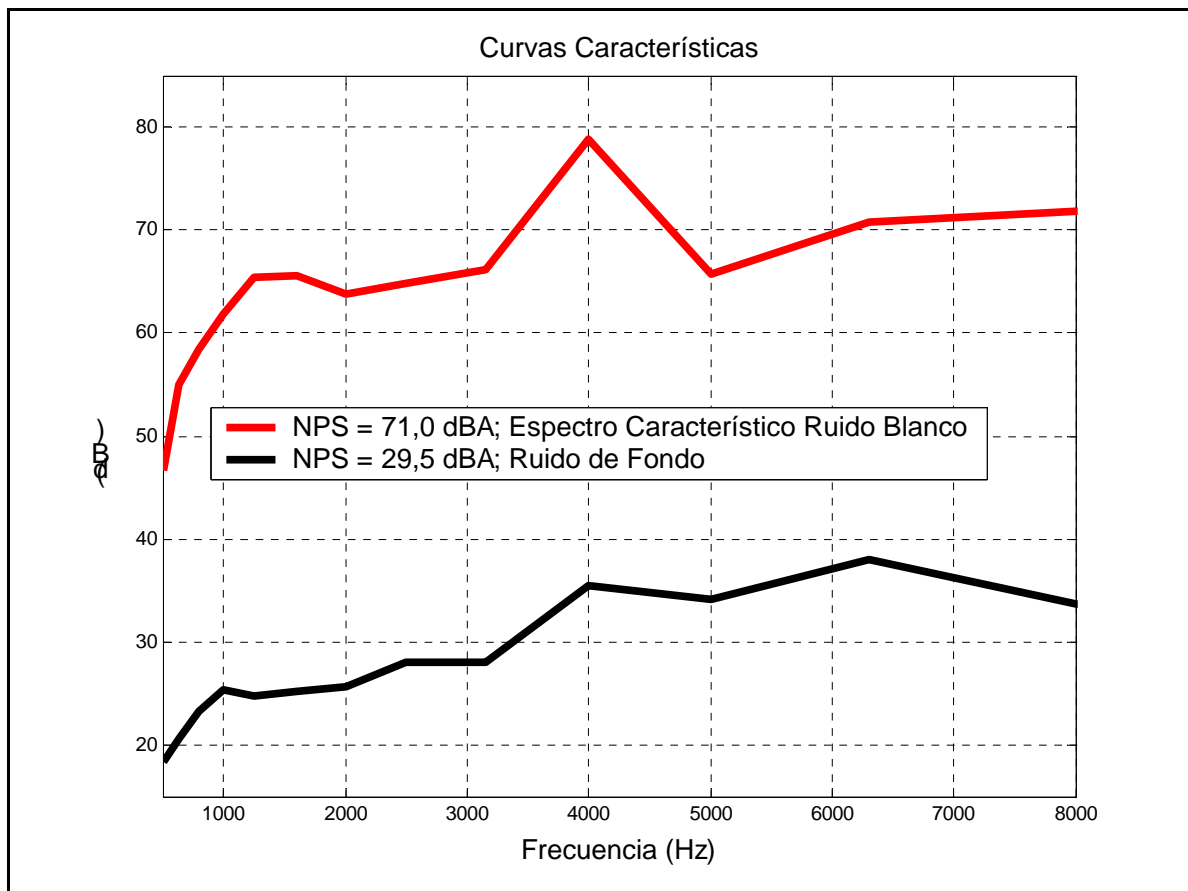
**Fig. 9.11.-** Sierra seccionadora de prueba con driver empotrado. (a) Bosquejo del montaje. (b) Se observa el driver en la superficie del mesón. (c) Se observa la parte posterior del driver empotrado justo donde se encontraba el disco de sierra.



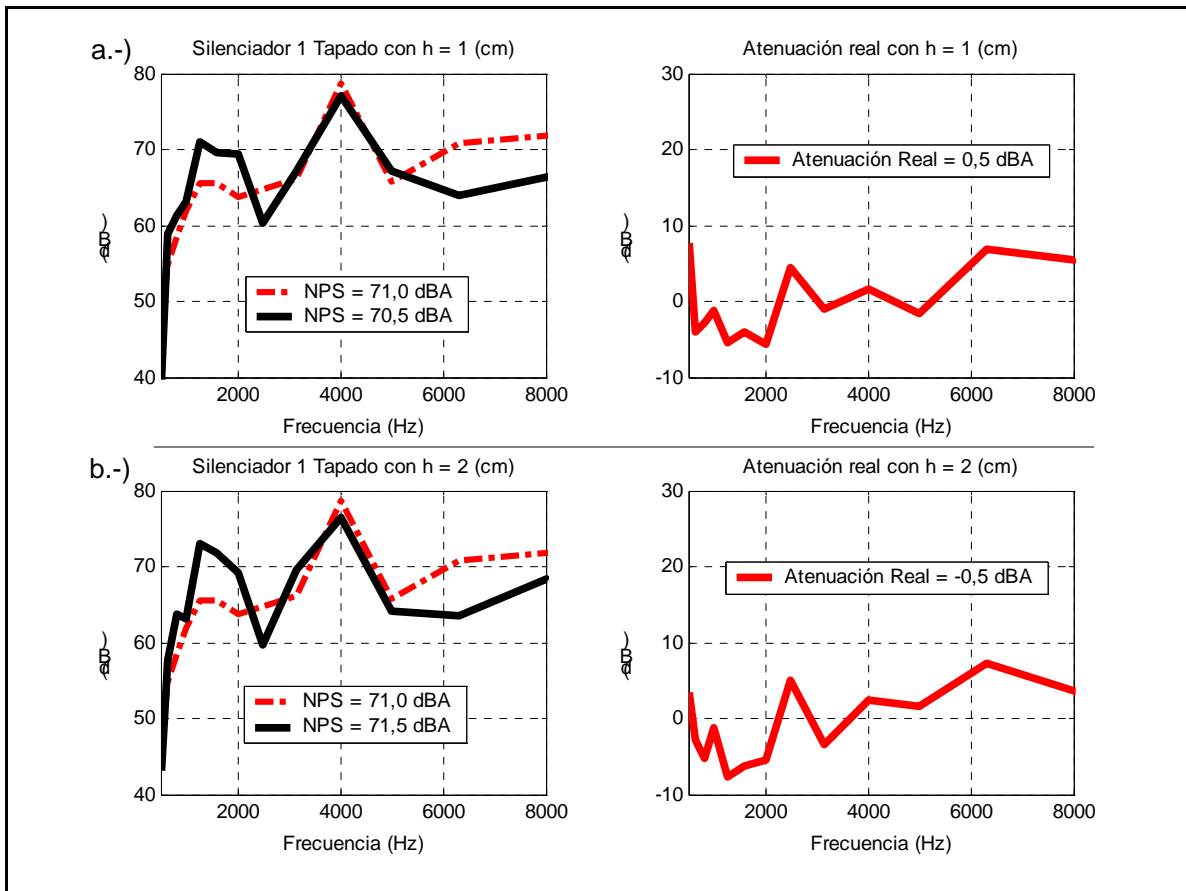
La unidad de driver se empotró en el mesón exactamente en el lugar por donde atravesaba el disco de sierra, al usar el driver como fuente sonora, se eliminaron casi completamente las vibraciones producidas anteriormente por el montaje de la sierra seccionadora de prueba al momento del corte. Se realizaron mediciones con el driver radiando ruido blanco y posteriormente radiando el sonido grabado de una sierra realizando un corte.

A continuación, se muestran las curvas obtenidas para las mediciones en donde se uso como fuente sonora una unidad de driver radiando ruido blanco. En cada gráfica, se especifica el silenciador y configuración usada por el mismo, la altura ( $h$ ) a que se ubicó el silenciador del mesón, el nivel de presión sonora [NPS] medido por el sonómetro Quest en dBA y respuesta lenta (Slow). Paralelamente a cada gráfica, se muestra la curva de atenuación real obtenida, esta resulta al hacer la diferencia entre el espectro característico del driver radiando ruido blanco sin silenciador alguno montado y la curva obtenida al insertar cada una de las distintas configuración para los silenciadores. Para realizar las curvas comparativas en forma sencilla, se utilizo como referencia el mínimo valor de voltaje medido ( $2,2139 \times 10^{-9} [V]$ ).

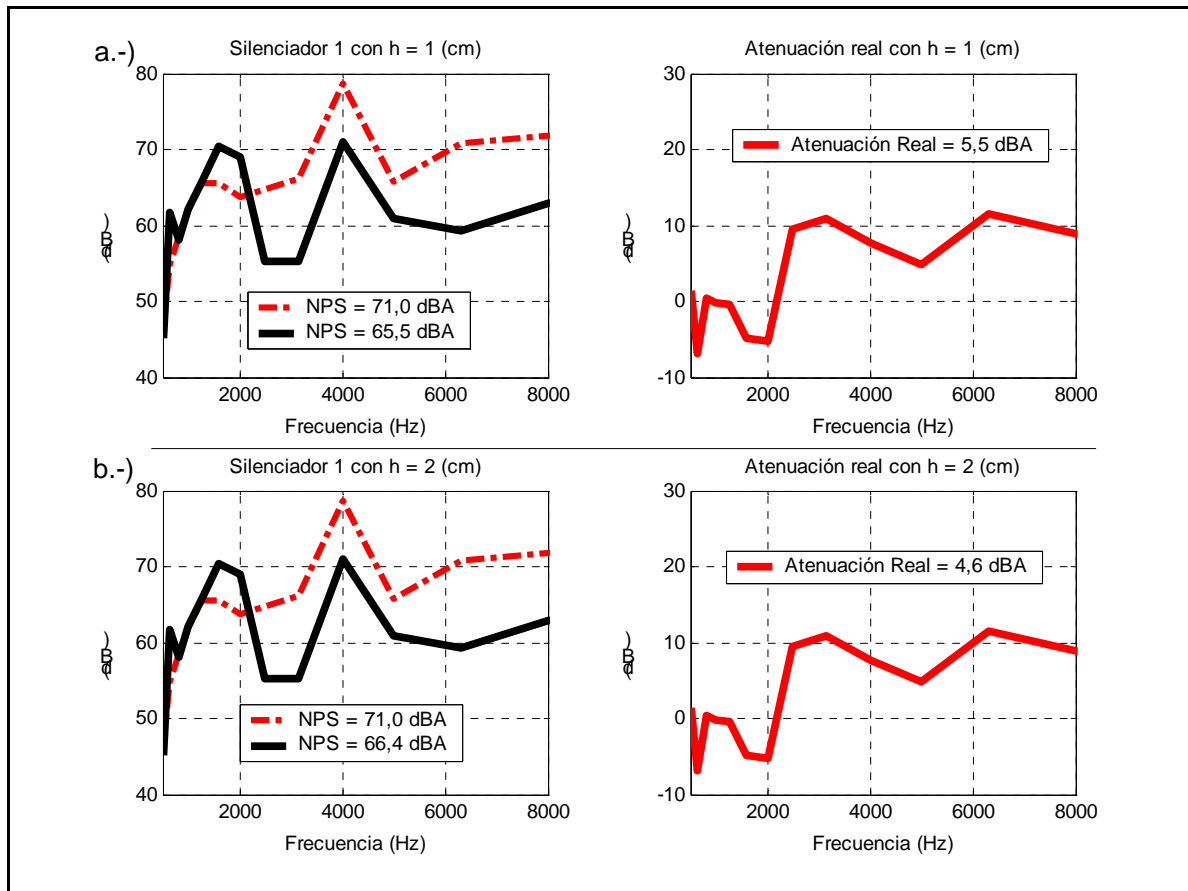
Las primeras curvas que se muestran (**Fig. 9.12.-**), corresponden a los espectros característicos medidos al interior de la sala anecoica, estas son: espectro característico del driver radiando ruido blanco sin silenciador alguno montado y el ruido de fondo medido.



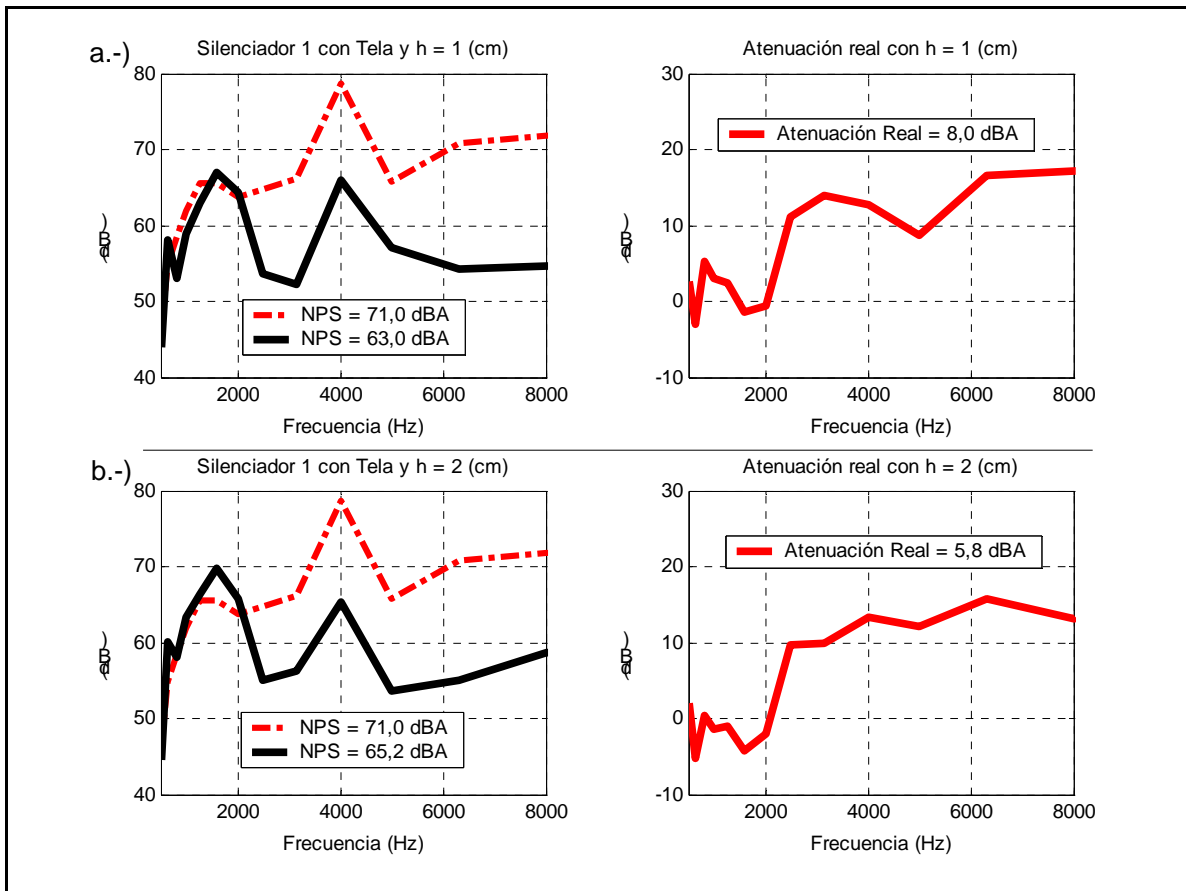
**Fig. 9.12.-** Curvas características al interior de sala anecoica. (—) Espectro característico del driver radiando ruido blanco. (—) Ruido de fondo obtenido. El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9} [V]$ ).



**Fig. 9.13.-** Silenciador 1 tapado. (a) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 tapado y  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 70,5$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 0,5$  dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 tapado y  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 71,5$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = -0,5$  dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9}$  [V]).

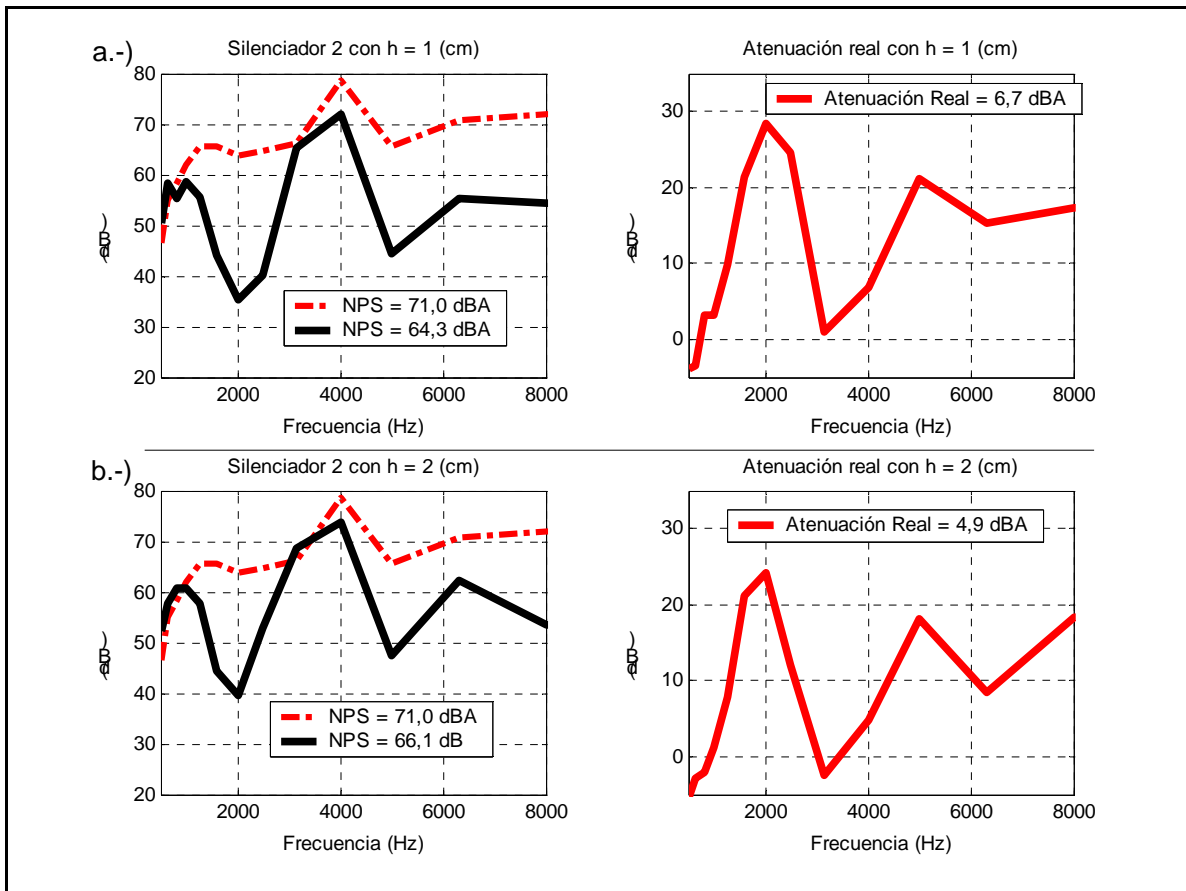


**Fig. 9.14.- Silenciador 1.** (a) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco (NPS = 71,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 con h igual a 1 [cm] (NPS = 65,5 dBA). (—) Curva de atenuación real con h igual a 1 [cm] (NPS = 5,5 dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco (NPS = 71,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 con h igual a 2 [cm] (NPS = 66,4 dBA). (—) Curva de atenuación real con h igual a 2 [cm] (NPS = 4,6 dBA). El valor de referencia, corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9}$  [V]).

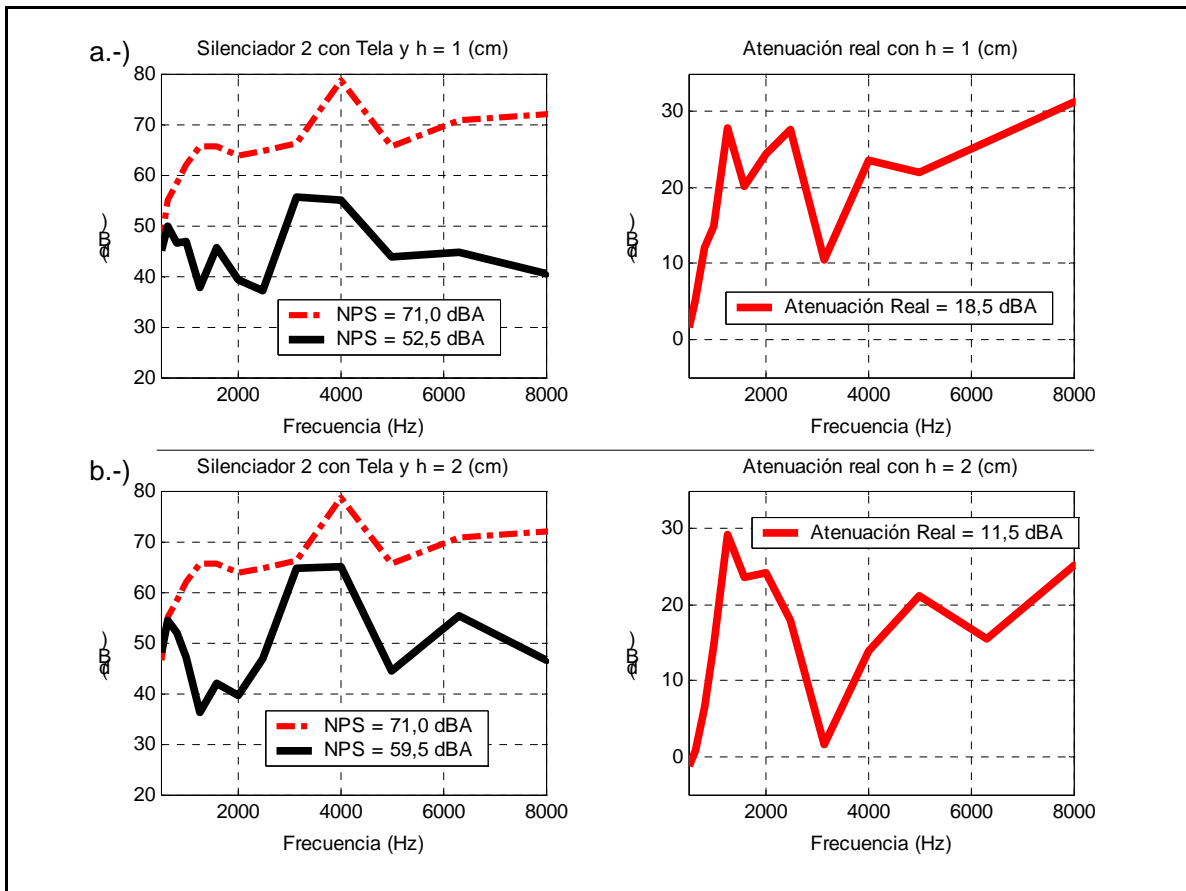


**Fig. 9.15.-** Silenciador 1 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco (NPS = 71,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 63,5 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 8,0 dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco (NPS = 71,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 65,2 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 5,8 dBA).

El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9}$  [V]).



**Fig. 9.16.-** Silenciador 2. (a) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 64,3$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 6,7$  dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 66,1$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 4,9$  dBA). El valor de referencia, es igual al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9}$  [V]).

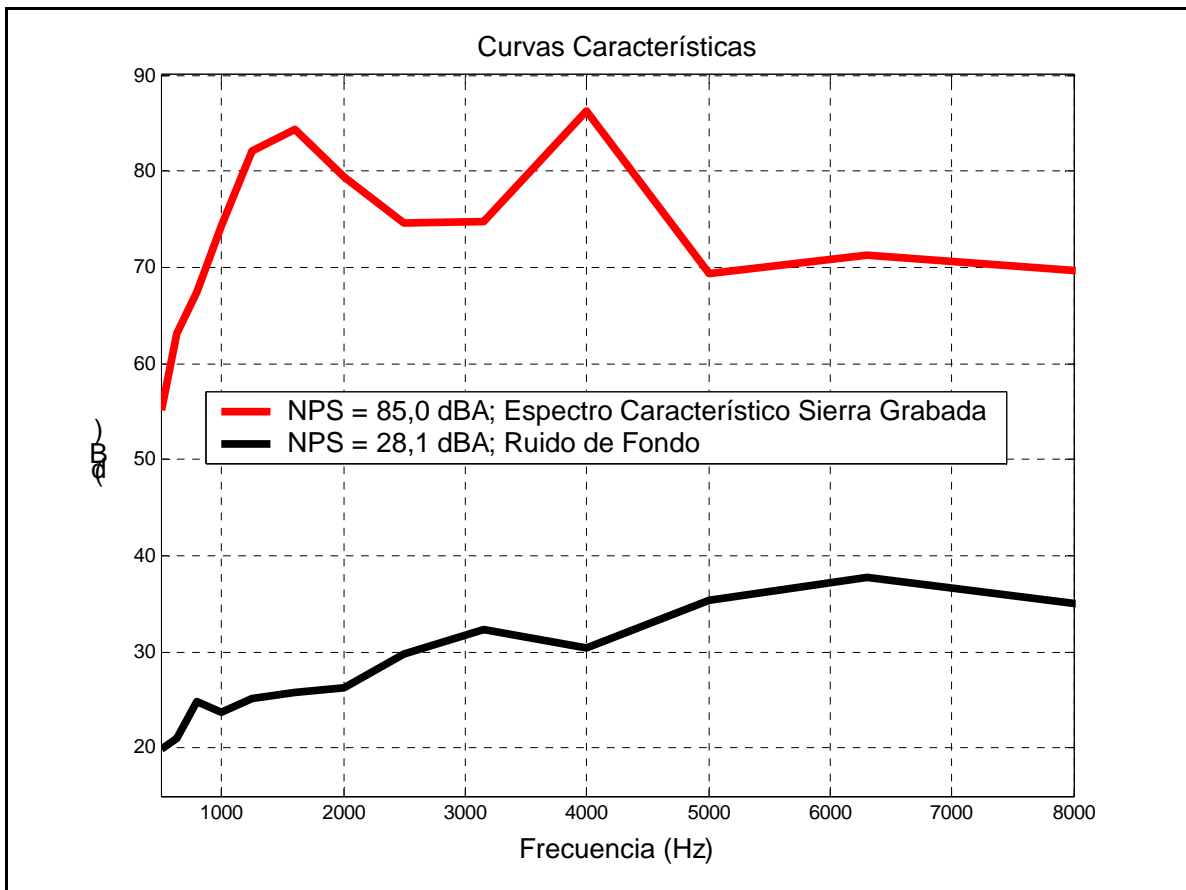


**Fig. 9.17.-** Silenciador 2 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 52,5$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 18,5$  dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando ruido blanco. ( $NPS = 71,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 59,5$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 11,5$  dBA).

El valor de referencia, es igual al valor mínimo de voltaje medido, ( $2,2139 \times 10^{-9}$  [V]).

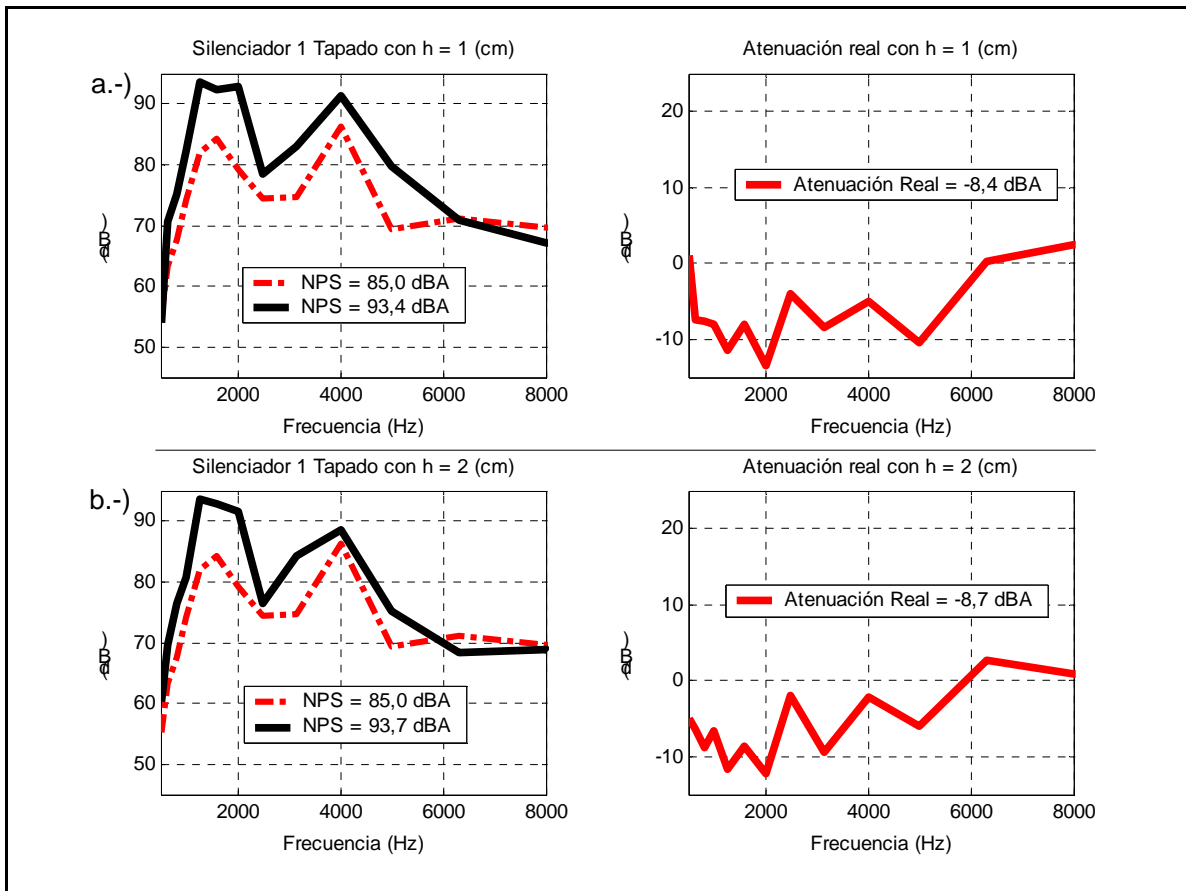
En seguida, se muestran las curvas obtenidas, cuando la unidad de driver radia la grabación de una sierra circular al momento del corte, en cada gráfica, se especifican los mismos datos que en las graficas anteriores. Para realizar las curvas comparativas en forma sencilla, se utilizo como referencia el mínimo valor de voltaje medido ( $4,779 \times 10^{-10} [V]$ ).

Las primeras curvas (**Fig. 9.18.-**), corresponden a los espectros característicos medidos al interior de la sala anecoica, estas son: espectro característico del driver radiando una sierra grabada sin silenciador alguno montado y el ruido de fondo.



**Fig. 9.18.-** Curvas características al interior de sala anecoica. (—) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada. (—) Ruido de fondo. El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $4,779 \times 10^{-10} [V]$ ).

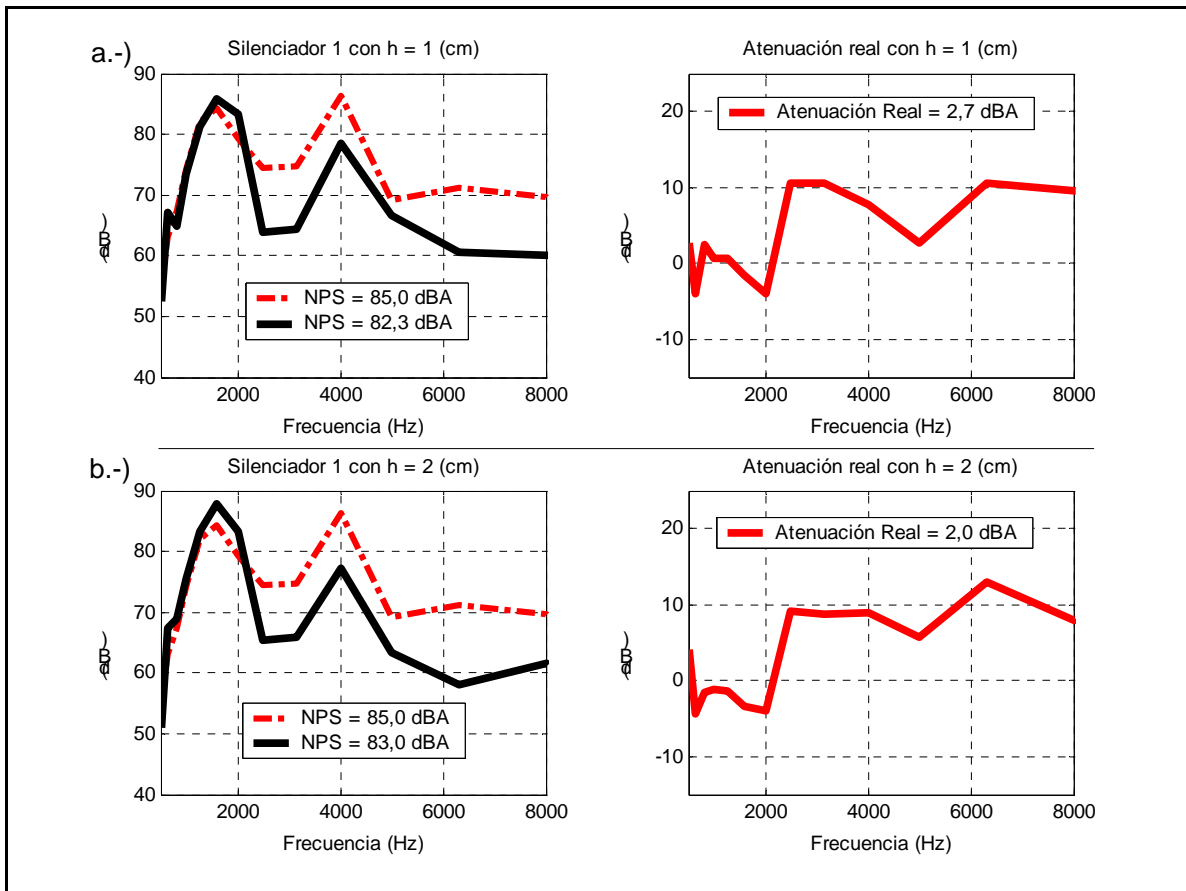




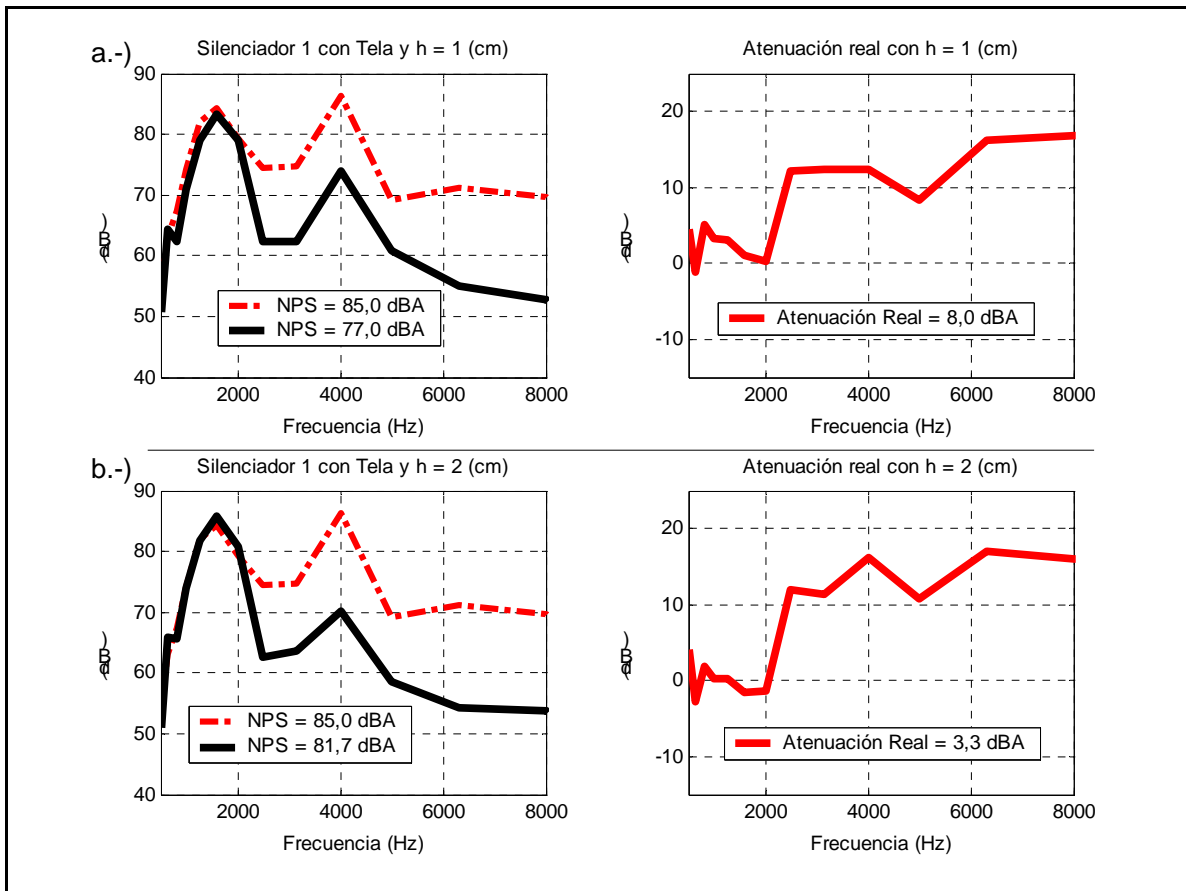
**Fig. 9.19.- Silenciador 1 tapado. (a)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 tapado y  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 93,4 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = -8,4 dBA). **(b)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 tapado y  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 93,7 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = -8,7 dBA).

El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido,

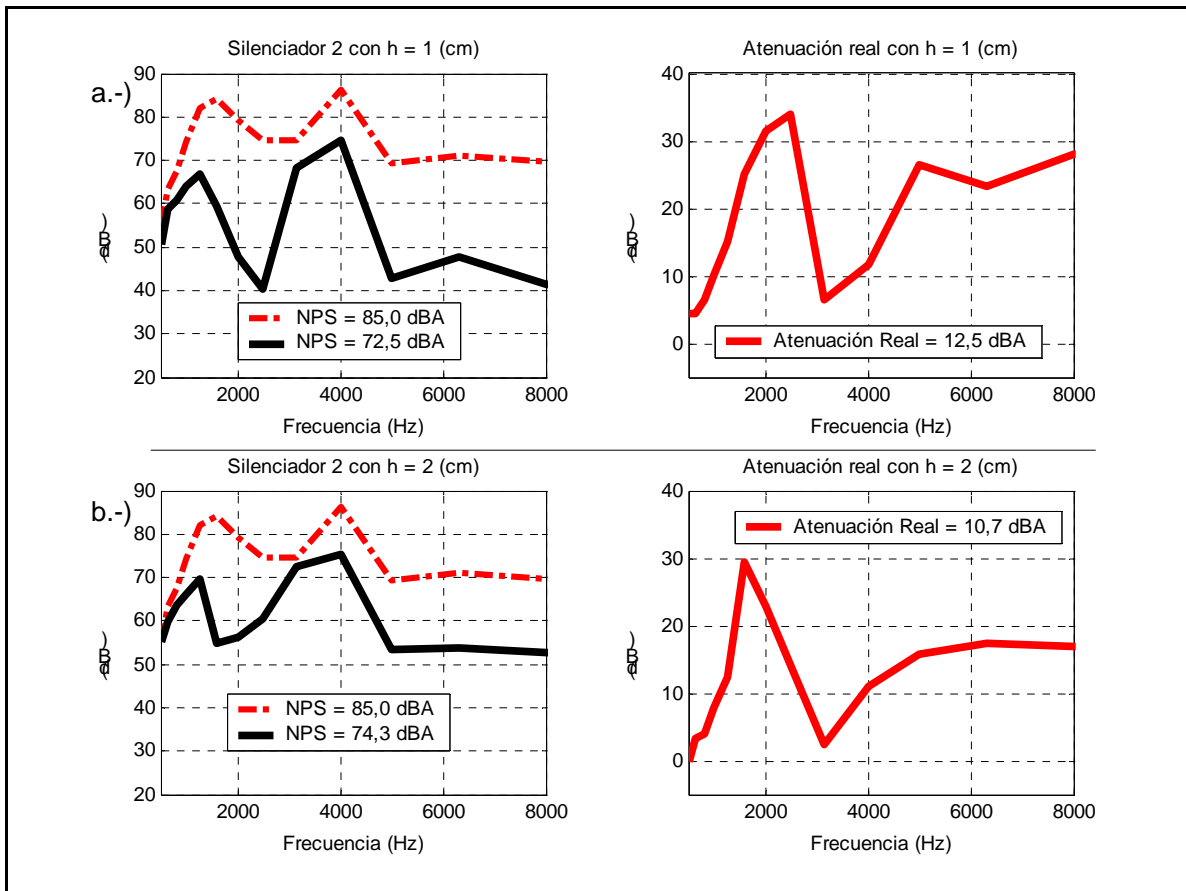
$$(4,779 \times 10^{-10} [\text{V}]).$$



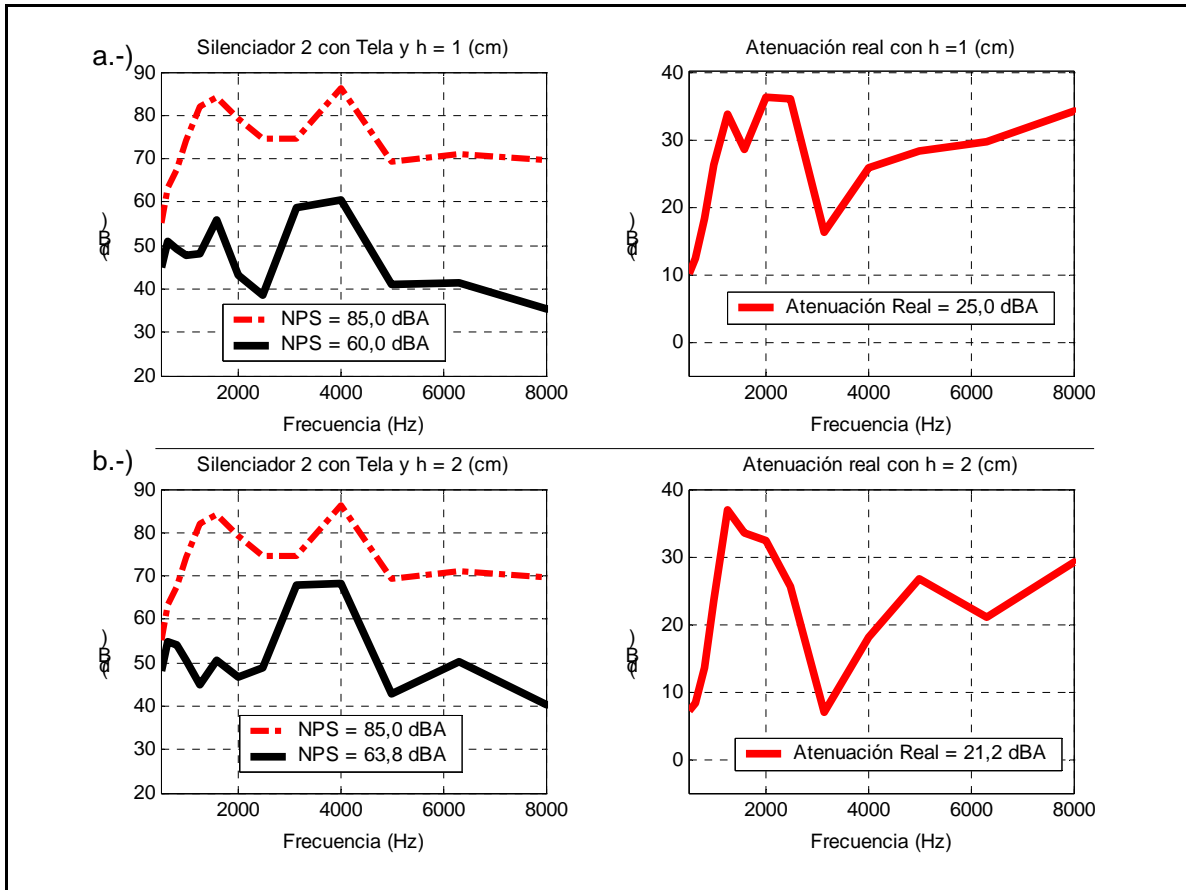
**Fig. 9.20.- Silenciador 1. (a)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 82,3 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 2,7 dBA). **(b)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 con  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 83,0 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 2,0 dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $4,779 \times 10^{-10}$  [V]).



**Fig. 9.21.-** Silenciador 1 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada. ( $NPS = 85,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 77,0$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 8,0$  dBA). (b) (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada ( $NPS = 85,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 1 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 81,7$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 3,3$  dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $4,779 \times 10^{-10}$  [V]).



**Fig. 9.22.- Silenciador 2. (a)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada ( $NPS = 85,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 72,5$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] ( $NPS = 12,5$  dBA). **(b)** (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada ( $NPS = 85,0$  dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 74,3$  dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] ( $NPS = 10,7$  dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $4,779 \times 10^{-10}$  [V]).



**Fig. 9.23.-** Silenciador 2 cubierto con tela. (a) (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 60,0 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 1 [cm] (NPS = 25,0 dBA) (b) (---) Espectro característico del driver radiando una sierra grabada (NPS = 85,0 dBA). (—) Espectro al insertar el silenciador 2 cubierto con tela y  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 63,8 dBA). (—) Curva de atenuación real con  $h$  igual a 2 [cm] (NPS = 21,2 dBA). El valor de referencia corresponde al valor mínimo de voltaje medido, ( $4,779 \times 10^{-10}$  [V]).

## 9.5.- Resumen resultados obtenidos.

A continuación, se presentan tablas resumen con los datos más relevantes de las mediciones obtenidas anteriormente.

<b>Fuente: Sierra Seccionadora de prueba al momento del corte.</b>			
<b>Configuración Silenciador.</b>	<b>Altura h [cm].</b>	<b>Atenuación [dB<sub>A</sub>].</b>	<b>Figura.</b>
Silenciador 1 tapado.	2	0,8	(9.6.a.-)
Silenciador 1.	2	3,6	(9.7.a.-)
Silenciador 2.	2	6,1	(9.9.a.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	2	4,1	(9.8.a.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	2	4,6	(9.10.a.-)
Silenciador 1 tapado.	3	1,0	(9.6.b.-)
Silenciador 1.	3	4,6	(9.7.b.-)
Silenciador 2.	3	2,1	(9.9.b.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	3	4,1	(9.8.b.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	3	4,1	(9.10.b.-)

**Tabla 9.1.-** Resumen de resultados obtenidos al utilizar la sierra seccionadora de prueba al momento del corte como fuente sonora.

<b>Fuente: Unidad de driver radiando ruido blanco.</b>			
<b>Configuración Silenciador.</b>	<b>Altura h [cm].</b>	<b>Atenuación [dB<sub>A</sub>].</b>	<b>Figura.</b>
Silenciador 1 tapado.	1	0,5	(9.13.a.-)
Silenciador 1.	1	5,5	(9.14.a.-)
Silenciador 2.	1	6,7	(9.16.a.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	1	8,0	(9.15.a.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	1	18,5	(9.17.a.-)
Silenciador 1 tapado.	2	-0,5	(9.13.b.-)
Silenciador 1.	2	4,6	(9.14.b.-)
Silenciador 2.	2	4,9	(9.16.b.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	2	5,8	(9.15.b.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	2	11,5	(9.17.b.-)

**Tabla 9.2.-** Resumen de resultados obtenidos al utilizar la unidad de driver radiando ruido blanco como fuente sonora.

<b>Fuente: Unidad de driver radiando una sierra grabada.</b>			
<b>Configuración Silenciador.</b>	<b>Altura h [cm].</b>	<b>Atenuación [dB<sub>A</sub>].</b>	<b>Figura.</b>
Silenciador 1 tapado.	1	-8,4	(9.19.a.-)
Silenciador 1.	1	2,7	(9.20.a.-)
Silenciador 2.	1	12,5	(9.22.a.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	1	8,0	(9.21.a.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	1	25,0	(9.23.a.-)
Silenciador 1 tapado.	2	-8,7	(9.19.b.-)
Silenciador 1.	2	2,0	(9.20.b.-)
Silenciador 2.	2	10,7	(9.22.b.-)
Silenciador 1 cubierto con tela.	2	3,3	(9.21.b.-)
Silenciador 2 cubierto con tela.	2	21,2	(9.23.b.-)

**Tabla 9.3.-** Resumen de resultados obtenidos al utilizar la unidad de driver radiando una sierra grabada como fuente sonora.

## 10.- Conclusiones.

En las atenuaciones logradas al insertar las distintas configuraciones de los silenciadores, no se obtienen resultados similares al modelado matemáticamente para un conducto o silenciador bi-dimensional. Para la sierra seccionadora de prueba al momento del corte, solo se lograron atenuaciones entre 3,6 [dB<sub>A</sub>] y 4,6 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 2 [cm], y entre 2,1 [dB<sub>A</sub>] a 4,6 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 3 [cm], las máximas atenuaciones no se producen en torno a la frecuencia esperada (1533 [Hz]).

Al utilizar la unidad de driver generando ruido blanco, se lograron atenuaciones entre 5,5 [dB<sub>A</sub>] y 18,5 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 1 [cm], y entre 4,6 [dB<sub>A</sub>] a 11,5 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 2 [cm], las máximas atenuaciones resultan del silenciador 2 sin tela y silenciador 2 cubierto con tela en cercanías a la frecuencia esperada (1533 [Hz]).

Al utilizar el driver generando el sonido de una sierra grabada, se lograron atenuaciones entre 2,7 [dB<sub>A</sub>] y 25 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 1 [cm], y entre 2 [dB<sub>A</sub>] a 21,2 [dB<sub>A</sub>] para un  $h$  igual a 2 [cm], las máximas atenuaciones resultan del silenciador 2 y silenciador 2 cubierto con tela en cercanías a la frecuencia esperada (1533 [Hz]).

El hecho de que los resultados al utilizar el driver en vez de la sierra real sean más congruentes con lo esperado aplicando la teoría de ductos confirma que el principal problema, es que al realizar el corte la vibración es transmitida a cada componente del sistema (sierra, mesón, silenciador, etc.) produciéndose un alto nivel de radiación por esa vía. Esta es la razón principal por la cual no se pudo atenuar el nivel de ruido emitido en forma eficiente mediante la técnica propuesta.

Para poder concluir con claridad respecto a la factibilidad de utilizar la técnica estudiada en una sierra real, se hace necesaria una evaluación detallada de la vibración producida en cada elemento del sistema. Solo de esa manera se puede analizar si es posible reducir los niveles de vibración. Lamentablemente por falta de equipamiento adecuado no fue posible realizar dicha evaluación.

Considerando los resultados al utilizar primero la sierra y luego el driver (eliminando el problema de vibración) se puede concluir que sería factible reducir los niveles de ruido emitidos por una sierra seccionadora vertical mediante la técnica



propuesta, solo si al mismo tiempo se logra controlar las vibraciones estructurales. Esto último, aunque se ve bastante difícil, podría ser tema de un futuro estudio.

# 11.- Bibliografía.

- [1] Catalogos Striebig Standard II, [www.striebeg.com](http://www.striebeg.com).
- [2] Barros José L, 2000, Kanalschalldämpfer mit ortsabhängigen Eigenschaften, Logos Verlag, Berlin. ISBN 3-89722-452-6.
- [3] Juan Aguilar. Fundamentos de la Acústica, apuntes del curso, Universidad Austral de Chile 1998.
- [4] Jorge Sommerhoff. Acondicionamiento en interior de salas, Universidad Austral de Chile 1989.
- [5] Beranek Leo L, 1969, Acústica, Buenos Aires, Hispano América S.A.
- [6] Kinsler Lawrence E, 1995, Fundamento de la Acústica, México, Limusa S.A.
- [7] Cremer L. Theorie der Luftschalldämpfung im Rechteckkanal mit schluckender Wand und das sich dabei ergebende höchste Dämpfungsmab. Acustica 3 (1953).
- [8] Operating Instructions and Safety Hints, Top Craft TTS720.
- [9] Test-Point User's Guide. Techniques and References, Vol. 2, 4<sup>a</sup> ed.
- [10] Keithley Metrabyte User's Guide. DAS-1800 HC/ST/HR Series.
- [11] Rodrigo Astudillo. "Diseño y Construcción de un Sistema de Medición de Coeficiente de Reflexión Complejo e Impedancia Acústica Especifica". Universidad Austral de Chile 2002.
- [12] Instructions for M-27 Noise Loggin Dosimeter Quest Technologies.
- [13] Instructions for Models 1900 and 2900 Integratin and Logging Sound Level Meter Quest Technologies.