



**UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ACÚSTICA**

*Profesor Patrocinante:*

*Dr. Ing. José Luis Barros*  
*Instituto de Acústica*  
*Universidad Austral de Chile*

*Profesores Informantes:*

*Víctor Hernán Poblete Ramírez*  
*Instituto de Acústica*  
*Universidad Austral de Chile*

*Jorge Cárdenas Mansilla*  
*Instituto de Acústica*  
*Universidad Austral de Chile*

**DISEÑO DE 5 MÓDULOS INTERACTIVOS PARA ENSEÑAR**  
**PRINCIPIOS BÁSICOS DE ACÚSTICA**

*Tesis presentada para optar al grado*  
*de Licenciado en Acústica y al Título*  
*profesional de Ingeniero Acústico*

**JUAN PABLO CHAPARRO ESCOBAR**  
**VALDIVIA – CHILE**  
**Junio 2003**

*A mi mama que siempre estuvo ahí  
a pesar de todo.  
A Nana y Carlos por ser más  
que mis hermanos.  
A Betty por llegar cuando era.  
A mis amigos por no dejarme nunca solo.*

## **RESUMEN**

Se diseñaron cinco módulos interactivos para que se construyan y funcionen en las instalaciones del museo de ciencia interactivo Maloka, en la ciudad de Bogotá, los cuales enseñan y demuestran los conceptos de direccionalidad del sonido, absorción y reflexión de la energía sonora, transmisión de sonido a través de placas delgadas, efecto Hass, efecto de fiesta de cóctel, enmascaramiento, ubicación de la fuente sonora y relación entre el sonido y las imágenes que este nos puede crear, a personas que no tienen ningún conocimiento de la materia.

El trabajo comprende una revisión teórica de los fenómenos acústicos y psicoacústicos utilizados, la elaboración de planos en autocad, la simulación del funcionamiento de los módulos, utilizando el programa computacional 3D studio max V 4.2 y un resumen del proceso del trabajo con Maloka, que tuvo como resultado la aprobación para la construcción de 4 de los 5 módulos propuestos.

Se anexan copia del proyecto presentado a Maloka, las características de los materiales para construcción de uno de los módulos y las mediciones de ruido de fondo en el museo.

## **ABSTRACT**

Five interactive modules were designed to be constructed in order to work on the interactive science museum Maloka, in Bogotá (Colombia). Such modules teach and prove the concepts of directionality of sound, absorption and reflection of sound energy, sound transmission through thin plates, Hass effect, cocktail party effect, sound masking, sound source localization, relationship between sound and the image that can be generated. All these modules are being conceived for the understanding of people who does not have any knowledge about this area of science.

This work includes a theoretical review of the acoustic and psychoacoustic phenomena used in the design, the processing of the Autocad blueprints, the explanation of the physical concepts in a way to be understandable for common readers. It also includes the simulation of the operation of the modules using the 3D studio max V4.2 software, and a summary of the work process carried out for Maloka, which had the approval for the construction of four of the five modules.

A copy of the project presented to Maloka is annexed, including the characteristic of the materials for construction and the background noises measurements for one of the modules.

## CONTENIDOS

<b>INTRODUCCION</b>	VI
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	VII
<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	VII
<b>1. MODULO DE DIRECCIONALIDAD DEL SONIDO</b>	1
1.1. – MARCO TEORICO	1
1.1.1. – Propiedades físicas del sonido	1
1.1.1.2. – Presión Sonora	1
1.1.1.3. - Velocidad de partícula	3
1.1.1.4. – Intensidad Sonora	3
1.1.1.4. - Densidad de energía	4
1.1.1.6. - Potencia Sonora	7
1.1.1.7. – Indice y factor de directividad.	8
1.1.2. – Cajas acústicas	9
1.2. – DISEÑO	13
1.2.1. – Objetivo	13
1.2.2. – Proceso	13
1.2.3. – Funcionamiento de módulo	19
<b>2. MODULO DE ABSORCION Y REFLEXION DE LA ENERGIA SONORA</b>	20
2.1. - MARCO TEORICO	20
2.1.1. – Absorción del sonido	20
2.1.2. – Cuantificación de la absorción	21
2.1.3. – Absortores	24
2.1.4. – Reverberación y tiempo de reverberación	25
2.1.5. – Modos normales de vibración	27
2.2. – DISEÑO	30
2.2.1. – Objetivo	30
2.2.2. – Proceso	30
2.2.3. – Funcionamiento del módulo	35
<b>3. MODULO DE TRANSMISION DE ENERGIA SONORA A TRAVES DE LAS PAREDES</b>	37
3.1. - MARCO TEORICO	37
3.1.1 – Interacción de una onda incidente sobre un panel infinito.	37
3.1.2 – Cuantificación de la pérdida por transmisión inducida por paneles infinitos.	40
3.1.3. – Paneles finitos	44
3.1.4. – Pérdida por transmisión de materiales porosos	45
3.2. - DISEÑO	47
3.2.1. – Objetivo	47
3.2.2. – Proceso	47
3.2.3. – Funcionamiento del módulo	52

<b>4. MODULO DE ABSORCION - TRANSMISION - REFLEXION DE LA ENERGIA SONORA</b>	53
4.1. - MARCO TEORICO	53
4.1.1. – Ondas sonoras al interior de tubos abiertos	53
4.2. - DISEÑO	55
4.2.1. – Objetivo	55
4.2.2. – Proceso	56
4.2.3. – Funcionamiento del modulo	58
<b>5. MODULO DE PSICOACUSTICA</b>	62
5.1. - MARCO TEORICO	62
5.1.1. – El sistema auditivo humano	62
5.1.2. – Relación sonido imagen	65
5.1.3. – Efecto Haas	65
5.1.4. – Enmascaramiento	69
5.1.5. – Efecto de fiesta de cóctel	73
5.1.6. – Ubicación de la fuente sonora	74
5.2. – DISEÑO	76
5.2.1. – Objetivo	76
5.2.2. – Proceso	76
5.2.2.1. – Relación sonido imagen	78
5.2.2.2. - Efecto Hass o de precedencia	79
5.2.2.3. – Enmascaramiento	80
5.2.2.4. - Efecto de fiesta de cóctel	81
5.2.2.5. - Ubicación de la fuente sonora	82
5.2.1 – Funcionamiento del módulo	82
<b>6. TRABAJO CON MALOKA</b>	83
6.1. – PRESENTACION DEL PROYECTO	83
6.2. – MONTAJE	84
<b>CONCLUSIONES</b>	85
<b>ANEXO 1</b>	87
<b>ANEXO 2</b>	107
<b>ANEXO 3</b>	117
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	123
<b>REFERENCIAS</b>	124
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	125

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que debe enfrentar el ingeniero acústico en el ejercicio de su labor, es el desconocimiento del público en general de la actividad que desempeña. Esto crea la necesidad de educar a la gente en todos los temas relacionados con el ejercicio de su profesión. Este problema es aún mayor en países donde la carrera de ingeniería acústica no existe, como es el caso de Colombia.

Ante esta problemática, cuya solución requiere de un prolongado trabajo por parte de quienes nos dedicamos a esta rama de la ingeniería, surge la posibilidad de comenzar a educar a los niños, jóvenes y adultos por medio de un medio masivo como lo es un museo de ciencia interactivo.

Este documento es el compendio del proceso de diseño y propuesta de construcción de cinco módulos interactivos, para enseñar y demostrar principios básicos de acústica, al museo de ciencia Maloka.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar 5 módulos interactivos que enseñan y demuestran principios básicos de acústica a personas sin ningún conocimiento de la materia.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar cinco módulos interactivos para enseñar y demostrar los fenómenos de direccionalidad del sonido, absorción y reflexión de la energía sonora, transmisión de sonido a través de placas delgadas, efecto Hass, efecto de fiesta de cóctel, enmascaramiento, ubicación de la fuente sonora y relación entre el sonido y las imágenes que este nos puede crear.
- Presentar al museo de ciencia interactivo MALOKA un proyecto para el montaje de los módulos en sus instalaciones y conseguir su aprobación.

## 1 MODULO DE DIRECCIONALIDAD DEL SONIDO

### 1.1. – Marco teórico

#### 1.1.1. – Propiedades físicas del sonido <sup>[2][6]</sup>

Sonido es como denominamos la percepción que tenemos de una forma de movimiento de las partículas bajo ciertas condiciones determinadas. En general se define el sonido como una perturbación que se propaga en un medio elástico causando variaciones periódicas de presión y desplazamiento o variación de la velocidad de desplazamiento en las partículas que conforman dicho medio.

Esta perturbación produce cambios de presión y densidad en el medio, desplazamiento y aceleración de las partículas que lo conforman, variaciones de temperatura, y como en cualquier proceso mecánico se produce un intercambio de energía debido al movimiento generado. A continuación se definen estos parámetros y se establecen las relaciones entre ellos.

#### 1.1.1.2. – Presión Sonora

Vamos a analizar que pasa con un fluido como el aire, cuando una onda sonora se propaga en él. Para esto supongamos que tenemos un volumen de aire infinitesimal pero lo suficientemente grande, con respecto al tamaño de las moléculas, como para considerarlo como un solo cuerpo. Antes de que comience la perturbación, el volumen de aire se encuentra a una presión inicial,  $p_o$  que en condiciones normales tiene un valor de  $10^5$  [Pa]. Cuando la perturbación alcanza una de las caras de nuestro volumen de aire, supongamos en dirección perpendicular a la

superficie del volumen, las partículas que están en su frontera se desplazan generando una fuerza sobre el área de una de las caras del volumen, produciendo un cambio de presión en ese punto. Esta variación de presión con respecto a la presión inicial, media en un instante  $t$  se denomina *presión sonora instantánea* ( $p(t)$ ).

Sin importar la dirección en que se propague el sonido, siempre existirá una componente normal a alguna de las superficies del volumen, por lo que el análisis anterior es válido sin importar la trayectoria de la onda sonora. Siendo el aire un medio isotrópico y homogéneo, podemos suponer que el comportamiento será igual para todas las partículas que lo conforman (se asume que el volumen infinitesimal es igual al volumen de la partícula)

La *presión sonora eficaz* ( $p$ ) en un punto es el valor cuadrático medio de la presión instantánea en un intervalo de tiempo en el punto determinado.

Como se dijo anteriormente esta variación de presión es periódica y el número de variaciones por segundo se denomina frecuencia y se mide en Hertz (Hz).

La mínima variación de presión que puede percibir el oído humano es de 20 [ $\mu\text{Pa}$ ] y la máxima antes de generar daño auditivo permanente es de 100 [Pa]. (El daño auditivo también depende del tiempo de exposición al sonido y varía con la frecuencia. Este valor dado aquí es como referencia). Debido a que el rango de valores a manejar es bastante amplio y a que el oído humano responde a las variaciones de presión en forma logarítmica, se utilizan los decibels (dB) para medirlas, los cuales se definen como el logaritmo base 10 de la relación entre dos potencias.

Para medir las variaciones de presión sonora de manera que represente el comportamiento del oído humano se define el nivel de presión sonora como:

$$NPS = 10 \log \left( \frac{p_{rms}^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB} \quad (1.1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} P_{\text{rms}} &: \text{presión sonora eficaz} \\ P_{\text{ref}} &: 2 \times 10^{-5} \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

Se puede apreciar como el nivel de presión sonora es nulo cuando  $p$  es igual a 20 [ $\mu\text{Pa}$ ], que es la mínima variación de presión que detecta el oído humano.

### 1.1.1.3.- Velocidad de partícula

Siguiendo con nuestro análisis anterior, la propagación de la onda sonora produce un desplazamiento de las partículas del medio. El valor de esta velocidad con respecto al movimiento del medio considerado como una unidad, medido en un punto específico, se denomina *velocidad instantánea de partículas* ( $u(t)$ ) y se mide en metros por segundo. Si medimos la velocidad de instantánea de partícula en un intervalo de tiempo y calculamos su valor cuadrático medio obtenemos la velocidad eficaz de las partículas ( $u$ ).

### 1.1.1.4. – Intensidad Sonora

Se define la intensidad sonora como el valor medio de la velocidad de transmisión de la energía, a través del área unitaria perpendicular a la dirección considerada en un punto dado; la unidad en sistema MKS es [ $\text{Watt/m}^2$ ]. En otras palabras es la cantidad de energía por unidad de tiempo por unidad de área.

La intensidad sonora ( $\vec{I}$ ) es una cantidad vectorial que tiene magnitud y dirección. Para un punto determinado, considerando la energía producida por la presión sonora, podemos deducir una expresión para la intensidad de la siguiente forma:

$$I(\vec{r}, t) = \frac{dE}{dA \cdot dt} \quad (1.2)$$

Cómo 
$$dE = F_r \cdot d\vec{r} \quad (1.3)$$

Entonces 
$$\vec{I}(\vec{r}, t) = \frac{F_r}{dA} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1.4)$$

De ahí obtenemos 
$$\vec{I}(\vec{r}, t) = p(\vec{r}, t) \cdot \vec{u}(\vec{r}, t) \quad (1.5)$$

Debido a la variación con el tiempo, habitualmente se mide la intensidad promedio ( $\bar{I}(\vec{r})$ )

$$\bar{I}(\vec{r}) = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(\vec{r}, t) \cdot \vec{u}(\vec{r}, t) \cdot dt \quad (1.6)$$

Donde:

T: Periodo de medición

Al igual que la presión sonora, la intensidad se suele expresar en escala logarítmica con respecto a un valor de referencia como muestra la expresión 1.7.

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_o}\right) \quad (dB) \quad (1.7)$$

Donde:

I: Intensidad sonora [Watts/m<sup>2</sup>]

I<sub>o</sub>: 10<sup>-12</sup> [Watts/m<sup>2</sup>]

#### 1.1.1.4.- Densidad de energía

Es la cantidad de energía sonora contenida en una parte infinitesimal dada del medio dividida por el volumen de esa misma parte. La unidad es [Watt-s/m<sup>3</sup>]. Este útil concepto, entre otras cosas, nos permite analizar la distribución de energía producida por una fuente.

Debido a que tanto el oído, como la mayor parte de medidores de niveles sonoros, responden a la presión sonora eficaz, establecer una relación entre estas dos variables, nos entrega una herramienta muy útil para analizar el comportamiento del sonido.

Para encontrar esta relación debemos tener en cuenta que cuando una onda sonora se propaga en un fluido, la energía que transporta esta conformada por dos partes: la energía cinética debida al movimiento de las partículas y la energía potencial del trabajo realizado por la presión acústica.

Ahora, volviendo a nuestro análisis de la partícula de fluido, sabemos que cuando no existe perturbación del medio, tiene un volumen  $V_o$  y se mueve con el fluido a una velocidad  $\bar{u}$ ; entonces podemos calcular la energía cinética asociada con este movimiento como se muestra en la expresión 1.8

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho_o \cdot \bar{u}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{V_o} \cdot \bar{u}^2 \quad (1.8)$$

Donde:

$\rho_o$  : Densidad específica del aire (1.18 [Kg/m<sup>3</sup>])

Y la energía potencial  $E_p$ , asociada a un cambio de volumen de  $V_o$  a  $V$ , suponiendo que es la única fuerza que actúa sobre el mismo, como:

$$E_p = -\frac{1}{V_o} \cdot \int_{V_o}^V p dV \quad (1.9)$$

Al analizar la expresión 1.9 nos damos cuenta que una disminución de volumen provoca un aumento en la energía potencial. Si llevamos esta deducción al examen que estamos haciendo de la comportamiento de la partícula de fluido, cuando la onda sonora la alcanza, se comprime, disminuyendo su volumen y aumentando su energía potencial.

Para poder solucionar esta integral debemos cambiar la expresión de tal manera que quede en función de una sola variable. Para esto se usa la ley de los gases ideales, (ley de Charles-Boyle) y se asume que cuando la onda se propaga en el fluido el proceso es adiabático, debido a la baja velocidad de transferencia de calor comparada con la velocidad del sonido. Entonces podemos llevar a cabo el siguiente procedimiento:

$$\text{Ley de Charles-Boyle} \quad P \cdot V^g = C \quad (1.10)$$

Donde:

C: constante

?: relación entre el calor específico a presión constante y a volumen constante.

(Para el aire tiene un valor de 1.4)

$$\text{Entonces,} \quad \frac{p}{P_o} = -\frac{g \cdot V}{V_o} \quad (1.11)$$

$$\text{Por lo tanto,} \quad dV = -\frac{V_o \cdot dp}{g \cdot P_o} \quad (1.12)$$

$$\text{Finalmente,} \quad E_p = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{g \cdot P_o} \quad (1.13)$$

Ahora si sumamos la dos componentes tenemos el valor de la densidad instantánea de energía total debida a la onda sonora (1.14):

$$D_T = \frac{1}{2} \cdot \left( \mathbf{r}_o \cdot u^2 + \frac{p^2}{g \cdot P_o} \right) \quad (1.14)$$

Como  $p$  y  $u$  son funciones del tiempo y del espacio, la densidad instantánea de energía no es constante a través del fluido.

### 1.1.1.6. - Potencia Sonora

La potencia sonora es una característica propia de la fuente y nos dice cuanta energía entrega al medio que la rodea por unidad de tiempo. La potencia instantánea se define como el producto entre la fuerza que se ejerce sobre las partículas ubicadas en una superficie imaginaria  $s$  y la velocidad  $\vec{u}$  que ellas alcanzan. Esta ecuación se muestra en la expresión 1.15

$$W = \vec{F} \cdot \vec{u} = p \cdot s \cdot \vec{u} \quad (1.15)$$

Para conocer la potencia de una fuente, debemos cuantificar la energía total que emite en todas las direcciones posibles. Por lo tanto la superficie  $s$  debe encerrar a la fuente. Si reemplazamos la ecuación 1.5 en 1.15 y suponemos una superficie cerrada entonces podemos calcular la potencia de la siguiente forma:

$$W = \oiint_s \vec{I} \cdot \vec{n} \, ds \quad (1.16)$$

Debido a que es una característica propia de la fuente, la potencia no varía con la distancia las condiciones ambientales o de la ubicación de la misma. Si no tenemos en cuenta el desgaste propio de los materiales por su uso, la potencia de una fuente sería igual en todo momento.

Por la misma razón que la presión, la potencia usualmente expresa de manera logarítmica y se mide en dB. La expresión 1.17 muestra como calcular el nivel de potencia.

$$L_w = 10 \cdot \log \left( \frac{W}{W_o} \right) \quad (dB) \quad (1.17)$$

Donde:

W : Potencia sonora de la fuente.

W<sub>o</sub>: Potencia de referencia [10<sup>-12</sup> watts]

### 1.1.1.7. – Índice y factor de directividad.

Aunque el índice y factor de directividad, al igual que la potencia, no son características propias del sonido sino de las fuentes que producen perturbaciones en un medio (en nuestro caso, el medio es normalmente aire) los incluimos en esta parte del trabajo debido a que nos permiten caracterizar mejor a los generadores de sonido.

Se define el factor de directividad  $Q(f)$ , como la relación de la intensidad sobre un eje determinado de un radiador a una distancia dada  $r$  y la intensidad que se produciría en el mismo punto con una fuente puntual que radiara la misma potencia acústica que el radiador. Se asume que las mediciones se realizan en campo libre y normalmente se mide en el eje de mayor radiación de la fuente. También es común medir este parámetro en otros ángulos de radiación para tener una mejor representación del comportamiento de la fuente. La utilidad de este parámetro es tener un número único que nos describa el comportamiento direccional de la fuente y que nos permita realizar comparaciones rápidas

El índice de directividad se define de la siguiente manera:

$$DI_q = 10 \cdot \log Q(f) = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}} \quad (1.18)$$

Aunque en general los patrones direccionales de las fuentes son muy complejos, lo que nos produce campos sonoros de igual o mayor complejidad, normalmente aproximaciones a campos sonoros generados por ondas esféricas, cilíndricas o planas son suficientes para resolver los problemas comunes en acústica

Sin embargo podemos usar las siguientes consideraciones cuando queremos tener una idea del patrón de radiación de una fuente sonora<sup>1</sup>:

- Cuando la longitud de onda del sonido emitido es muy grande en comparación con las dimensiones de la fuente, el sonido se irradia uniformemente en todas las direcciones. Entonces decimos que la fuente es omnidireccional.
- Cuando la longitud de onda es pequeña comparada con las dimensiones de la fuente, el sonido irradiado desde la superficie de la fuente tiende a confinarse en un haz relativamente estrecho; así, mientras más alta sea la frecuencia, más estrecho es el haz.

### 1.1.2. – Cajas acústicas

Debido a lo extenso y complejo que es el tema de construcción de cajas acústicas y abordarlo esta fuera de los intereses propuestos para este trabajo, el diseño de la caja requerida en el módulo se hizo utilizando el programa computacional *Speaker box lite 1.00*. En esta sección sólo se harán las consideraciones principales y factores que se deben tener en cuenta para la construcción de cajas acústicas cerradas.

Las cajas acústicas se utilizan para mejorar la respuesta en bajas frecuencias de los altavoces de radiación directa. Esto se logra debido a que la caja aumenta la impedancia de radiación del parlante, que es la expresión cuantitativa de la manera cómo el medio (aire que rodea la superficie que vibra) reacciona contra el movimiento de una superficie vibrante<sup>[11]</sup>.

El aumento en la impedancia de radiación se debe a que un parlante montado en una caja tiene un comportamiento que se asemeja al que tendría si se monta en un sonodeflector infinito. En la práctica esto se logra si la caja es muy grande y bien amortiguada en su interior con material absorbente.

Para que el desempeño de un parlante montado en la caja se asemeje, al que tendría si se montara en un sonodeflector infinito, esta debe ser totalmente hermética, para aislar, idealmente, el volumen interior de aire del exterior y las paredes de la caja deben ser lo más rígidas posibles.

Se coloca material absorbente en su interior, para atenuar los modos normales que se producen dentro de la caja en el rango de frecuencia donde el volumen de la caja deja de actuar como compliancia acústica. Este material debe ser muy absorbente en la frecuencia del primer modo de vibración de la caja.

Para las frecuencias en las cuales el coeficiente de absorción del material absorbente al interior de la caja es superior a 0.8, el parlante se comporta como si realmente estuviera montado en un sonodeflector infinito. Otro efecto que tiene este material es que aumenta el volumen efectivo del aire encerrado por la caja, aumentando la compliancia acústica de la caja.

Si la superficie frontal de la caja es mayor a  $0.587 \text{ m}^2$  se considera que el parlante es montado en un sonodeflector infinito. Si es menor se considerara como que esta montada al extremo de un tubo. Esta recomendación utilizada en el diseño de la caja también nos sirve para calcular el factor de directividad  $Q$ , utilizando el gráfico 1.1

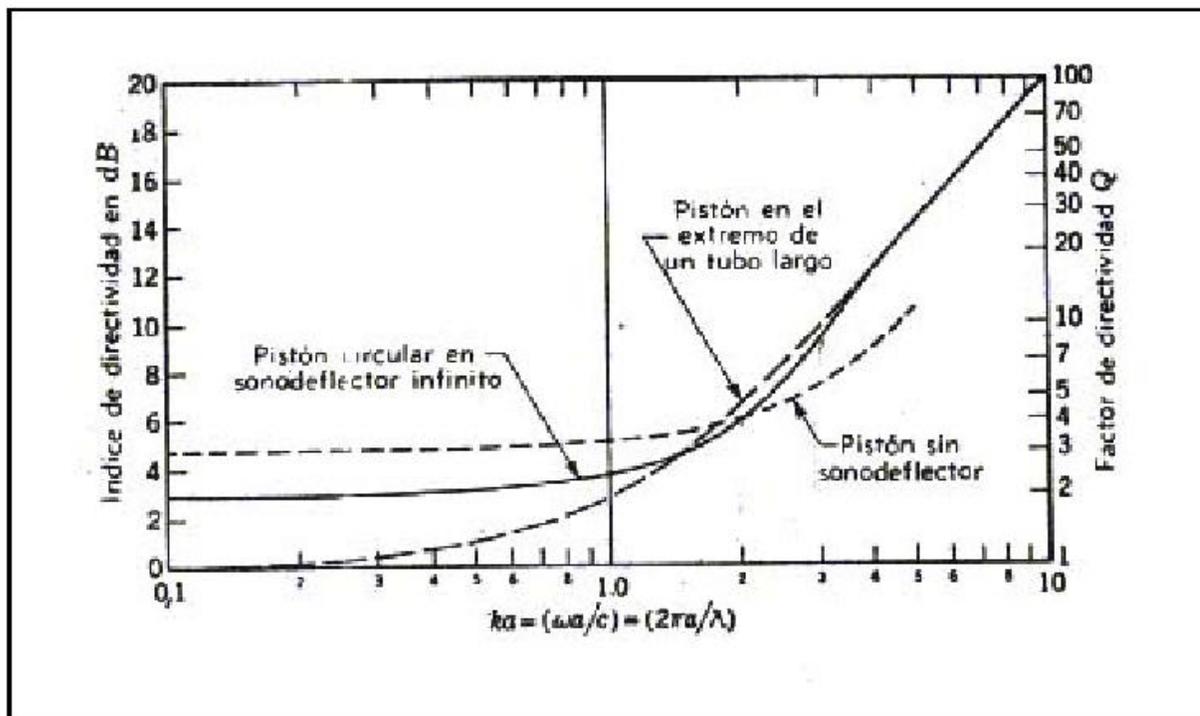
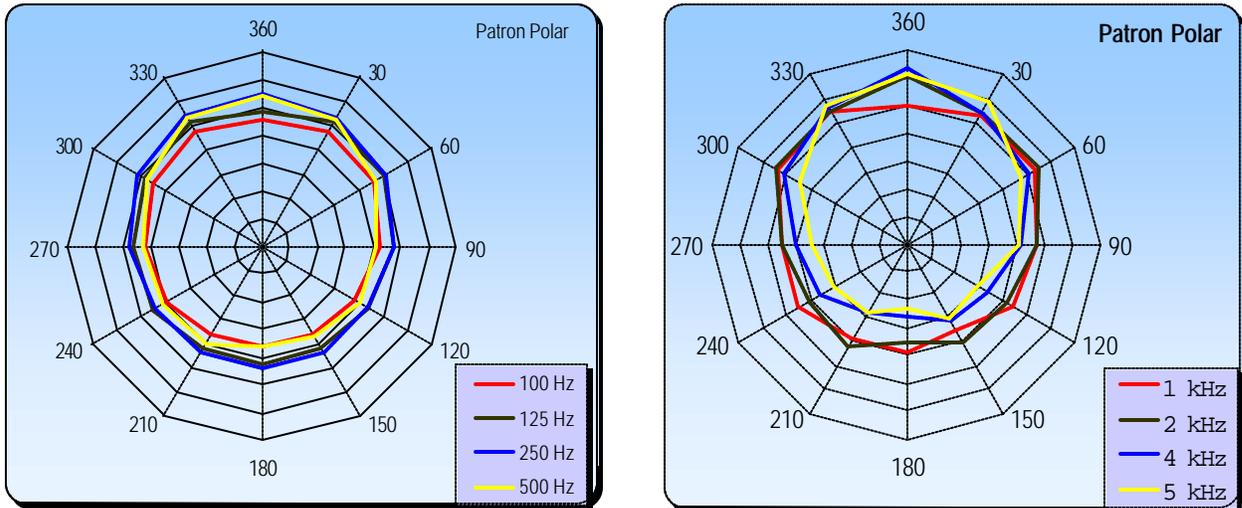


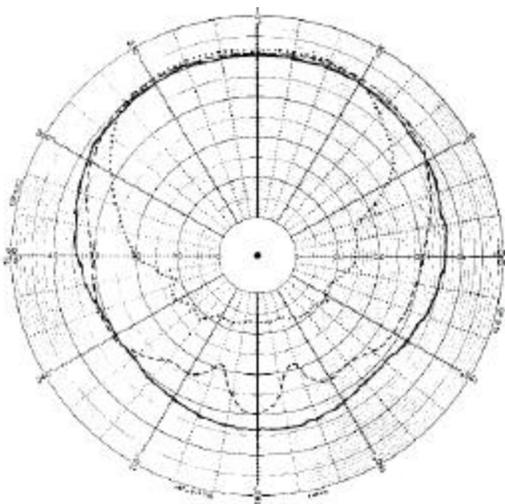
Gráfico 1.1

Otra forma común de caracterizar la forma de radiar sonido de las cajas acústicas es por medio de los patrones polares. Las figuras 1.1 y 1.2 muestran patrones polares de distintos tipos de parlantes y en diferentes montajes para varias frecuencias.



**Figura 1.1**

*Patrón polar de un sistema de cajas acústicas, construido con MDF de 2 cm. Medido como parte del curso laboratorio de mediciones en el primer semestre del año 2002.  
(Escala: 10 dB por segmento)*



*Patrón polar de un parlante Atlas Sound de 8" modelo EQ 818*

500 Hz \_\_\_\_\_

2000 Hz - - - - -

8000 Hz . . . . .

**Figura 1.2**

Podemos ver que en ambos casos a frecuencias superiores a 1 kHz el patrón direccional comienza a cerrarse en torno a los cero grados. Si investigamos acerca de los patrones polares de distintos parlantes vamos a encontrar la misma tendencia.

Si colocamos el parlante en el centro de una de las caras de la caja se producirán ondas de difracción en el espacio de audición, por que las ondas generadas en por el diafragma llegan simultáneamente a las cuatro esquinas. Por este motivo el parlante debe colocarse descentrado con respecto a la cara de montaje.

El gráfico 1.2 muestra la respuesta de frecuencia que entrega el programa computacional, para una caja diseñada en el mismo y el gráfico 1.3 la respuesta de frecuencia de la caja construida según ese diseño, medida con tonos puros, a un Watt de potencia (2.68 Volt constantes en los terminales) a un metro, en la cámara anecoica de la universidad. Se filtro la señal medida en bandas de tercio de octava para obtener el resultado.

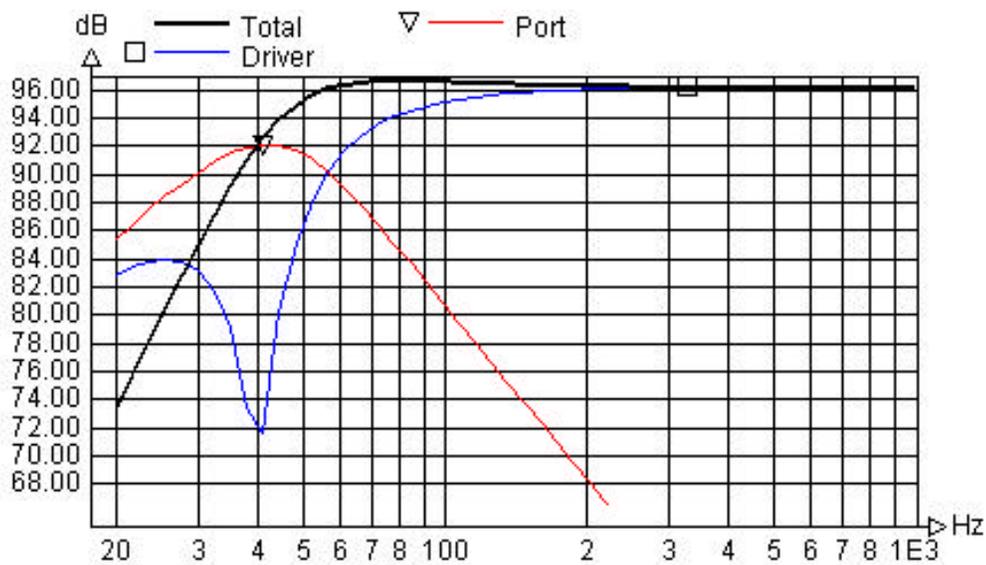
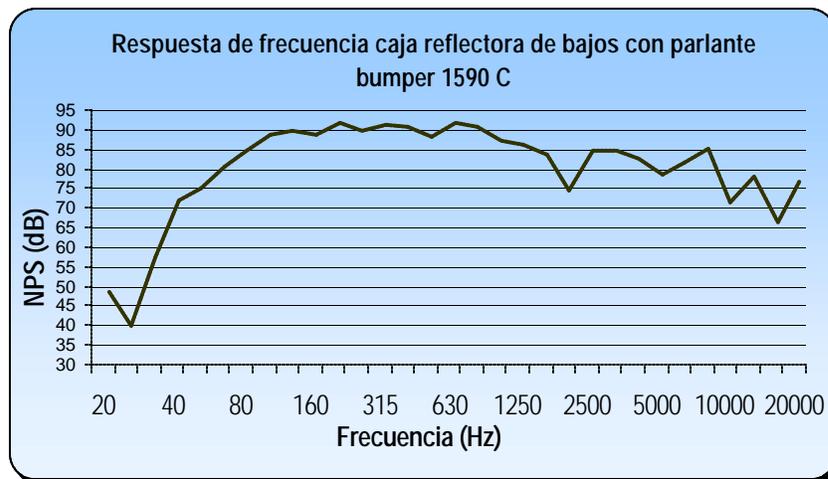


Gráfico 1.2



**Gráfico 1.3**

## 1.2. – Diseño

### 1.2.1. – Objetivo

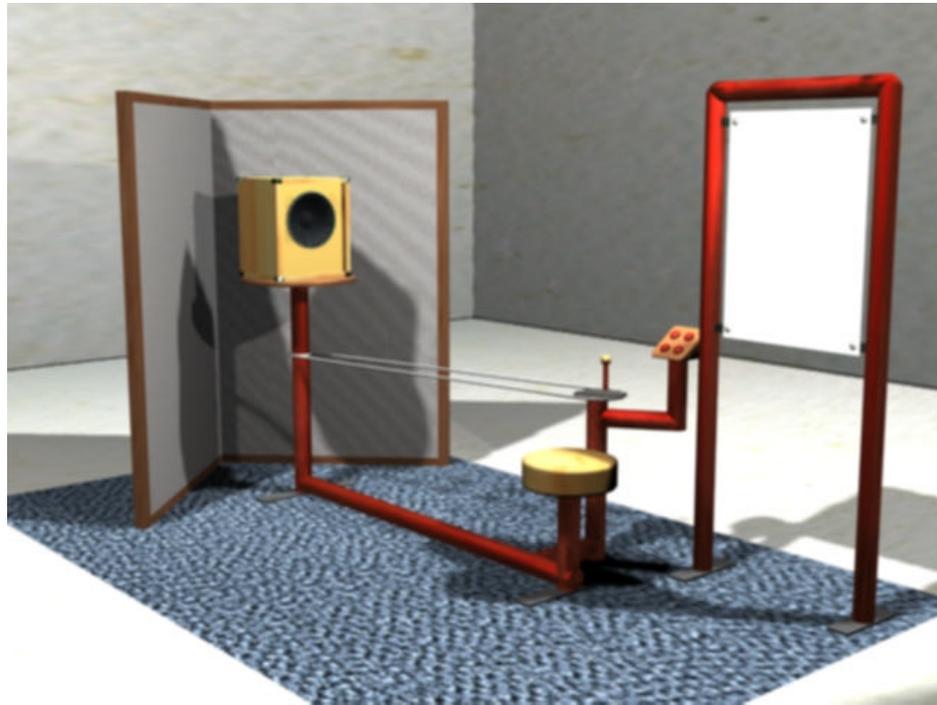
Mostrarle al visitante como dependiendo de la frecuencia, el sonido es emitido de diferente manera por una misma fuente, siendo las frecuencias bajas radiadas con igual intensidad en todas las direcciones y las altas radiadas con diferentes intensidades dependiendo de la dirección.

### 1.2.2. – Proceso

Por costos, facilidad de manejo, requerimientos y versatilidad, la fuente escogida fue parlante de radiación directa montado en una caja acústica cerrada.

Para poder mostrar la relación entre dirección, intensidad y frecuencia del sonido se hace rotar la fuente mientras genera sonidos en distintas frecuencias manteniendo constante la distancia con el receptor (el usuario del módulo) y el nivel de intensidad del sonido. Para lograr esto, se diseñó una estructura en la que se ubica la fuente en una base de madera, que el visitante

hace girar sobre su eje vertical por medio de una manivela conectada a un sistema de engranaje (se utiliza el sistema de piñones y cadena de una bicicleta). El usuario se sienta a una distancia aproximada de 1.5 metros de la fuente, asegurando que se encuentre fuera del campo cercano de la fuente para frecuencias superiores a 100 Hz. Un esquema del montaje se muestra en la figura 1.1



**Figura 1.1**

Al lado derecho de la butaca se ubica el panel de control del módulo y el letrero con las instrucciones de uso y la explicación del fenómeno (ver anexo 1, pagina 90). En la parte posterior se ubican dos paneles Madefondo, sostenidos por un marco de madera, con lana mineral en su parte frontal, cubiertos con paño Hilac. Para detalles de construcción y dimensiones, ver el archivo para autocad “direccionalidad caja cerrada.dwg” en el CD adjunto.

Los sonidos escogidos para ser emitidos por el parlante, son un tono puro de 100 [Hz], un tono puro de 5000 [Hz], los dos tonos puros simultáneamente y un fragmento de la canción Human Behavior interpretado por Björk. Estos sonidos se encuentran como pistas de audio en el

CD adjunto con el nombre de direccionalidad 1.wav, direccionalidad 2.wav, direccionalidad 3.wav y direccionalidad 4.wav respectivamente. Debido a que el nivel de las pistas fue regulado en un sistema de parlantes distinto en el que se van a reproducir, es necesario corregir el nivel nuevamente una vez montado el módulo.

Con el primer tono puro el usuario del módulo podrá apreciar claramente cómo, sin importar la posición del parlante, siempre escucha la frecuencia baja a la misma intensidad, lo que no ocurre al activar el tono de 5000 [Hz], que escuchará con mayor intensidad cuando el parlante esté frente a él. Al escuchar los dos tonos simultáneos podrá comparar el comportamiento de los dos sonidos y al escuchar la música estará en capacidad de relacionar el comportamiento de los tonos con la variación de la percepción en la música. Se puede asumir el comportamiento direccional de la fuente, basándose en la experiencia propia y en los diagramas polares de distintos tipos de parlantes de radiación directa.

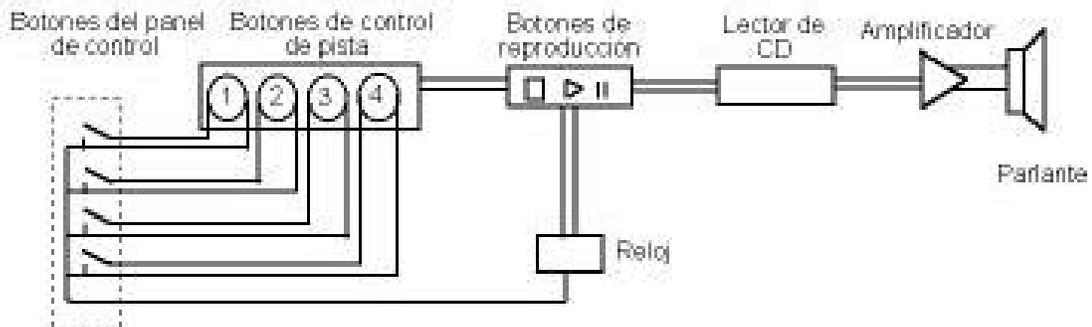
En el panel de control se ubican cuatro botones, los que activan cada uno de los sonidos. (la señalización en el panel indica la relación con los sonidos). La duración de cada uno de ellos es de 20 segundos y el nivel generado por la fuente debe ser mínimo de 85 [dB] en la posición del usuario, para estar por encima de los niveles de ruido de fondo (ver anexo 3, pagina 115). Sin embargo el ajuste final de nivel se debe realizar una vez instalado el módulo en su ubicación definitiva.

Los tonos puros fueron generados utilizando el programa computacional Samplitud 2496 Versión 5.58. En este programa también se edito el fragmento de la canción requerida.

Para reproducir las pistas, previamente grabadas en un CD, se utiliza una unidad de reproducción desmontada de una radio Sony SXC 250, a la cual se le deja conectado el control de reproducción y selección de pistas, el control de volumen y la alimentación eléctrica. La señal de salida de esta unidad se conecta a un amplificador y este al parlante. El sistema se ubica en interior del panel de control, y el amplificador al interior de la caja cerrada.

Para controlar el orden de reproducción de las pistas, los botones del panel de control van conectados directamente a los interruptores de selección de pistas de la radio y a un reloj de dos minutos; de esta manera al oprimir un botón se activara directamente la pista deseada y en caso de que no se reproduzcan más pistas, el reloj, conectado al botón de parada del reproductor de CD, finaliza la reproducción del disco. Por este motivo al elaborar el CD que se instale en el módulo, se debe dejar un espacio en blanco de dos minutos después de finalizado el audio requerido para cada pista.

Un esquema de las conexiones eléctricas se muestra en la figura 1.4.

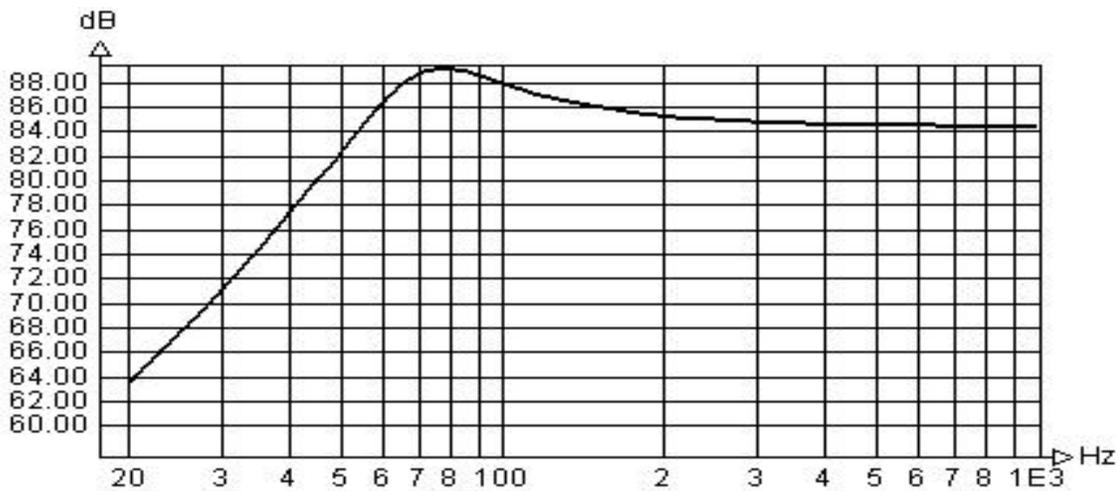


**Figura 1.4**

El amplificador, que se construirá en los talleres de electrónica de Maloka, tiene una impedancia de salida de 8 ohms, una potencia de 50 Watts.

Para reducir peso y facilitar el movimiento de la fuente se diseño una caja cerrada, la cual nos permite tener un tamaño mas reducido de caja con una respuesta aceptable. Por costos, respuesta de frecuencia y durabilidad, se escogió el parlante bumper 1048-C. Aunque no es el parlante ideal para instalar en una caja cerrada, se tuvo en cuenta la resistencia, durabilidad y bajo costo debido a que cualquier montaje que se haga en Maloka debe ser diseñado lo suficientemente robusto como para soportar el mal uso que le puedan dar los visitantes del museo.

Manejando el programa *Speaker box lite 1.00*, diseñando la caja con ese parlante, para conseguir la respuesta de frecuencia requerida la caja debe tener un volumen de 34 litros y estar rellena en un 90% de material absorbente en su interior. Se utiliza lana mineral como material de relleno. Las uniones interiores de la caja se sellan con silicona y todo su interior se pinta para evitar la absorción de humedad del ambiente. El exterior se pinta o se cubre con laca. La respuesta de frecuencia esperada de sistema caja-parlante, conectado a un amplificador que genere 1 [W] de potencia eléctrica (2.83 Volt en 8Ω) se muestra en la figura 1.5



**Figura 1.5**

El cableado se hace en el interior de los tubos y el eje de centro del sistema de rodamiento se debe perforar para permitir el pasar los cables en su interior. En el extremo inferior del eje se coloca un plug giratorio (tipo teléfono) para permitir que el cable de conexión al amplificador gire libremente. Los detalles de dimensiones y construcción se encuentran en el archivo “direccionalidad caja cerrada.dwg”.

En la tabla 1.1 se enumeran los materiales requeridos y los costos de los mismos en pesos Colombianos Los precios están en pesos colombianos. (Aproximadamente 2.800 pesos por dólar)

## MATERIALES Y COSTOS DEL MODULO DE DIRECCIONALIDAD DEL SONIDO

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
1	Amplificador	-----	-----
1	Radio Sony SXC 250	200.000	200.000
1	Parlante Bumper 1048-C	100.000	100.000
1	Malla protección parlante	2.000	2.000
1	M <sup>2</sup> lana mineral de 10 cm.	25.000	25.000
8	Esquineros para caja	800	6.400
2	Placas de MDF 3 cm de 1.53*2.44*0.018	88.850	180.000
100	Tornillos 6 ×1” auto roscante	1.700	1.700
1	Tarro silicona Sika 300 ml	6.900	6.900
3	Aerosol pintura negra.	6.200	18.600
3	Aerosol color madera.	6.200	18.600
1	Plug giratorio	5.000	5.000
1	Piñón de bicicleta de 28 dientes	5.000	5.000
1	Piñón de bicicleta de 48 dientes	7.000	7.000
1	Sistema de rodamiento (eje de centro)	4.000	4.000
4	Metro de cadena de bicicleta.	1.200	4.800
1	Manivela (bola)	3.500	3.500
4	Metro tubo CR de 2.5” y 2mm de espesor con acabado electroestático.	9.200	36.800
2 m	Lamina metal de 1 m de 3/16”	3.000	6.000
1	Madera de butaca	20.000	20.000
12	M de paral madera 4 ×4 cm	1.600	19.200
4.5	Metros <sup>2</sup> madefondo (2 placas de 0.005 m)	47300	94.600
4.5	Lana mineral	7.383	36.900
5	M <sup>2</sup> paño hilac	15.000	75.000
4	Botones	4.000	16.000
8	Metro de cable calibre 24	200	1.600
1	Tomacorriente doble con caja	4000	4.000
1	Enchufe	3900	3.900
X	Metros cable duplex centelsa 2×18	1450	
5 m	Metro tubo CR de 1.5” y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	27.500
2	Laminas acrílico 80×56×0.3 cm.	26.000	52.000
4	Tornillos plásticos	250	1.000
1	Impresión en ploter	8.000	8.000
<b>Total de modulo:</b>			<b>993.000</b>
<b>Total en USD:</b>			<b>355</b>

Tabla 1.1

Debido a que el modulo se diseño para ser construido en los talleres de Maloka no se incluyen los costos de mano de obra, ni en este ni en ninguno de los otros módulos.

### **1.2.3. – Funcionamiento de módulo**

El visitante se sienta en la butaca y oprime el primer botón en el panel de control, haciendo que parlante reproduzca un tono puro de 100 Hz. A continuación mueve la manivela, haciendo rotar la caja hasta que el tono puro deje de sonar. Después repite el procedimiento oprimiendo el segundo botón lo que genera un tono puro de 5000 Hz. Al dejar de sonar el tono puro repite el procedimiento con el tercer botón, que activa el sonido de los dos tonos puros simultáneamente y el cuarto hace sonar música. (Ver simulación en el CD adjunto, archivo caja cerrada.avi. Las simulaciones de los 5 módulos se elaboraron en el programa computacional 3D STUDIO MAX V. 4.2. )

## **2 MODULO DE ABSORCION Y REFLEXION DE LA ENERGÍA SONORA**

### **2.1. - Marco teórico**

#### **2.1.1. – Absorción del sonido**

Un sonido al viajar en un medio determinado pierde una cierta cantidad de energía. Esta pérdida de energía se puede clasificar en tres tipos básicos<sup>2</sup>:

- Pérdidas viscosas
- Pérdidas por conducción de calor
- Pérdidas por intercambios moleculares

Las pérdidas viscosas son producto de los movimientos relativos entre porciones adyacentes al medio y se pueden considerar como pérdidas por fricción. La conducción de energía térmica entre las condensaciones de mayor temperatura, y las rarefacciones de menor temperatura se traduce en pérdida por transmisión de calor. Los intercambios moleculares de energía que pueden causar absorción incluyen la conversión de la energía cinética de las partículas en energía potencial, interna rotacional y vibracional, o de asociación y disociación.

Este tipo de pérdida es importante cuando el volumen del medio en el cual viaja el sonido es grande, pero en situaciones en que el sonido viaja distancias cortas, es insignificante, siendo considerables únicamente las pérdidas en las fronteras del medio.

Cuando hablamos de materiales absorbentes nos referimos a materiales que aumentan las pérdidas de frontera del medio en que se transmite el sonido (el aire). Los más utilizados para este propósito son los materiales porosos, en los cuales la absorción de sonido se debe principalmente a la transformación de la energía sonora en calor, cuando éste viaja a través de las cavidades del material. Otras técnicas para aumentar las pérdidas en las fronteras del medio consisten en usar paneles no porosos montados a cierta distancia de una pared o superficie rígida (absortores oscilantes) así como de resonadores.

### 2.1.2. – Cuantificación de la absorción<sup>[1]</sup>

Cuando una onda sonora con una intensidad  $I_i$  impacta una superficie, un cierto porcentaje de este sonido es reflejado con una intensidad  $I_r$ . La intensidad restante  $I_a$  es absorbida de manera que se cumple que:

$$I_i = I_r + I_a \quad (2.1)$$

Donde la intensidad absorbida está compuesta por la suma del sonido transformado en calor, el transmitido por el sólido y el sonido radiado al otro lado de la superficie (figura 2.1).

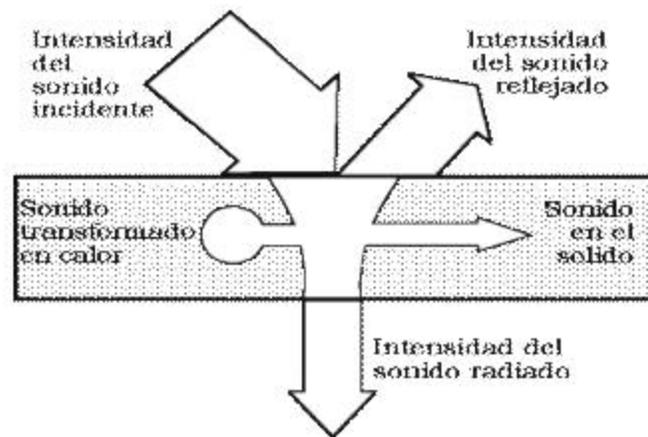


Figura 2.1

Para cuantificar el porcentaje de energía sonora que es absorbida por un material se define el coeficiente de absorción  $\mathbf{a}$  como:

$$\mathbf{a} = \frac{I_a}{I_i} \quad (2.2)$$

De la misma forma se define el coeficiente de reflexión como:

$$\mathbf{s} = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.3)$$

Por 2.1 se cumple que:

$$\mathbf{a} + \mathbf{s} = 1 \quad (2.4)$$

El coeficiente de absorción de un material depende de la frecuencia, el ángulo de incidencia del sonido y el montaje del material. El valor del coeficiente de absorción de un material depende de sus características físicas. En la tabla 2.1 se muestran los valores del coeficiente de absorción en varias frecuencias para distintos materiales.

## COEFICIENTES DE ABSORCIÓN PARA DISTINTOS MATERIALES

MATERIAL	FRECUENCIA EN Hz					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ventana abierta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Espuma acústica LSP207 (25mm de espesor)	0.1	0.25	0.5	0.7	0.8	0.9
Espuma Sonex VLW -35 (1 ½" de espesor)	0.08	0.29	0.73	0.94	0.97	0.89
Lana mineral de 10 cm de espesor	0.42	0.66	0.73	0.74	0.76	0.79
Madera de 0.3 cm con 5 cm. de cámara	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06
Filtro de 2.5 cm.	0.13	0.41	0.56	0.69	0.65	0.49
Alfombra de lana acolchada 1.5 cm	0.2	0.25	0.35	0.4	0.5	0.75
Vidrio	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
Pared de ladrillo pintada	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
Mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01

Tabla 2.1

El poder absorbente de la energía sonora de una superficie, depende de su tamaño y del coeficiente de absorción. La absorción de una superficie se mide en  $m^2 Sabine$  y esta dada por<sup>3</sup>:

$$A = Sa \quad (2.5)$$

Donde:

$S$  es el área de la superficie.

Cuando existe más de un material en la sala, se utiliza el coeficiente de absorción medio ( $\bar{a}$ ), que se define como el promedio ponderado de todos sus coeficientes de absorción. Es decir:

$$\bar{a} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N}{S} \quad (2.6)$$

Donde:

$A_N$  es la absorción de la N-ava superficie

### **2.1.3. – Absortores <sup>[1]</sup>**

#### **Absortor poroso:**

Son materiales que tienen en su superficie una contextura porosa o con finas hendiduras. Cuando un sonido incide sobre ellos, la presión sonora hace vibrar el aire que está en el interior de los poros. El roce del aire con las superficies interiores de los poros y hendiduras produce una disipación de energía calórica que se obtiene de la energía acústica. La magnitud de la absorción depende de la porosidad efectiva y el factor de estructura. Si todos los poros están interconectados entre sí, el material tendrá un coeficiente de absorción mayor. Este tipo de absortores es efectivo para frecuencias cuyo  $\lambda/4$  sea menor que el grosor del material.

#### **Absortor oscilante:**

Se construye con una superficie de un material impermeable al aire ubicado a distancia de la pared sólida. La cavidad encerrada por estas superficies se llena usualmente con material absorbente poroso. Al impactar una onda sonora en la superficie esta vibra deformándose y transformando de esta manera energía sonora en calor, alcanzando el mayor grado de absorción cuando alcanza su máxima deformación, situación que ocurre en la frecuencia de resonancia del sistema. Igualmente, el material absorbente poroso absorbe una cierta cantidad de energía al ser impactado por la onda sonora. La frecuencia de resonancia del sistema depende de la distancia de la superficie impermeable a la pared y de su densidad superficial.

#### **Absortores resonadores:**

Estos absortores consisten en una cavidad de volumen determinado que se comunica al exterior por medio de uno o varios tubos o aberturas, denominados cuellos. 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 actúa como componente elástico del sistema. En la frecuencia de resonancia del sistema las partículas de aire en el cuello vibran con mucho vigor y la fricción transforma una considerable cantidad de energía acústica en calórica, produciendo un incremento en la absorción. Esta energía absorbida puede aumentarse aun más si se eleva en forma artificial la resistencia acústica del cuello.

### 2.1.4. – Reverberación y tiempo de reverberación <sup>[1]</sup>

La reverberación se define como el sonido que persiste al interior de una sala después de la detención del tono que la produjo. La reverberación esta formada por el conjunto de reflexiones que se fusionan unas a otras, y que se extinguen con mayor o menor rapidez dependiendo de la absorción y el volumen de la sala.

Se denomina tiempo de reverberación  $T_{60}$ , al tiempo necesario para que, una vez cortada la fuente sonora en una sala, la energía disminuya a una millonésima parte.

Para calcular el decaimiento de la energía en un campo difuso se utiliza la ecuación de Sabine<sup>II</sup>.

$$D(t) = D' e^{-(Ac/4V)t} \quad (2.7)$$

Donde:

- D' : Densidad inicial de energía sonora
- A : Absorción de la sala
- V : Volumen de la sala
- c : Velocidad del sonido en el aire

La ecuación 2.7 se debe emplear en casos en que la sala sea difusa y el coeficiente de absorción medio  $\bar{a}$  sea menor que 0.2 en el rango de frecuencia de interés

Debido a esta limitante, en 1930 Eyring y en 1932 Millington propusieron las siguientes ecuaciones:

*Ecuación de Eyring:*

$$D(t) = D' e^{-(cS/4V)(-\ln(1-\bar{a}))t} \quad (2.8)$$

Donde:

- S: superficie de la sala

Ecuación de Millington:

$$D(t) = D' e^{-(ct/4V)(-\sum S_n \ln(1-a_n))} \quad (2.9)$$

Se puede apreciar como la única variante introducida en estas formulas es la manera en que se calcula el coeficiente de absorción medio de la sala. Esta situación genera limitantes para la aplicación de las formulas, relacionadas con el tipo de sala al que se le quiera calcular el decaimiento de la energía sonora.

La ecuación 2.8 se puede aplicar si los coeficientes de absorción de las distintas superficies de la sala no son muy distintos. La ecuación 2.9 no debe aplicarse si alguno de los coeficientes de absorción de las es cercano a 1 ya que ello nos entrega como resultado que el decaimiento en una sala es igual al del campo libre.

Por definición del tiempo de reverberación tenemos que:

$$D(0) = 10^6 D(T) \quad (2.10)$$

Desarrollando 2.10 y tomando como velocidad del sonido 344 m/s obtenemos que:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A} \quad (2.11)$$

Ahora, si incluimos la absorción del aire y de los objetos que se encuentran al interior de la sala, la ecuación para calcular  $T_{60}$  es:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A + A' + 4mV} \quad (2.12)$$

Donde:

$A'$ : absorción de los objetos al interior de la sala.

$m$ : constante de atenuación de energía en  $m^{-1}$

El valor de  $A$  se calcula de distintas maneras, como se muestra a continuación, según el tipo de sala a la cual se le quiera calcular  $T_{60}$ .

*Absorción de Sabine:*

$$A = S\mathbf{a} \quad (2.13)$$

*Absorción de Eirynng:*

$$A = -S \ln(1 - \bar{\mathbf{a}}) \quad (2.14)$$

*Absorción de Millington:*

$$A = -\sum S_n \ln(1 - \mathbf{a}_n) \quad (2.15)$$

*Absorción de Fitzroy:*

$$A = \left[ \frac{-\ln(1 - \bar{\mathbf{a}}_1)}{S_1} + \frac{-\ln(1 - \bar{\mathbf{a}}_2)}{S_2} + \frac{-\ln(1 - \bar{\mathbf{a}}_3)}{S_3} \right] \quad (2.16)$$

Donde:

$S_1, S_2, S_3$ : área total de las superficies opuestas

$\bar{\mathbf{a}}_1, \bar{\mathbf{a}}_2, \bar{\mathbf{a}}_3$ : coeficientes de absorción medios de los pares de superficies opuestas

Las restricciones para usar 2.13, 2.14 y 2.15 son las mismas dadas para 2.7, 2.8 y 2.9 respectivamente. La absorción según Fitzroy se utiliza cuando los pares de superficies opuestas tienen coeficientes de absorción muy distintos.

### 2.1.5. – Modos normales de vibración

En una sala rectangular, las ondas sonoras pueden viajar de ida y vuelta entre cualquier par de paredes opuestas. También pueden viajar alrededor del recinto, involucrando así la

reflexión en varias paredes con diferentes ángulos de incidencia. Si estos ángulos se eligen adecuadamente, las ondas vuelven al estado original después de cada viaje completo, y se establecen ondas estacionarias o permanentes. Cada onda es un modo normal de vibración del recinto. Esto implica que si una fuente sonora emite un sonido cuya frecuencia es igual a la correspondiente a un modo normal de vibración, la presión sonora aumenta considerablemente en el interior de la sala debido a la resonancia producto de la onda estacionaria.

Si una sala es rectangular y las paredes son muy reflectantes, las frecuencias de los modos normales de vibración están dadas por:

$$f(n_x, n_y, n_z) = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{n_x^2}{l_x^2} + \frac{n_y^2}{l_y^2} + \frac{n_z^2}{l_z^2}} \quad (2.17)$$

Donde:

$l_x, l_y, l_z$  : dimensiones del recinto

$n_x, n_y, n_z$  : enteros que pueden elegirse independientemente con valores entre cero e infinito

Los modos normales de vibración se clasifican en axiales, tangenciales y oblicuos dependiendo de la dirección de viaje con respecto a las paredes de la sala.

Podemos calcular en forma aproximada el número de modos normales existentes en una sala de cualquier geometría entre 0 y  $f$  como sigue a continuación:

$$Q = \frac{4pVf^4}{3c^3} \quad (2.18)$$

En cualquier tipo de sala siempre existen modos normales de vibración, pero en recintos irregulares y en frecuencias cuyas longitudes de onda sean mucho menores que las dimensiones

del local y además las paredes tienen distintos coeficientes de absorción, determinar el campo sonoro es muy complicado. Para facilitar estos cálculos se utiliza la acústica estadística.

Podemos dividir el campo sonoro al interior de una sala, según la posición de la fuente en cercano o lejano.

El *campo cercano* existe en una región cercana a la posición de la fuente donde la velocidad de las partículas no está necesariamente en la dirección de propagación de la onda sonora. La presión puede variar considerablemente con la posición y la intensidad sonora no está relacionada con el cuadrado de la presión sonora eficaz. La distancia hasta la cual se considera campo cercano varía dependiendo del autor, por ejemplo Beranek la establece como  $\lambda/6$ <sup>5</sup>; Morfey en su diccionario de acústica, habla del campo cercano hidrodinámico, para distancias mayores a  $\lambda/4$ , y del campo cercano de Fresnel, el cual existe en el área alrededor de la fuente tal que  $(L^2/\lambda)N$  sea mayor que  $\lambda/4$ , donde L es la mayor dimensión de la fuente y N un entero.

El *campo lejano* es toda la región fuera del campo cercano. Se divide en *campo directo*, en el cual la presión sonora del sonido directo es mucho mayor que la presión sonora producto de las reflexiones y se cumple que el NPS disminuye 6 dB con la duplicación de la distancia y en *campo reverberante*, el cual se origina por las múltiples reflexiones en el interior del local. En el campo reverberante el NPS se estabiliza cambiando muy poco de un lugar a otro. Cuando las reflexiones viajan en todas las direcciones posibles y la densidad de energía es relativamente uniforme tenemos un *campo difuso*.

Se puede determinar el punto en que termina el campo sonoro directo y comienza el difuso calculando el punto en el que la densidad de energía directa es igual a la densidad de energía reverberante. Este punto se denomina radio de reverberación o distancia crítica y se calcula como:

$$r_T = \sqrt{\frac{QR}{16p}} \quad (2.19)$$

Donde:

Q: índice de directividad de la fuente.

R: constante de la sala que se calcula según 2.21

$$R = \frac{S \bar{a}}{1 - \bar{a}} \quad (2.21)$$

## 2.2. – Diseño

### 2.2.1. – Objetivo

Permitir que el usuario del modulo experimente el fenómeno de la reverberación, aprecie como dos materiales distintos, absorben y reflejan el sonido en diferente proporción y como al cambiar los materiales que recubren las paredes de una sala se produce una variación en la percepción auditiva, dando la explicación a este fenómeno

### 2.2.2. – Proceso

Debido a que se pretende demostrar el fenómeno de reverberación, es obvio que se debe construir una sala cerrada, con el volumen mínimo y los materiales adecuados para que quien se encuentre en su interior pueda escuchar claramente las reflexiones de sonido, que en conjunto constituyen la reverberación. Para poder mostrar la variación de la percepción auditiva generada por el cambio de materiales, se hace necesario poder cambiar el recubrimiento de las paredes de

la sala mientras el visitante hace uso del modulo, lo cual es muy ineficiente y complicado de manejar, o construir dos salas exactamente iguales que se diferencien únicamente en el material de sus paredes interiores, opción que se tomo para diseñar del modulo.

Por estas razones diseñaron dos recintos cerrados, que denominaremos “cámara reverberante” y “cámara absorbente”. La primera de estas salas consiste en una adaptación del diseño propuesto por Enrique Alonso Suárez Silva y Erasmo Felipe Vergara Miranda<sup>4</sup>, para la construcción de una cámara reverberante. Este diseño asegura una correcta distribución de los modos normales de vibración y acercarnos lo más posible a tener un campo difuso en el interior de la cámara, condición ideal para el diseño.

Se redujeron todas sus dimensiones en una razón de 1:1/3, con lo cual volumen interno de de la cámaras es de  $8.33 \text{ m}^3$  y una superficie de  $25.69 \text{ m}^2$ . Con esta relación la dimensión mínima al interior de la cámara es de 1.7 m, permitiendo tener un campo sonoro difuso en frecuencias superiores a 202 Hz, lo que es suficiente en nuestro diseño teniendo en cuenta que la fuente va a ser la voz humana. Se eliminó la puerta y se introdujo una abertura redonda de 28 cm. de diámetro en la esquina superior izquierda. Las paredes están construidas de placas Superboard de 17 mm. de espesor (Ver anexo 2, pagina 105), sujetas entre si por la estructura de soporte especificada por el fabricante. En su interior las paredes están cubiertas por baldosa para baño Ártico blanco, de  $30 \times 45 \text{ cm}$ . montadas de tal manera que se puedan considerar como una sola lamina (minimizando las separaciones de las uniones entre cada baldosa). Se escogió Super Board para las paredes ya que posee la resistencia y rigidez necesaria para soportar las baldosas, que se eligieron como material de recubrimiento por tener un coeficiente de absorción bastante bajo (alrededor de 0.01). Dentro de la cámara se instala una ampolleta de luz blanca en el piso de la esquina trasera derecha, y en el techo de la misma esquina una campana.

La abertura esta hecha para que el usuario introduzca su cabeza por ella y hable o produzca sonidos en su interior. Se ubicó en la esquina debido a que la cabeza de la persona va a actuar como fuente, y por lo tanto podemos excitar la mayor cantidad de modos normales en su interior. En los bordes de la abertura se ubica un marco de acrílico redondeado por motivos de

seguridad y estética. En su exterior a las paredes se decoran con pintura acrílica, aunque se puede hacer cualquier tipo de acabado, ya que al montar el súper Board, este se ve como una pared de concreto lisa.

La cámara absorbente es exactamente igual, pero en el interior las paredes se recubren lana mineral de 10 cm. de espesor cubierta de paño Hilac en reemplazo de la baldosa. Para reducir de costos, en esta cámara el Superboard se puede cambiar por triplex de 2 cm. Aunque para demostrar el fenómeno de la absorción del sonido no es necesario tener un recinto de estas dimensiones, por razones pedagógicas se hace indispensable que las dos cámaras tengan las mismas dimensiones y la única diferencia que el visitante note sea el recubrimiento de las paredes.

En adición a esto se deben construir dos escaleras de dos escalones y las cámaras se deben ubicar sobre una alfombra de alto tráfico de 2 cm. de espesor, para reducir la transmisión de vibraciones provenientes del piso.

La figura 2.4 muestra un esquema general de las cámaras. Mayores detalles de construcción y dimensiones se encuentran en el archivo “plano de absorción.DWG” para autocad en el CD adjunto.



**Figura 2.4**

En frente de cada una de las cámaras se ubican los letreros con las instrucciones y explicación del fenómeno (ver anexo 1, pagina 93)

Para construir las paredes se deben unir por separado las placas de Superboard que cubran el área total de cada pared, realizar los cortes y después montarlas siguiendo las indicaciones del anexo 2. Los perfiles para las uniones deben pedirse directamente a la fábrica especificando los ángulos de unión.

En las tablas 2.2 y 2.3 se muestran los materiales y cantidades necesarias para la construcción de los módulos. Los precios están en pesos colombianos.

MATERIALES Y COSTOS PARA EL MODULO DE ABSORCIÓN Y REFLEXIÓN DE LA ENERGÍA SONORA

<b>CÁMARA REFLECTANTE</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
19	Placas de Superboard de 2.44×1.22×0.0017 m.	74850	1'422.150
30	Metros <sup>2</sup> baldosa ártica blanca	27.000	810.000
7	Paquetes de 25 kg de pegacort	2000	140.000
20	Párales 1-5/8	5250	105.000
15	Angulo perimetral 29 ×24 mm	2000	30.000
100	Tornillos calibre 20	30	3000
250	Tornillos calibre 22	45	11.250
2	Metro tubo CR de 2.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	9.200	18.400
2	Escalones	27.500	55.000
1	Campana	20.000	20.000
6 m.	Cordón	200	1.200
1	Roseta	1.150	1.150
1	Ampolleta luz blanca	21.950	21.950
1	Enchufe	3900	3.900
X	Metros cable eléctrico 3*16	1450	
1	Aro acrílico curvo de 28 cm. de radio	12.500	12.500
12	Metros <sup>2</sup> Alfombra industrial (Niver futura)	14.950	179.400
5 m	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	27.500
2	Laminas acrílico 80×56×0.3 cm.	26.000	52.000
1	Impresión en ploter	8.000	8.000
4	Tornillos plásticos	250	1.000
2.5	Galones viniltex	83.750	83.750
<b>Subtotal:</b>			<b>5'996.150</b>

**Tabla 2.2**

<b>CÁMARA ABSORBENTE</b>			
<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
18	Placas de Superboard de 2.44×1.22×0.0017 m.	75.550	1'359.900
15*	Placas de tablex 2.44×1.53×0.02 m	40.000	600.000
30	Metros <sup>2</sup> lana mineral (equivale a 3 Rollos de Frescasa)	135.250	405.750
20	Párales 1-5/8	5250	105.000
15	Angulo perimetral 29 mm*2.4	2.000	30.000
100	Tornillos calibre 20	30	3.000
250	Tornillos calibre 22	45	11.250
1	Campana	20.000	20.000
1	Galón de boxer	29.850	29.850
2	Metro tubo CR de 2.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	9.200	18.400
2	Escalones	27.500	55.000
1	Enchufe	3.900	3.900
X	Metros cable eléctrico 3*16	1.450	
6 m.	Cordón	200	1.200
1	Roseta	1.150	1.150
1	Ampolleta luz blanca	21.950	21.950
1	Aro acrílico curvo de 28 cm. de radio	12.500	12.500
12	Metros <sup>2</sup> Alfombra industrial (Niver futura)	14.950	179.400
5 m	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	27.500
2	Laminas acrílico 80×56×0.3 cm.	26.000	52.000
1	Impresión en ploter	8.000	8.000
4	Tornillos	250	250
2.5	Galones laca para madera	95.250	95.250
<b>Subtotal:</b>			<b>2'683.000</b>
<b>Total de modulo:</b>			<b>8'679.150</b>
<b>Total en USD:</b>			<b>3.100</b>

\*Opcional

**Tabla 2.2**

### 2.2.3. – Funcionamiento del módulo

El visitante se acerca al modulo, sube los escalones e introduce su cabeza en la abertura de una de las dos cámaras, y habla ó emite algún tipo de sonido. Después hala la cuerda haciendo

sonar la campana. A continuación repite la operación en la otra cámara y podrá sentir la diferencia del sonido entre las dos. (Ver simulación en el CD adjunto. Archivo absorción.avi)

Con las dimensiones y materiales especificados y aplicando las expresiones 2.6, 2.11 y 2.13 obtenemos los siguientes tiempos de reverberación en las dos cámaras:

TIEMPOS DE REVERBERACIÓN ESPERADOS

FRECUENCIA [Hz]	Cámara absorbente		Cámara reverberante	
	$\bar{a}$	$T_{60}$	$\bar{a}$	$T_{60}$
125	0,42	0,12	0,012	4,19
250	0,66	0,08	0,012	4,19
500	0,73	0,07	0,012	4,19
1000	0,74	0,07	0,022	2,32
2000	0,76	0,07	0,022	2,32
4000	0,79	0,07	0,012	4,19

Tabla 2.3

Los valores se calcularon considerando  $a = 1$  para ventana y despreciando el efecto de la ampolleta y de la campana.

### 3. Modulo de transmisión de energía sonora a través de las paredes

#### 3.1. - Marco teórico

##### 3.1.1 – Interacción de una onda incidente sobre un panel infinito. <sup>[3]</sup>

Si un panel infinito, plano, homogéneo, no amortiguado e isotrópico, rodeado de aire en sus dos caras, es impactado en una de ellas por una onda sonora (onda incidente), vibra con una amplitud proporcional al nivel de presión de la onda y en las mismas frecuencias que componen su espectro, ocasionando que la masa de aire que se encuentra al otro lado del panel sea excitada por su movimiento, traspasándole una cierta cantidad de la energía proveniente de la onda incidente. Esta energía se propaga en el aire en forma de onda plana, en la misma dirección de la onda incidente y se denomina onda transmitida. En general la cantidad de energía que “pasa” al otro lado de un panel depende de la rigidez, masa y amortiguamiento de la pared, ángulo de incidencia y la frecuencia o componentes de frecuencia de la onda sonora que impacta.

Cuando la onda impacta el panel, existirá siempre una componente de variación de presión perpendicular a su superficie, que genera ondas de pliegue en el, (por continuidad en la misma frecuencia de la onda incidente), las cuales son las responsables de producir la perturbación en la masa de aire al otro lado del panel (en la misma frecuencia) debido a los grandes desplazamientos en dirección transversal que generan este tipo de ondas. Aunque al incidir un sonido sobre la placa también se pueden generar ondas longitudinales, transversales y torsionales, estas no son tenidas en cuenta debido a que la radiación de sonido que generan es muy pequeña en comparación a las de pliegue.

En los sólidos, la velocidad del sonido varía dependiendo de las características físicas del material y la frecuencia. Para ondas de pliegue la velocidad de propagación esta dada por:

$$C_p = \sqrt[4]{\frac{W^2 \cdot B}{r_s}} \quad (3.1)$$

Donde:

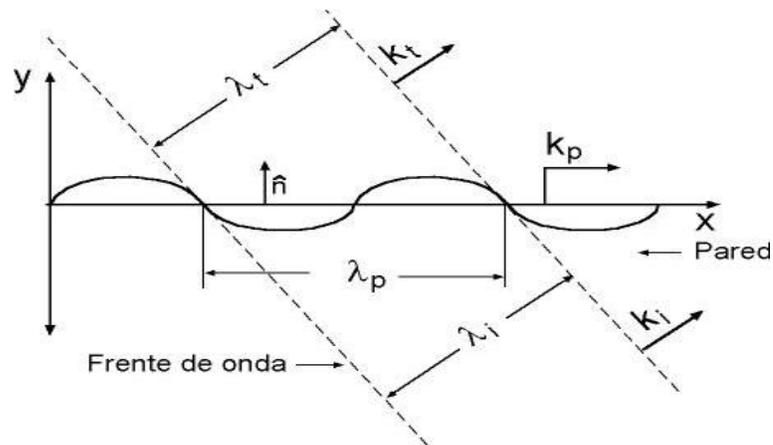
$W$ : Frecuencia de la onda sonora incidente

$B$ : Rigidez al pliegue [Nm]

$\rho_s$ : Densidad superficial del material [Kg/m<sup>2</sup>].

Como podemos ver, la velocidad de propagación de la onda depende de la frecuencia y de las características físicas del material. Cuando la velocidad de propagación del sonido en el aire es la misma que en el sólido, la intensidad de la onda transmitida es casi igual a la de la onda incidente debido a que  $\rho$  es igual en las tres ondas (incidente, de pliegue y transmitida), produciendo que los desplazamientos de las partículas en los tres medios estén en fase y como consecuencia de ello, la impedancia que el panel ofrece a la onda sonora tiende a cero.

La figura 3.1 muestra la situación antes descrita:



**Figura 3.1**

Donde:

$\lambda_i, \lambda_p, \lambda_t$  : Longitudes de onda de las ondas incidente, de pliegue y transmitida respectivamente.

$K_i, K_p, K_t$  : Números de onda de las ondas incidente, de pliegue y transmitida respectivamente.

Como:

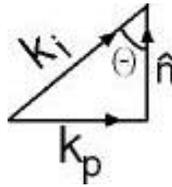
$$k_i = 2p/l_i \quad (3.2)$$

$$w = kc$$



$$k_p = 2p/l_p \quad (3.3)$$

Y:



Podemos encontrar la siguiente relación:

$$\frac{l_i}{l_p} = \text{sen } \theta \quad (3.4)$$

Al estudiar esta expresión nos damos cuenta que para cada ángulo de incidencia existe una sola frecuencia en la que se cumple que la velocidades de propagación son iguales. Este se conoce como ángulo de coincidencia ( $\theta_{co}$ ). Debido a que la función seno no puede tomar valores mayores a la unidad, tenemos un límite inferior de frecuencia para que se cumpla la condición dada, la cual se denomina frecuencia crítica, y se puede calcular con como se indica en la expresión 3.5:

$$f_c = \frac{c^2}{2p} \cdot \sqrt{\frac{r_s}{B}} = \frac{c^2 \cdot \sqrt{12}}{2p \cdot h} \cdot \sqrt{\frac{r_v}{E}} \quad (3.5)$$

Donde:

h: Ancho de la pared [m]

E: Módulo de Young [N/m<sup>2</sup>]

$\rho_v$ : Densidad del material en [Kg/m<sup>3</sup>]

### 3.1.2 – Cuantificación de la pérdida por transmisión inducida por paneles infinitos.

Para determinar la cantidad de energía que radia la pared infinita en la cara opuesta a la que es impactada por la onda sonora, se define el coeficiente de transmisión  $t$  como:

$$t = \frac{I_r}{I_i} = \frac{|p_r|^2}{|p_i|^2} \quad (3.6)$$

Donde:

$I_t$  : Intensidad transmitida.

$I_i$  : Intensidad incidente.

$P_t$  : Presión producida por la onda transmitida.

$P_i$  : Presión producida por la onda incidente

Podemos hacer una representación de lo que ocurre con la presión cuando una onda sonora impacta una pared como se muestra en la figura 3.2

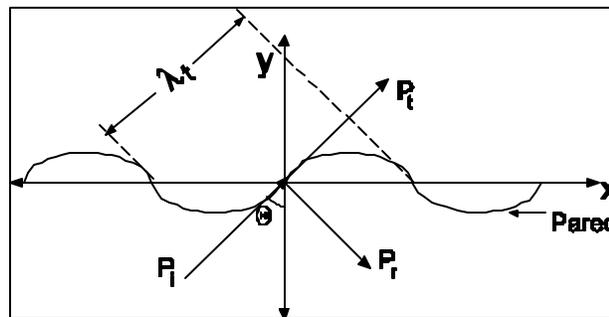


Figura 3.2

Si hacemos el análisis matemático correspondiente, obtenemos que la función de la presión esta dada por:

$$p(x, y) = \begin{cases} \left( p_i \ell^{-jk_o y \cos \mathbf{q}} + p_r \ell^{jk_o y \cos \mathbf{q}} \right) \ell^{-jk_o x \sin \mathbf{q}} & \text{si } y < 0 \\ p_t \ell^{-jk_o y \cos \mathbf{q}} \ell^{-jk_o x \sin \mathbf{q}} & \text{si } y > 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde:

$k_o$  : Número de onda de la onda en el aire

$k_p$  : Número de onda de pliegue

Nótese que si  $Y = 0$  entonces la expresión queda reducida a.

$$p(x, 0) = (p_i + p_r + p_t) \ell^{-jk_o x \sin \mathbf{q}} \quad (3.8)$$

Si aplicamos la ecuación de Euler, las condiciones de frontera y hacemos un desarrollo algebraico con las expresiones 3.7 y 3.8 podemos llegar a la siguiente expresión:

$$\left| \frac{P_t}{P_i} \right| = \left[ \frac{z_q \cos \mathbf{q}}{2r_o c} + 1 \right]^{-1} \quad (3.9)$$

Donde:

$Z_q$ : impedancia específica del panel para un ángulo de incidencia ?

Para cuantificar la atenuación que produce un panel a una onda sonora que “pasa” a través de él, se define la pérdida de transmisión como la diferencia entre el nivel de intensidad incidente y el transmitido<sup>5</sup>. Este se relaciona con el coeficiente de transmisión como sigue a continuación:

$$TL = 10 \log \left( \frac{1}{t} \right) \quad (3.10)$$

Para una placa delgada, homogénea, e isotrópica la impedancia específica esta dada por:

$$z_q = j\omega r_s \left[ 1 - \left( \frac{k_o}{k_B} \right)^4 \text{sen}^4 q \right] \quad (3.11)$$

Si combinamos las ecuaciones 3.6, 3.9, 3.10 y 3.11 y asumimos que  $k_0 \ll k_B$  obtenemos una expresión sencilla para cuantificar la pérdida por transmisión, la cual se conoce como ley de la masa.

$$TL = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega r_s}{2r_0 c} \cos q \right)^2 \right] \quad (3.12)$$

Como vemos en esta expresión, la pérdida por transmisión depende de la frecuencia, la densidad superficial de masa y el ángulo de incidencia, y además tiene la restricción, por la aproximación hecha, de solo poder aplicarse para frecuencias mucho más pequeñas que la frecuencia crítica.

Para poder trabajar fácilmente con esta fórmula, *Beraneck* propuso la ley de la masa de incidencia aleatoria ( $TL_{\text{random}}$ ) y la ley de masa de incidencia de campo ( $TL_{\text{field}}$ ) para lo cual hizo un promedio de la pérdida por transmisión producida en distintos ángulos y obtuvo las expresiones 3.14 y 3.15. Ambas se basan el valor de pérdida por transmisión de incidencia normal ( $TL_0$ ) obtenida cuando el sonido incide en un ángulo de cero grados con respecto a la normal de la pared como se muestra a continuación:

$$\text{Si } q = 0 \quad TL_0 = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{\omega r_s}{2r_0 c} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

Si existe un campo sonoro totalmente difuso y  $TL_0 > 15$  dB, podemos utilizar la expresión de  $TL_{\text{random}}$

$$TL_{\text{random}} = TL_0 + 10 \log (0,23 * TL_0) \quad (\text{dB}) \quad (3.14)$$

Si tenemos un  $TL_0 > 15$  dB podemos usar la ley de masa de incidencia de campo

$$R_{\text{campo}} = R_o - 5 \text{ (dB)} \quad (3.15)$$

Al analizar la expresión 3.11 cuando  $k_0 = k_B$ , estamos en la frecuencia crítica y la impedancia que produce la placa tiende a cero. En consecuencia la pérdida por transmisión de la misma es nula.

Para calcular la pérdida de transmisión para paneles simples en todo el rango audible existen diferentes métodos propuestos por distintos autores, pero todos tienen como base común considerar la ley de la masa (normalmente de incidencia de campo) o una aproximación de esta para frecuencias menores a la frecuencia crítica, tomar como nulo o casi nulo el aislamiento en la frecuencia crítica y para frecuencias superiores una curva con una pendiente de 9 dB por octava.

A continuación se muestran dos formas de calcular la pérdida por transmisión para frecuencias superiores a la frecuencia crítica.

Según Cremer: 
$$TL = 20 \cdot \log\left(\frac{w \cdot r_s}{2 \cdot r_o}\right) + 10 \cdot \log(2 \cdot h) + 5 \cdot \log\left(\frac{f}{f_o}\right) \text{ (dB)} \quad (3.16)$$

Según Heckl: 
$$TL = 20 \cdot \log\left(\frac{w \cdot r_s}{2 \cdot r_o c}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{1}{2 \cdot h}\right) \sqrt{\frac{f_c}{f}} \text{ (dB)} \quad (3.17)$$

La variación de estas expresiones respecto a las de la ley de la masa se debe a que en frecuencias superiores a la frecuencia crítica, la impedancia ofrecida por el material a la onda sonora presenta una mayor dependencia del amortiguamiento interno.

### 3.1.3. – Paneles finitos

El comportamiento de las ondas sonoras en paneles finitos se diferencia de los paneles infinitos, en que en los primeros, la presencia de bordes, genera ondas de pliegue reflejadas. La interferencia entre estas y las incidentes produce ondas estacionarias, lo que se puede convertir en desplazamientos transversales de gran amplitud en el panel<sup>6</sup>.

En un panel las ondas estacionarias, producidas debido a que la onda se propaga en un camino cerrado volviendo siempre en fase al punto en que fue generada, generan resonancias, lo cual debe ser tenido muy en cuenta al calcular la pérdida por transmisión producida por este tipo de estructuras, ya que en estas frecuencias el desplazamiento transversal del panel se puede traducir en variaciones muy importantes en la cantidad de sonido radiado por el panel. Para determinar cuanta es la energía que radia el panel en estas frecuencias (denominadas modos normales de vibración) se utilizan métodos estadísticos, y aunque las resonancias se producirán en todo el espectro, normalmente sólo se tienen en cuenta los primeros modos, ya que después de cierto punto la densidad de estos modos es tal que se puede considerar que no afecta la pérdida por transmisión producida por el panel.

Las frecuencias en las que ocurren los modos normales de vibración se pueden determinar con la expresión 3.18

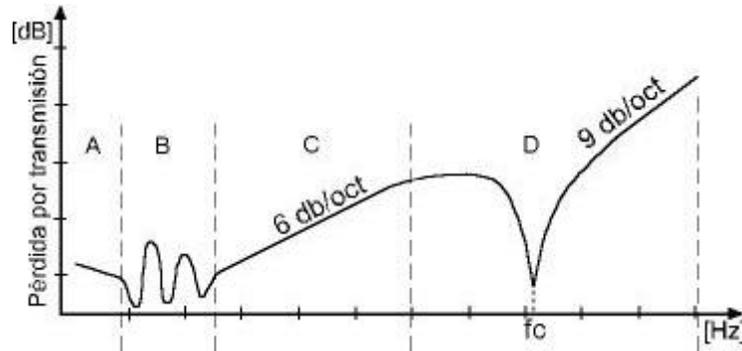
$$f_{m n} = \frac{p}{2} \left( \frac{B}{r_s} \right)^{1/2} \left[ \left( \frac{m}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{n}{l_y} \right)^2 \right] \quad m, n = 1, 2, 3... \quad (3.18)$$

Donde:

$l_x, l_y$ : Dimensiones del panel en direcciones x, y respectivamente.

Debido a la complejidad que implica analizar y determinar la pérdida por transmisión en estas frecuencias, lo usual cuando se utilizan paneles simples para atenuar el sonido, es realizar un diseño en el cual las resonancias se produzcan fuera del rango de interés.

En términos generales la pérdida por transmisión entregada por un panel finito se comporta de la manera que se muestra en el gráfico 3.1



**Gráfico 3.1**

Las divisiones marcadas en el gráfico se deben a que en cada uno de estos sectores el factor que más determinante de la pérdida por transmisión cambia según se describe a continuación:

- A : Región controlada por la rigidez
- B : Región controlada por las resonancias.
- C : Región controlada por la masa.
- D : Región controlada por el amortiguamiento y las coincidencias

### 3.1.4. – Pérdida por transmisión de materiales porosos <sup>[3]</sup>

Como se dijo en el capítulo 2, cuando una onda sonora viaja a través de un material poroso, la fricción producida con las fibras del material hacen que se disipe energía en forma de calor. La cantidad de energía que se disipa depende de la resistencia al flujo que ofrece el material, su densidad y porosidad, la distribución de sus canales internos debido a la disposición de las fibras y en algunos casos de su elasticidad. Si la longitud de onda del sonido que se

propaga en el material es grande comparada con su espesor, se denomina lamina (*sheet*) o en bloque (*bulk*) si la longitud de onda es pequeña en comparación a su espesor.

En los materiales tipo lamina, los efectos viscosos y la densidad superficial controlan su comportamiento respecto a la onda sonora que se propaga en su interior. En los tipo bloque los efectos viscosos y termales así como la densidad del material sólido lo controlan.

La resistencia al flujo esta definida como:

$$R_1 = \frac{\Delta p}{\Delta T u} \quad \text{rayls / m} \quad (3.19)$$

Donde:

?P : Diferencia de presión a través del espesor del material, medida en dirección de la velocidad de la partícula.

?T : Espesor del material

u : Velocidad de partícula a través del material

La porosidad (Y) es la razón entre el volumen de las cavidades de aire en el interior del material y su volumen total. Esto es:

$$Y = \frac{V_a}{V_m} \quad (3.20)$$

El coeficiente volumétrico de elasticidad del aire K se define como sigue:

$$K = - \frac{\Delta P}{\Delta V} V \quad (3.21)$$

Donde :

V : Volumen total de aire considerado [m<sup>3</sup>]

?P : Delta de la presión [N/m<sup>2</sup>]

$\Delta V$  : Delta de volumen [ $m^3$ ]

La estructura interna de un material poroso se describe por el factor de estructura  $k$ . La variación de este parámetro puede producir un incremento de la densidad del aire en las cavidades del material. Este incremento es resultado de los caminos que deben tomar las partículas de aire cuando oscilan en el interior del material Experimentalmente (Zwikker y Kosten, 1941) se ha encontrado que este valor puede variar entre 1 y 1.2 para materiales flexibles y entre 1 y 3 para materiales rígidos.

## **3.2. - Diseño**

### **3.2.1. – Objetivo**

Mostrar al usuario del módulo como distintos materiales, dependiendo de sus características físicas, atenúan el sonido en distinta proporción.

### **3.2.2. – Proceso**

Para poder realizar una demostración comparativa del comportamiento de los distintos materiales respecto a la atenuación de sonido es necesario que sean expuestos al mismo tipo de sonido o ruido, bajo las mismas condiciones. Por lo tanto se decidió tener una fuente fija, emitiendo el mismo sonido durante toda la prueba y que los materiales se interpongan en el camino de la onda sonora de la fuente al receptor (usuario del modulo).

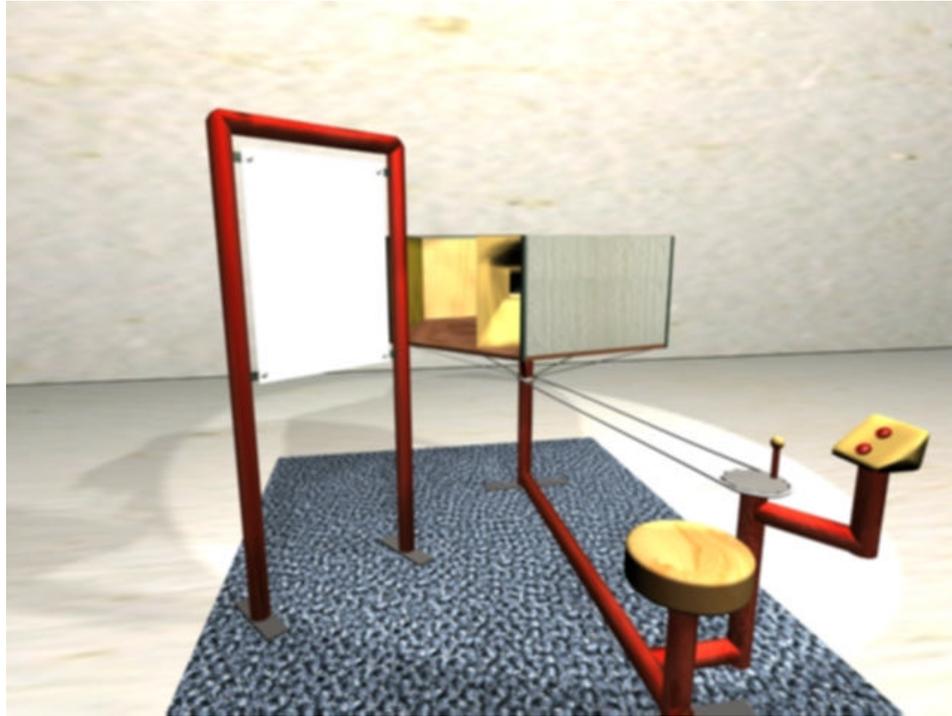
El diseño es una variante del propuesto para el modulo de direccionalidad del sonido, en el cual se reemplaza la caja acústica por un “*tambor*” hexagonal, cuya base es de triplex de 5

mm. y la estructura esta hecha con rieles de aluminio y en cada uno de sus lados tiene los siguientes materiales:

- 1) Nada
- 2) Icopor de 1 cm. de espesor. (plumavit)
- 3) Vidrio de 1 cm. de espesor.
- 4) Lamina de acero o hierro de 0.5 mm de espesor.
- 5) Triplex de 1 cm. de espesor. (madera terciada)
- 6) Espuma de colchón de 1 cm. de espesor.

Los materiales se escogieron debido a que son de uso común en distintas aplicaciones y presentan distintos grados de atenuación del sonido. La espuma de colchón (idealmente se usaría algún tipo de material absorbente como sonex o espuma acústica pero por costos y mantenimiento se optó esta espuma) y el icopor (plumavit) se escogieron para demostrar que la creencia común de que materiales de este tipo sirven para hacer aislamientos acústicos es errada. Las muestras de material van fijadas a la estructura de rieles de tal manera que se puedan considerar como un panel simplemente soportado. En el caso del vidrio y el acero, las placas se deben amortiguar con goma de 2 mm sus uniones

En el centro del tambor y fijo a la estructura se ubica una bocina Motorola montada en una caja cerrada, en la cual también están el amplificador y un sistema de reproducción de CD igual al utilizado en el modulo de direccionalidad. Se escogió esta bocina como fuente debido a que su ángulo de dispersión es bastante cerrado lo que permite que el sonido se pueda enfocar hacia el material de muestra. Sin embargo para asegurar que el sonido solo impacte la muestra que esta frente al usuario y evitar reflexiones dentro del tambor hexagonal, se monta una bocina de MDF de 1 cm de espesor desde la caja de montaje hasta la muestra. En la figura 3.3 se muestra un esquema general del modulo. Para mayores detalles de construcción y dimensiones, referirse al archivo para autocad “transmisión.dwg” en el CD adjunto.

**Figura 3.3**

Otro motivo igual de importante al momento de escoger la fuente fue su rango de frecuencia (500 [Hz] a 20 [kHz]), debido a que sería imposible atenuar el sonido en frecuencias más bajas en las magnitudes que se requiere con materiales de esas dimensiones y características físicas.

En la parte superior y cubriendo todo el tambor se coloca una tapa de acrílico transparente y la bocina de madera se cubre en su interior con una capa de lana mineral de 3 cm tapada con paño hilac, para que atenuar las reflexiones que se produzcan.

Los sonidos escogidos para este módulo fueron ruido blanco y la voz de una mujer, grabada en el estudio de la universidad en julio del 2002, leyendo un fragmento de “el principito” de Antoine de Saint Exupéry. Con este último la gente puede relacionar mejor el fenómeno con lo que pasa en la vida diaria. Por este mismo motivo se deja como opción el sonido de tráfico de una calle para reemplazar el ruido blanco (grabado en la calle los laureles esquina con los robles, en

agosto del 2002 con un DAT portátil). Estos sonidos se encuentran como pistas de audio en el CD adjunto con el nombre de transmisión 1.wav, transmisión 2.wav y transmisión 3.wav. La duración de cada pista es de 40 segundos y el nivel que debe generar la bocina en la posición del usuario es de 85 [dB] . La potencia requerida del amplificador es de 20 Watts.

Al igual que en los otros módulos un letrero con las instrucciones y explicación de fenómeno se ubica a un costado de este. (Ver anexo 1, pagina 96)

La tabla 3.1 es un listado de los materiales requeridos para la construcción del módulo. Los costos están en pesos colombianos.

**MATERIALES Y COSTOS DEL MODULO DE TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA SONORA A TRAVÉS DE LAS PAREDES**

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
1	Amplificador	-----	-----
1	Radio Sony SXC 250	200.000	200.000
1	Bocina	20.000	20.000
1	Laminas MDF de 1.53×2.44×0.001 m.	45.000	45.000
1	Laminas MDF de 1.53×2.44×0.0018 m.	93.000	93.000
4	Metro tubo CR de 2.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	9.200	36.800
6	Angulo crudo de 3 m ×17 ×19 mm	3.900	23.400
2	Tee crudo de 3 m ×17×19 mm	1.300	2.600
100	Tornillos 12 ×1" auto roscante	1.700	1.700
2	Metros <sup>2</sup> de acrílico transparente de 3 mm.	105.000	105.000
1	Placa de hierro de 0.78×0.5×0.005 m	5.000	5.000
1	Placa de triplex de 0.78×0.5×0.01 m	15.950	15.950
1	Placa de icopor de 0.78×0.5×0.02 m	1.000	1.000
1	Vidrio de 0.78×0.5×0.01 m	30.000	30.000
1	Espuma de 0.78×0.5×0.02 m	1.000	1.000
0.5	M <sup>2</sup> de goma de 2 mm	15.000	15.000
1	Piñón de bicicleta de 28 dientes	5.000	5.000
1	Piñón de bicicleta de 48 dientes	7.000	7.000
1	Sistema de rodamiento (eje de centro)	4.000	4.000
4	Metro de cadena de bicicleta.	1.200	4.800
20	Cm. de tubo liso 5/8	1.000	1.000
2 m	Lamina metal de 1 m de 3/16"	3.000	6.000
1	Butaca	20.000	20.000
1	Plug giratorio	5.000	5.000
3	Metros Cable 2 × 18	350	
1	Tomacorriente doble	3.450	3.450
1	Enchufe	3.900	3.900
X	Metros cable eléctrico	350	
5 m	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	27.500
2	Laminas acrílico 80×56×0.3 cm.	26.000	52.000
4	Tornillos plásticos	250	1.000
1	Impresión en ploter	8.000	8.000
<b>Total de modulo:</b>			<b>744.000</b>
<b>Total en USD:</b>			<b>270</b>

**Tabla 3.1**

### **3.2.3. – Funcionamiento del módulo**

El usuario se sienta en la butaca y oprime uno de los botones para encender la fuente, que emite ruido blanco o la grabación de una voz femenina, y mueve la manivela haciendo girar el tambor con materiales. Al pasar frente a la fuente, cada uno de los materiales reduce en NPS en distinta proporción permitiéndole comparar cuanto es la atenuación entregada por cada uno de ellos. (Ver simulación en el CD adjunto. Archivo transmisión.avi)

## 4. Modulo de absorción - transmisión - reflexión de la energía sonora

### 4.1. - Marco Teórico

#### 4.1.1. – Ondas sonoras al interior de tubos abiertos <sup>[6]</sup>

Supongamos un tubo de longitud  $l$  y diámetro  $a$ , con un pistón oscilando armónicamente en un extremo con una velocidad angular  $W$  y abierto en el otro como muestra la figura 4.1

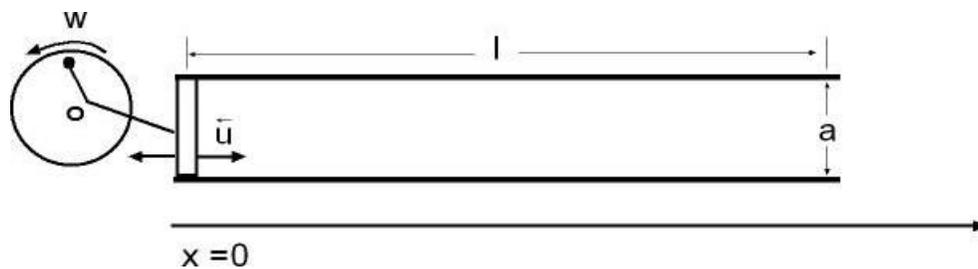


Figura 4.1

El desplazamiento del pistón dentro del tubo generará ondas sonoras a una frecuencia  $f$  determinada por la velocidad angular. Si la longitud de onda de esa frecuencia es tal que :

$$l > 6a \quad (4.1)$$

Entonces las ondas en el interior del tubo serán planas y por lo tanto cumplen con la siguiente condición:

$$p(x,t) = \left( A e^{-jk(l-x)} + B e^{jk(l-x)} \right) e^{-j\omega t} \quad (4.2)$$

Donde A y B se determinan con las condiciones de borde.

En  $x = l$  la impedancia mecánica de la onda es igual a la impedancia mecánica del extremo  $Z_{ml}$ . Como la fuerza del fluido en ese punto, por 4.2 es:

$$p(l, t)S \quad (4.3)$$

Donde:

S: Superficie del extremo del tubo

Si aplicamos la ecuación de Euler, para despejar la velocidad en  $x = l$  podemos encontrar el valor de la impedancia en ese punto, que tiene el siguiente resultado:

$$Z_{ml} = \rho_o c S \frac{A + B}{A - B} \quad (4.4)$$

Cuando una onda sonora que se propaga por un medio hasta alcanzar la frontera y pasa a otro medio, una cierta cantidad de energía es reflejada al medio en el cual se desplaza y la restante es transmitida al segundo medio. Si suponemos ondas planas y que los dos medios son fluidos, podemos definir los coeficientes de transmisión y reflexión de presión de manera análoga a los definidos en el capítulo 2. En base a estos podemos hallar los coeficientes de transmisión ( $T_I$ ) y reflexión de intensidad ( $R_I$ ) para luego encontrar los coeficientes de transmisión y reflexión de potencia ( $T_p$  y  $R_p$ ), que están definidos según la ecuación 4.4 y 4.5.

$$T_p = \frac{A_t}{A_i} T_I = \frac{I_t}{I_i} \quad (4.5)$$

Donde:

$A_i, A_t$  : Área en la cual inciden y se transmiten las ondas sonoras respectivamente.  
 $I_i, I_t$  : Intensidad incidente y transmitida respectivamente.

$$R_p = R_I = \frac{I_r}{I_i} \quad (4.6)$$

Donde:

$I_i, I_r$  : Intensidad incidente y reflejada respectivamente.

Y se cumple que:  $R_p + T_p = 1$  (4.7)

Podemos calcular el coeficiente de transmisión de potencia a partir de:

$$T_p = 1 - |B/A|^2 \quad (4.8)$$

Despejando B/A de 4.3, utilizando la expresión de impedancia de radiación para un tubo sin pestaña en el borde, y asumiendo  $ka \ll 1$  donde a es el radio del tubo, llegamos al siguiente resultado:

$$T_p = (ka)^2 \quad (4.9)$$

Esta expresión nos indica que para frecuencias más bajas el tubo radía sonido con mayor intensidad que en frecuencias altas.

## 4.2. - Diseño

### 4.2.1. – Objetivo

Mostrar al usuario del módulo como los materiales dependiendo de sus características físicas reflejan, absorben y transmiten el sonido en distinta proporción

#### **4.2.2. – Proceso**

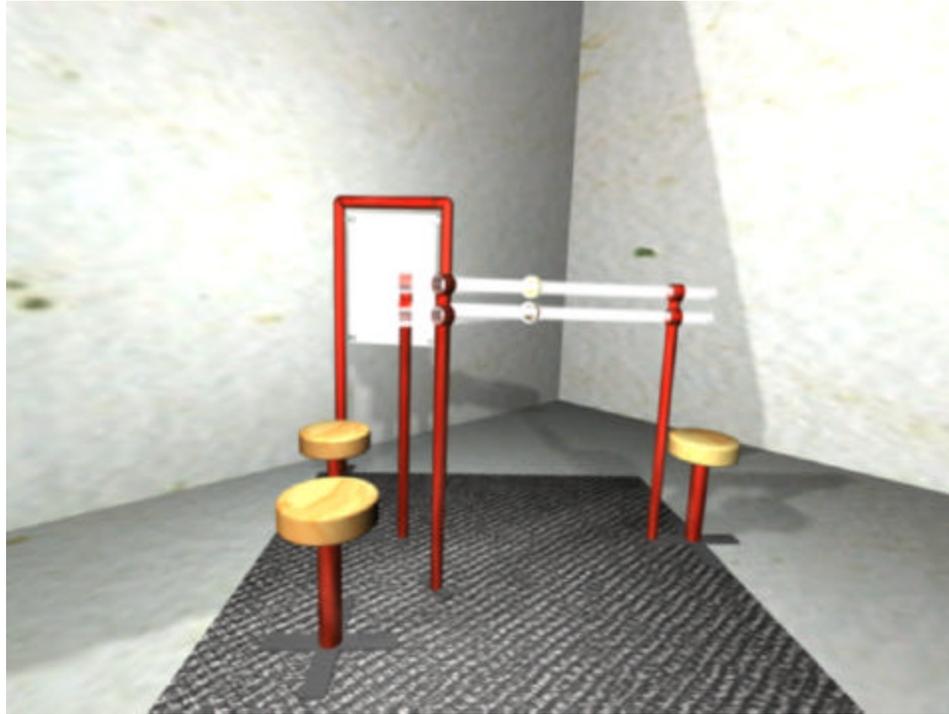
Como una opción más económica, se diseñó este módulo en el que se combina la idea de los dos anteriores, obviando el concepto de reverberación.

Para mostrar como el sonido es absorbido, reflejado o transmitido por un material, se debe generar un ambiente sonoro en el que las condiciones sean las mismas salvo por la muestra que se está poniendo a prueba.

Se diseñó el módulo, utilizando como campo acústico, el que se produce al interior de un tubo cuando una fuente genera variaciones de presión sonora en uno de sus extremos.

El módulo consiste en un tubo de acrílico transparente, (primer tubo), de 1,72 m de longitud, 3.8 cm. de radio externo y con un espesor de 5 mm, al que se le inserta otro tubo (segundo tubo) de las mismas características, pero una longitud de 0,86 m, en un ángulo de 45° con respecto al eje del primer tubo, a una distancia de 0,86m de su extremo. En ese punto se introduce una muestra de material absorbente, en el mismo ángulo que el segundo tubo.

Otra estructura de tubos exactamente igual, se encuentra encima de la primera, sujeta por un soporte metálico, pero la muestra es una lámina de metal. Un esquema del módulo se muestra en la figura 4.2



**Figura 4.2**

La estructura metálica eleva los tubos a 1.15 m del suelo. En los extremos abiertos de los tubos se ubican butacas para que el modulo pueda ser usado por personas de distintas alturas y el letrero con las instrucciones y explicaciones se encuentra a la izquierda del mismo. Para mayores detalles y dimensiones, referirse al archivo para autocad “absorción tubo.dwg” en el CD adjunto.

Con las dimensiones del tubo, usando 4.1 se puede asegurar que en su interior se propagan ondas planas en frecuencias inferiores a 860 Hz , y debido a que el metal tiene un coeficiente de reflexión mucho más alto que la espuma el porcentaje de sonido que refleje será mucho mayor que el de la espuma. La situación universal ocurrirá con la cantidad de sonido que pase a través de ellos.

En su construcción se debe tener cuidado en amortiguar los tubos poniendo goma en el interior de los aros de aluminio que los sujetan, y asegurarse que las uniones de los tubos queden

totalmente herméticas y sin formas irregulares en su interior. Es necesario también amortiguar correctamente la muestra de metal.

La tabla 4.1 muestra la lista de materiales que se requieren para construir el modulo. Los precios están en pesos colombianos.

MATERIALES Y COSTOS DEL MODULO DE ABSORCIÓN-TRANSMISIÓN-REFLEXIÓN DE LA ENERGÍA SONORA

Cantidad	Descripción	Valor unitario	Valor total
6	M de tubo de acrílico de 4.8 cm de radio y 5 mm de espesor	58.000	348.000
20	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	110.000
4	Discos de acrílico 11 de diámetro y 5 mm de espesor	1.000	4.000
10	Cm <sup>2</sup> de espuma de 1 cm de espesor	----	----
10	Cm <sup>2</sup> Lamina de acero de 0.5 mm	----	----
3	Sillín de madera	20.000	60.000
	Tornillos		
12	Lamina metal de 0.4 m de 3/16"	1.200	14.200
1	M <sup>2</sup> de goma de 2 mm	15.000	15.000
4	Laminas de aluminio de 1 mm	500	2.000
5 m	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	5.500	27.500
2	Laminas acrílico 80×56×0.3 cm.	26.000	52.000
4	Tornillos plásticos	250	1.000
<b>Total de modulo:</b>			<b>635.000</b>
<b>Total en USD:</b>			<b>250</b>

TABLA 4.1

#### 4.2.3. – Funcionamiento del modulo

Para utilizar este módulo se requiere de dos personas, una de las cuales se sienta frente al tubo en la posición indicada en las instrucciones, y su compañero en alguna de las otras dos butacas. La primera persona habla por uno de los tubos y la otra escucha lo que ésta dice

poniendo su oreja en la terminación del mismo tubo. Dependiendo si el material que hay en la muestra es metal o espuma y si esta en el tubo que forma el ángulo de  $45^\circ$  ó en la continuación del otro, va a escuchar el sonido con mayor o menor intensidad. Después se hace lo mismo en el siguiente tubo y se intercambia de posiciones. De esta manera el visitante puede comparar lo que pasa cuando en medio del camino del sonido se interpone un material con un alto coeficiente de reflexión o absorción. Ver simulación en el archivo “absorción tubo.avi” en el CD. Adjunto

A continuación se muestra el texto que va en el letrero de instrucción y explicación del fenómeno demostrado en el módulo

### **¿Qué hacer?**

Dile a un amigo que se siente en la butaca marcada con la X y pídele que hable en los tubos. Mientras el hace esto pasa tu por el extremo del tubo en el cual él esta hablando y escucha. Después cambien de posición, tú hablas y el escucha.

### **¿Qué pasa?**

Cuando una onda sonora alcanza una superficie (como por ejemplo una pared), una cantidad de energía atraviesa la superficie, produciendo la radiación de sonido al otro lado de la pared, otra cantidad de energía se transforma en calor, un porcentaje viaja a través de la superficie y la energía restante es reflejada.

El porcentaje de energía sonora que es reflejada depende de las características físicas del material, principalmente de la porosidad y la cantidad de energía sonora radiada al otro lado de la superficie de las dimensiones de la superficie, la masa y la rigidez.

El tubo de arriba tiene en la mitad una lamina de metal el cual por ser poco poroso hace que gran parte del sonido que llega a el sea reflejado; por lo tanto se escucha la voz de tu compañero en el extremo del tubo B pero no se escucha en el extremo tubo A. Lo contrario sucede con el tubo de arriba que tiene una muestra de espuma que por tener poca masa y ser poco rígida deja pasar una gran cantidad de energía sonora y refleja el sonido en menor proporción que la lamina de metal. Es por esto que escuchas más fuerte la voz de tu compañero en el extremo del tubo A que en el extremo del tubo B.

Como la voz está compuesta por frecuencias medias y medio-altas, los materiales con mayor masa, como el metal, tienen una mayor **pérdida por transmisión** que los materiales con poca masa (espuma), lo que permite que pase una menor cantidad de energía sonora

### **¿Como absorben sonido los materiales?**

La cantidad de sonido que es absorbido por un material depende principalmente de la cantidad de energía sonora que es transformada en calor. En los materiales porosos el sonido debe viajar a través de las cavidades, lo que le hace gastar energía (que es transformada en calor), y que se traduce en una reducción del nivel de presión sonora (nps) .

Es importante notar que la cantidad de energía absorbida no tiene relación directa con la transmitida. Esto quiere decir que si al interior de una sala colocamos una gran cantidad de material absorbente y el tiempo de reverberación disminuye, la intensidad del sonido que se radia fuera de esta prácticamente no variará.

### **¿Por que un material atenúa más sonido que otro?**

El sonido es producido por la vibración de un objeto (como la membrana de un parlante) la cual mueve (hace oscilar) las partículas de aire que están a su alrededor, transmitiéndoles una

cierta cantidad de energía y estas a las que están a su lado y así sucesivamente hasta que las partículas de aire que están en nuestro oído vibran, haciendo que se mueva el tímpano, percibiendo de esta manera la energía sonora (el sonido).

Pero cuando una onda sonora que viaja en el aire tiene que atravesar una pared, necesita una mayor cantidad de energía para “mover” las partículas de ésta, para que muevan las de aire que están al otro lado y así el sonido siga su camino. La cantidad de energía que se transmite al atravesar la pared depende principalmente de la masa del material, por esto un cuerpo con mayor masa (más denso, como el hierro respecto a la espuma) hace que el sonido sea atenuado en una mayor proporción al atravesarlo que en uno menos denso.

## 5. Módulo de psicoacústica

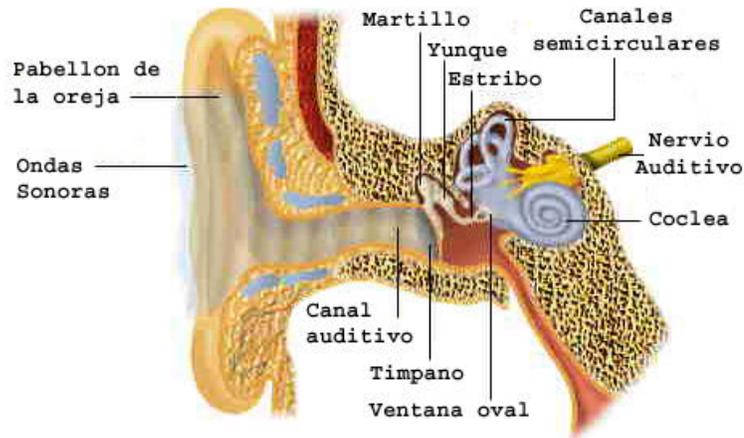
### 5.1. - Marco Teórico

#### 5.1.1. – El sistema auditivo humano

El oído humano está dividido en tres partes, el oído externo, medio e interno. El externo está formado por el pabellón de la oreja y el canal auditivo, el cual mide alrededor de 2.54 cm de longitud y 0.6 de diámetro, lo que lo hace que su frecuencia de resonancia este alrededor de los 3000 Hz, produciendo por esto la mayor sensibilidad del oído en esta frecuencia. El oído medio, compuesto por el tímpano, la cavidad timpánica y la cadena de huesecillos (martillo, yunque y estribo). La cadena de huesecillos también sirve como sistema de protección y ganancia del aparato auditivo, ya que por la contracción del músculo *stapedius* la cadena se rigidiza disminuyendo la transmisión de vibración a la cóclea. Es importante notar que el músculo demora aproximadamente 100 milisegundos en contraerse, por lo que esta protección no funciona para ruidos impulsivos. El oído medio está conectado a la parte trasera de la garganta a través de la trompa de Eustaquio, lo que sirve para igualar las presiones dentro y fuera del oído. El interno está compuesto, por las ventanas oval y redonda, los canales semicirculares, que sirven para el sentido de equilibrio y posición, la cóclea, y el nervio auditivo. La cóclea es un canal doble en forma de caracol de tres vueltas y media, con un diámetro de alrededor de 2 mm dividido en tres partes, la escala timpánica, el saco vestibular y la escala media. La escala timpánica y el saco vestibular están llenos de un líquido llamado perilinfa y se conectan entre si por el hericotema; en el extremo opuesto de cada una se encuentran las ventanas oval y redonda respectivamente. Separado de la escala timpánica por la membrana basilar, y por debajo del saco vestibular, se encuentra la escala media, la cual está llena de un líquido llamado endolinfa. Sobre la membrana basilar, y al interior de la escala media se encuentra el órgano de Corti, el cual transforma las

vibraciones que captan en la perilinfa las cerca de 3500 células ciliadas que lo forman, en señales nerviosas. La información que capta el oído es enviada al cerebro a través del nervio auditivo.

En la figura 5.1 se pueden ver la estructura del oído.



**Figura 5.1**

Su funcionamiento básico consiste en que el pabellón de la oreja capta el sonido que viaja en el aire, con mayor o menor intensidad dependiendo del ángulo de incidencia y las componentes de frecuencia del mismo, lo que es primordial para que podamos discernir si el sonido viene de adelante atrás, izquierda o derecha, aunque en este proceso intervienen muchas más variables, y lo envía al canal auditivo. Al final del canal auditivo se encuentra el tímpano, que es una delgada membrana la cual vibra al recibir la presión sonora del exterior, produciendo el movimiento de la cadena de huesecillos los cuales transmiten la vibración a la ventana oval. El sonido también puede llegar al oído interno a través de la vibración que produce en el cráneo siendo transmitida por medio del hueso temporal. La vibración de la ventana oval produce el movimiento de la perilinfa, y esta a su vez hace vibrar la ventana redonda, que sirve para compensar la presión al interior de la cóclea. El movimiento de la perilinfa es captado por las células ciliadas, y lo transforman en señales nerviosas que envían al cerebro a través del nervio auditivo, para que éste las interprete.

Como exactamente la misma estructura se encuentra en los dos oídos, el cerebro realiza su labor con las dos señales nerviosas recibidas, que normalmente difieren entre sí, haciendo que el sistema auditivo humano sea biaural.

El sistema nervioso biaural combina la información de los dos oídos, permitiendo a quien escucha, localizar la dirección de la cual provienen los sonidos y en algunos casos, orientarse y desplazarse sin necesidad de usar la visión. Cuando existen superficies reflectantes, la percepción biaural del sonido permite calcular la distancia entre la fuente sonora y quien percibe el sonido, a través del análisis de la reverberación. En la tabla 5.1 se describen algunas de las características del oído humano.

**Tabla 5.1**

<b>Exactitud</b>	<i>Intensidad:</i> alrededor de 1 dB <i>Frecuencia:</i> variaciones del 0.6%
<b>Ancho de banda</b>	Al rededor de 20 kHz <i>Ancho de banda critico:</i> $f/5$
<b>Resolución temporal</b>	<i>Azimuth binaural</i> , al rededor de 20 microsegundos (no se percibe Sensación de antes o después) <i>Clicks</i> , alrededor de 2 milisegundos ( sonidos con diferente orden de tiempo, pero sin sensación de antes o después) <i>Tonos musicales</i> , al rededor de 20 milisegundos (sensación de antes y después) <i>Simultaneidad</i> (tocar juntos) alrededor de 30 a 50 milisegundos <i>Ecos</i> (aplausos y voz) 50 a 60 milisegundos
<b>Umbral de audición</b>	En 3000 Hz alrededor de 10 Watts por metro cuadrado para gente con audición agúda
<b>Rango dinámico</b>	90 a 120 dB en 3000 Hz 30 a 60 dB en 30 Hz
<b>Enmascaramiento</b>	Alrededor de 30 dB pero es un fenómeno complejo

**Discriminación del oído**

### 5.1.2. – Relación sonido imagen

Utilizar distintas escalas musicales y sonidos para crear distintas sensaciones, es una técnica ampliamente utilizada por músicos alrededor del mundo. Si quieren producir la sensación de pesadez o lentitud componen melodías lentas y en notas bajas; por el contrario si se quiere generar la sensación de ligereza y velocidad, tocan notas altas ejecutadas rápidamente. Esto debido a que en la naturaleza usualmente este tipo de sonidos corresponden a las situaciones que se quiere representar. Sin importar la cultura a la que se pertenezca a medida que crecemos vamos asociando diferentes sonidos a distintos recuerdos o situaciones, como por ejemplo una alarma a una emergencia si crecimos en un ambiente urbano o el ruido producido con un animal determinado con una sensación de peligro. A medida que el conocimiento y las experiencias de una persona se van ampliando las imágenes y sensaciones que producen los sonidos también se amplían. De esta manera podemos relacionar un tipo de melodía o estructura armónica con un lugar o momento en la historia, o con un recuerdo determinado.

### 5.1.3. – Efecto Haas

Para localizar de la posición de origen de un sonido, el sistema auditivo se basa en la presentación dicótica inherente a los dos oídos por estar situados en diferentes puntos del espacio. Esto porque debido a su ubicación, el sonido llega normalmente a ellos con pequeñas diferencias de tiempo e intensidad dependiendo de la dirección de origen, lo que nos permite localizar la fuente sonora. Pero si tenemos dos fuentes ubicadas en distintos puntos del espacio generando el mismo sonido, la diferencia de tiempo con que estos alcancen nuestros oídos puede generar una percepción del origen del sonido que no es la verdadera.

Los ruidos, clicks, voces y tonos musicales normalmente comienzan en distintos tiempos, lo que permite a nuestro sistema auditivo ubicar correctamente la posición de la fuente sonora en un cuarto que tiene muros reflectantes. En una habitación con estas características, la combinación de muchos sonidos reflejados puede alcanzarnos con una intensidad mayor que el

sonido directo, pero esto no engaña a nuestros oídos. Nosotros escuchamos el sonido como si este procediera de la dirección de la cual proviene el sonido que nos llega primero. Esto se denomina efecto de precedencia o del primer frente de onda. También es conocido como efecto Haas, aunque lo que él investigó fueron las combinaciones de diferencia de nivel y retardos entre los canales de un par estereofónico de altavoces que producen una sensación de igual sonoridad de las dos señales en quien escucha.

Este fenómeno tiene una larga e interesante historia que está muy bien descrita en una publicación de Mark Gardner (1968b). En uno de los primeros experimentos, descrito por Joseph Henry en 1849, consistió en que un escucha recibe un sonido impulsivo, como un aplauso o un disparo, directamente y reflejado por un muro grande y suave. Cuando la fuente de sonido se mueve lejos del muro, después de cierta distancia el receptor percibe dos sonidos, el original y su eco. En este experimento se registró el eco cuando la diferencia de tiempo entre el sonido directo y el reflejado era de 25 a 35 milisegundos.

Haas (1951), Meyer y Choedder (1952), Lochner y Burger (1958), Kietz (1959) entre otros, realizaron estudios para determinar el umbral a partir del cual el retardo entre dos señales es percibido como un eco. Este umbral es dependiente del tipo de señal y de la diferencia de nivel entre las dos señales.

La tabla 5.2 muestra los resultados de los umbrales obtenidos por distintos autores.

Reference	Signal	Approximate level (dBSL)	Type of threshold	Value of threshold (ms)
Klemm (1920)	Clicks	—	Echo threshold	c. 2
Rosenzweig and Rosenblith (1950)	Clicks	—	Echo threshold	2
Cherry and Taylor (1954)	Speech of average speed	—	Echo threshold	20
Blodgett, et al. (1956)	Narrow-band noise around 425 Hz	—	Equal-loudness threshold	7.6
	Broadband noise 0.1–4.8 kHz	—		9.4
Guttman (1926)	Clicks	36	Echo threshold	3
		16		4.6
Babkoff and Sutton (1966)	Clicks	50	Echo threshold	2.6
		20		3.6
Schubert and Wernick (1969)	Sinusoids 0.25, 0.5, and 2 kHz, with triangular envelope	40	Echo threshold (envelope shifted but fine structure of signal not shifted)	5–7
				duration 20 ms
				duration 50 ms
				duration 100 ms
				7–12 up to 100 ms
				up to 100 ms
Noise, high- or low-pass-filtered (cutoff at 1 kHz), with triangular envelope	40	Echo threshold (envelope shifted but fine structure of signal not shifted)	5.5 (HP), 6 (LP)	
			duration 20 ms	
			duration 50 ms	
			duration 100 ms	
			8 (HP), 12 (LP)	
			16 (HP), 22 (LP)	

Tabla 5.2

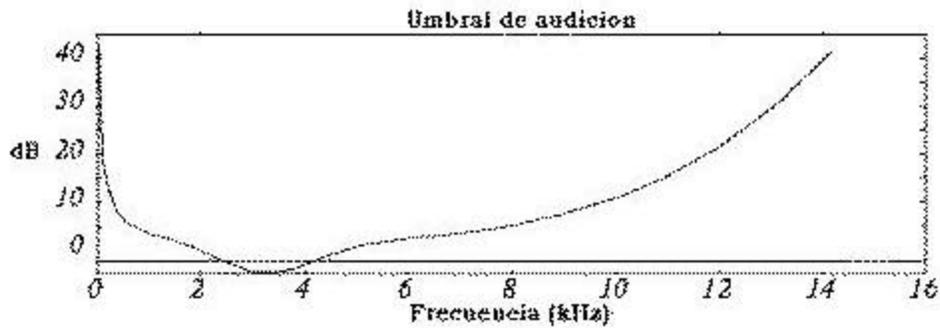
Harris en 1960 estudió este efecto con audífonos, utilizando tonos puros y cliks procesados con filtros pasa altos y pasa bajos. La relación entre decibeles per milisegundos de diferencia entre las señales varía dependiendo de la naturaleza de la señal. Por esto el uso de un control de un sistema estéreo acentuado hacia algún lado difumina el sentido de percepción, siendo necesario ubicar al receptor en una posición equidistante y el sistema totalmente centrado, para tener una correcta percepción de la posición de la fuente.

Rasch estableció en 1979 que si los músicos no se encuentran a una distancia que produzca un retardo en el sonido mayor que 30 a 50 milisegundos sentirán que están tocando juntos. Hirsch en 1959, y Patterson y Green en 1970 encontraron que cuando dos medios tonos de diferentes frecuencias son tocados en una sucesión bajo alto o alto bajo, esta puede ser escuchada si la separación de tiempo es de mas de 20 milisegundos. Los últimos también encontraron que podemos distinguir la diferencia sonora existente entre una onda reproducida hacia delante o hacia atrás si ésta tiene una duración de más de 2 milisegundos. Brian Moore en 1989 demostró que podemos sentir la diferencia en la dirección de un sonido que corresponde a cambios en el tiempo relativo de llegada del sonido a nuestros oídos cuando estos son del orden de 10 a 20 milisegundos.

Sin embargo, otros autores como Jordan 1954, Leakey 1959, Hanson 1959, Franssen, 1959, 1960, 1963, y Wendt 1960a, 1963, 1964, entre muchos otros, han estudiado la relación entre los retardos y el nivel de las dos señales utilizadas para generar el fenómeno, llegando a distintas relaciones de tiempo y nivel en las que se registra el fenómeno.

### 5.1.4. – Enmascaramiento

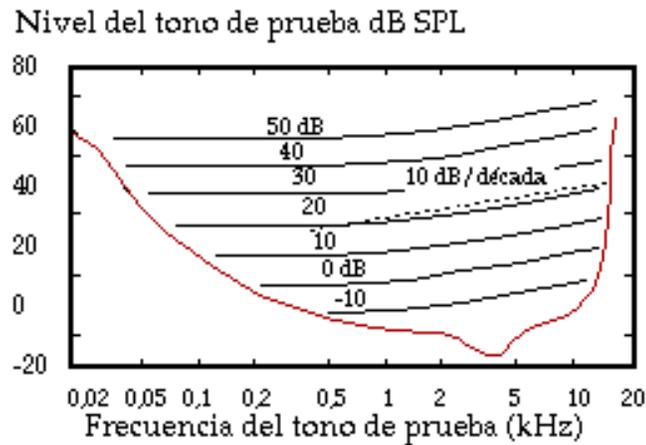
Se define como un proceso en el cual el umbral de audibilidad de un evento sonoro (el enmascarado) es elevado por otro evento sonoro (el que enmascara). Como resultado de esto se percibe únicamente el sonido del evento que enmascara. El umbral de audibilidad es el nivel de presión sonora mínimo necesario para que un sonido sea percibido y es dependiente de la frecuencia, la duración de la señal de prueba y el ruido de fondo existente. En el gráfico 5.1 se muestra el umbral de audibilidad de una persona con audición normal, medida en una cámara anecóica.



**Gráfico 5.1**

El umbral de enmascaramiento es el NPS mínimo necesario para que un sonido sea apenas percibido en presencia de una señal enmascarante y es dependiente del nivel, la frecuencia y duración de la señal enmascarada y del ruido de fondo. Resulta obvio que en ausencia de señal enmascarante el umbral de audibilidad y el de enmascaramiento son iguales

En el gráfico 5.2 se muestra el umbral de enmascaramiento producido por una señal de ruido blanco con distintos NPS. Para determinarlo se utilizaron tonos puros en todo el rango de audición.



**Gráfico 5.2**

Se puede ver como el umbral de enmascaramiento es independiente de la frecuencia hasta aproximadamente 500 hz. Para frecuencias superiores, aumenta 10 dB por década.

Debido a la dependencia temporal de los umbrales de audición y enmascaramiento, para duraciones de la señal de prueba de más de 200 ms los umbrales permanecen constantes, mientras que para duraciones inferiores el umbral aumenta en 10 dB por década de reducción del tiempo. Esta dependencia sugiere que, para duraciones inferiores a 200 ms, el sistema auditivo opera como un detector de energía; de este modo, si se reduce la duración de una señal de  $T$  a  $0,1T$  segundos, para que la señal siga siendo apenas audible es preciso incrementar la potencia de la señal de  $P$  a  $10P$ , con el fin de que la energía de la señal,  $E = PT$  permanezca constante.

Sin embargo no es necesario que los dos eventos sonoros ocurran simultáneamente para que uno de ellos sea enmascarado. Un sonido suave emitido algunos milisegundos antes de uno fuerte puede ser enmascarado. Esto se denomina como enmascaramiento previo (*backward masking*). Si el sonido suave es emitido después del fuerte (hasta 200 milisegundos después) y es enmascarado entonces tenemos un enmascaramiento posterior (*forward masking*) (Gráfico 5.3)

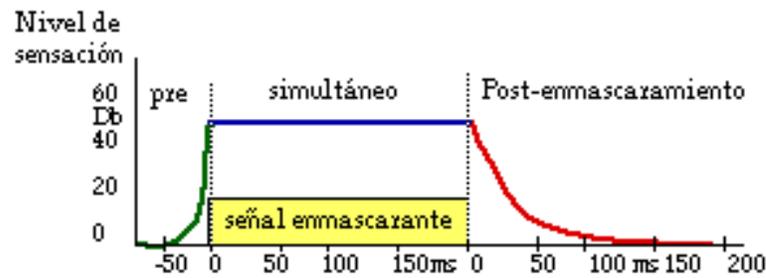


Gráfico 5.3

Aunque la comprensión que se tiene acerca del enmascaramiento previo o pre-enmascaramiento es escasa, debido a que los resultados experimentales obtenidos sólo son reproducibles con sujetos altamente entrenados y en muchos casos no permiten concluir con certeza acerca de sus propiedades, se cree que es debido al tiempo que requiere el órgano de Corti para generar impulsos nerviosos y el cerebro para interpretarlos y crear la sensación sonora.

Las señales de gran intensidad requieren de un tiempo de formación de la sensación menor que el de las señales de baja intensidad así, si una señal de un NPS determinado se presenta unos pocos milisegundos después que una señal con NPS menor, la sensación asociada a ésta puede no llegar a producirse, quedando efectivamente enmascarada. El fenómeno se extiende hasta unos 20 ms antes de la aparición de la señal enmascarante, independientemente del nivel de ésta.

Por el contrario el enmascaramiento posterior o post- enmascaramiento, es un efecto fácil de medir aun en sujetos no entrenados. Por regla general, se determina experimentalmente mediante señales de prueba de corta duración (del orden de los 5 ms o menos), aplicadas luego de una señal enmascarante de duración variable.

El gráfico 5.4 muestra el comportamiento del umbral de enmascaramiento en función del retardo entre el instante en que desaparece la señal enmascarante y el instante en que desaparece la señal de prueba, y de la intensidad de la señal enmascarante. La señal de prueba en este caso es un impulso de presión de forma "gaussiana", de 20 ms de duración; la señal enmascarante es ruido blanco de 0,5 s de duración y nivel de densidad espectral variable.

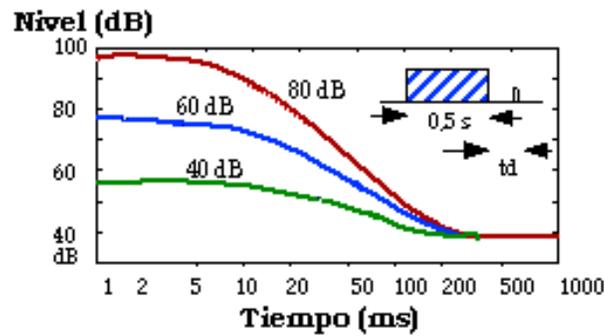


Gráfico 5.4

En el instante  $t = 0$ , el umbral de enmascaramiento alcanza su valor máximo, el cual es idéntico al obtenido en el enmascaramiento simultáneo. Para  $t > 0$ , el umbral de enmascaramiento decae con el tiempo hasta que, eventualmente, se hace igual al umbral de audición en un intervalo no mayor de 200 ms, por lo que la tasa de decaimiento es mayor para señales enmascarantes de mayor intensidad.

Se cree que del post-enmascaramiento tiene su origen en dos procesos fisiológicos distintos:

- Las propiedades mecánicas de la membrana basilar son tales que ésta vibra durante un cierto tiempo ( $< 20$  ms) luego de la desaparición del estímulo sonoro.
- Efectos de "adaptación" o "acomodación" neural.

Esta característica del oído humano ha sido estudiada por las empresas dedicadas al audio digital, ya que se basan en ella para elaborar sus sistemas de compresión, filtros y sistemas de codificación (como por ejemplo los sistemas de Philips DDC system y MUSICAM o el mp3) y entregarle al oído lo que necesita para escuchar “correctamente” utilizando la menor cantidad de información posible.

Otro tipo de enmascaramiento es el biaural el cual está relacionado con la diferencia de señales que llegan a un oído y al otro. Por ejemplo, si una persona escucha con audífonos una señal de ruido blanco y un tono puro del mismo nivel simultáneamente en ambos auriculares, el

ruido enmascara al tono puro, pero si este es invertido 180° en uno de los auriculares, la persona escuchará claramente el tono puro. Esto es debido a que el cerebro percibe la diferencia de fase e invierte una de las señales permitiendo que se perciba el tono puro. Ahora si el ruido y el tono puro son enviados solamente a un auricular, no se puede percibir el tono puro; pero si se envía la señal de ruido a ambos auriculares, se percibirá claramente la existencia del tono puro.

Un aspecto importante a tener en cuenta en todos los fenómenos de enmascaramiento es que, debido al funcionamiento de la membrana basilar, una frecuencia alta es fácilmente enmascarada por una baja, pero una alta no puede enmascarar una baja.

#### 5.1.5. – Efecto de fiesta de cóctel

El sistema auditivo humano tiene la capacidad de reconocer o distinguir un sonido en particular ante la presencia de muchos otros. Esto es algo que todas las personas ponen en práctica diariamente y es particularmente útil a los músicos, quienes al encontrarse en una sala donde suenan simultáneamente varios instrumentos pueden “sintonizar” uno en particular percibiendo su sonido por encima del que producen los otros. El mismo fenómeno ocurre cuando nos encontramos en una habitación donde hay varias personas hablando simultáneamente y queremos seguir lo que una de ellas dice; lo podemos hacer sin necesidad de que las otras dejen de conversar y ni siquiera es necesario girar la cabeza hacia el sitio en el cual se encuentra esta persona. Pero si nos tapamos un oído, entender lo que esta persona dice, se vuelve mucho más difícil de lograr.

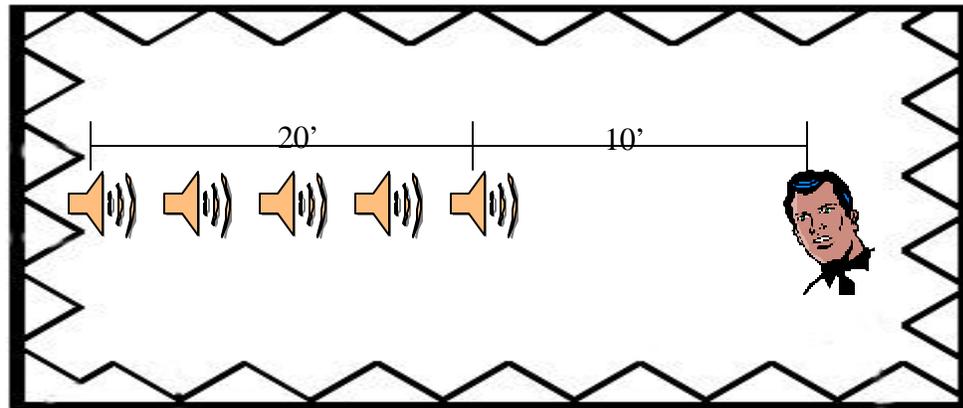
La situación descrita anteriormente, conocida como el efecto de fiesta de coctel (*Cocktail party effect*, Cherry 1953), se debe al hecho de que una señal con una cierta dirección de incidencia es enmascarada en menor grado por un ruido no deseado proveniente de una dirección diferente cuando se escucha biauralmente que cuando se escucha monoauralmente. Esto por que el sistema auditivo humano tiene la habilidad de ajustar los tiempos de viaje de las señales neuronales provenientes de los dos oídos y así la señal que nosotros queremos escuchar se

incrementa por llegar exactamente al mismo tiempo al cerebro y el ruido no. Cuando el sonido que deseamos escuchar proviene exactamente del mismo sitio que el ruido, esta habilidad no es útil, debido a que tanto la señal neuronal del ruido, como la del sonido de interés, reciben el mismo retraso y por ende el mismo incremento. Aunque actualmente no se entienden todos los detalles que involucra este efecto, es fácilmente demostrable con un sencillo experimento.

#### **5.1.6. – Ubicación de la fuente sonora**

Si entramos en una sala con los ojos cerrados y hablamos o alguien dentro de ella nos habla, la reverberación nos ayuda a formarnos una idea del tamaño de la sala y de los materiales de esta (en el caso de personas entrenadas), así como también la distancia a la que nos encontramos de la persona que nos esta hablando.

En 1968 Gardner realizó un experimento, en el que se demostraba que la falta de reverberación nos indica que la fuente se encuentra cerca del oído. Este consistió en ubicar una serie de fuentes al interior de una sala anecónica, a distintas distancias y apuntando todas al sitio en donde se ubicaba un escucha, como muestra la figura 5.2. Se ajustó el nivel de salida de los parlantes de tal manera que la intensidad sonora en la posición del escucha fuera la misma sin importar cual fuente reproducía la señal. Cuando la señal enviada no tenía reverberación el sujeto de prueba siempre escogía el parlante mas cercano como la fuente de la cual provenía el sonido. De nuestra experiencia en el mundo real, podemos deducir que la falta de reverberación de un sonido significa que la fuente esta cerca al oído.



**Figura 5.2**

Chowning en 1971 y F. R. Moore en 1983 demostraron como con la reverberación y la atenuación de altas frecuencias se puede generar la sensación de distancia en señales generadas por computador.

Discernir si la fuente se encuentra a la derecha o izquierda arriba o debajo de la posición de nuestros oídos, esta determinado por la audición binaural, los retardos con que los sonidos alcanzan los dos oídos, las diferencias de nivel y la reverberación existente. Aunque también hay una dependencia con la frecuencia, debido a que las más altas son atenuadas por el pabellón de la oreja, la cabeza o todo el cuerpo, dependiendo la dirección de origen, obstáculos que también pueden producir difracción en estas frecuencias, lo que en conjunto nos permite tener una mejor idea de donde proviene el sonido. Esta es la razón por la cual en un campo difuso es imposible determinar la posición de la fuente.

## **5.2. – Diseño**

### **5.2.1. – Objetivo**

Hacer que el usuario experimente los 5 fenómenos psicoacústicos antes descritos, y entienda la razón por la cual se producen.

### **5.2.2. – Proceso**

Debido a que para mostrar el efecto Hass y el de posicionamiento de la fuente sonora es necesario controlar tanto la posición del usuario como las reflexiones de sonido, se diseñó una “cámara” abierta de paredes y techo absorbente (una estructura del mismo tipo que la utilizada para controlar las reflexiones del módulo de direccionalidad) en la cual se ubica una butaca en el medio del espacio y un par de monitores JBL control 1 en la pared del fondo de la cámara, a 1.20 metros del suelo de tal manera que si una persona se sienta en la butaca, los parlantes le quedan a la altura de los oídos.

A la izquierda de la butaca se encuentra el panel de control y en la esquina inferior derecha se coloca una caja de madera cubierta de tapete, para instalar allí la unidad de reproducción de CD similar a la usada en los módulos de direccionalidad y transmisión del sonido a través de las paredes y un amplificador Yamaha RX-396. Se escogió este amplificador debido a que esta disponible en las instalaciones de Maloka.

La figura 5.4 muestra un esquema del módulo.



**Figura 5.4**

El letrero con las instrucciones y la explicación del fenómeno se encuentra en la parte de exterior, a la derecha del modulo (ver anexo 1 pagina 99). Todo el modulo se encuentra sobre una alfombra de alto trafico para atenuar las reflexiones causadas por el piso. Para mayores detalles y dimensiones referirse al archivo plano psicoacústica.dwg en el CD adjunto.

Los botones del panel de control se encuentran conectados al interruptor que activa la reproducción de las pistas 1 a 5 las cuales corresponden a las elaboradas previamente con las características descritas más adelante.

La tabla 5.3 enumera los materiales y costos necesarios para poder construir el modulo.

## MATERIALES Y COSTOS PARA EL MODULO DE PISCOACÚSTICA

<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor total</b>
1	Amplificador	500.000	500.000
1	Lector de CD	200.000	200.000
1	CD con sonidos	-----	-----
2	Parlantes JBL control 1	215.000	430.000
14	Metros <sup>2</sup> madefondo (4 placas de 2.44×1.53×0.005 m)	47300	189.200
18	Lana mineral	135.250	150.000
18	M <sup>2</sup> Tela	15.000	270.000
8	Listón madera 3 m de 4×4 cm.	1600	12.800
1	Madera para butaca	20.000	20.000
3 m	Lamina metal de 1 m de 3/16"	3.000	9.000
20	Metro de cable calibre 24	200	4.000
5	Botones	4.000	20.000
4.5	Metro tubo CR de 1.5" y 2mm de espesor con acabado electroestático.	9.200	41.400
2	Laminas acrilico 80×56×0.3 cm	26.000	52.000
4	Tornillos plasticos	250	1.000
1	Tomacorriente doble	3450	3.450
1	Enchufe	3900	3.900
X	Metros cable eléctrico 2×18	1.450	
6	M <sup>2</sup> Alfombra alto tráfico.	22900	100.000
1	Libra de puntilla para madera	3.000	3.000
½	Galón colbón madera	25.000	25.000
<b>Total de modulo:</b>			<b>2'034.000</b>
<b>Total en USD:</b>			<b>730</b>

Tabla 5.3

## 5.2.2.1. – Relación sonido imagen

Para poder mostrar este fenómeno se escogió la melodía de “los pollitos dicen” por ser conocida por mayoría, si no todas las personas. Se interpretaron y grabaron tres versiones distintas de ella para ser reproducidas en secuencia y quien la escucha tendrá distintas imágenes o sensaciones con respecto al cambio de versión

Las grabaciones se realizaron en el estudio de la universidad utilizando el procesador Alesis como generador de voces. Se conectó la salida del procesador se conecto al DAT Tascam.

Las versiones que se grabaron tienen las siguientes características:

- La primera versión se interpretó en modo mayor, a un tempo de 137 beats por segundo y con un sonido de marimba
- La segunda versión se interpretó en modo menor, a un tempo de 66 beats por segundo y con un sonido de piano
- A la tercera versión, también en modo menor pero con un tempo de 61 beats por segundo se le cambió el sonido a uno de órgano

Esta pista se encuentra en el CD adjunto con el nombre de Psicoacustica 1.wav

#### **5.2.2.2. - Efecto Hass o de precedencia**

Utilizando el programa computacional Samplitud 2496 Versión 5.58 se generó un tono puro de 800 [Hz]. Se realizó una mezcla estéreo en la cual el tono puro que suena en el canal izquierdo está retrasado 24 milisegundos con respecto al canal derecho. Este retraso y frecuencia se escogieron basados en la experiencia adquirida en la práctica de laboratorio diseñada para el curso Laboratorio de Mediciones (ACUS 232) en el primer semestre del 2002.

Entonces si reproducimos esta pista en el diseño hecho para el módulo, quien se sienta en la butaca podrá experimentar el efecto de precedencia. Es posible que se necesiten hacer ajustes a la frecuencia o al retardo entre las dos señales una vez construido el módulo, debido a que la percepción del efecto depende mucho de la relación de posiciones entre los parlantes y el usuario.

Esta pista se encuentra en el CD adjunto con el nombre de psicoacustica 2.wav

### 5.2.2.3. – Enmascaramiento

Para la elaboración de esta pista se grabó, usando el DAT portátil del estudio de la Universidad, el sonido ambiente en la orilla del río calle-calle a la altura del museo de arte moderno y el ruido de tráfico en la calle Los Robles esquina con Los Laureles en la ciudad de Valdivia.

Utilizando el programa computacional Cubase SX se hizo una mezcla estéreo con las grabaciones de la siguiente manera:

La pista de ruido ambiente con una duración de 35 segundos, se normalizó y se le dio un nivel de  $-7.5$  dB y se paneó en al centro.

La pista de ruido de trafico, también normalizada y paneada al centro, tiene un fade in a partir de los 4.0 segundos (respecto al inicio de la pista de ruido de ambiente) hasta los 5.8 segundos variando su nivel de  $-\infty$  hasta 0 dB y se mantiene a este nivel hasta los 15 segundos en donde se hace un fade out hasta los 16.2 segundos.

Cuando el usuario escuche esta mezcla dejará de oír el ruido de fondo cuando esté sonando el ruido de trafico y lo volverá a escuchar nuevamente cuando éste se detenga. Estos sonidos se escogieron debido a que el ruido de tráfico es uno de los mayores contaminantes acústicos en las ciudades y el sonido al lado de un río, que es relajante, es algo de lo que no se puede disfrutar normalmente en una ciudad como Bogotá. De esta manera, aparte de entender y experimentar el fenómeno, el usuario esta en capacidad de relacionarlo con su actividad normal.

Esta pista se encuentra en el CD adjunto con el nombre de psicoacustica 3.wav

Como otra opción para demostrar el fenómeno se elaboró otra pista en donde se escucha un fragmento del principito, leído por una mujer. Esta pista esta a un nivel de  $-4.9$  dB A los 2.5 segundos se hace un fade in de otra pista, en la que suenan varias voces simultáneamente, desde

$-\infty$  hasta  $-1.8\text{dB}$  en 2 segundos. Este nivel se mantiene por 5 segundos y después se baja hasta  $-11\text{dB}$  se mantiene por 5 segundos y después vuelve a su nivel original. Finalmente a los 22 segundos de iniciada la pista se hace un fade out hasta  $-\infty$  en 2 segundos.

Esta pista se encuentra en el CD adjunto con el nombre de psicoacústica 3B.wav

#### **5.2.2.4. - Efecto de fiesta de cóctel**

En el estudio de la Universidad, en agosto del 2002 se grabó la voz de una mujer leyendo un fragmento de “el principito”. Utilizando el programa computacional Samplitud 2496 Versión 5.58 se realizó una mezcla estéreo con las siguientes características.

La pista resultante de la grabación se dividió en dos partes, las cuales se montaron simultáneamente en dos canales separados, se normalizaron y se paneó el primer segmento totalmente a la izquierda y el segundo a la derecha. A los 4 segundos del comienzo se paneó el segundo segmento hacia la izquierda que dura hasta el segundo 8.5. Cuando ha sonando 10 segundos de esta forma los dos segmentos se panean al centro. Este paneo dura 5 segundos, se deja sonar hasta el segundo 36 donde los segmentos se panean a el primero totalmente a la derecha y el segundo totalmente a la izquierda. Este paneo tiene una duración de 6 segundos, y se mantiene hasta el segundo 56 cuando se vuelven a panear al centro, y se mantiene hasta el segundo 71, cuando se vuelven a panear a su posición original. Este último paneo tiene una duración de 6 segundos.

Con ésta mezcla se puede apreciar claramente cómo solo se entiende la lectura cuando las pistas están paneadas en distintas posiciones, pero cuando vienen del mismo sitio, es prácticamente imposible “seguir el hilo” de una de las dos narraciones.

Esta pista se encuentra en el CD adjunto con el nombre de psicoacústica 4.wav

### 5.2.2.5. - Ubicación de la fuente sonora

Se elaboró una pista de audio que creará la sensación de que un auto se está acercando a la posición donde se encuentra el usuario.

Para esta pista se grabó el ruido generado por el motor de un vehículo, en el frente del estudio de grabación, durante 1 minuto utilizando el DAT portátil Tascam. Empleando el Cubase SX se modificó la pista de la siguiente manera:

Al comienzo de la pista, después de haberla normalizado, se aplica un filtro pasa bajo, con una reverberación con una duración de 4 segundos. El nivel de la pista es de  $-18$  dB. Se automatizó la mezcladora virtual de manera que a medida que la pista avanza, el filtro va aumentando su frecuencia central hasta quedar totalmente plano, simultáneamente la reverberación va disminuyendo hasta llegar a cero 1.4 segundos antes del final de la pista. Simultáneamente el nivel va aumentando hasta llegar a cero dB.

Esta pista se mezcló con la de ruido de fondo utilizada en el modulo de enmascaramiento, para dar una referencia del nivel del ambiente a quien este usando el modulo. Esta se mantiene a un nivel constante de  $-16$  dB durante todo el tiempo.

La mezcla final encuentra en el CD adjunto con el nombre de psicoacústica 5.wav

### 5.2.1 – Funcionamiento del módulo

El usuario entra a la cabina y se sienta en la butaca, y a medida que va oprimiendo cada uno de los botones del panel de control, se reproducen cada una de las cinco pistas, descritas en la sección anterior. El usuario permanece todo el tiempo sentado. (Ver simulación en el archivo “psicoacústica.avi” en el CD adjunto).

## **6. Trabajo con Maloka**

### **6.1. – Presentación del proyecto**

El proceso se llevo a cabo en tres etapas. En la etapa inicial se realizaron dos reuniones con la directora de exposiciones Sigrid Falla en marzo del 2002.

En la primera se planteo el proyecto y se presento un plan de trabajo y un presupuesto muy aproximado del costo de los módulos logrando un acuerdo verbal para montar los módulos, si era posible construirlos con los materiales y elementos existentes en los talleres de sus instalaciones o con recursos de caja menor (aproximadamente \$300.000 pesos Colombianos por módulo). Posterior a esto se realizo una visita de evaluación a los talleres

En la siguiente reunión se acordó el plan de trabajo y se establecieron las fechas para la entrega del proyecto y montaje de los módulos.

En la segunda etapa, en octubre se presentaron los diseños definitivos y las animaciones de simulación de funcionamiento de los módulos (ver anexo 1, pagina ) al Ing. Manuel Franco, encargado de producción y a las diseñadoras Olga Neira y Patricia Rivera que aprobaron su construcción y con quienes se trabajo posteriormente para su adecuación.

La última etapa, llevada a cabo en diciembre del 2003 consistió en realizar nuevamente la presentación a Sigrid Falla y al personal administrativo para que autorizaran su construcción y destinaran fondos para el mismo. Para esta presentación se adiciono el modulo de “reflexión-absorción-transmisión de la energía sonora” al proyecto. Se logró conseguir la aprobación de montaje para los módulos de direccionalidad, transmisión, reflexión-absorción-transmisión y psicoacústica.

Es importante destacar que es la primer vez que en Maloka se aprueba la construcción de un modulo sin financiamiento externo, modalidad que siempre usan en todos sus proyectos.

En el anexo 1 se adjunto una copia de la carta entregada por Maloka en la cual se certifica el interés que tienen en construir los módulos.

## **6.2. – Montaje**

El montaje de los módulos se llevara a cabo en dos etapas. En la primera se construirán los de direccionalidad y psicoacústica, asignadas a la sección Maloka viajera (que recorre todo el país haciendo exposiciones temporales). Las pistas del modulo de psicoacústica serán utilizados en el taller “Taller grabación de audio, efectos y comportamiento del sonido” que se dictará a partir de agosto del 2003.

Los otros dos módulos aprobados se esperan construir en noviembre de de este año.

## CONCLUSIONES

- La aprobación obtenida por parte del museo de ciencia interactivo Maloka para la construcción de los módulos en sus instalaciones avala el trabajo de diseño realizado y se convierte en un gran paso en el proceso de educación de la población Colombiana en temas concernientes a la acústica.
- Los temas propuestos y tratados en los módulos, a pesar de tener una alta complejidad teórica, se demuestran y explican de una manera fácil de entender, generando contradicción y sorpresa en personas sin conocimientos de acústica, lo cual se espera, cree curiosidad en el usuario del módulo, llevándolo a indagar más acerca del fenómeno experimentado. Este principio pedagógico es requisito fundamental para todos los módulos que funcionan y se diseñan en Maloka.
- Las modelaciones del funcionamiento de los módulos fueron una poderosa herramienta, no solo para conseguir la aprobación del proyecto, sino también para evaluar la posible respuesta de la gente y se convirtieron por si solas en un elemento educativo, llegando al punto de que en Maloka se están evaluando las condiciones técnicas para montarlas en su página web.
- Aunque no se realizó una evaluación rigurosa de la respuesta del público ante los módulos, se puede afirmar en base a la reacción observada de las personas que vieron las simulaciones, que el módulo de psicoacústica y el de direccionalidad del sonido son los que generarán mayor interés y causarán más curiosidad a los usuarios de los módulos una vez se encuentren en funcionamiento. Esto se puede atribuir a dos hechos: estos son los que generan mayor sorpresa y se pueden relacionar más fácilmente con la cotidianidad.
- El tipo de trabajo realizado en este proyecto permitió y exigió el desarrollo de habilidades necesarias para el desempeño de la labor de ingeniería como son el aplicar conceptos teóricos en situaciones reales, trabajar con profesionales de diversas áreas, aprender a utilizar nuevas herramientas de trabajo como fueron los programas *3D studio max* y *autocad* y la consecución de la aprobación de un proyecto.

- Aunque el diseño fue realizado específicamente para que se construyan los módulos en los talleres de Maloka, con la información aquí entregada cualquier ingeniero con conocimientos básicos de acústica puede construirlos, si dispone de las herramientas y materiales adecuados.

## **ANEXO 1**

# **DISEÑO DE MÓDULOS DE SONIDO**

**POR JUAN PABLO CHAPARRO ESCOBAR**  
Tesista Universidad Austral de Chile

Santa Fe de Bogotá, 19 de octubre del 2002

## JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

Considerando el desconocimiento que existe por parte del público acerca del comportamiento del sonido y de la acústica en general, y teniendo en cuenta la ausencia de experiencias relacionadas con la materia en Maloka, se diseñaron cuatro módulos interactivos para enseñar principios básicos de la acústica.

El primer módulo, **direccionalidad del sonido**, muestra el comportamiento direccional del sonido y su relación con la frecuencia, como concepto básico para comprender la naturaleza del sonido. Se propone instalarlo en la Sala de Telecomunicaciones debido a la directa relación existente entre el rango de frecuencia de sonidos transmitidos en las comunicaciones y los métodos usados para ello.

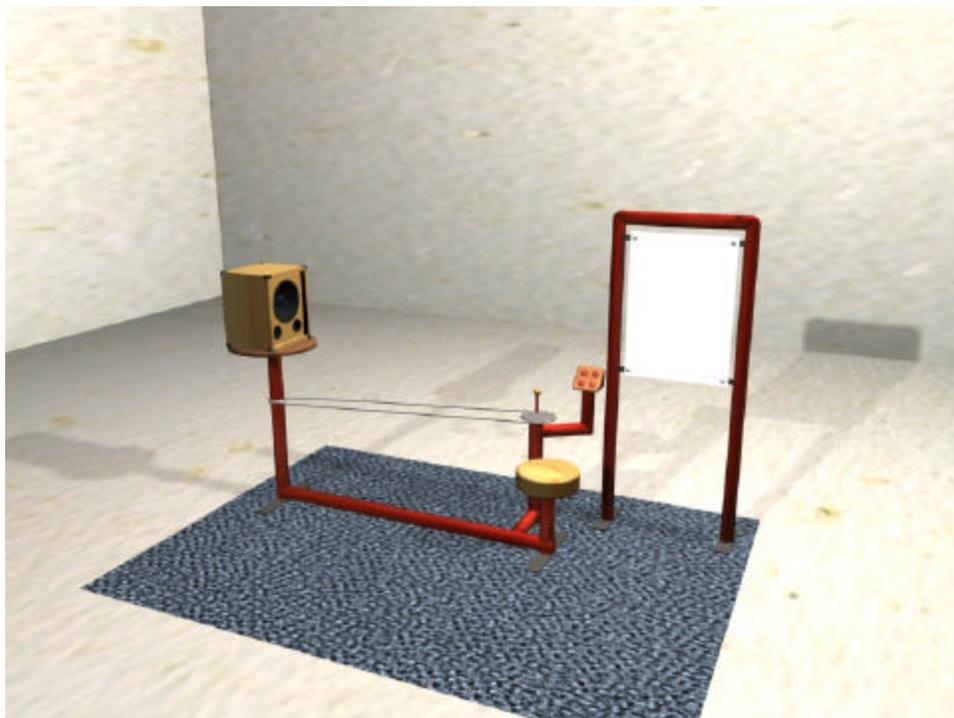
El segundo módulo, **absorción y reflexión de la energía sonora**, demuestra este fenómeno y explica por que la energía de una onda sonora se disipa cuando impacta un material. Se instalaría en la Sala UPME, ya que en esta se encuentran los módulos relacionados con el tema de la energía. Con el módulo se espera que el público entienda que el sonido es una forma de energía, que se consume y que puede ser controlada en un cierto rango para obtener algún beneficio o que por el contrario, cuando esto no se hace, puede llegar a ser muy molesta.

El tercer módulo, **transmisión de la energía sonora a través de las paredes**, que se encontraría ubicado en la Sala Ciudad, explica el fenómeno de la transmisión de la energía sonora a través de las paredes, y el concepto de coeficiente de transmisión, el cual nos indica la cantidad de intensidad sonora que puede ser reducida por ciertas estructuras o materiales.

Con este módulo, las personas podrán entender que la contaminación por ruido se puede evitar y que existen soluciones para este problema.

El último módulo, **psicoacústica**, que pertenecería a la sala del Ser Humano, permite que el visitante experimente 5 fenómenos de este tipo, los cuales demuestran cómo lo que escuchamos no siempre es lo que está sonando, y cómo el cerebro y el oído corrigen o “engañan” al escucha, con efectos como el enmascaramiento o la selección de sonidos (efecto de fiesta de coctel).

## MÓDULO DE DIRECCIONALIDAD DEL SONIDO



El modo de operación consiste en sentarse y apretar uno de los botones del panel, mientras se hace girar la caja usando la manivela ubicada a la derecha de la butaca. El primero de los botones hace sonar un tono puro de 100 Hz, el segundo uno de 4000 Hz, el tercero los dos simultáneamente y el último música, con una duración de 30 segundos cada sonido.

Al girar la caja el usuario podrá percibir que cuando el parlante está frente a él escucha todos los sonidos, pero a medida que gira deja de escuchar las frecuencias altas.

Este módulo requiere un área de 6 m<sup>2</sup> y un tomacorriente de 110 V para su funcionamiento. Para referencia del tamaño real de todos los módulos, los carteles de explicación miden 1.8 m de altura.

## INFORMACIÓN PARA COLOCAR EN EL CARTEL DE INSTRUCCIONES Y EXPLICACIÓN.

### ¿Qué hacer

Siéntate y oprime el botón N° 1, comenzará a sonar un tono puro de 100 Hertz (Hz). Gira la manivela, haciendo que la caja de varias vueltas y escucha. Luego oprime el botón N° 2, esto hará que suene un tono de 4000 Hz, gira nuevamente la manivela y escucha. Al oprimir el botón N° 3 sonarán los dos tonos simultáneamente y al oprimir el 4 sonará música. No olvides girar la manivela.

### ¿Qué pasa?

Las **frecuencias bajas** son omnidireccionales (viajan en todas las direcciones con la misma intensidad) mientras que las **altas** son direccionales (viajan en una dirección con mayor intensidad). Por esto cuando la caja gira mientras suena el tono de 100 Hz seguimos escuchando todo el tiempo, pero cuando suena el tono de 4000 Hz, sólo lo escuchamos cuando el parlante está frente a nosotros, debido a que este es radiado con mayor intensidad en la dirección en que apunte el parlante.

Como la música esta compuesta por la suma de frecuencias bajas medias y altas, cuando el parlante esta apuntando hacia ti escuchas todas sus componentes, y a medida que va girando escuchamos solamente las frecuencias bajas.

### ¿Qué es la frecuencia de un sonido?

El sonido es producido por la vibración de un objeto (como la membrana de un parlante) la cual mueve (hace oscilar) las partículas de aire que están a su alrededor, transmitiéndoles una cierta cantidad de energía y éstas a las que están a su lado y así sucesivamente hasta que las

partículas de aire que están en nuestro oído vibran, haciendo que se mueva el tímpano, permitiéndonos percibir la energía sonora (el sonido).

Para que esta vibración de las partículas sea percibido como sonido, las partículas de aire deben realizar oscilaciones completas o ciclos (moverse hacia adelante, hacia atrás y volver a su posición original) en un tiempo determinado.

El número de ciclos por segundo que realiza cada partícula se denomina frecuencia y se mide en Hertz (Hz).

Por ejemplo:

50 Hz significa que las partículas oscilan 50 veces por segundo.

3000 Hz significa que las partículas oscilan 3000 veces por segundo.

El oído humano es capaz de captar sonidos entre 20 Hz y 20.000 Hz. Los sonidos con frecuencias entre 20 y 320 Hz se consideran como bajos (suenan mas graves); los comprendidos entre 320 y 3000 Hz como medios (en estas frecuencias esta comprendido el rango de la voz); las frecuencias mayores a 3000 Hz son consideradas frecuencias altas.

### **¿Qué son los decibeles (dB)?**

Es la manera usual de medir el nivel de presión sonora que produce un sonido en el aire. Un sonido fuerte produce una mayor presión que uno suave; esto implica que un sonido de 90 dB suena más fuerte que uno de 50 dB.

Debido a que es una relación logarítmica entre dos valores (la presión en el aire con respecto a un valor de referencia), un sonido de 80 dB no tiene el doble de energía que uno de 40 dB, ni tampoco es el doble de fuerte. Un aumento de 3 dB indica un incremento del doble de la energía sonora. Pero, a causa del funcionamiento del oído, para que percibamos que algo suena el

doble de fuerte, el sonido debe aumentar 10 dB, y físicamente, por ser una relación matemática, un sonido de 60 dB tiene una presión sonora 1000 veces mayor que uno de 0 dB, pero uno de 80 dB tiene solamente 10 veces más presión que el de 60 dB.

## MÓDULO DE ABSORCIÓN Y REFLEXIÓN DE LA ENERGÍA SONORA



Las dos cámaras tienen exactamente la misma forma y al interior de ellas hay una campana. Difieren en el material que recubre las paredes por dentro, siendo la de la izquierda la “cámara absorbente” por estar recubierta de material poroso (lana mineral cubierta de paño hilac) y la de la derecha por material reflectante (cerámica de baño).

---

<sup>1</sup> En la cámara absorbente se recomienda el uso de material absorbente y en el reflectante de cerámica de baño.

Para utilizarlo es necesario introducir la cabeza completamente por el agujero de una de ellas y tirar del hilo de la campana, escuchar, después hablar gritar o cantar, repitiendo la operación en la otra cámara. Al hacer esto en la cámara reverberante se escuchará cómo el sonido rebota y se mantiene por un intervalo de 4 segundos aproximadamente, después de ser generado. Por el contrario, en la absorbente, el sonido se desvanecerá inmediatamente después de ser emitido.

Este módulo requiere un área de 24 m<sup>2</sup> y una altura máxima de 2.7 m y requiere un tomacorriente de 110 V. para la iluminación al interior de las cámaras. La cámaras se construyen con Super Board.

## INFORMACIÓN PARA COLOCAR EN EL CARTEL DE INSTRUCCIONES Y EXPLICACIÓN

### **¿Qué hacer?**

Introduce toda tu cabeza por el orificio de la cámara “reverberante”, tira del cordel de la campana y escucha. Luego habla, grita o canta y escucha.

A continuación haz lo mismo en la cámara “absorbente” y percibirás un cambio en el sonido de la campana y de tu voz.

### **¿Qué pasa?**

---

<sup>2</sup> Las dimensiones señaladas son las recomendadas para su mejor funcionamiento, aunque pueden ser reducidas hasta en un factor de 1.2

Cuando un sonido es emitido al interior de un recinto, este viaja hasta alcanzar las paredes, en donde una cantidad de energía sonora es absorbida y la restante es reflejada hacia el interior de la sala.

El porcentaje de energía sonora que es reflejada depende de las características físicas del material, principalmente de la porosidad.

Como las paredes de la cámara reverberante son de baldosa, una gran cantidad de energía sonora es reflejada, manteniéndose el sonido, “rebotando” al interior de la cámara, por un intervalo de 4 segundos después de ser generado, lo que quiere decir que tiene un **tiempo de reverberación** alto.

El caso contrario ocurre en la cámara absorbente, la cual está recubierta de un material poroso, lo que hace que un gran porcentaje de energía sonora sea absorbida al alcanzar la pared.

### **¿Qué es el tiempo de reverberación?**

Se denomina reverberación al sonido que persiste al interior de una sala después de la detención de la señal que la produjo. La reverberación está formada por el conjunto de reflexiones que se fusionan unas a otras y que se extinguen con mayor o menor rapidez dependiendo de la absorción y del volumen de la sala.

El tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que, una vez cortada la fuente sonora en la sala, la energía disminuya a una millonésima parte.

Por lo tanto, si una sala tiene un tiempo de reverberación alto, quiere decir que un sonido que se emita en el interior de ésta será reflejado una mayor cantidad de veces, antes de desvanecerse totalmente; y estas reflexiones, que pueden ser percibidas por el oído humano, nos indican que la energía sonora está aún presente.

El caso contrario, una sala con tiempo de reverberación bajo, nos indica que el sonido es absorbido rápidamente por las paredes: se consume energía sonora y disminuye el número de reflexiones.

### **¿Como absorben sonido los materiales?**

Cuando una onda sonora alcanza una superficie (como por ejemplo una pared), una cantidad de energía atraviesa la superficie, produciendo la radiación de sonido al otro lado de la pared, otra cantidad de energía se transforma en calor, un porcentaje viaja a través de la superficie y la energía restante es reflejada.

La cantidad de sonido que es absorbido por un material depende principalmente de la cantidad de energía sonora que es transformada en calor. En los materiales porosos el sonido debe viajar a través de las cavidades, lo que le hace gastar energía (que es transformada en calor), y que se traduce en una reducción del nivel de presión sonora (nps) .

Es importante notar que la cantidad de energía absorbida no tiene relación directa con la transmitida. Esto quiere decir que si al interior de una sala colocamos una gran cantidad de material absorbente y el tiempo de reverberación disminuye, la intensidad del sonido que se radia fuera de ésta prácticamente no variará.

## MÓDULO DE TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA SONORA A TRAVÉS DE LAS PAREDES



El modo de operación de este módulo es similar al de direccionalidad del sonido. Al oprimir el primer botón sonará ruido blanco y con el segundo se activará la reproducción de la lectura de un fragmento de *El principito*, por medio de la bocina, que está fija en el centro de éste apuntando en dirección a la butaca.

Al girar la manivela, el hexágono, que en cada uno de sus lados tiene un material distinto (icopor, vidrio, una placa de metal, madera, espuma y un lado sin ningún material), girará y se

---

<sup>3</sup> Esta placa puede ser de acero o hierro, pero se recomienda la de acero por estética.

percibirá cómo se atenúa el sonido en distinta cantidad dependiendo del material que se encuentre frente a la bocina.

Para su montaje se requiere de un área de 6.2 m y un tomacorriente de 110 V.

## INFORMACIÓN PARA COLOCAR EN EL CARTEL DE INSTRUCCIONES Y EXPLICACIÓN

### ¿Qué hacer?

Siéntate, oprime uno de los botones y gira la manivela. Escucha como varía el nivel del sonido al cambiar el material que está frente a la bocina. Repite esto oprimiendo el otro botón.

### ¿Qué pasa?

Cuando una onda sonora alcanza una superficie (como por ejemplo una pared), una cantidad de energía atraviesa la superficie, produciendo la radiación de sonido al otro lado de la pared, otra cantidad de energía se transforma en calor, un porcentaje viaja a través de la superficie y la energía restante es reflejada.

La cantidad de energía sonora radiada al otro lado de la superficie, depende de la frecuencia del sonido y de las características físicas del material, como las dimensiones, la masa y la rigidez.

Como la voz y el ruido que reproducen la bocina están compuestos por frecuencias medio-altas y altas, los materiales con mayor masa (metal, vidrio) tienen una mayor **pérdida por transmisión** que los materiales con poca masa (icopor, espuma), lo que permite que pase una menor cantidad de energía sonora

### **¿Qué es la pérdida por transmisión?**

Es una forma de cuantificar la energía que pierde una onda sonora al atravesar un cuerpo. Se mide en decibeles (dB), que es la forma habitual de indicar los niveles de presión sonora, y una mayor pérdida por transmisión (TL, por sus siglas en inglés) indica una menor transmisión de energía, lo que se traduce en una mayor atenuación del sonido.

En nuestro experimento el icopor presenta un TL aproximado de 5 dB y la madera de 38 dB en 1000 Hz. Es por esto que se escucha más duro el ruido o la voz cuando la placa de icopor está frente al parlante que cuando está la de madera.

Esta característica de los materiales es la más importante cuando se requiere controlar la contaminación acústica (ruidos molestos) en las ciudades, labor desempeñada por los ingenieros acústicos.

### **¿Por qué un material atenúa más sonido que otro?**

El sonido es producido por la vibración de un objeto (como la membrana de un parlante) la cual mueve (hace oscilar) las partículas de aire que están a su alrededor, transmitiéndoles una cierta cantidad de energía y estas a las que están a su lado y así sucesivamente hasta que las partículas de aire que están en nuestro oído vibran, haciendo que se mueva el tímpano, percibiendo de esta manera la energía sonora (el sonido).

Pero cuando una onda sonora que viaja en el aire tiene que atravesar una pared, necesita una mayor cantidad de energía para “mover” las partículas de ésta, para que muevan las de aire que están al otro lado y así el sonido siga su camino. La cantidad de energía que se transmite al atravesar la pared depende principalmente de la masa del material, por esto un cuerpo con mayor masa (más denso, como el hierro respecto al icopor) hace que el sonido sea atenuado en una mayor proporción al atravesarlo que en uno menos denso.

## MÓDULO DE PSICOACÚSTICA



Para la utilización de este módulo el visitante de Maloka se sienta en la butaca, oprime uno a uno los 5 botones del panel de control, y escucha lo que se reproduce por los parlantes ubicados en la pared del fondo.

Al oprimir el primer botón se escuchará la melodía “Los pollitos dicen” en tres versiones distintas, lo que producirá distintas sensaciones o imágenes dependiendo de la persona que escuche.

Con el segundo botón se activa la pista de efecto Haas o de precedencia. Se escuchará un tono puro proveniente del parlante de la derecha pero al acercarse al de la izquierda se notará que éste emite el mismo sonido.

El tercer botón activa la pista de enmascaramiento. Se escuchará el sonido de una tarde tranquila en un parque, a continuación el ruido de tráfico de una ciudad. Aunque los dos suenen simultáneamente solo se escuchará el ruido del motor de los carros.

Con el cuarto botón, correspondiente al efecto de fiesta de coctel, se escucharán distintos fragmentos de *El principito* en el baffle de la izquierda y de la derecha, los cuales se “moverán” de un lado a otro. Quien esté al interior del módulo, intentará seguir la narración de uno de los lados, sin poderlo conseguir.

El ultimo botón activa la pista para la ubicación de la fuente sonora. Con ella se sentirá un carro moviéndose hacia el interior del módulo.

Este módulo requiere un área de 4.2 m<sup>2</sup>, una altura de 2 m y un tomacorriente de 110 V.

## INFORMACIÓN PARA COLOCAR EN EL CARTEL DE INSTRUCCIONES Y EXPLICACIÓN

### **¿Qué hacer?**

Siéntate y oprime uno por uno los botones del panel ubicado a la derecha de la silla siguiendo las instrucciones.

- BOTON N° 1: Vas a escuchar la misma melodía con tres sonidos distintos, ¿que sensación te producen?

- BOTON N° 2: Vas a escuchar un tono puro en el parlante de la derecha, acércate un poco al de la izquierda y vuelve a sentarte. ¿De dónde proviene realmente el sonido?
  
- BOTON N° 3: Vas a escuchar el sonido grabado a la orilla de un río, un momento después sonará simultáneamente con ruido de tráfico. ¿ Todavía puedes escuchar el viento y los pájaros?
  
- BOTON N° 4: Vas a escuchar distintos fragmentos de *El Principito* en el parlante de la izquierda y de la derecha. ¿Puedes “seguir el hilo” de uno de los fragmentos todo el tiempo?
  
- BOTON N° 5: Cierra los ojos y escucha lo que se acerca.

### ¿Qué pasa?

Botón N° 1: Relación sonido imagen.

Los sonidos nos pueden generar sensaciones o hacernos recrear imágenes. Esto es bien sabido por los músicos, quienes para generar una idea de pesadez o lentitud usan notas bajas, (sonidos graves) interpretadas lentamente o notas altas y rápidas para generar la sensación de ligereza. De la misma manera se utilizan los intervalos y escalas musicales.

A medida que crecemos asociamos determinados sonidos con imágenes o reacciones, como una melodía con una época determinada o una sirena con una actitud de alerta.

Por estas razones las distintas versiones de “los pollitos” nos pueden generar una sensación de alegría, tristeza, o de un pollito medieval.

Sin embargo por ser esto un comportamiento subjetivo, hay personas a las cuales no les genera ninguna sensación o imagen.

#### Botón N° 2: Efecto Haas o de precedencia.

Debido a la ubicación de los oídos, el sonido generalmente llega a éstos con pequeñas diferencias de tiempo e intensidad dependiendo de la dirección de origen, lo que nos permite localizar la posición de la fuente sonora. Pero si tenemos dos fuentes ubicadas en distintos puntos del espacio generando el mismo sonido, la diferencia de tiempo con que estos alcancen nuestros oídos puede generar una percepción del origen del sonido que no es la verdadera.

Esta variación de la percepción de la posición debido al retardo entre las dos señales se conoce como efecto Haas o efecto de precedencia, el cual dice que si una señal idéntica alcanza un oído (p.e. izquierdo) con un retardo de 20 milisegundos con respecto al otro (derecho), se percibirá que la fuente se encuentra a la derecha. Si el retardo es de 35 milisegundos o más se percibirá como un eco. Si el retardo varía de 0 a 20 milisegundos se percibirá como si la fuente se moviera hacia el lado del oído que esta recibiendo la señal sin retardo.

En nuestro experimento el tono puro de 800 Hz que suena en el parlante de la izquierda, está retrasado 24 milisegundos con respecto al de la derecha. Este retardo provoca que el sonido llegue primero a tu oído derecho, y que el cerebro determine que el sonido viene únicamente del parlante derecho.

#### Botón N° 3: Enmascaramiento.

El sistema auditivo humano es capaz de reconocer sonidos que se producen simultáneamente e identificar su origen, posición y características sonoras (como timbre, altura, intensidad), pero como todo sistema físico tiene limitaciones. Aunque puede

percibir sonidos en un rango de intensidad y variaciones de nivel muy pequeñas, cuando dos sonidos con diferencias de intensidad muy grandes suenan simultáneamente, solo podemos escuchar el sonido con mayor nivel (el que suena más duro). Es por esto que para poder hablar en sitios con mucho ruido subimos la voz, reduciendo de esta manera la diferencia de intensidad entre nuestra voz y el ruido.

En nuestro experimento existe una diferencia de 40 dB entre el sonido del río y el ruido de tráfico. Por esta razón no podemos escuchar a los pájaros cuando suenan los motores de los carros aunque los dos sonidos estén presentes.

#### BOTON N° 4: Efecto fiesta de coctel.

Cuando varios sonidos llegan simultáneamente a nuestros oídos, y queremos poner mayor atención a alguno en particular, podemos hasta cierto punto “sintonizarlo” de manera que lo podamos percibir con mayor claridad.

Esto lo podemos hacer por que el sonido llega con pequeñas diferencias de tiempo a nuestros oídos, y el cerebro “retrasa” la señal de uno de ellos de manera que se sume el nivel del sonido que queremos escuchar.

Esta habilidad de seguir una conversación o un sonido en particular, en presencia de muchos otros, se denomina efecto de la fiesta de cóctel. Esto se puede hacer cuando las fuentes sonoras o quienes hablan están en distintos sitios, pero cuando los sonidos provienen del mismo sitio no podemos discriminarlos claramente, debido a que al retrasar la señal de un oído, se retrasan todos los sonidos, y no podemos aumentar el nivel de uno en particular.

En nuestro experimento la voz que comienza a sonar en la izquierda unos segundos después se mueve al parlante de la derecha. A continuación las 2 voces se mueven al centro, permanecen unos segundos así y la voz que comenzó en la izquierda va a la derecha y la de la derecha a la izquierda. Un momento después las voces vuelven al centro y finalmente a la posición donde comenzaron. Cuando el sonido de las voces proviene del mismo sitio (el centro o la izquierda) es que se pierde “el hilo” de lo que se está escuchando.

#### BOTON N° 5: Ubicación de la fuente sonora.

Nuestra habilidad para juzgar si una fuente sonora se encuentra cerca o lejos se basa en la capacidad del oído de identificar la diferencia entre el sonido directo y el reflejado y las variaciones de nivel y frecuencia.

Cuando escuchamos el sonido emitido por una fuente que está lejos, percibimos niveles similares de sonido directo y reflejado, pero cuando se acerca, el sonido directo es mucho más intenso que el reflejado.

Debido a que las frecuencias altas se atenúan más que las bajas con la distancia, un sonido que proviene de lejos contiene más componentes de frecuencias bajas que altas, y a medida que se acerca la fuente que lo produce, se pueden escuchar todas las frecuencias que lo componen.

Si variamos estas características (frecuencia, reverberación y nivel de sonido directo) podemos generar la sensación de que una fuente sonora se está acercando a nosotros.

En nuestra experiencia fue modificado el sonido del carro, mientras que el ruido

ambiente se mantuvo igual para generar la sensación de un punto fijo de referencia.

## COSTOS

<b>MODULO</b>	<b>VALOR APROXIMADO</b>
Direccionalidad del sonido	\$ 700.000
Absorción y reflexión de la energía sonora	\$ 6'000.000
Transmisión de energía sonora a través de las paredes	\$ 800.000
Psicoacústica	\$ 1'700.000

El valor total para la elaboración de los módulos depende de los materiales disponibles en los talleres de Maloka. Después de revisar la disponibilidad existente se presentara el presupuesto para su montaje.

Los costos están basados en los precios de los materiales que probablemente no estén disponibles en los talleres de Maloka.

## **ANEXO 2**

# **CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES DE MONTAJE DEL SUPER BOARD**

## PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

Propiedad	Valor	Unidad	Ensayo
Absorción	30 - 35	%	ASTM D1037
Densidad (en seco)	1.25	kg/dm <sup>3</sup>	ASTM D1037
Contenido de humedad	10 -12	%	ASTM D1037
<b>Variación lineal con cambio de humedad</b>			
De seco a ambiente saturado	1.2	m/m	ASTM D1037
De seco al horno a saturado	2.7	mm/m	
Coefficiente de expansión térmica	6.7 E <sup>-6</sup>	m/m °C	ASTM D696
Módulo de elasticidad (seco al horno)	57.512 - 5.642	kg/cm <sup>2</sup> - MPa	ASTM C120
Conductividad térmica	0.263	W/ m °K	ASTM C518
<b>Resistencia a la tracción del clavo</b>			
En húmedo	32.0	Kg	ASTM D1037
En seco	64.7	Kg	ASTM D1037
Resistencia al impacto (Charpy)	2.1	KJ/m <sup>2</sup>	ASTM D256

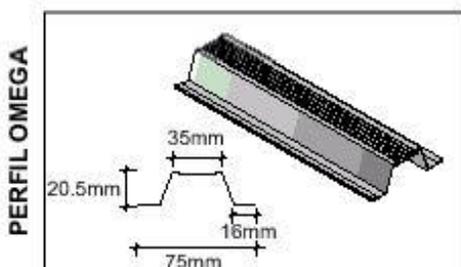
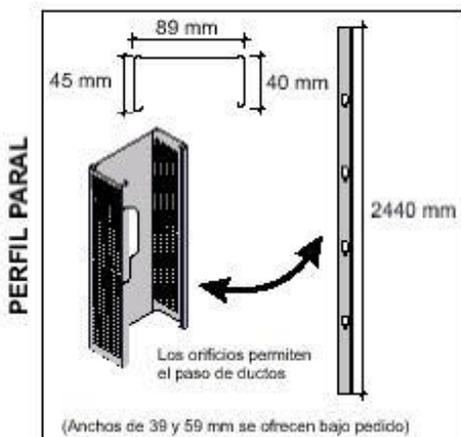
## CLASIFICACIÓN SEGÚN RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

ASTM 1187 - 91	ISO 8336 - 93 y NTC 4373 (Icontec)
<b>GRADO III</b>	<b>CATEGORÍA 4</b>
En húmedo 13 MPa	En húmedo 13 MPa
En equilibrio* 16 MPa	En equilibrio* 16 MPa
* Entiéndase equilibrio como condiciones ambientales	

PLACAS DE FIBROCEMENTO



## PAREDES



### Estructura de soporte

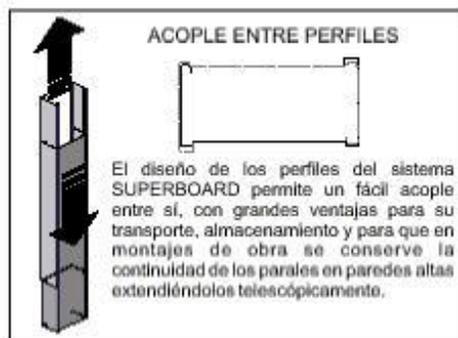
Para garantizar una mejor estabilidad del sistema constructivo, se recomienda utilizar estructura metálica. La estructura de soporte se constituye de perfiles verticales y horizontales de lámina galvanizada cal. 24(0.6mm) fijados entre sí con tornillos de cabeza extraplana.

Estos perfiles han sido desarrollados bajo el sistema de rolado o cold-rolled, de acuerdo con estándares internacionales, que garantizan un nivel de rigidez adecuado de cada elemento y el montaje exacto de la estructura.

Los perfiles horizontales o canales se utilizan como elementos de fijación a las losas y demás elementos de la estructura principal de la edificación.

Los perfiles verticales o parales se utilizan como elementos principales de la estructura de las paredes. La distancia máxima entre estos elementos es de 610mm.

COLOMBIT ofrece perfilería estándar de 89 mm (Perfil paral) / 90 mm (Perfil canal). Sin embargo, si el proyecto lo requiere, puede utilizarse perfilería de 59 mm (Perfil paral) / 60mm (Perfil canal) ó 39 mm (Perfil paral) / 40 mm (Perfil canal). Para esta perfilería especial consulte con el departamento de asistencia técnica de COLOMBIT.



Es de vital importancia ceñirse a la utilización de los perfiles que recomienda COLOMBIT para la instalación de las láminas SUPERBOARD, estos perfiles son fabricados mediante rolado, lo que garantiza resistencia, dimensiones estándar, fácil instalación y estabilidad del sistema en general.

Los perfiles elaborados mediante el proceso de doblado no son aptos para la instalación de láminas SUPERBOARD, cualquier economía que se logre mediante estos perfiles, se traducirá en reclamaciones más costosas.



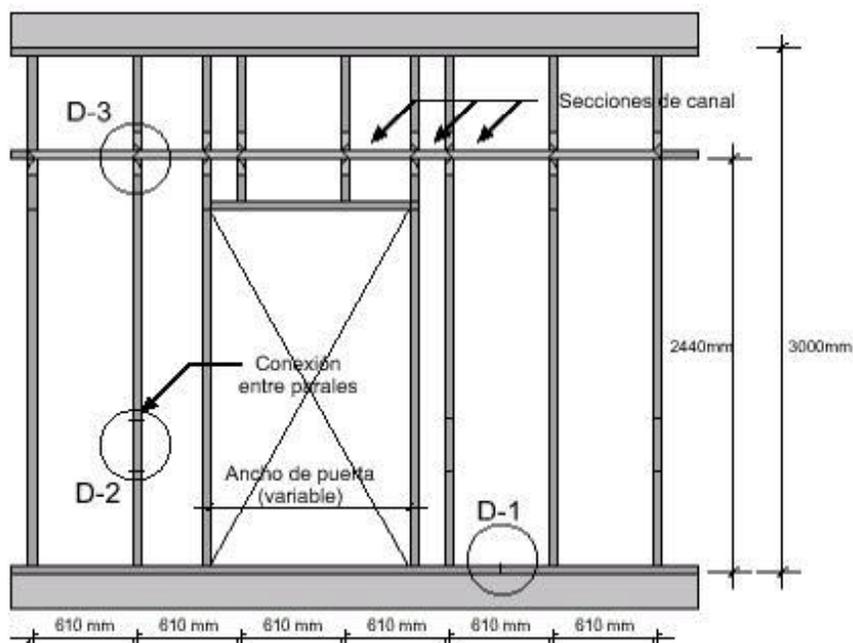
FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(6)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente:(57) (6)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras:(57)(6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an **ELC** GROUP company



## PAREDES

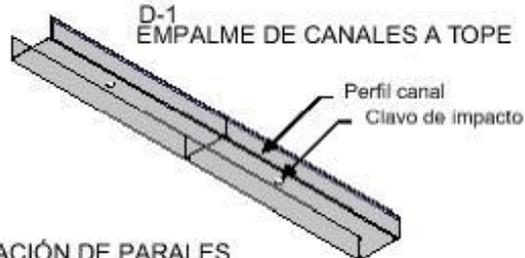
REFUERZO EN PAREDES ALTAS (>2440mm)



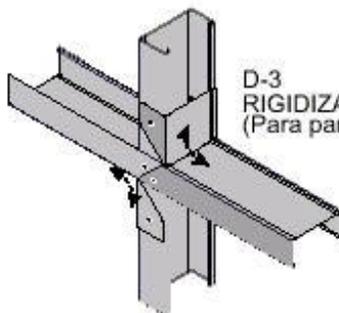
D-2  
CONEXIÓN ENTRE PAREALES



D-1  
EMPALME DE CANALES A TOPE



D-3  
RIGIDIZACIÓN DE PAREALES  
(Para paredes altas)



FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(8)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (8)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (8)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an **ELC** GROUP company

PLACAS DE FIBROCEMENTO



## PAREDES

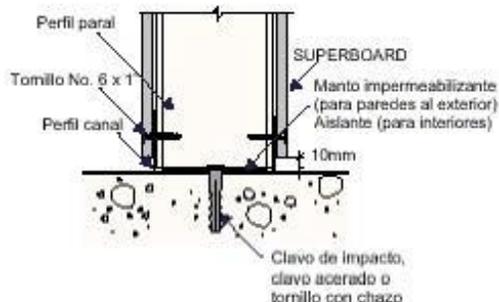
### Fijación de los elementos de soporte a la estructura de la edificación

La fijación de los perfiles depende del tipo de material con el que está construido el piso, el techo y las paredes perimetrales.

**PARA CONCRETO:** clavos de fijación con pistola de impacto, anclajes de camisa o tornillos con chazo de plástico.

**PARA MADERA:** clavos de acero o tornillos.

### DETALLE DE FIJACIÓN AL PISO



### PARA EL MONTAJE DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

FIJACIÓN A LOSAS Y COLUMNAS

FIJACIÓN ENTRE PERFILES

Elementos de fijación

<p>Clavo para fijación con pistola de impacto</p> <p>E 1/4" Longitud: 1" y 1 1/2"</p>	<p>Anclaje de nylon de expansión rápida</p> <p>E 3/8" Longitud: 1 1/2" y 1 3/4"</p>
---	---

<p>Tomillo autoperforante de cabeza extraplana y punta aguda para lámina menor a cal. 20</p> <p>No. 8 x 1/2"</p>	<p>Tomillo autoperforante de cabeza extraplana y punta de broca para lámina mayor a cal. 20</p> <p>No. 8 x 1/2"</p>
--	---

### PARA FIJACIÓN DE PLACAS A LA ESTRUCTURA DE SOPORTE

SOBRE ESTRUCTURA DE MADERA

SOBRE ESTRUCTURA METÁLICA

<p>Clavo acerado (Máximo sobre placa de 8 mm)</p>	<p>Tomillo tipo drywall No. 6 (Con rosca para madera)</p>
---	---

<p>Tomillo tipo drywall No. 6 para lámina cal. 22 a 26</p>	<p>Tomillo tipo drywall No. 6 punta de broca para láminas cal. 14 a 20</p>	<p>Tomillo tipo drywall No. 8 autoavellanante para lámina cal. 12 a 20</p>
--	--	--

Longitud mínima de tornillos para fijación de placas: 1"



FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(6)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (6)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an ELEC GROUP company

PLACAS DE FIBROCEMENTO



## PAREDES

### Fijación entre elementos de soporte

PARA PERFILES METÁLICOS: Tornillos de cabeza extraplana.

PARA ELEMENTOS DE MADERA: Clavos o tornillos para madera.

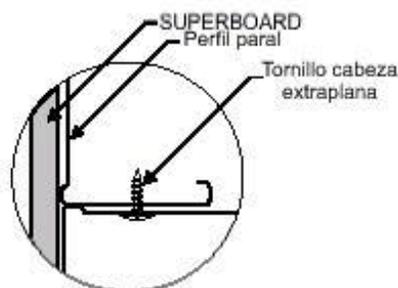
### Fijación de las placas SUPERBOARD

El tornillo indicado para esta parte del montaje es el tornillo autoavellanante, el cual permite que la cabeza penetre lo suficiente (2 mm como mínimo) para que el estuco cubra los puntos de fijación adecuadamente. Para lograr esto, el operario debe calibrar el atornillador eléctrico a fin de trabajar con el nivel de torque específico que la máquina le puede dar.

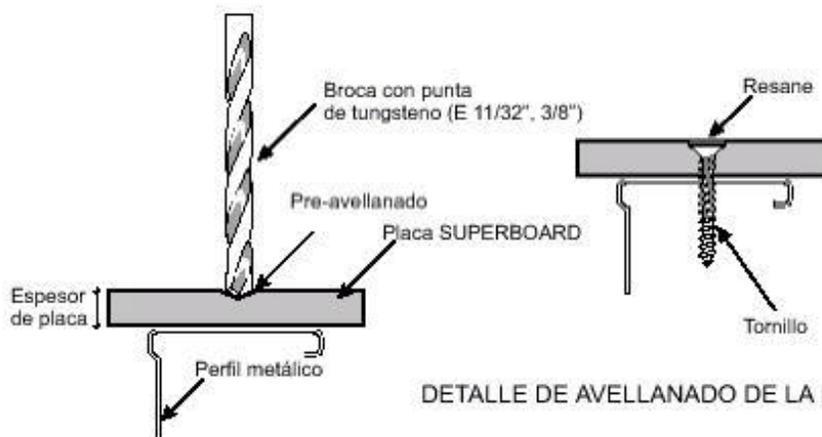
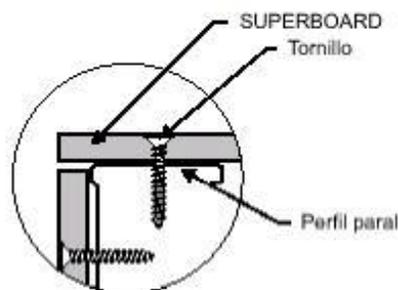
Cuando se utilice tornillo para drywall convencional No. 6 x 1", se debe pre-avellanar la placa SUPERBOARD con broca de tungsteno de 1 1/32" ó 3/8".

Sobre estructura de madera, puede utilizarse el mismo tipo de tornillo o clavo acerado sobre placa no mayor de 8 mm de espesor.

### DETALLE UNIÓN ENTRE PERFILES



### DETALLE FIJACIÓN PLACA A PERFIL EN ESQUINA

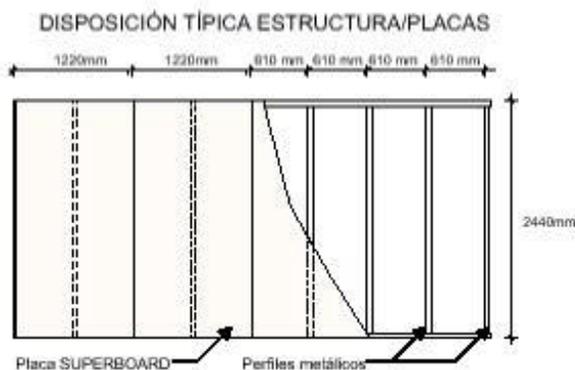


### DETALLE DE AVELLANADO DE LA PLACA



FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(8)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (8)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an **ELC** GROUP company



## Instalación de las paredes

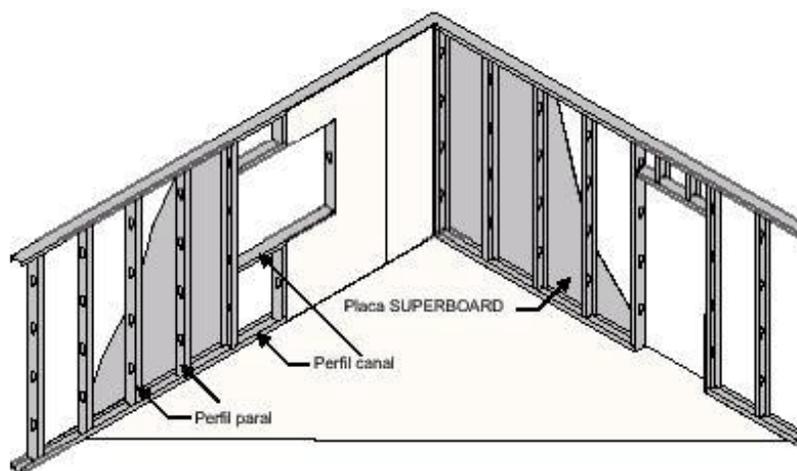
Durante el diseño de las paredes, se hace necesario prever el espesor adecuado de las mismas para dar paso a las tuberías hidráulicas, eléctricas y sanitarias (Ver página 20). Sin embargo, el ancho estándar del perfil de 90 mm que COLOMBIT suministra, permite albergar los ductos más comúnmente usados en redes de servicio.

Antes de empezar la instalación, se deben trazar las líneas de referencia en el piso necesarias para la distribución de las paredes.

Inicialmente se deben instalar las canales tanto en el piso como en la losa superior. Los tornillos o elementos de fijación no deben estar distanciados más de 600 mm entre sí.

Luego se colocan los parales, iniciando por uno de los extremos de la nueva pared. La distancia entre perfiles debe ser máximo de 610 mm a ejes. Para facilitar la ubicación de estos perfiles, se pueden ir fijando a medida que se van atornillando las placas. De esta forma, el operario puede ubicar el perfil de modo que las dos placas SUPERBOARD contiguas queden correctamente apoyadas sobre éste.

Debe procurarse la disposición de los parales en el mismo sentido con el fin de que los orificios de estos perfiles coincidan y faciliten la colocación de instalaciones y tuberías al interior de las paredes.



FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(6)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (6)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an **ELC** GROUP company

PLACAS DE FIBROCEMENTO



## PAREDES

Por último se instalan las placas, sobre las cuales se marca previamente la ubicación de los tornillos. Las placas se deben dejar levantadas del nivel del piso 10 mm para evitar que absorban humedad de éste por capilaridad.

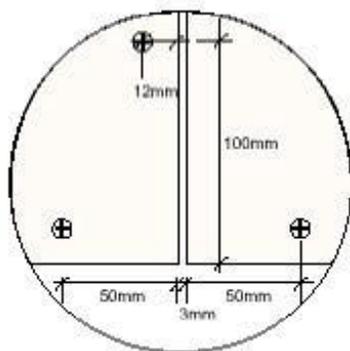
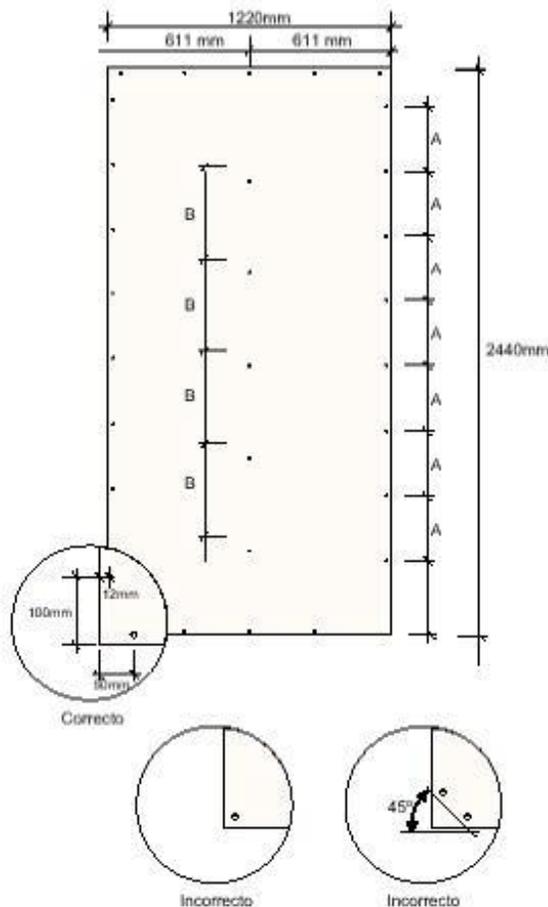
Se debe evitar que las juntas entre las placas instaladas por ambas caras de la estructura coincidan, con el fin de darle más estabilidad y rigidez a la pared.

Cuando se utiliza estructura de soporte madera, los pasos a seguir son similares a los anteriormente descritos, pero la distancia entre clavos y tornillos es menor (ver cuadro).

### DISTANCIA MÁXIMA ENTRE ELEMENTOS DE FIJACIÓN

FIJACIÓN	A (mm)	B (mm)
Puntilla acerada	150	300
Tomillo	300	400

La distancia máxima entre tornillos puede reducirse en algunas aplicaciones diferentes a paredes interiores. Favor consultar con nuestro Departamento de Asistencia Técnica.



### DISTANCIA DE LOS TORNILLOS A LOS BORDES DE LA PLACA



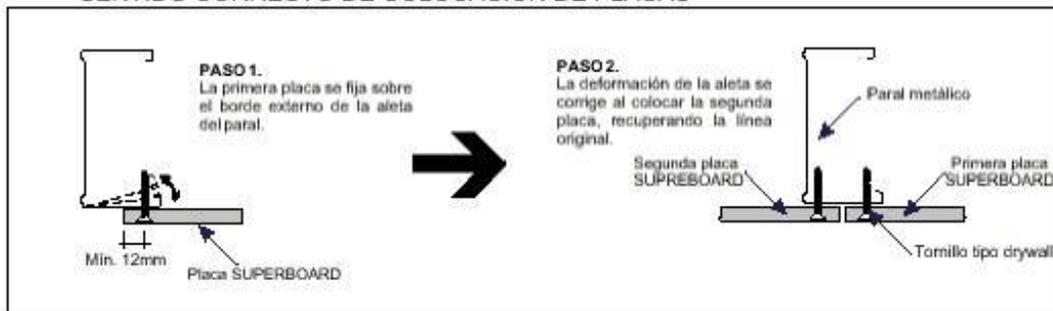
FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(6)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (6)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an ELEC GROUP company

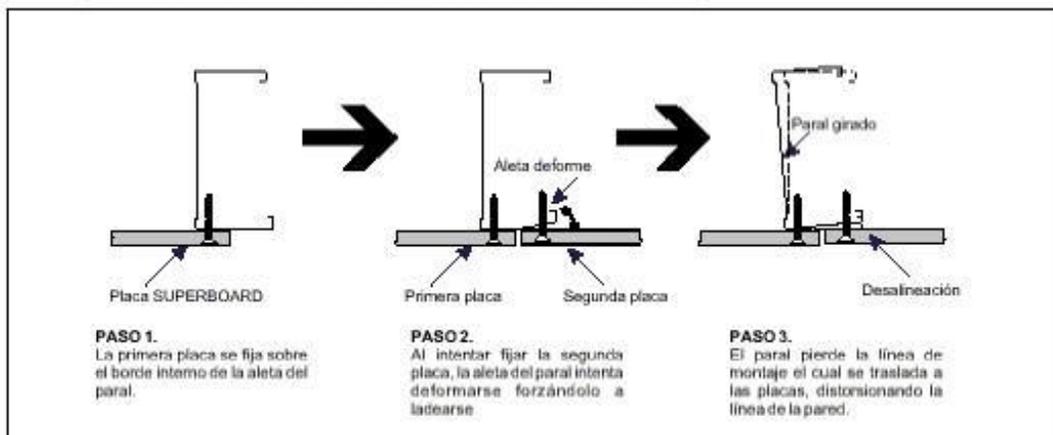


## PAREDES

### SENTIDO CORRECTO DE COLOCACIÓN DE PLACAS



### SENTIDO INCORRECTO DE COLOCACIÓN DE PLACAS



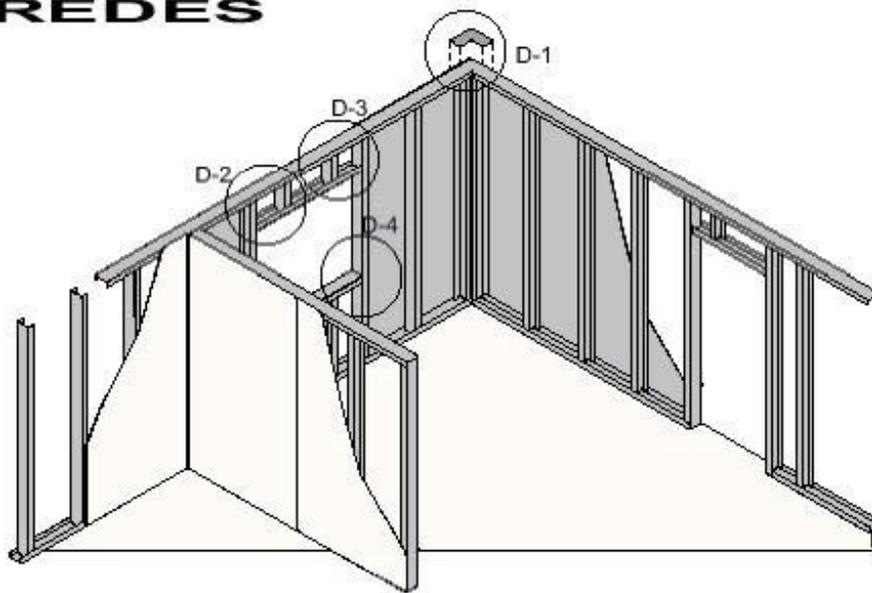
FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(6)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente:(57) (6)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras:(57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an ELEX GROUP company

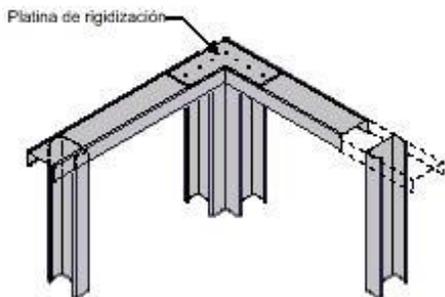
PLACAS DE FIBROCEMENTO



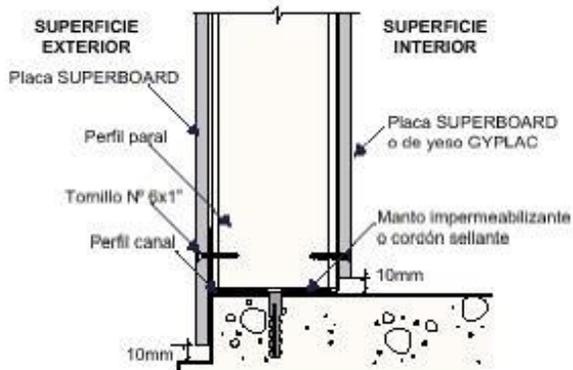
**PAREDES**



**D-1 RIGIDIZACIÓN DE ESQUINAS**  
Para paredes que no llegan hasta la losa superior



**D-2 PLACA DESCOLGADA A RAS DE PARED**



FÁBRICA Y OFICINAS - Parque Industrial Juanchito - Conmutador: (57)(8)874 77 47 - Fax: 874 59 33  
 Servicio al Cliente: (57) (8)874 10 13 - Fax: 874 10 21 - Compras: (57) (6)874 10 17 - Fax: 874 56 41 Apartado Aéreo: 358  
 MANIZALES, CALDAS, COLOMBIA - Línea gratuita de Asistencia Técnica 9(800) 966200

an **ELC** GROUP company

## **ANEXO 3**

# **MEDICIONES DE RUIDO DE FONDO EN LAS INSTALACIONES DE MALOKA**

**Fecha de realización:** 29 de noviembre de 2002

**Locación:** Instalaciones de Maloka

**Instrumento:** Sonómetro Larson Davis

**Modelo/ Numero de serie:** 824/A0765

**Mediciones realizadas:** NPS,  $L_{EQ}$ , SEL,  $L_{MIN}$ ,  $L_{MAX}$ , con ponderaciones A, C y Plana,  $L_{EQ}$ ,  $L_{MIN}$ ,  $L_{MAX}$ , en bandas de 1/3 y 1/1 con ponderación plana en 3 puntos distintos.

Los las mediciones fueron realizadas cuando en las instalaciones había gran cantidad de gente.

#### SLM & RTA Summary

**Translated: 27-Apr-2003 02:25:23**

-----  
File Translated: E:\Cd respaldo\mediciones maloka\29Nov10s\_063.slmdl

Model Number: 824

Serial Number: A0765

Firmware Rev: 3.111

Software Version: 3.100

Start Time: 29-Nov-2002 10:01:34

Elapsed Time: 00:02:08.8

	<b>A Weight</b>	<b>C Weight</b>	<b>Flat</b>
Leq:	70.5 dBA	77.8 dBC	78.4 dBF
SEL:	91.7 dBA	98.9 dBC	99.5 dBF
Peak:	90.4 dBA	91.6 dBC	92.3 dBF
Lmax (slow):	73.3 dBA	79.5 dBC	80.0 dBF
Lmin (slow):	67.0 dBA	74.0 dBC	74.8 dBF
Lmax (fast):	75.4 dBA	80.8 dBC	81.2 dBF
Lmin (fast):	65.6 dBA	73.1 dBC	73.8 dBF
Lmax (impulse):	77.0 dBA	81.6 dBC	81.9 dBF
Lmin (impulse):	66.1 dBA	73.4 dBC	74.1 dBF

## Spectra

Start Time: 29-Nov-2002 10:01:34 Run Time: 00:02:08.8

Freq	Leq 1/3	Leq 1/1	Max 1/3	Max 1/1	Min 1/3	Min 1/1
12.5 Hz	67.6		62.9		53.2	
16.0 Hz	59.3	68.5	57.0	64.1	48.1	54.9
20.0 Hz	57.0		50.5		45.6	
25.0 Hz	60.9		61.6		50.4	
31.5 Hz	64.1	67.5	65.2	69.0	55.6	58.5
40.0 Hz	62.7		65.0		53.6	
50.0 Hz	61.4		60.8		53.6	
63.0 Hz	74.8	75.1	76.0	76.2	65.1	65.6
80.0 Hz	60.1		57.9		52.7	
100 Hz	60.5		60.6		55.1	
125 Hz	64.9	68.3	68.2	70.1	57.0	61.3
160 Hz	64.0		63.8		57.2	
200 Hz	64.7		65.3		55.7	
250 Hz	66.7	70.3	69.0	72.3	58.1	61.9
315 Hz	65.0		67.4		57.4	
400 Hz	63.9		64.8		58.6	
500 Hz	65.1	69.2	66.6	71.1	57.6	62.6
630 Hz	64.1		67.3		57.2	
800 Hz	62.6		69.3		56.7	
1000 Hz	60.8	66.1	62.1	72.0	56.3	60.5
1250 Hz	60.1		67.5		53.8	
1600 Hz	58.0		61.7		52.1	
2000 Hz	55.0	60.4	55.0	63.1	50.4	55.1
2500 Hz	51.9		53.8		47.2	
3150 Hz	50.2		52.1		44.1	
4000 Hz	48.8	53.2	51.2	55.5	41.8	46.8
5000 Hz	44.5		47.7		38.7	
6300 Hz	42.3		44.5		35.6	
8000 Hz	39.7	45.2	40.9	46.8	34.3	39.2
10000 Hz	38.3		38.9		33.2	
12500 Hz	45.5		35.4		32.2	
16000 Hz	42.6	44.2	39.8	42.2	37.0	40.0
20000 Hz	36.4		35.4		35.1	

**SLM & RTA Summary****Translated: 27-Apr-2003 02:26:02**

File Translated: E:\Cd respaldo\mediciones maloka\29Nov10s\_064.slmml

Model Number: 824

Serial Number: A0765

Firmware Rev: 3.111

Software Version: 3.100

Start Time: 29-Nov-2002 10:04:52

Elapsed Time: 00:02:01.6

	<b>A Weight</b>	<b>C Weight</b>	<b>Flat</b>
Leq:	70.3 dBA	75.8 dBC	76.3 dBF
SEL:	91.2 dBA	96.6 dBC	97.1 dBF
Peak:	88.4 dBA	90.8 dBC	90.9 dBF
Lmax (slow):	74.9 dBA	78.1 dBC	78.4 dBF
Lmin (slow):	66.7 dBA	73.2 dBC	73.9 dBF
Lmax (fast):	76.7 dBA	79.1 dBC	79.4 dBF
Lmin (fast):	65.6 dBA	72.3 dBC	72.7 dBF
Lmax (impulse):	77.3 dBA	80.2 dBC	80.5 dBF
Lmin (impulse):	66.2 dBA	73.0 dBC	73.6 dBF

**Spectra**

Start Time: 29-Nov-2002 10:04:52 Run Time: 00:02:01.6

<b>Freq</b>	<b>Leq 1/3</b>	<b>Leq 1/1</b>	<b>Max 1/3</b>	<b>Max 1/1</b>	<b>Min 1/3</b>	<b>Min 1/1</b>
12.5 Hz	62.2		60.8		50.3	
16.0 Hz	58.6	64.4	60.7	64.3	47.7	53.1
20.0 Hz	55.8		54.8		45.9	
25.0 Hz	61.9		54.8		52.2	
31.5 Hz	65.5	68.8	60.4	68.2	58.0	60.4
40.0 Hz	63.9		67.2		54.9	
50.0 Hz	62.0		62.1		54.8	
63.0 Hz	61.9	66.0	64.5	67.5	55.3	58.7
80.0 Hz	59.4		60.6		50.3	
100 Hz	58.9		60.7		53.3	
125 Hz	63.0	68.2	70.6	72.1	55.9	60.8
160 Hz	65.8		65.7		57.7	
200 Hz	66.3		64.4		59.9	
250 Hz	66.2	70.4	64.4	69.3	60.7	64.8
315 Hz	64.1		64.7		59.3	

400 Hz	64.4		65.2		60.2	
500 Hz	64.7	68.9	66.8	70.4	59.7	64.0
630 Hz	63.1		64.6		57.1	
800 Hz	62.5		69.6		56.6	
1000 Hz	60.5	65.9	60.8	72.8	53.7	59.4
1250 Hz	60.1		69.5		52.5	
1600 Hz	58.3		61.9		52.0	
2000 Hz	55.6	60.7	60.6	65.8	50.1	54.9
2500 Hz	51.7		60.3		47.0	
3150 Hz	48.7		55.6		44.6	
4000 Hz	47.0	51.8	52.3	58.0	42.7	47.5
5000 Hz	44.2		49.7		39.3	
6300 Hz	41.2		48.4		37.3	
8000 Hz	39.6	44.4	47.0	51.3	36.0	40.9
10000 Hz	37.3		41.8		34.7	
12500 Hz	37.2		41.0		33.4	
16000 Hz	38.9	43.0	41.1	44.8	36.5	40.0
20000 Hz	38.4		36.6		5.3	

**SLM & RTA Summary****Translated: 27-Apr-2003 02:26:13**-----  
File Translated: E:\Cd respaldo\mediciones maloka\29Nov10s\_065.slmml

Model Number: 824

Serial Number: A0765

Firmware Rev: 3.111

Software Version: 3.100

Start Time: 29-Nov-2002 10:12:30

Elapsed Time: 00:02:03.1

	<b>A Weight</b>	<b>C Weight</b>	<b>Flat</b>
Leq:	76.7 dBA	81.1 dBC	81.3 dBF
SEL:	97.6 dBA	102.0 dBC	102.2 dBF
Peak:	98.1 dBA	100.1 dBC	100.1 dBF
Lmax (slow):	83.3 dBA	86.1 dBC	86.1 dBF
Lmin (slow):	69.8 dBA	74.5 dBC	75.0 dBF
Lmax (fast):	87.3 dBA	88.8 dBC	88.8 dBF
Lmin (fast):	68.0 dBA	72.4 dBC	73.0 dBF
Lmax (impulse):	90.0 dBA	90.8 dBC	90.8 dBF
Lmin (impulse):	70.3 dBA	74.3 dBC	74.8 dBF

**Spectra**

Start Time: 29-Nov-2002 10:12:30 Run Time: 00:02:03.1

<b>Freq</b>	<b>Leq 1/3</b>	<b>Leq 1/1</b>	<b>Max 1/3</b>	<b>Max 1/1</b>	<b>Min 1/3</b>	<b>Min 1/1</b>
12.5 Hz	63.4		53.9		51.7	
16.0 Hz	62.6	66.5	61.8	63.6	49.0	54.0
20.0 Hz	56.5		57.3		44.2	
25.0 Hz	62.8		59.1		48.4	
31.5 Hz	67.6	69.9	64.2	65.7	53.2	55.4
40.0 Hz	63.4		54.6		48.2	
50.0 Hz	59.7		63.9		48.5	
63.0 Hz	60.1	65.2	56.8	65.5	51.3	55.2
80.0 Hz	61.2		57.6		51.0	
100 Hz	61.8		60.9		52.5	
125 Hz	71.3	75.1	69.4	74.3	55.5	58.7
160 Hz	72.4		72.3		53.3	
200 Hz	68.5		67.9		54.2	
250 Hz	73.5	75.7	67.0	72.3	57.4	61.5
315 Hz	68.7		67.7		57.7	
400 Hz	67.4		69.0		58.5	
500 Hz	69.7	74.0	67.0	72.5	60.4	63.8
630 Hz	70.2		66.7		57.7	
800 Hz	69.0		72.6		57.8	
1000 Hz	66.7	72.6	75.2	81.0	55.2	60.5
1250 Hz	67.3		78.8		53.0	
1600 Hz	65.6		74.8		51.1	
2000 Hz	63.3	68.2	75.7	78.8	51.1	55.2
2500 Hz	59.6		69.1		48.6	
3150 Hz	58.4		63.4		45.9	
4000 Hz	55.8	61.1	60.5	65.6	42.6	48.3
5000 Hz	53.3		54.7		40.0	
6300 Hz	50.6		52.8		36.9	
8000 Hz	50.2	54.6	52.8	56.2	36.7	41.2
10000 Hz	48.3		45.4		35.4	
12500 Hz	46.1		41.9		34.1	
16000 Hz	47.6	50.6	45.0	47.5	38.5	41.2
20000 Hz	42.4		39.3		35.4	

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] **SOMMERHOFF, J.** “*Acústica de Locales*”. Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile
- [2] **BERANEK, L. L.** “*Acústica*”. 2ª edición. Editorial Hispano Americana S.A. 1969. Buenos Aires. Argentina
- [3] **BERANEK, L. L.** “*Noise and Vibration Control*”. McGraw-Hill Book Company. 1971. New York.
- [4] **BLAUERT JENS.** “*Spatial hearing. The psychophysics of human sound localización*”. Revised Edition. The MIT Press, Cambridge, Massachussets, London, England. 1997. USA
- [5] **COOK, PERRY R.** “*Music, Cognition, and Computerized sound. An introduction to Psychoacoustics*”. The MIT Press, Cambridge, Massachussets, London, England. 1999. USA
- [6] **KINSLER, L.** “*Fundamentos de Acústica*”. Editorial Limusa, 1995, Mejico.
- [7] **DAVIS, DON Y DAVIS CAROLYN.** “*Sound System Engineering*”. 2ª edición. Focal Press. 1997. USA
- [8] **AGUILAR A, JUAN RAMON.** “*Grabación del sonido utilizando una cabeza artificial y su reproducción mediante un sistema compatible*”. Tesis de Ingeniero Acústico. Escuela de Ingeniería Acústica. Facultad de Ingeniería. Universidad Austral de Chile. 1997. Valdivia, Chile.
- [9] [http://www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/PSICOACUSTICA/Enmasc\\_no\\_simulta.html](http://www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/PSICOACUSTICA/Enmasc_no_simulta.html)
- [10] **SUAREZ S, ENRIQUE A, VERGARA M, ERASMO F.** “*Diseño y funcionamiento de laboratorio normalizado de medición de propiedades acústicas de materiales de construcción*”. Tesis de Ingeniero Acústico. Escuela de Ingeniería Acústica. Facultad de Ingeniería. Universidad Austral de Chile. 1995. Valdivia, Chile.
- [11] **SOMMERHOFF, J.** “*Cajas acústicas*”. Instituto de Acústica. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile
- [12] **MORFEY L, CHRISTOPHER.** “*Dictionary of acoustics*”. 1ª edición. Academic Press. 2001. USA

## Referencias

- 
- <sup>1</sup> **MÖSER, M.** (2002). "*Lectures on theoretical Acoustics*". Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile
- <sup>2</sup> **KINSLER, L.** (1995). "*Fundamentos de Acústica*". Editorial Limusa, 592 pp.
- <sup>3</sup> **SOMMERHOFF, J.** (2001). *Acústica de Locales*. Instituto de Acústica, Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Universidad Austral de Chile
- <sup>4</sup> **SUAREZ S, ENRIQUE A, VERGARA M, ERASMO F.** (1995) "*Diseño y funcionamiento de laboratorio normalizado de medición de propiedades acústicas de materiales de construcción*". Tesis de Ingeniero Acústico. Escuela de Ingeniería Acústica. Facultad de Ingeniería. Universidad Austral de Chile. 1995. Valdivia, Chile.
- <sup>5</sup> **BERANEK, L.** (1971). *Noise and vibration control*. McGRAW- HILL. New York