



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

Profesor Patrocinante:
Jorge P. Arenas B.
Instituto de Acústica
Universidad Austral de Chile

**Determinación analítica y experimental de la
atenuación sonora de un protector auditivo de inserción
considerando la absorción acústica de su material**

Tesis presentada para optar al Grado
Académico de Licenciado en Acústica y
al Título Profesional de Ingeniero Acústico.

Maysa Daniela Moreno Mardones
Valdivia - Chile
2006

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Introducción	7
1.2. Antecedentes de la UFSC	9
1.3. Limitación del estudio	9
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivo General	10
1.4.2. Objetivos Específicos	10
2. Revisión bibliográfica	11
2.1. Sistema Auditivo	11
2.2. Protectores Auditivos	13
2.2.1. Funcionamiento del protector auditivo	14
2.2.2. Tipos de protectores auditivos	15
2.3. Métodos para ensayos de atenuación de ruido de protectores auditivos	16
2.3.1. Método Subjetivo	16
2.3.2. Método Objetivo	17
2.4. Revisión de Normativa	18
3. Características acústicas del material del protector auditivo	20
3.1. Medición de la impedancia acústica para la determinación del Coeficiente de Absorción Sonora	21
3.2. Resultados experimentales para la determinación del Coefi- ciente de Absorción Sonora	26
3.2.1. Descripción de las muestras	26
3.2.2. Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia grande	27

3.2.3.	Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia pequeño	28
3.2.4.	Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia grande sin las capas superior e inferior de la muestra	29
4.	Formulación analítica del modelo del canal auditivo simulado	30
4.1.	Modelo del canal auditivo sin protector auditivo	31
4.2.	Modelo del canal auditivo con protector auditivo sin considerar la absorción del material.	40
4.3.	Modelo del canal auditivo con protector auditivo considerando la absorción del material.	48
4.4.	Atenuación del protector auditivo al variar su tamaño, densidad y velocidad del sonido	51
4.4.1.	Modificación del tamaño del protector auditivo	51
4.4.2.	Modificación de la densidad del protector auditivo	53
4.4.3.	Modificación de la velocidad de onda longitudinal del protector auditivo	55
5.	Conclusiones	57
	Bibliografía	65
	Agradecimientos	67

Lista de símbolos

α	Coefficiente de absorción
A	Amplitud de presión sonora onda incidente [N/m ²]
ANSI	American National Standard Institute
B	Amplitud de presión sonora onda reflejada [N/m ²]
c	Velocidad del sonido en el aire [m/s]
f	Frecuencia [Hz]
f_c	Frecuencia de corte [Hz]
f_n	Frecuencia de resonancia para un tubo abierto-cerrado [Hz]
H_{12}	Función de transferencia entre $P_1(\omega)$ y $P_2(\omega)$
ISO	International Standards Organization
k	Número de onda [1/m]
L	Longitud del tubo recto [m]
L_p	Longitud del protector auditivo [m]
n	Número entero
NPS	Nivel de Presión Sonora [dB]
NRR	Nivel de Reducción de Ruido [dB]
P_i	Presión incidente onda plana
P_r	Presión reflejada onda plana
P_t	Presión transmitida onda plana
$P_1(\omega)$	Presión sonora en el punto 1 del tubo de impedancia
$P_2(\omega)$	Presión sonora en el punto 2 del tubo de impedancia
P_T	Presión acústica total
P_{Tf}	Presión total compleja en el tímpano [N/m ²]
P_{Te}	Presión en la entrada del canal auditivo [N/m ²]
REAT	Real Ear Attenuation at Threshold
R_d	Resistencia acústica
$r(\omega)$	Coefficiente de reflexión complejo

s	Espacio entre las posiciones de los micrófonos 1 y 2 (z_2-z_1)
S	Sección transversal [m^2]
t	Tiempo [s]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
T_{rev}	Tiempo de reverberación [s]
u_{pi}	Velocidad de partícula de la onda incidente
u_{pr}	Velocidad de partícula de la onda reflejada
U_i	Velocidad de volumen de la onda incidente
U_r	Velocidad de volumen de la onda reflejada
U_T	Velocidad de volumen total
x	Coordenada longitudinal [m]
X_d	Reactancia acústica
z	Impedancia acústica
z_1	Distancia entre la posición 1 del tubo de impedancia y la superficie de la muestra
z_2	Distancia entre la posición 2 del tubo de impedancia y la superficie de la muestra
Z_T	Impedancia acústica compleja del tímpano [Ns/m^5]
$Z(x)$	Impedancia en cualquier punto del tubo
Z_0	Impedancia del tímpano en la entrada del canal auditivo
ρ	Densidad del aire [kg/m^3]
ω	Frecuencia angular [rad/s]

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo principal determinar la atenuación sonora para ruido continuo de un tipo de protector auditivo de inserción automoldeable a través de un método analítico simple y considerando el efecto del coeficiente de absorción del material del cual es fabricado el protector auditivo.

El procedimiento experimental consistió básicamente, en la determinación del coeficiente de absorción del material del protector auditivo a través del tubo de impedancia. Para realizar estas mediciones se seleccionaron muestras de diferentes diámetros para tener un mayor rango de frecuencia y como el material posee una capa superior e interior más densa, se utilizaron muestras sin esta capa, para determinar su influencia en los resultados.

Posteriormente, se desarrolló un método analítico del canal auditivo, para determinar la presión sonora tanto en la entrada del canal como en la membrana timpánica y obtener a partir de ellas la atenuación debido a la presencia del protector auditivo.

Abstract

The main objective of this work was to evaluate the sound attenuation for continuous noise of a type of formable earplug hearing protector by using a simple analytical method which considers the effect of the absorption coefficient of the material from which the hearing protector is made.

The absorption coefficient was experimentally determined by means of an impedance tube and by using a two-microphone technique. During the experimental procedure several samples of different diameters were selected in order to have results valid in a wide frequency range. In addition, since the material of the hearing protector had a layer at the top which was denser than the interior layer, samples without this layer were measured for determining its influence on the results.

Subsequently, an analytic model for the ear canal was developed, to determine the sound pressure both at the input of the canal and at the eardrum. These results were used to evaluate the sound attenuation due to the presence of the hearing protector.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El creciente desarrollo e industrialización de las ciudades trae consigo muchos agentes contaminantes perjudiciales para la población, principalmente para los trabajadores. Hoy en día, tanto en Chile como en otros países del mundo, la pérdida auditiva es catalogada como una de las enfermedades ocupacionales más recurrente.

El ruido, desde el punto de vista ocupacional, puede definirse como un contaminante físico que produce una sensación auditiva considerada molesta o incómoda y que con el paso del tiempo y por efecto de su reiteración, puede ser perjudicial para la salud de las personas.

Dentro de un programa de conservación auditiva, lo fundamental es controlar el ruido en la fuente o en el medio de propagación. Sin embargo, cuando ésto no es técnica ni económicamente posible, los protectores auditivos pueden ser una alternativa de protección que ofrece una buena atenuación, siempre que sean correctamente seleccionados.

Los protectores auditivos son elementos de protección personal cuyo objetivo principal es reducir a un nivel aceptable los ruidos excesivos a los cuales el trabajador está expuesto para evitar algún daño irreparable. Es importante destacar que los protectores auditivos no deben ser considerados como una solución definitiva al problema.

En la actualidad existe una gran variedad de protectores auditivos, de diferentes modelos, formas y tamaños, cuyo objetivo común es atenuar la onda de presión sonora antes de ésta llegar a la membrana timpánica.

Los métodos tradicionales para evaluar la atenuación sonora de protectores auditivos son el método subjetivo o REAT (Real Ear Attenuation at Threshold) que calcula la diferencia entre los umbrales de audición sin y con el protector auditivo, y el método objetivo que no considera factores humanos ya que se utilizan cabezas artificiales y aparatos de pruebas acústicas.

Debido a la complejidad de la geometría del canal auditivo humano y de los distintos tipos de protectores auditivos de inserción, los recursos de formulación analítica del modelo del canal auditivo con y sin protector auditivo y la simulación numérica son herramientas muy poderosas para obtener una solución aproximada.

La formulación analítica del modelo del canal auditivo pretende determinar la respuesta acústica estacionaria del canal auditivo humano, la presión sonora y la curva de atenuación debido a la presencia de un protector auditivo de inserción automoldeable.

Junto con el avance tecnológico y computacional, surgieron diversos programas computacionales comerciales de simulación numérica dando solución a problemas más complejos. El uso de métodos numéricos de análisis permite la evaluación y optimización de nuevos proyectos en forma computacional y, por lo tanto, probar experimentalmente sólo los modelos optimizados, economizando tiempo y dinero.

Entre los métodos numéricos mas utilizados se destacan los métodos de elementos finitos (FEM) y de elementos de contorno (BEM). Una gran ventaja de la simulación por el método FEM es la facilidad con la que se pueden variar los parámetros de los modelos numéricos, tales como condiciones de contorno y propiedades físicas.

1.2. Antecedentes de la UFSC

El Laboratorio de Ruido Industrial (LARI) del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) ubicada en la ciudad de Florianópolis, Brasil, fue creado en 1998. En la actualidad el LARI es el único laboratorio de Brasil para investigación, desarrollo y ensayos de protectores auditivos (PA). El LARI es certificado por el Ministerio de Trabajo y Empleo (MTE) de Brasil para ensayos de protectores auditivos y es el encargado de la emisión de documentos obligatorios que son usados por los fabricantes e importadores de protectores auditivos para la obtención del certificado de aprobación, necesario para la venta de este producto en el mercado. A partir del año 2003, el gobierno brasileño exige que todos los protectores auditivo fabricados o importados en Brasil estén validados de acuerdo con la norma.

En el LARI son realizados ensayos de atenuación de ruido de protectores auditivos, se desarrollan procedimientos para medición de atenuación de ruido impulsivo de protectores auditivos, ensayos objetivos de protectores auditivos de inserción, modelos numéricos de predicción de atenuación de ruido de PA, desarrollo y modificación del proyecto de PA para fabricantes, además del estudio del efecto de la vida útil de los PA en su atenuación de ruido.

1.3. Limitación del estudio

Considerando que el tema de los protectores auditivos es bastante amplio, el presente trabajo considerará las siguientes restricciones:

- Será estudiado el protector auditivo de inserción automoldeable con características porosas;
- No serán considerados factores como comodidad, duración, higiene, etc;
- No será considerada la impedancia del canal auditivo, geometría del canal ni de la oreja.
- Será utilizado como excitación un nivel de presión sonora de bajo nivel, para evitar los efectos no lineales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Determinar la atenuación sonora de protectores auditivos de inserción automoldeables para ruido continuo a través de un método analítico simple y considerando las características acústicas del material del protector auditivo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Modelar el canal auditivo humano, por ecuaciones exactas, para obtener la curva de atenuación sonora con y sin un protector auditivo de inserción automoldeable utilizando la teoría de propagación de onda sonora plana, en uno o más medios homogéneos,
- Determinar el coeficiente de absorción e impedancia acústica del material del protector auditivo a través de ensayos experimentales,
- Comprobar si el protector auditivo se comporta como material absorbente.

Capítulo 2

Revisión bibliográfica

En este capítulo será presentada una revisión bibliográfica del sistema auditivo, protectores auditivos, estudios y problemas relacionados con los métodos objetivos y subjetivos para determinar la atenuación de ruido de protectores auditivos, además de una revisión de normativas sobre los procedimientos de ensayo de atenuación de ruido.

2.1. Sistema Auditivo

El oído humano es un sistema muy sensible, delicado, complejo y discriminativo [1]. La tarea principal del oído es detectar y analizar los ruidos mediante el proceso de transducción. Otra función muy importante del oído es la de mantener el sentido del equilibrio.

Cuando el sistema auditivo es excitado por una fuente sonora externa, la señal es captada y modificada por el pabellón y transmitida a lo largo del canal auditivo hacia la membrana timpánica. Luego, la presión es transmitida a lo largo de un líquido hasta ser convertido por la cóclea en señales eléctricas que son captadas por el cerebro e interpretadas como sonido.

La mejor forma de describir el funcionamiento del oído es mostrando la ruta que siguen las ondas sonoras en su trayectoria a través de este órgano.

El oído humano se divide en tres partes principales: Oído externo, oído medio y oído interno (ver Figura 2.1).

El oído externo está compuesto por el pabellón, que concentra las ondas sonoras en el conducto, y el conducto auditivo externo que desemboca en la membrana timpánica. La única parte visible del oído es el pabellón auditivo

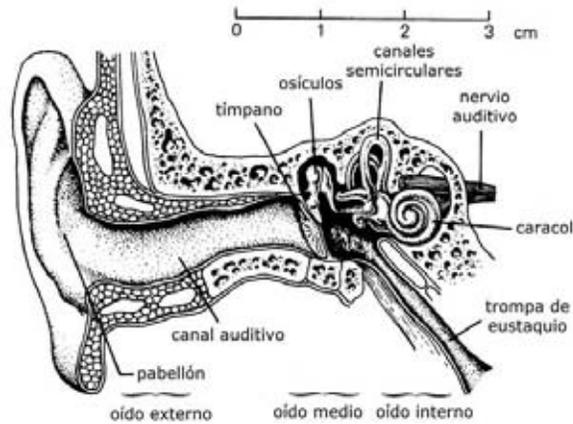


Figura 2.1: Oído Humano

(oreja) que, debido a su forma helicoidal, es la primera parte del oído en reaccionar ante el sonido. El pabellón auditivo funciona como una especie de embudo que ayuda a dirigir el sonido hacia el interior del oído.

Para que las ondas sonoras penetren en el oído de la mejor forma posible, la resistencia del aire no debe ser demasiado alta. El pabellón auditivo es esencial para ayudar a vencer la diferencia de presión en el interior y exterior del oído. El pabellón auditivo funciona como un vínculo intermedio que hace que esta transición sea más suave.

Una vez que las ondas sonoras han superado el pabellón auditivo, se desplazan de dos a tres centímetros dentro del conducto auditivo antes de hacer vibrar la membrana timpánica.

El canal auditivo humano tiene aproximadamente 8 mm de diámetro y 27.9 mm de longitud. El canal es ligeramente curvado y la sección transversal varía a lo largo del canal. Al final del canal auditivo se encuentra la membrana timpánica. Para frecuencias en las cuales la longitud de onda es mucho mayor que cualquier dimensión del canal, la presión sonora es igual en cualquier punto [2].

El oído medio es una cavidad llena de aire limitada por un lado por la membrana timpánica y por la ventana oval al otro lado. En su interior hay tres huesecillos, llamados martillo, yunque y estribo.

La presión de las ondas sonoras hace que la membrana timpánica vibre y cuando esto sucede, las ondas sonoras pasan por el martillo y el yunque hacia el estribo y posteriormente hacia la ventana oval. La ventana oval es

una membrana que recubre la entrada a la cóclea en el oído interno.

Cuando las ondas sonoras se transmiten desde la membrana timpánica a la ventana oval, el oído medio funciona como un transformador acústico, amplificando las ondas sonoras antes de que lleguen al oído interno. La presión de las ondas sonoras es unas veinte veces mayor en la ventana oval que en la membrana timpánica.

Si en el oído externo se canaliza la energía acústica y en el oído medio se la transforma en energía mecánica transmitiéndola y amplificándola hasta el oído interno, es en éste en donde se realiza la definitiva transformación en impulsos eléctricos.

Una vez que las vibraciones de la membrana timpánica se han transmitido a la ventana oval, las ondas sonoras continúan su camino hacia el oído interno. El oído interno es una intrincada zona de tubos y conductos, conocido como laberinto. En el laberinto puede encontrarse el vestíbulo y la cóclea. En la cóclea o caracol, las ondas sonoras se transforman en impulsos eléctricos que se envían al cerebro. El cerebro traduce esos impulsos en sonidos que podemos reconocer y entender.

Cuando el oído recibe un sonido con varias frecuencias, cada una de ellas excita un punto en la membrana basilar, de modo que el cerebro puede interpretar además de la altura del sonido su timbre, sin más que discernir qué terminaciones nerviosas fueron excitadas y con cuánta intensidad. Es decir, el oído interno funciona como un analizador de sonidos.

2.2. Protectores Auditivos

En los programas de conservación auditiva, lo fundamental es reducir el ruido en sus fuentes de emisión, ya sea por medio de reducción de vibraciones, mantención, cambios operacionales, etc y/o en el medio de propagación, considerando barreras o cerramientos acústicos. Sin embargo, a pesar del avance tecnológico existen muchas situaciones donde la reducción de ruido no es económica ni técnicamente posible. En este caso se debe proceder al control de ruido a nivel del receptor mediante el uso de protectores auditivos adecuados a los requerimientos de reducción de ruido propios del puesto de trabajo.

Los protectores auditivos son elementos de protección personal que, como resultado de sus propiedades de atenuación, reducen los niveles de ruido para así evitar un daño en el oído. Para asegurar la protección efectiva, los pro-

ectores auditivos deben utilizarse durante todo el tiempo que el trabajador se encuentre en un ambiente con un nivel de ruido superior al límite máximo permitido. Sin embargo, los protectores auditivos no deben ser considerados como solución definitiva al problema del ruido debido a sus problemas intrínsecos como incomodidad, dificultad en la comunicación, higiene, etc.

Hoy en día existen muchos tipos de protectores auditivos, los cuales a pesar de variar en su forma, tamaño y modelos se basan en un principio común: atenuar la onda de presión sonora antes de llegar a la membrana timpánica.

2.2.1. Funcionamiento del protector auditivo

El funcionamiento de un protector auditivo depende tanto de sus características propias como de las características fisiológicas y anatómicas del usuario. La energía sonora puede llegar al oído interno por cuatro caminos (ver Figura 2.2):

1. Transmisión vía ósea y tejido,
2. Vibraciones del protector,
3. Transmisión a través del material del protector,
4. Filtración a través del contacto entre el protector y la cabeza.

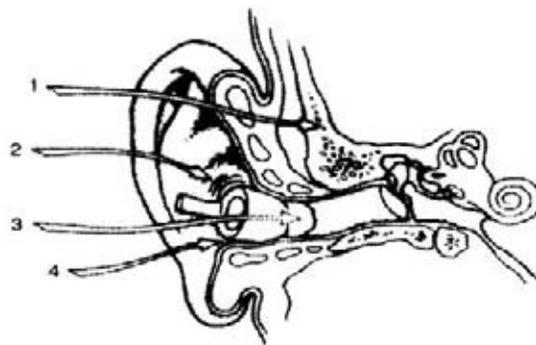


Figura 2.2: Vías de transmisión de ruido.

2.2.2. Tipos de protectores auditivos

Dada la existencia de diferentes tipos de protectores auditivos, que se utilizarán en situaciones de trabajo muy variadas, es necesario seleccionar el protector auditivo más adecuado al trabajo a realizar.

Para llevar a cabo la selección, es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Requerimientos de la atenuación sonora;
- Nivel de Reducción de ruido NRR;
- Comodidad del trabajador;
- Características del ambiente de trabajo y de la actividad;
- Problemas de salud del trabajador;
- Tiempo de uso;
- Compatibilidad con otros elementos de protección personal.

En general, los protectores auditivos pueden ser divididos en tres grandes categorías; protectores de inserción (automoldeables, premoldeados y personalizados), tipo orejera y tipo especial (ver Figura 2.3).



Figura 2.3: Tipos de protectores auditivos

Cada tipo y marca de protector auditivo tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, los protectores tipo orejera son fáciles de colocar pero son incómodos en ambientes muy calientes y para largas jornadas de trabajo. Los

protectores de inserción son más livianos y cómodos, pero son más difíciles de colocar correctamente. Además, la persona que va a utilizarlo debe tener las manos limpias.

2.3. Métodos para ensayos de atenuación de ruido de protectores auditivos

Para determinar la atenuación sonora de un protector auditivo existen dos métodos que son normalmente usados: el método subjetivo y el objetivo.

El método subjetivo o REAT, consiste en obtener los umbrales de audición sin y con protector auditivo en el oído. La atenuación está dada por la diferencia entre los umbrales con el canal auditivo abierto y cerrado. Este método a pesar de entregar valores cercanos a los reales, porque considera la transmisión vía ósea, es un método caro y demorado.

Los métodos objetivos de atenuación de ruido de PA utilizan generalmente cabezas artificiales y aparatos de pruebas acústicas. Este método no considera factores humanos y es más rápido. Además es la única técnica aplicable en el caso de ruido impulsivo con altos niveles de presión sonora.

2.3.1. Método Subjetivo

El método subjetivo o REAT (Real Ear Attenuation at Threshold), mide la atenuación en el laboratorio, usando como metodología la norma internacional (ISO 4869 o ANSI S3.19-1974, ANSI S12.6-1984/1997) [3 - 6]. La medición se basa en la determinación del umbral de audición del oyente con el oído abierto (sin protector) y después con el oído cerrado (con protector). De acuerdo con la norma ANSI (Instituto Nacional Americano de Normas) se necesitan 20 oyentes, donde cada uno debe hacer tres mediciones con canal abierto y tres mediciones con el protector auditivo, mientras que en la norma ISO se utilizan 16 oyentes y cada uno hace sólo una medición con canal abierto y una con el protector auditivo. Para cada medición se obtienen valores de 1/1 octava en las frecuencias centrales de 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 y 8.000 Hz. Luego es calculado un número único denominado Nivel de Reducción de Ruido NRR, que permite cuantificar de manera simple la comparación y selección de protectores auditivos. Este método, a pesar de entregar valores cercanos a los reales porque considera la transmisión vía

ósea, es un método caro, lento y que requiere una cámara especial con un tiempo de reverberación $T_{rev} \leq 1,6$ seg [7].

Estudios demuestran que las mediciones de atenuación medidas en terreno son sustancialmente menores que las mediciones realizadas en el laboratorio. Esto es un factor muy importante pues los compradores y usuarios de protectores auditivos consideran los datos de atenuación publicados en los productos.

La atenuación medida en el laboratorio usando la norma ISO 4869 o ANSI S3.19-1974, ANSI S12.6 - 1984 o 1997(A) es, generalmente, mayor que la atenuación conseguida por el trabajador en el campo por los siguientes motivos:

- Los oyentes en el laboratorio colocan los protectores auditivos para obtener máxima atenuación mientras que el trabajador en el campo usa el protector para máxima comodidad;
- El oyente en el laboratorio es sentado confortablemente por poco tiempo, mientras que el trabajador en el campo ejecuta actividades físicas y movimientos durante la jornada, por ejemplo de 8 horas diarias;
- El oyente es entrenado para el uso del protector, mientras que el trabajador generalmente no es entrenado.

2.3.2. Método Objetivo

Los métodos objetivos para evaluar protectores auditivos usualmente se basan en la diferencia de dos mediciones, las cuales son registradas por instrumentos de lectura con transductores ubicados en una cabeza real o artificial, implantación de micrófonos en oídos de cadáveres, cambio de umbral de reflejo auditivo, etc.

Las ventajas del método objetivo para determinar la atenuación sonora son que como no trabaja con individuos oyentes, no considera factores humanos en las mediciones tales como motivación o fatiga, la medición es más rápida, pudiendo ser incluidas más frecuencias en las pruebas, no se necesitan salas sofisticadas para las mediciones además de ser el único método aplicable en el caso de ruido impulsivo con peaks de NPS muy altos, que pondrían en riesgo la audición de los posibles oyentes.

Dentro de los métodos objetivos para evaluar la atenuación sonora se encuentran:

- instalación de prueba acústica (oído/cabeza artificial) (ATF),
- micrófono en oído real (MIRE),
- micrófono en oído de cadáver,
- cambio de umbral de reflejo auditivo (ARTS).

Los métodos objetivos (con excepción del ARTS) no consideran directamente todas las vías que conducen el sonido hacia el oído. La transmisión ósea es incorporada por medio de ajustes de cálculos después de las mediciones o simplemente es ignorada.

2.4. Revisión de Normativa

La primera normativa sobre los procedimientos de ensayo de atenuación de ruido en laboratorios es la ANSI Z 24.22/1957. Esta norma fue posteriormente revisada y se publicó la ANSI S3.19/1974, la cual fue nuevamente revisada, creando la ANSI S12.6-1984 y recientemente la ANSI S12.6-1997.

La ANSI Z 24.44/1957 especifica una cámara anecoica con campo acústico direccional. El campo acústico es de tonos puros y generados por altavoces posicionados diagonalmente a la persona sentada, mientras que la ANSI S3.19/1974 especifica que la sala de prueba debe tener un tiempo de reverberación $0,5 < T < 1,6$ segundos y el campo sonoro en su interior debe ser generado en bandas de 1/3 de octava.

Para la norma ANSI S12.6/1984 y 1997 (o ISO 4869-1), el tiempo de reverberación de la sala de prueba debe ser $T \leq 1,6$ segundos.

Todas las normativas describen procedimientos de laboratorio para la medida de la atenuación de ruido entregada por el protector auditivo. La medición de la atenuación se basa en la determinación del umbral de audición de un individuo sin y con protector auditivo. La diferencia entre ambas medidas entrega la atenuación del protector.

En el caso del método objetivo de la normativa ANSI S3.19/1974 o ISO 4869-1, usando una cabeza artificial, la atenuación esta dada por la diferencia entre los niveles con y sin protector. La ANSI S3.19 e ISO 4869-1 son

normas simplificadas y son usadas generalmente para control de calidad. Todas las normativas son válidas para ensayar protectores lineales, esto es, la atenuación del protector no depende de los niveles usados durante el ensayo.

La norma ANSI S3.19/1974, en su contexto, describe un método objetivo usando una cabeza artificial, eliminando la necesidad del uso de personas para la realización del ensayo y entregando resultados más repetibles.

Capítulo 3

Características acústicas del material del protector auditivo

En este capítulo serán presentadas las características acústicas del material del cual es fabricado el protector auditivo y el procedimiento de medición de la impedancia acústica y coeficiente de absorción a través del tubo de impedancia.

Según Bolton [8] casi todos los materiales porosos son físicamente anisotrópicos, es decir, tienen diferentes valores para sus propiedades físicas en cada dirección. También es conocido el hecho que los materiales porosos no son homogéneos, lo que significa que sus propiedades macroscópicas varían a lo largo del material. Por lo tanto, es importante recordar que las propiedades físicas de una muestra del material no representan precisamente las propiedades medias de todo el material.

Las características acústicas más importantes de un material poroso son:

- Coeficiente de absorción acústica (Impedancia acústica),
- Resistividad al flujo,
- Porosidad,
- Viscosidad (longitud característica viscosa)
- Característica termal (longitud característica térmica),
- Tortuosidad o Factor estructural.

Las tres primeras características acústicas pueden ser obtenidas experimentalmente y los resultados obtenidos pueden ser utilizados como datos de entrada en el programa Foam-X [9] para obtener las características acústicas restantes.

Para poder evaluar si el material del protector auditivo se comporta como un material absorbente vamos a considerar solamente el cálculo del coeficiente de absorción. Para esto, se tomarán varias muestras del material, con y sin la capa superior e inferior.

3.1. Medición de la impedancia acústica para la determinación del Coeficiente de Absorción Sonora

Denominamos impedancia acústica a la resistencia que encuentran las ondas sonoras para su propagación en un medio. Cada medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso ofrece una dificultad mayor o menor para la propagación del sonido. La impedancia acústica específica se define como la relación compleja entre la presión acústica y la velocidad propia del movimiento vibratorio (velocidad de partícula).

La determinación del coeficiente de absorción sonora e impedancia en un tubo de impedancia por el método de la función de transferencia está normada por la ISO 10534-2 [10].

El rango de frecuencia utilizable depende del largo del tubo y del espacio entre las posiciones del micrófono. Un extenso rango de frecuencia puede ser obtenido de la combinación de diferentes largos y espacios entre micrófonos.

Las mediciones pueden ser realizadas utilizando una de las dos técnicas siguientes:

1. Utilizando dos micrófonos en ubicaciones fijas: este método requiere correcciones antes o durante el ensayo para minimizar la diferencia de amplitud y fase entre los micrófonos. Sin embargo, es rápido y de alta exactitud y fácil implementación;
2. Usando un micrófono sucesivamente en dos ubicaciones; este método tiene una particular generación y procesamiento de señal y puede requerir de más tiempo. Sin embargo, elimina la diferencia de fase entre micrófonos y permite la selección de óptimas ubicaciones para el micrófono para

cualquier frecuencia. Utilizando un único micrófono, se eliminan errores y dificultades asociadas a la diferencia de fase entre dos micrófonos.

El montaje de la experiencia consiste en el uso de un tubo de impedancia, dos ubicaciones de micrófonos y un sistema de análisis de frecuencia.

La muestra de prueba es montada en el final de un tubo de impedancia recto, rígido, liso (no poroso), sin agujeros (excepto los de micrófono) y hermético. La pared del tubo debe ser lo suficientemente rígida para que no sea afectada por las vibraciones. Las ondas planas son generadas por una fuente de ruido (parlante) en el tubo y las presiones sonoras son medidas en dos puntos cercanos a la muestra [10], tal como indica la Figura 3.1.

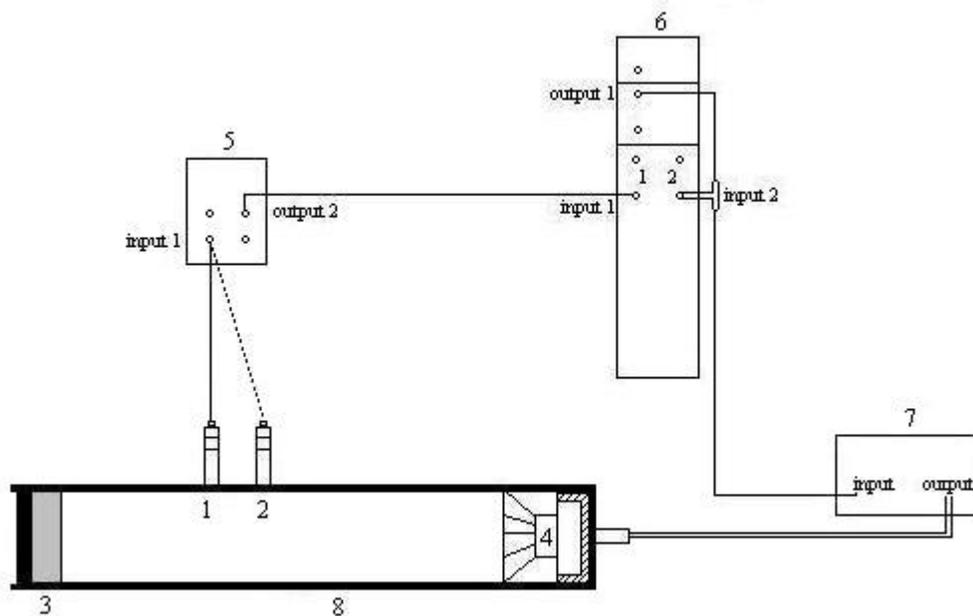


Figura 3.1: Montaje para el ensayo de la impedancia acústica de una muestra de material poroso. (1) Posición mic 1, (2) Posición mic 2, (3) Muestra, (4) Fuente Sonora (Parlante), (5) Mic power supply B&K 2804, (6) Frontend Pulse - Sistema de análisis de frecuencia, (7) Amplificador de potencia B&K 2706 y (8) Tundo de impedancia.

El método consiste en excitar el tubo con ruido blanco de banda ancha y medir la presión sonora en su interior en diferentes posiciones. Las señales

obtenidas son procesadas en un analizador de señales y es calculada la función de transferencia entre ellas. A partir de la función de transferencia, se puede calcular el coeficiente de reflexión y la impedancia normal a la superficie.

Considerando que en el interior del tubo sólo se propagan ondas planas, la presión incidente y reflejada están dadas por:

$$P_i = Ae^{i(\omega t - kx)},$$

$$P_r = Be^{i(\omega t + kx)},$$

donde:

A : amplitud de la onda incidente (real) [N/m²],

B : amplitud reflejada (compleja) [N/m²],

k : número de onda [1/m]

Luego dos señales son obtenidas en diferentes puntos. La obtención de estas señales será hecha mediante un único micrófono. Suponiendo que las posiciones sean 1 y 2 de acuerdo con la figura 3.1, las respectivas señales serían expresadas como:

$$P_1(\omega) = e^{i(\omega t)}(Ae^{-ikz_1} + Be^{ikz_1}), \quad (3.1)$$

$$P_2(\omega) = e^{i(\omega t)}(Ae^{-ikz_2} + Be^{ikz_2}), \quad (3.2)$$

donde:

z_1 : distancia entre la posición 1 y la superficie de la muestra;

z_2 : distancia entre la posición 2 y la superficie de la muestra.

La función de transferencia entre las dos señales esta dada por:

$$H_{12}(\omega) = \frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)} = \frac{[Ae^{-ikz_1} + Be^{ikz_1}]}{[Ae^{-ikz_2} + Be^{ikz_2}]} \quad (3.3)$$

El coeficiente de reflexión complejo esta dado por la relación entre A y B . Aislado en la ecuación anterior, se tiene:

$$r(\omega) = \left[\frac{H_{12}(\omega) - e^{-iks}}{e^{iks} - H_{12}(\omega)} \right] e^{2ikz_1}, \quad (3.4)$$

donde:

s : espacio entre los micrófonos $(z_2 - z_1)$ [m].

Esta ecuación, es aplicada para la determinación de la impedancia acústica y el coeficiente de absorción de los materiales.

El coeficiente de absorción esta dado por:

$$\alpha = 1 - |r|^2. \quad (3.5)$$

La impedancia acústica esta dada por:

$$z = \frac{1 + r}{1 - r} \rho c, \quad (3.6)$$

donde:

ρ : densidad del aire;

c : velocidad del sonido en el aire.

Las funciones de transferencias entre el punto 1 y 2 del tubo con respecto a la muestra son medidos con el sistema de análisis de frecuencia PULSE de Bruel & Kjaer (Lan Interface Module Type 7533) y se obtienen P_1 y P_2 para cada muestra. Una vez obtenidos estos datos se elabora un programa para el cálculo del coeficiente de absorción del material en MatLab (ver Anexo 1).

En este caso, la función de transferencia H_{12} puede ser escrita en términos de la función de transferencia entre las señales y la fuente de ruido (parlante). Tenemos:

$$H_{12} = \frac{G_{12}}{G_{11}} = \frac{P_1^* P_2}{P_1^* P_1}, \quad (3.7)$$

donde:

G_{12} : espectro cruzado de las dos señales 1 y 2;

G_{11} : autoespectro de la señal 1;

P_1 y P_2 : señales 1 y 2 respectivamente en el dominio de la frecuencia;

P_1^* : complejo conjugado de P_1 .

La función de transferencia entre la fuente y las señales del micrófono se puede escribir como:

$$H_{1F} = \frac{G_{1F}}{G_{11}} = \frac{P_1^* P_F}{P_1^* P_1}, \quad (3.8)$$

$$H_{F2} = \frac{G_{F2}}{G_{FF}} = \frac{P_F^* P_2}{P_F^* P_F}. \quad (3.9)$$

Multiplicando H_{1F} y H_{F2} , se obtiene:

$$H_{1F} H_{F2} = \frac{P_1^* P_F}{P_1^* P_1} \frac{P_F^* P_2}{P_F^* P_F}, \quad (3.10)$$

que es la función de transferencia H_{12} . De esta forma, se tiene que:

$$H_{12} = H_{1F} \cdot H_{F2}. \quad (3.11)$$

3.2. Resultados experimentales para la determinación del Coeficiente de Absorción Sonora

3.2.1. Descripción de las muestras

El material utilizado para las mediciones es una espuma de PVC de 18 mm de espesor, de la cual se tomaron 6 muestras de 28 mm de diámetro (tubo pequeño) y 5 muestras de 97 mm de diámetro (tubo grande).



Figura 3.2: Muestras del material de PVC de 97 mm y de 28 mm de diámetro.

A simple vista se puede apreciar que tanto en la parte superior como inferior, el material tiene una capa mas densa. Estas capas serán denominadas *a* y *b*, y se estudiará si estas capas tienen alguna influencia en el coeficiente de absorción.

Las mediciones fueron realizadas en 2 tipos de tubos, uno pequeño con 28 mm de diámetro interior, que cubre las frecuencias de 2.000 a 7.000 Hz y otro grande, de 97 mm de diámetro interior, que cubre las frecuencias de 100 a 2.000 Hz, aproximadamente.

3.2.2. Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia grande

Como se puede observar en las Figuras 3.3 y 3.4, no se obtienen grandes diferencias entre la medición del lado *a* y *b* de la muestra. El coeficiente de absorción se mantiene prácticamente constante entre los 300 y 800 Hz sufriendo una pequeña alteración entre los 900 y 2.000 Hz, donde el lado *b* del material tiene un coeficiente de absorción un poco mayor que el lado *a*. De todas maneras, el coeficiente de absorción, en general, es muy bajo, por lo tanto el material no actúa totalmente con características absorbentes.

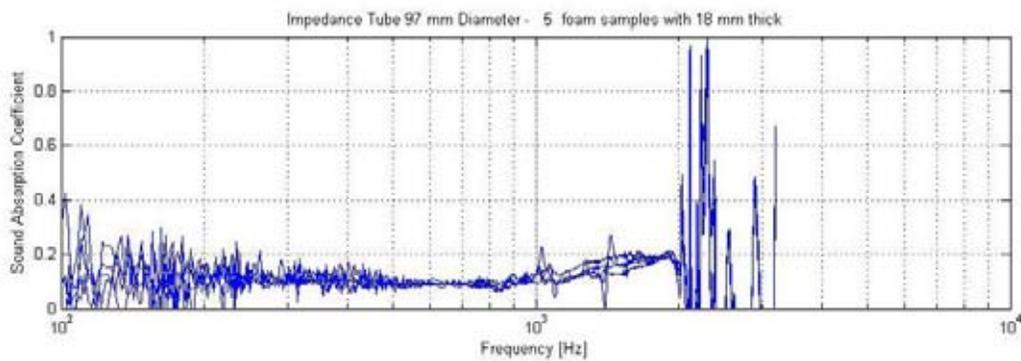


Figura 3.3: Coeficiente de absorción tubo grande lado *a*.

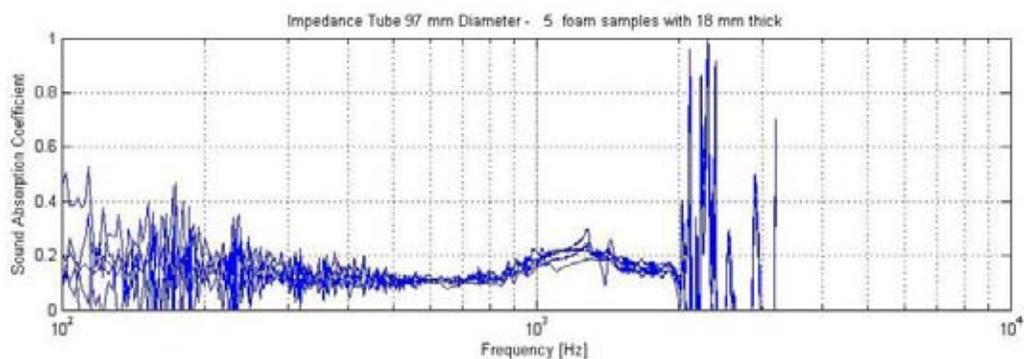


Figura 3.4: Coeficiente de absorción tubo grande lado *b*.

3.2.3. Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia pequeño

En el caso del tubo pequeño ocurre una situación similar al tubo grande. Se puede observar en las Figuras 3.5 y 3.6 que el coeficiente de absorción entre 2.000 y 6.000 Hz se mantiene constante, tanto en el lado *a* como en el lado *b* de la muestra, con excepción de 2 muestras del lado *a* y una muestra del lado *b* que aumentan un poco.

De todas maneras, en general, el coeficiente de absorción es muy bajo, por lo cual el material no se considera absorbente.

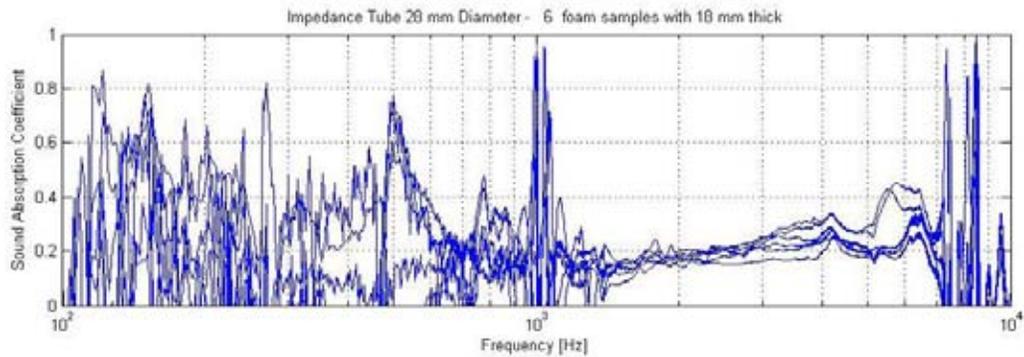


Figura 3.5: Coeficiente de absorción tubo pequeño lado *a*.

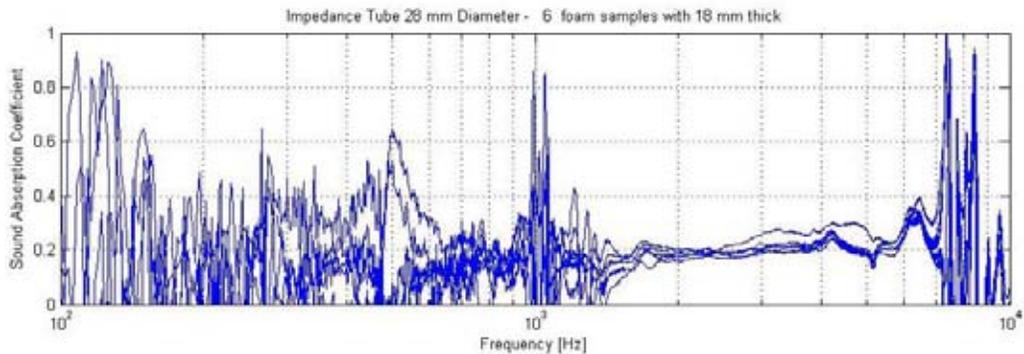


Figura 3.6: Coeficiente de absorción tubo pequeño lado *b*.

3.2.4. Mediciones del coeficiente de absorción en el tubo de impedancia grande sin las capas superior e inferior de la muestra

Como se indicó anteriormente, el material del cual es fabricado el protector auditivo tiene, tanto en la parte superior como inferior, una capa más densa, las cuales dificultan el paso de aire a través de la muestra. Para realizar las mediciones del material sin las capas *a* y *b* se tomaron 5 muestras grandes de 97 mm de diámetro y se les retiró manualmente tanto la capa superior como inferior. En promedio, las muestras tienen un espesor de 13 mm. Si comparamos la Figura 3.7, en la cual tenemos el coeficiente de absorción sin las capas externas y la Figura 3.3 o 3.4 (con las capas), se puede apreciar que el coeficiente de absorción prácticamente no varía. Por lo tanto, la capa externa del material no afecta en las mediciones del coeficiente de absorción sonora.

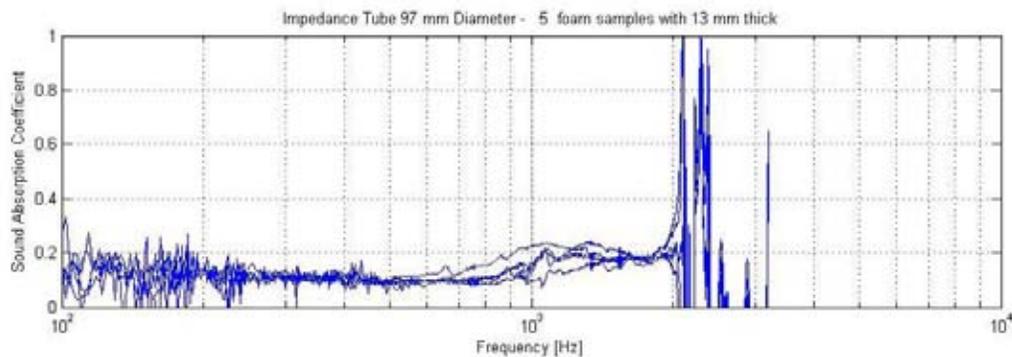


Figura 3.7: Coeficiente de absorción muestras sin capas.

Además, se hicieron mediciones por separado del coeficiente de absorción para cada uno de los lados de la muestra. Tanto en las mediciones en el tubo grande como en el tubo pequeño no se observaron diferencias. En el tubo grande el coeficiente de absorción entre los 300 y 800 Hz es del orden de 0,1 y a partir de los 900 a los 2.000 Hz aumenta a 0,2. En el tubo pequeño, donde el rango de frecuencia es confiable a partir de los 2 kHz hasta los 7 kHz se tiene que el coeficiente de absorción se mantiene relativamente constante en 0,2 sufriendo un pequeño aumento en los 6.500 Hz.

Capítulo 4

Formulación analítica del modelo del canal auditivo simulado

En este capítulo será desarrollado el modelo analítico para la investigación de la respuesta acústica estacionaria del canal auditivo humano y la determinación de la presión sonora, para obtener la atenuación en la membrana timpánica, debido a la presencia de un protector auditivo de inserción automoldeable en su interior.

El canal auditivo humano tiene en promedio un largo de 27,9 mm y un diámetro de 8 mm. Además, es un hecho conocido que la distribución de presión en el canal auditivo está dominada por ondas planas en el rango de frecuencia audible [11]. Por lo tanto, con el fin de simplificar el análisis, se aproxima a un tubo acústico recto con un lado abierto (posición de la oreja) y otro cerrado (posición de la membrana timpánica). Las dimensiones del tubo se aproximan a 30 mm de largo y 8 mm de diámetro, y serán realizadas dos situaciones de análisis: tubo sin y con protector auditivo.

4.1. Modelo del canal auditivo sin protector auditivo

Al modelar un sistema, existe la necesidad de establecer hipótesis simplificadoras del problema real, para obtener un conjunto de ecuaciones que describan el fenómeno mediante la relación de las variables físicas de interés y las condiciones de contorno del problema.

Como primera aproximación, se hizo una simplificación del canal auditivo, aproximándolo a un tubo recto de sección transversal circular constante, con 30 mm de largo y 8 mm de diámetro, donde $x = 0$ corresponde a la entrada del canal auditivo y $x = L$ a la posición de la membrana timpánica, tal como indica la Figura 4.1.

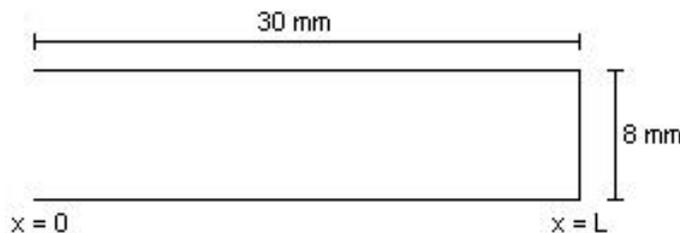


Figura 4.1: Dimensiones del modelo del canal auditivo.

Este tubo es excitado acústicamente en la extremidad abierta, simulando un ambiente ruidoso, y en la extremidad cerrada, se simula la membrana timpánica, para la cual fue especificada una impedancia compleja igual a la impedancia del tímpano.

La impedancia acústica compleja del tímpano Z_T tiene una componente real y otra componente imaginaria:

$$Z_T = R_d + iX_d. \quad (4.1)$$

La parte real de la impedancia (Resistencia Acústica R_d) representa la disipación de energía y la parte imaginaria (Reactancia Acústica X_d) está asociada al almacenamiento de energía. Los valores de impedancia del tímpano son obtenidos de resultados promedios basados en datos de más de veinte estudios, considerando oídos normales. En el Cuadro 4.1 y Figura 4.2

se presentan los valores y respectivas curvas de resistencia R_d y reactancia X_d del tímpano humano, para varias frecuencias [12].

Frecuencia [Hz]	Resistencia 10^5 [Ns/m ⁵]	Reactancia 10^5 [Ns/m ⁵]
100	490	-2800
200	430	-1400
300	390	-950
500	350	-550
700	330	-360
1000	320	-170
2000	390	-80
3000	420	-30
5000	400	200
7000	400	410
10000	400	510

Cuadro 4.1: Resistencia R_d y reactancia X_d del tímpano humano para varias frecuencias [7].

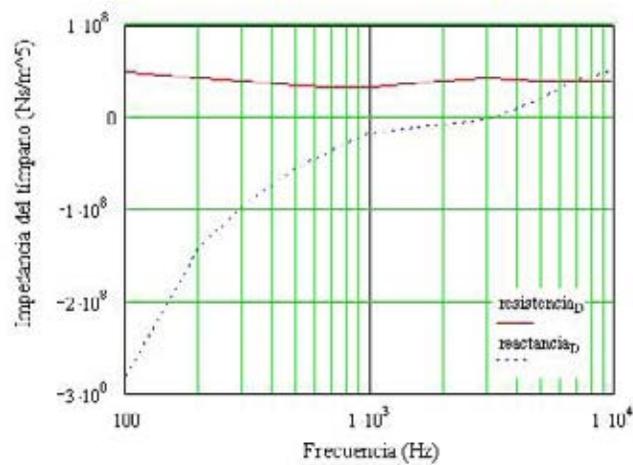


Figura 4.2: Resistencia y reactancia del tímpano humano.

En el ser humano, la impedancia de la pared del canal auditivo presenta una magnitud del orden de 10^4 veces mayor que la impedancia del aire en

el interior del canal auditivo [13]. Debido a esto, la pared del canal auditivo parece no flexionarse debido a la acción del aire y por este mismo motivo puede considerarse rígida [11].

La respuesta de presión acústica (P_T) es determinada dividiendo la presión total compleja en el tímpano (P_{Tf}) por la presión total en la extremidad abierta (P_{Te}):

$$P_T = 20 \log(P_{Tf}/P_{Te}) \quad [\text{dB}], \quad (4.2)$$

donde:

P_{Tf} : Presión compleja total en el tímpano, expresada en Pa = N/m²,

P_{Te} : Presión acústica en la entrada del canal auditivo, expresada en Pa = N/m².

Las propiedades del aire (fluido) en el canal auditivo sin protector auditivo, en condiciones atmosféricas normales a 20°C, son:

$$\rho = 1,21 \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

$$c = 343 \text{ [m/s]},$$

donde:

ρ : Densidad del aire,

c : Velocidad de propagación del sonido en el aire.

Una fórmula aproximada para la determinación de la velocidad del sonido en el aire para otras temperaturas es [13]:

$$c = 331 + 0,6T \text{ [m/s]} \quad (4.3)$$

Por lo tanto, considerando que dentro del canal auditivo la temperatura T es de 35° C, la velocidad del sonido en el canal auditivo será 352 [m/s].

En el interior de un tubo recto uniforme de paredes rígidas, sólo las ondas planas se propagan bajo la frecuencia de corte (f_c):

$$f_c = 1,84 \frac{c}{\pi d} \text{ [m/s]} \quad (4.4)$$

$$f_{c1} = \frac{1,84 * 352}{\pi * 0,008} = 25783,4 \approx 25 \text{ [kHz]}$$

Por lo tanto, la presión acústica dentro del canal auditivo simulado esta dominado por ondas planas hasta los 25 kHz. Considerando que los ensayos de atenuación de ruido trabajan con bandas de 1/3 de octava de 125 Hz a 8 kHz, se considerará el rango de frecuencia de 100 Hz a 10 kHz.

Cuando la onda plana incidente entra en el canal auditivo y se encuentra con la impedancia del tímpano en $x = L$, aparecen las ondas reflejadas y transmitidas.

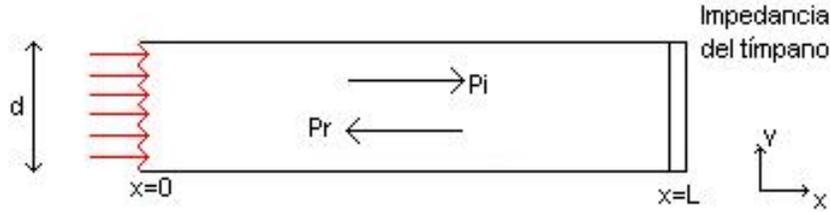


Figura 4.3: Onda plana incidente y reflejada en un tubo abierto-cerrado de longitud L y diámetro d.

Para la onda acústica plana propagándose en el eje x con incidencia normal a la superficie perpendicular en $x = L$, la presión incidente es representada por la una onda P_i , la cual produce una onda reflejada P_r [7]:

$$P_i = Ae^{i(\omega t - kx)}, \quad (4.5)$$

$$P_r = Be^{i(\omega t + kx)}, \quad (4.6)$$

$$P_T = P_i + P_r, \quad (4.7)$$

donde:

A y B : constantes complejas que representan amplitudes de presión de onda,

ω : frecuencia angular [rad/s],

x : coordenada longitudinal [m],

k : número de onda [1/m].

La velocidad de partícula de la onda plana está dada por la ecuación de Euler:

$$u_p = \frac{-1}{i\omega\rho} \frac{\partial P}{\partial x}. \quad (4.8)$$

Sustituyendo la presión incidente (4.5) en la fórmula general de velocidad de partícula (4.8), obtenemos la velocidad de partícula incidente u_{pi} :

$$u_{pi} = \frac{Ae^{i(\omega t - kx)}}{\rho c} = \frac{P_i}{\rho c}. \quad (4.9)$$

De igual manera la presión reflejada (4.6) es sustituida en la ecuación de velocidad de partícula (4.8) para obtener la velocidad de partícula reflejada:

$$u_{pr} = \frac{-Be^{i(\omega t + kx)}}{\rho c} = \frac{-P_r}{\rho c}. \quad (4.10)$$

Las velocidades de volumen correspondientes a P_i y P_r son:

$$U_i = \frac{P_i}{\rho c/S},$$
$$U_r = -\frac{P_r}{\rho c/S},$$

donde:

S : sección transversal del tubo en [m²], y

$$U_T = U_i + U_r.$$

La impedancia en cualquier punto del tubo está dada por [14]:

$$Z(x) = \frac{P(x)}{U(x)},$$

donde x es la coordenada longitudinal en [m].

La impedancia en el tímpano Z_T es la relación entre la presión total y la velocidad de volumen en el tímpano ($x = L$):

$$Z_T = \frac{P_T}{U_T} = \frac{P_i + P_r}{U_i + U_r}. \quad (4.11)$$

Sustituyendo las presiones P_i y P_r y las velocidades de volumen U_i y U_r se obtiene:

$$Z_T = \frac{P_i + P_r}{\frac{P_i}{\rho c/S} - \frac{P_r}{\rho c/S}} = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{P_i + P_r}{P_i - P_r} \right],$$

$$Z_T = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{Ae^{i(\omega t - kL)} + Be^{i(\omega t + kL)}}{Ae^{i(\omega t - kL)} - Be^{i(\omega t + kL)}} \right] = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{Ae^{-ikL} + Be^{ikL}}{Ae^{-ikL} - Be^{ikL}} \right], \quad (4.12)$$

donde:

L : Largo del tubo recto [m],

S : Área sección transversal en [m²],

t : Tiempo [s].

Para obtener el valor de la impedancia del tímpano en la entrada del canal auditivo (Z_0), evaluamos Z_T en $x = 0$ [15]:

$$Z_0 = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{A + B}{A - B} \right]. \quad (4.13)$$

La determinación de la variable compleja B para dejar en función de una sola variable compleja puede ser resuelta a partir de la ecuación 4.13:

$$B = A \left[\frac{Z_0 - \rho c/S}{Z_0 + \rho c/S} \right],$$

la cual puede ser usada para eliminar B de la ecuación de Z_T :

$$Z_T = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{\frac{Z_0 S}{\rho c} (e^{-ikL} + e^{ikL}) + (e^{-ikL} - e^{ikL})}{\frac{Z_0 S}{\rho c} (e^{-ikL} + e^{ikL}) + (e^{-ikL} + e^{ikL})} \right],$$

$$Z_T = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{\frac{Z_0 S}{\rho c} + \frac{(e^{-ikL} - e^{ikL})}{(e^{-ikL} + e^{ikL})}}{\frac{Z_0 S}{\rho c} + \frac{(e^{-ikL} + e^{ikL})}{(e^{-ikL} - e^{ikL})}} \right].$$

como:

$$i \tan(x) = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{e^{ix} + e^{-ix}},$$

entonces:

$$Z_T = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{\frac{Z_0 S}{\rho c} - i \tan(kL)}{1 - i \frac{Z_0 S}{\rho c} \tan(kL)} \right]. \quad (4.14)$$

A partir de este resultado, se obtiene el valor de Z_0 en función de la impedancia del tímpano Z_T :

$$Z_0 = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{\frac{Z_T S}{\rho c} + i \tan(kL)}{1 + i \frac{Z_T S}{\rho c} \tan(kL)} \right]. \quad (4.15)$$

Finalmente, reemplazamos el valor de Z_0 en la ecuación de B y obtenemos:

$$B = A e^{-2ikL} \left[\frac{Z_T - \rho c/S}{Z_T + \rho c/S} \right].$$

Luego, la presión acústica en la entrada del canal auditivo P_{Te} , para $x = 0$ está dada por:

$$P_{Te} = (P_i + P_r)_{x=0} = A e^{i(\omega t - kx)} + B e^{i(\omega t + kx)},$$

$$P_{Te} = A e^{i\omega t} + A e^{i\omega t} e^{-2ikL} \left[\frac{Z_T - \rho c/S}{Z_T + \rho c/S} \right],$$

$$P_{Te} = A e^{i\omega t} \left[1 + e^{-2ikL} \frac{Z_T - \rho c/S}{Z_T + \rho c/S} \right], \quad (4.16)$$

y la presión acústica total en el tímpano P_{Tf} , para $x = L$ está dada por:

$$P_{Tf} = (P_i + P_r)_{x=L} = Ae^{i(\omega t - kL)} + Be^{i(\omega t + kL)},$$

$$P_{Tf} = Ae^{i\omega t} e^{-ikL} + Ae^{i\omega t} e^{ikL} e^{-2ikL} \left[\frac{Z_T - \rho c/S}{Z_T + \rho c/S} \right],$$

$$P_{Tf} = Ae^{i\omega t} \left[e^{-ikL} + e^{-ikL} \frac{Z_T - \rho c/S}{Z_T + \rho c/S} \right]. \quad (4.17)$$

Para visualizar el comportamiento de las presiones totales en la entrada ($x = 0$ mm) y en el tímpano ($x = 30$ mm) del canal auditivo sin protector auditivo, se deben sustituir los valores en las ecuaciones (4.16) y (4.17).

En la Figura 4.4, es presentada la relación de la presión acústica en la entrada del canal auditivo (P_{Te}) y en el tímpano (P_{Tf}) con respecto a una presión de referencia igual a 2×10^{-5} N/m², respectivamente.

A través de la Figura 4.4 se puede apreciar que la amplitud de presión en la entrada del canal auditivo es mayor que la amplitud en el tímpano y que, además, varía en función de la frecuencia.

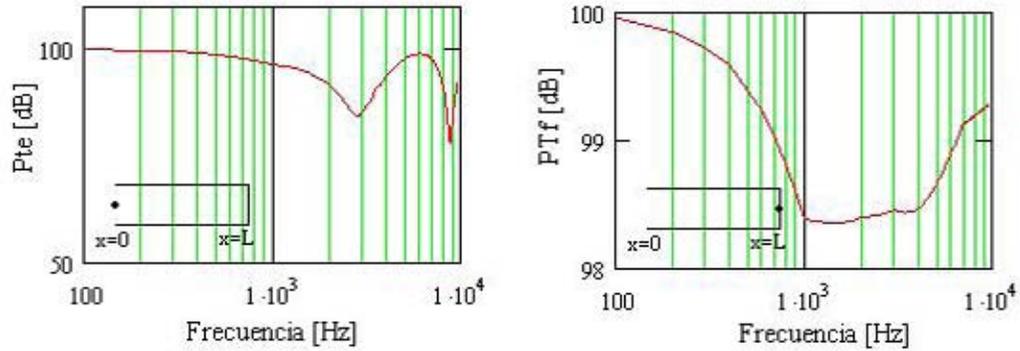


Figura 4.4: NPS en el canal auditivo, para $x = 0$ y en el tímpano para $x = L$.

Luego, la respuesta de presión acústica total está dada por la relación entre la presión en la posición del tímpano y la presión en la entrada del canal auditivo:

$$P_T = 20 \log(P_{Tf}/P_{Te}) \quad [\text{dB}], \quad (4.18)$$

$$P_T = 20 \log \left[\frac{e^{-ikL} \left[Z_T + \frac{\rho c}{S} \right] + e^{-ikL} \left[Z_T - \frac{\rho c}{S} \right]}{\left[Z_T + \frac{\rho c}{S} \right] + e^{-2ikL} \left[Z_T - \frac{\rho c}{S} \right]} \right],$$

$$P_T = 20 \log \left[\frac{Z_T}{Z_T \cos(kL) + i \frac{\rho c}{S} \sin(kL)} \right], \quad (4.19)$$

donde:

Z_T : Impedancia del tímpano humano [Ns/m⁵].

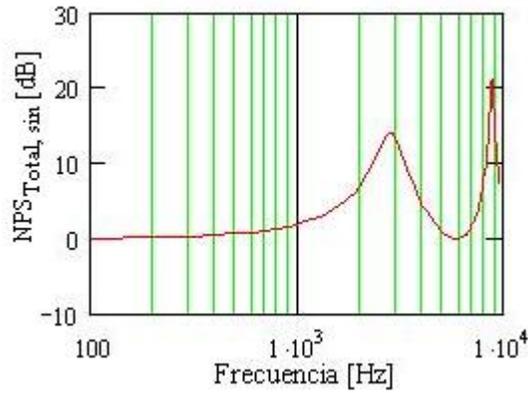


Figura 4.5: Razón de presión sonora del canal auditivo sin protector auditivo.

De acuerdo con el gráfico de la Figura 4.5, se pueden observar dos máximos: el primero es en 2.900 Hz y el segundo en 8.600 Hz, los cuales también pueden ser determinados a partir de la expresión teórica que determina la frecuencia de resonancia para un tubo abierto-cerrado [7]:

$$f_n = \frac{(2n - 1)c}{4L}, \quad (4.20)$$

donde:

c : velocidad del sonido en el aire [m/s],

L : largo del tubo [m],

n : número entero, $n = 1,2,3,4..$

Por lo tanto, recordando que para el tubo abierto-cerrado, con 30 mm de longitud, y con velocidad del sonido de 352 m/s, las dos primeras frecuencias de resonancia son:

$$f_1 = \frac{c}{4L} = 2933[\text{Hz}]$$

$$f_2 = \frac{3c}{4L} = 8800[\text{Hz}]$$

presentando una muy buena concordancia entre los resultados analíticos y teóricos.

4.2. Modelo del canal auditivo con protector auditivo sin considerar la absorción del material.

En este caso será desarrollado un modelo con tres medios. El medio I representa el aire en la entrada del canal auditivo, el medio II representa el protector auditivo como medio homogéneo y el medio III representa el aire encerrado entre la extremidad del protector y la membrana timpánica.

La onda plana en el medio I (aire) es transmitida al medio II (protector auditivo) y luego al medio III (aire). Las condiciones del medio I y III son iguales.

Las dimensiones y comportamientos de las amplitudes de las ondas incidentes, reflejadas y transmitidas en el interior del canal auditivo simulado, están indicadas en la Figura 4.6.

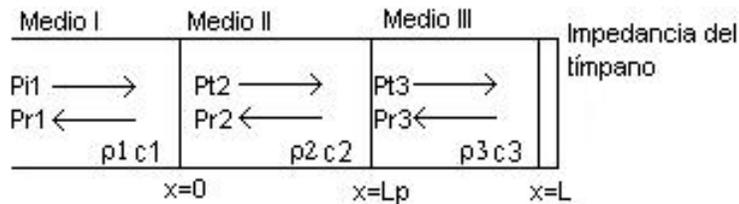


Figura 4.6: Modelo analítico de tres medios.

Presión incidente medio I

$$P_{i1} = A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)}. \quad (4.21)$$

Presión reflejada medio I

$$P_{r1} = B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}. \quad (4.22)$$

Presión transmitida medio II

$$P_{t2} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)}. \quad (4.23)$$

Presión reflejada medio II

$$P_{r2} = B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)}. \quad (4.24)$$

Presión transmitida medio III

$$P_{t3} = A_3 e^{i(\omega t - k_3(x - L_p))}. \quad (4.25)$$

Presión reflejada medio III

$$P_{r3} = B_3 e^{i(\omega t + k_3(x - L_p))}, \quad (4.26)$$

donde:

A_1, A_2, A_3, B_1, B_2 y B_3 : constantes complejas que representan amplitudes de presión de onda,

ω : frecuencia angular [rad/s],

x : coordenada longitudinal [m],

L_p : longitud del protector auditivo [m],

k_1, k_2 y k_3 : número de onda en medio I, II y III, respectivamente [1/m].

La velocidad de volumen para la onda incidente U_{i1} es:

$$U_{i1} = \frac{A_1 e^{i(\omega t - k_1 x)}}{\rho_1 c_1 / S}. \quad (4.27)$$

En estado estacionario, las velocidades de volumen para las ondas reflejadas y transmitidas son:

$$U_{r1} = \frac{-B_1 e^{i(\omega t + k_1 x)}}{\rho_1 c_1 / S}, \quad (4.28)$$

$$U_{t2} = \frac{A_2 e^{i(\omega t - k_2 x)}}{\rho_2 c_2 / S}, \quad (4.29)$$

$$U_{r2} = \frac{-B_2 e^{i(\omega t + k_2 x)}}{\rho_2 c_2 / S}, \quad (4.30)$$

$$U_{t3} = \frac{A_3 e^{i(\omega t - k_3(x - L_p))}}{\rho_3 c_3 / S}, \quad (4.31)$$

$$U_{r3} = \frac{-B_3 e^{i(\omega t + k_3(x - L_p))}}{\rho_3 c_3 / S}, \quad (4.32)$$

donde:

U_{t2} y U_{t3} : Velocidades de volumen de la onda transmitida en medio II y III, respectivamente,

U_{r1} , U_{r2} y U_{r3} : Velocidades de volumen de la onda reflejada en medio I, II y III, respectivamente,

ρ_1 , ρ_2 y ρ_3 : Densidad del material del medio I, II y III, respectivamente.

Por lo tanto, los parámetros a ser determinados son las amplitudes de presión de las ondas reflejadas y transmitidas (B_1 , A_2 , B_2 , A_3 y B_3).

Para obtener estos parámetros se necesita obedecer ciertas condiciones de contorno:

- Las presiones acústicas en ambos lados de la superficie de separación ($x = 0$) son iguales;
- Las velocidades de partícula normales a la interface son iguales;
- La impedancia del tímpano es igual a la impedancia de las ondas transmitidas y reflejadas.

Usando las condiciones de contorno de presión en $x = 0$ tenemos:

$$P_{i1} + P_{r1} = P_{t2} + P_{r2}. \quad (4.33)$$

Reemplazando los valores, tenemos:

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2. \quad (4.34)$$

Usando las condiciones de contorno de velocidad en $x = 0$ y $x = L_p$ tenemos:

$$U_{i1} + U_{r1} = U_{t2} + U_{r2}. \quad (4.35)$$

Si $x = 0$

$$\frac{A_1 - B_1}{\rho_1 c_1} = \frac{A_2 - B_2}{\rho_2 c_2}. \quad (4.36)$$

De forma similar, la presión en $x = L_p$:

$$P_{t2} + P_{r2} = P_{t3} + P_{r3}, \quad (4.37)$$

$$A_2 e^{-ik_2 L_p} + B_2 e^{ik_2 L_p} = A_3 + B_3. \quad (4.38)$$

De igual forma, las condiciones de contorno de velocidad de volumen en $x = L_p$ son:

$$U_{t2} + U_{r2} = U_{t3} + U_{r3}. \quad (4.39)$$

Sustituyendo los valores de las velocidades de los medio II y III:

$$A_2 e^{-ik_2 L_p} - B_2 e^{ik_2 L_p} = (A_3 - B_3) \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}. \quad (4.40)$$

Las condiciones de contorno de la presión y velocidad de volumen en $x = L$ están dadas por:

$$Z_T = \frac{P_{t3} + P_{r3}}{U_{t3} + U_{r3}}. \quad (4.41)$$

Sustituyendo los valores de P_{t3} , P_{r3} , U_{t3} y U_{r3} tenemos:

$$A_3 e^{-ik_3(L-L_p)} \left[1 - \frac{SZ_T}{\rho_3 c_3} \right] + B_3 e^{ik_3(L-L_p)} \left[1 + \frac{SZ_T}{\rho_3 c_3} \right] = 0. \quad (4.42)$$

Para determinar las presiones en cualquier punto del medio III, es necesario encontrar las amplitudes de las presiones B_1 , A_2 , B_2 , A_3 y B_3 .

Si agrupamos convenientemente las ecuaciones de presión y de velocidad de partícula en $x = 0$ y $x = L_p$, y las condiciones de contorno de impedancia en el medio III en $x = L$, se obtiene una ecuación matricial del tipo $\mathbf{A}\mathbf{y} = A_1\mathbf{b}$, donde los valores de \mathbf{y} son las incógnitas a ser encontradas. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones 5×5 a ser resuelto, es el siguiente:

$$\begin{aligned}
A_1 + B_1 &= A_2 + B_2, \\
\frac{A_1 - B_1}{\rho_1 c_1} &= \frac{A_2 - B_2}{\rho_2 c_2}, \\
A_2 e^{-ik_2 L_p} + B_2 e^{ik_2 L_p} &= A_3 + B_3, \\
A_2 e^{-ik_2 L_p} - B_2 e^{ik_2 L_p} &= (A_3 - B_3) \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3}, \\
A_3 e^{-ik_3(L-L_p)} \left[1 - \frac{SZ_T}{\rho_3 c_3} \right] + B_3 e^{ik_3(L-L_p)} \left[1 + \frac{SZ_T}{\rho_3 c_3} \right] &= 0,
\end{aligned}$$

La forma matricial del sistema es:

$$\begin{bmatrix}
1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\
-1 & -\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} & \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} & 0 & 0 \\
0 & e^{-ik_2 L_p} & e^{ik_2 L_p} & -1 & -1 \\
0 & e^{-ik_2 L_p} & -e^{ik_2 L_p} & -\frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3} & \frac{\rho_2 c_2}{\rho_3 c_3} \\
0 & 0 & 0 & e^{-ik_3(L-L_p)} \left[1 - \frac{Z_T S}{\rho_3 c_3} \right] & e^{ik_3(L-L_p)} \left[1 + \frac{Z_T S}{\rho_3 c_3} \right]
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
B_1 \\
A_2 \\
B_2 \\
A_3 \\
B_3
\end{bmatrix}
= A_1
\begin{bmatrix}
-1 \\
-1 \\
0 \\
0 \\
0
\end{bmatrix}$$

La determinación de las amplitudes de presión es efectuada a partir de $\mathbf{y} = \mathbf{A}^{-1} \times A_1 \mathbf{b}$ donde \mathbf{A}^{-1} es la matriz inversa de \mathbf{A} , la matriz \mathbf{A} es no singular y permite invertirla.

Los parámetros involucrados son:

- Densidad y velocidad de propagación del sonido
 - $\rho_1 = \rho_3 = 1,21$ [kg/m³]
 - $c_1 = c_3 = 352$ [m/s]
 - $\rho_2 = 98$ [kg/m³]
 - $c_2 = 320$ [m/s]
- Excitación de amplitud constante $A_1 = 1$ [N/m²] en $x = 0$
- Impedancia del tímpano en $x = L$ según Figura 4.2.
- Dimensiones del canal auditivo según Figura 4.1.

Los valores de densidad (ρ_2) y velocidad de propagación de onda (c_2) del protector auditivo son una media global de protectores auditivos de inserción existentes en el mercado [16].

Finalmente, de la matriz antes mencionada, se obtienen los valores de cada una de las amplitudes en función de la frecuencia. En las Figuras 4.7 y 4.8 se puede apreciar el comportamiento de cada una de ellas, y se puede ver que en 300 Hz y en 8.900 Hz tiene un comportamiento diferente.

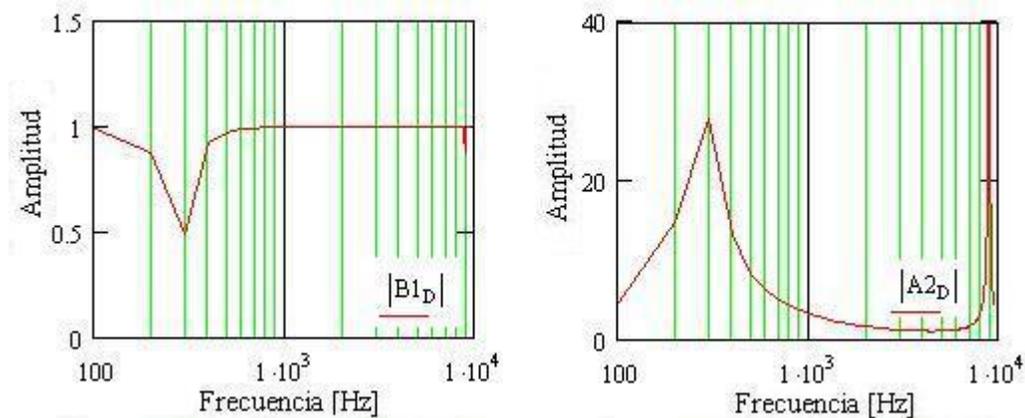


Figura 4.7: Amplitudes en función de la frecuencia.

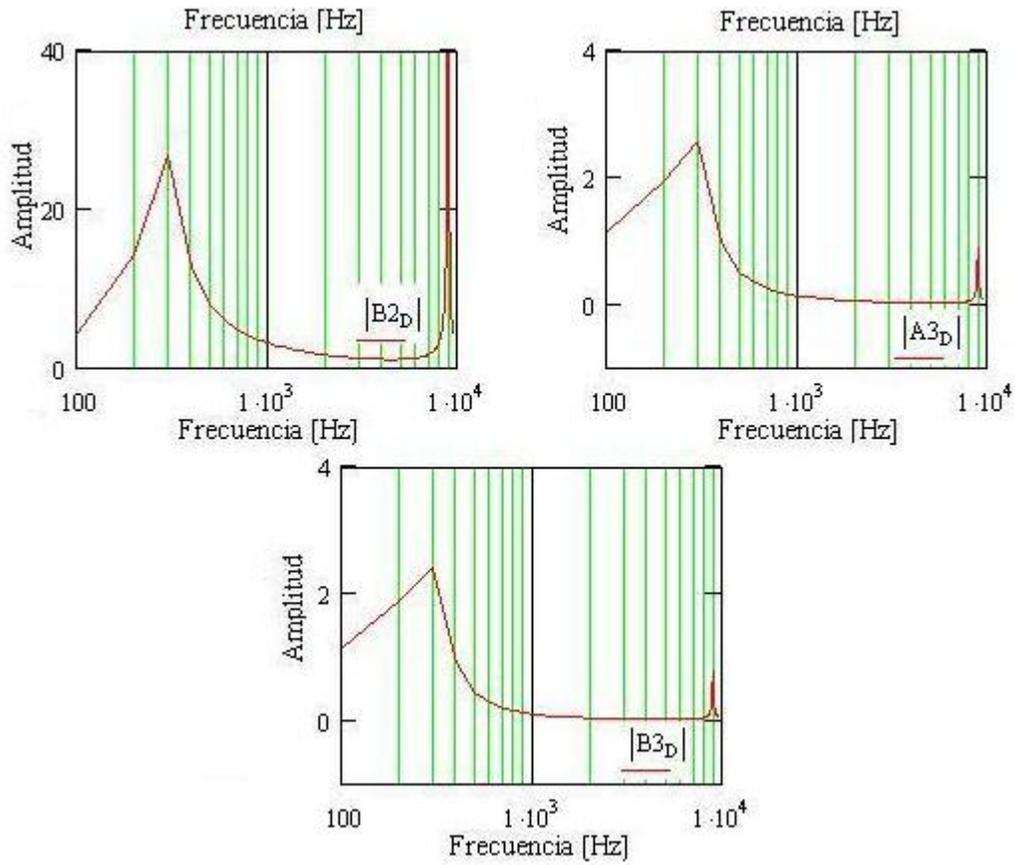


Figura 4.8: Amplitudes en función de la frecuencia.

Obedeciendo las condiciones anteriormente mencionadas, se obtiene el resultado analítico del nivel relativo de presión sonora con protector auditivo, de acuerdo con la ecuación $P_T = 20 \log \left[\frac{P_{Tf}}{P_{Te}} \right]$ en dB. El resultado se muestra en la Figura 4.9, la cual presenta su primera frecuencia de resonancia cerca de los 300 Hz.

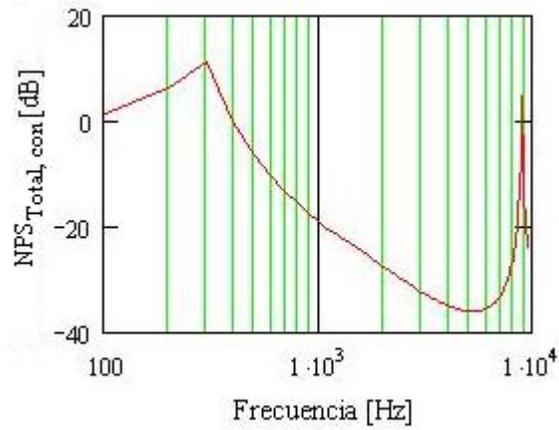


Figura 4.9: Razón de presión sonora del canal auditivo con protector auditivo.

En la figura 4.10 se pueden apreciar las curvas de nivel de presión sonora sin y con el protector auditivo.

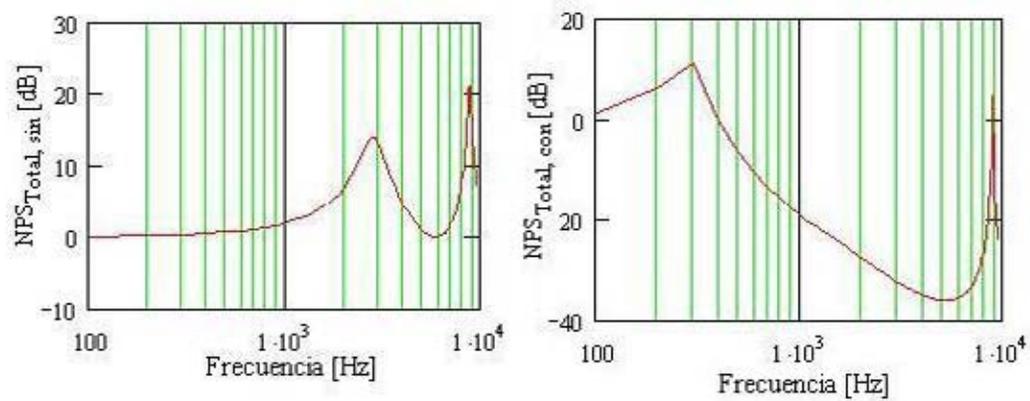


Figura 4.10: Razón de presión sonora del canal auditivo sin protector auditivo (izquierda) y con protector auditivo (derecha).

Finalmente, la atenuación total entregada por el protector auditivo esta dada por la diferencia entre el nivel de presión sonora en la membrana timpánica sin y con el protector auditivo (ver Figura 4.11).

$$\text{Atenuacion} = \text{NPS}_{\text{Total,sin}} - \text{NPS}_{\text{Total,con}} \quad (4.43)$$

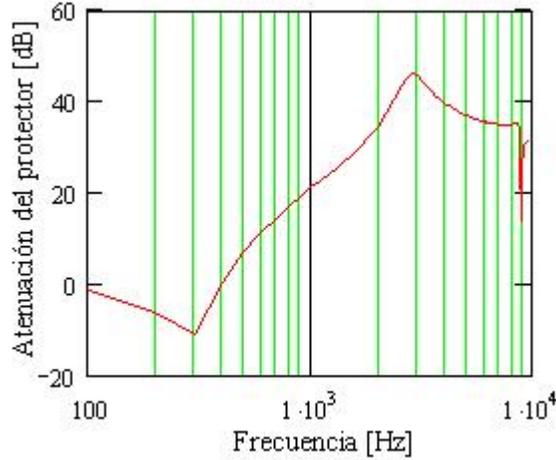


Figura 4.11: Atenuacion del protector auditivo.

4.3. Modelo del canal auditivo con protector auditivo considerando la absorción del material.

Al igual que en el caso anterior, en esta sección se desarrolla un sistema de tres medios. Sin embargo, para el medio II, el cual representa el protector auditivo, se considera el coeficiente de absorción del material homogéneo, el cual fue obtenido experimentalmente, tal como se explicó en el Capítulo 3.

Los parámetros de presión incidente, reflejada y transmitida de los medios I y III se mantienen iguales. Sin embargo tanto la presión transmitida P_{t2} como la presión reflejada P_{r2} en el medio II cambian:

$$P_{t2} = A_2 e^{i(\omega t - k_2 x - \alpha x)}, \quad (4.44)$$

$$P_{r2} = B_2 e^{i(\omega t + k_2 x - \alpha x)}. \quad (4.45)$$

Lo mismo sucede con la velocidad de volumen:

$$U_{t2} = \frac{A_2 e^{i(\omega t - k_2 x - \alpha x)}}{\rho_2 c_2 / S}, \quad (4.46)$$

$$U_{r2} = \frac{-B_2 e^{i(\omega t + k_2 x - \alpha x)}}{\rho_2 c_2 / S}. \quad (4.47)$$

Una vez considerado estos cambios en el medio II, se sigue el mismo procedimiento para obtener las amplitudes de las ondas. Una vez obtenidas estas amplitudes a través de una matriz, se reemplazan en las ecuaciones de presión sonora en la entrada del canal auditivo P_{Te} y en la membrana timpánica P_{Tf} , para finalmente obtener la relación logarítmica entre ellas $P_T = 20 \log \left[\frac{P_{Tf}}{P_{Te}} \right]$ en decibeles, tal como lo indica la Figura 4.12.

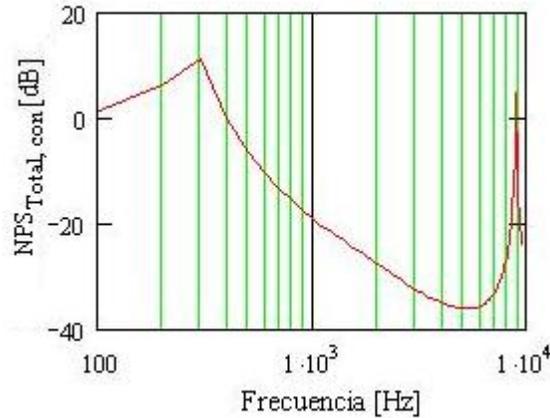


Figura 4.12: Razón de presión sonora del canal auditivo con protector auditivo considerando el coeficiente de absorción.

A través de la Figura 4.13 se puede apreciar que el coeficiente de absorción del material del cual es fabricado el protector no afecta el cálculo de atenuación.

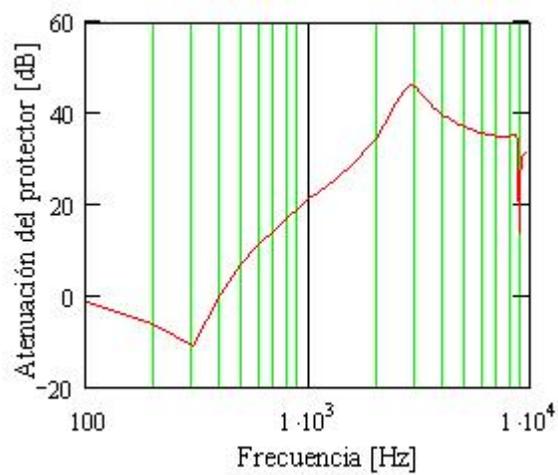


Figura 4.13: Diferencia entre NPS en la membrana timpánica con y sin PA considerando el coeficiente de absorción.

4.4. Atenuación del protector auditivo al variar su tamaño, densidad y velocidad del sonido

4.4.1. Modificación del tamaño del protector auditivo

Durante todo el procedimiento matemático, el cual fue realizado a través del software MathCad 12, se consideró la longitud del protector auditivo, L_p , igual a 18 mm. Luego, si variamos el tamaño del protector entre 15 y 25 mm, se puede apreciar en la Figura 4.14 que la primera frecuencia de resonancia (cercana a los 300 Hz), se mantiene constante, la cual corresponde a la resonancia del material poroso del cual es fabricado el protector auditivo. Por otro lado, una segunda frecuencia de resonancia, que varía de los 10 kHz hasta los 6,5 kHz, aparece al incrementar el tamaño del protector auditivo. Esta segunda frecuencia de resonancia corresponde a la resonancia del aire entre el protector auditivo y la membrana timpánica.

Esto se explica por el hecho que las dimensiones del canal auditivo son pequeñas en comparación con la longitud de onda y, en este caso, el movimiento es equivalente al de un cuerpo rígido vibrando en el interior de un tubo, como un resonador de Helmholtz.

Observando la Figura 4.14 podemos ver que la atenuación varía al variar la longitud del protector, pero se mantiene constante hasta los 3 kHz, a partir de esa frecuencia la atenuación comienza a disminuir, sufriendo una caída de hasta 40 dB en los 6,5 kHz.

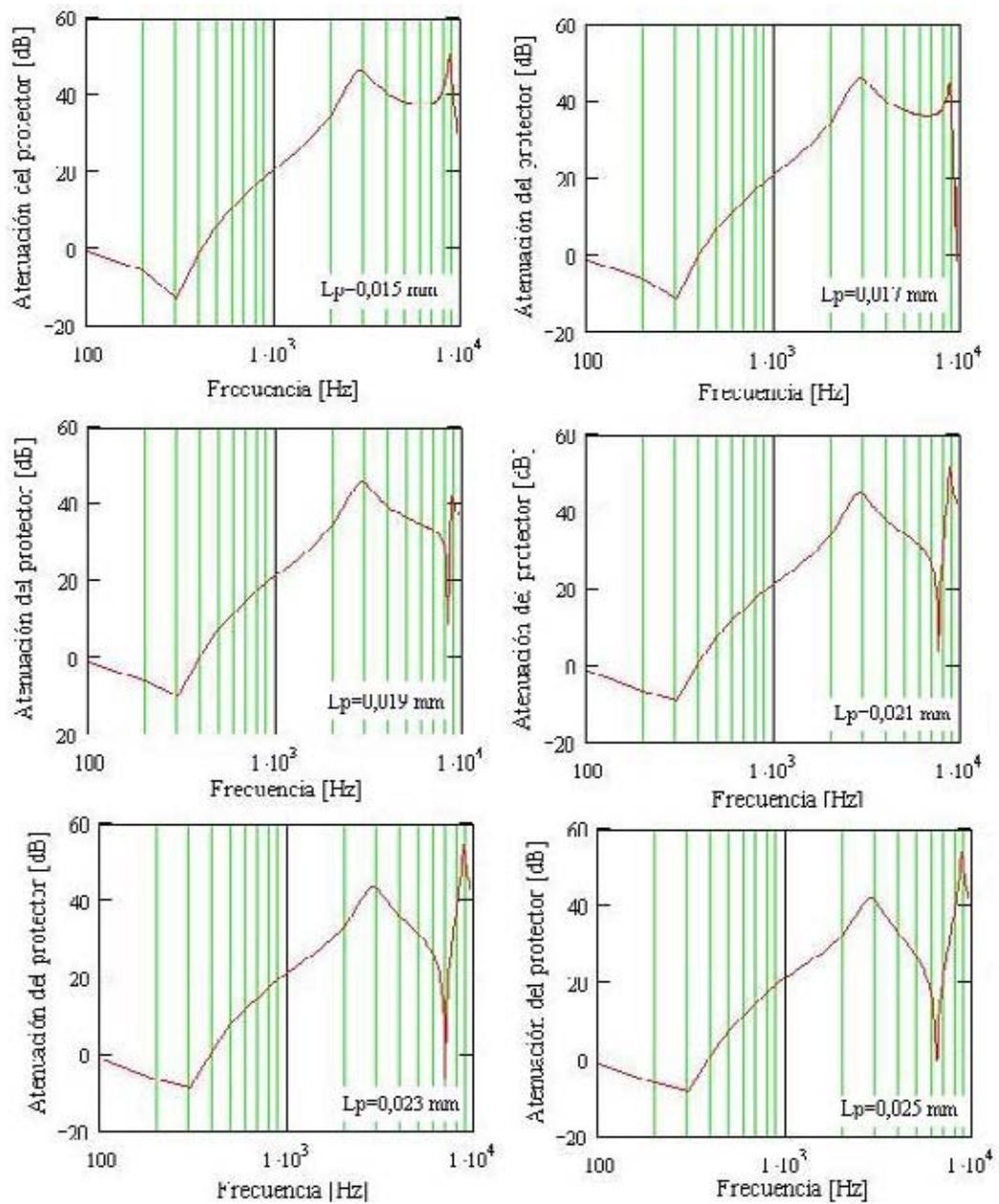


Figura 4.14: Variación de la atenuación sonora al variar el tamaño del protector auditivo.

4.4.2. Modificación de la densidad del protector auditivo

Para observar la variación de la atenuación sonora al variar la densidad del material del protector auditivo, se mantienen constantes los parámetros de velocidad de onda longitudinal y tamaño del protector auditivo y se consideraron cinco valores arbitrarios de densidad. La velocidad de onda longitudinal considerada fue de 320 m/s y el tamaño del protector auditivo de 18 mm. Las densidades consideradas fueron: 15 kg/m³, 45 kg/m³, 98 kg/m³, 378 kg/m³ y 950 kg/m³.

Como se puede apreciar en la Figura 4.15, al variar la densidad del material, cambia la primera frecuencia de resonancia. A medida que aumenta la densidad del material la primera frecuencia de resonancia va disminuyendo. Por otra parte, la segunda frecuencia de resonancia se mantiene próxima de 3kHz pero varía el valor de atenuación entre 60 y 30 dB.

Además, al aumentar la densidad del material también se observa un aumento de la atenuación. Por ejemplo, en 1kHz, entre la primera densidad de 15 kg/m³ y 950 kg/m³ hay una diferencia de 40 dB, y la máxima atenuación se produce en los 3 kHz.

Por lo tanto, la densidad del protector modifica solamente las amplitudes de las atenuaciones en frecuencias medias y altas, desplazando hacia las frecuencias bajas la primera frecuencia de resonancia.

Es importante considerar que la densidad del material varía cuando es insertado en el canal auditivo, debido a que se encuentra comprimido por las paredes del mismo.

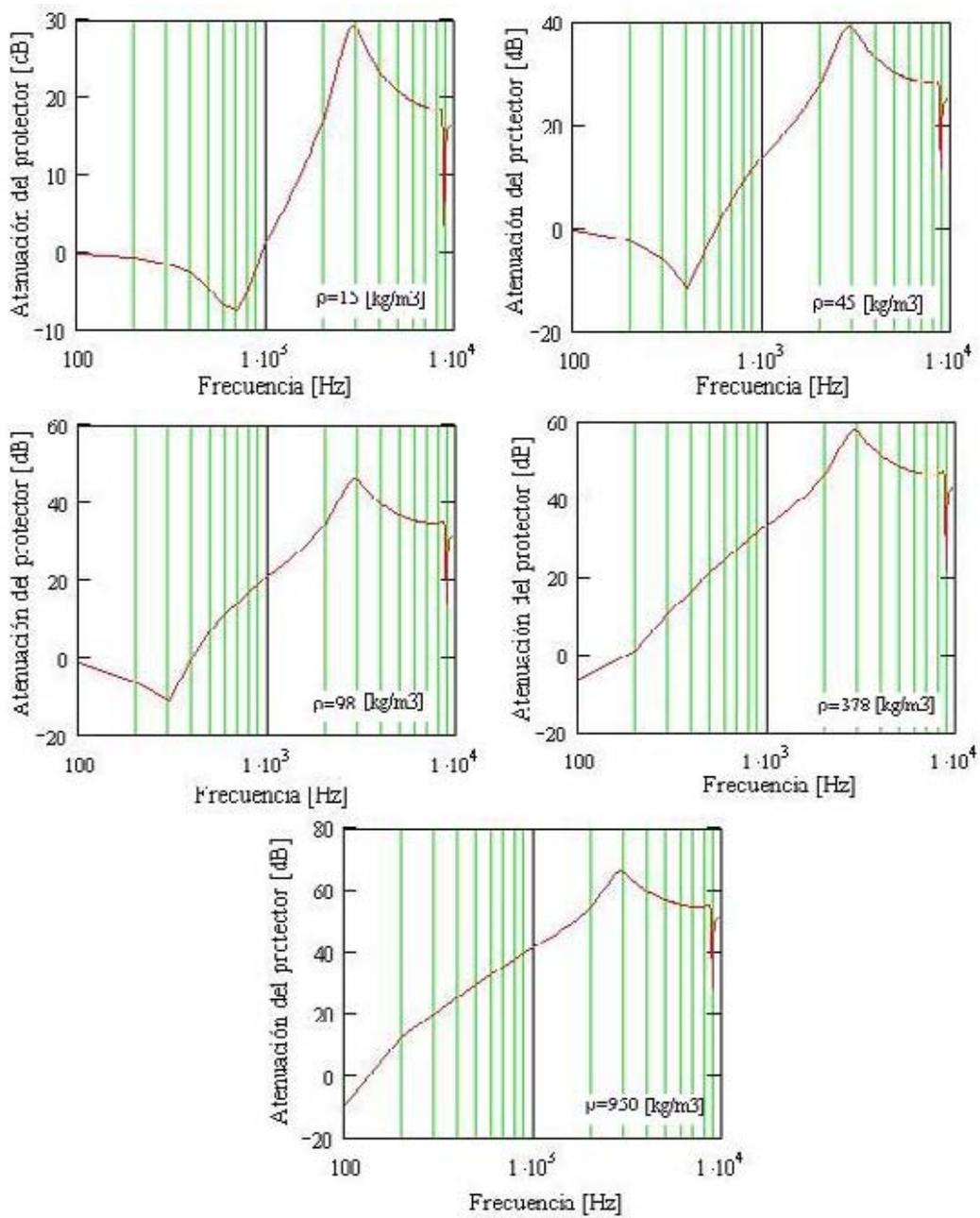


Figura 4.15: Variación de la atenuación sonora al variar la densidad del protector auditivo.

4.4.3. Modificación de la velocidad de onda longitudinal del protector auditivo

En este caso, se mantendrán constante la densidad del material en 378 kg/m^3 y el tamaño del protector en 18 mm . Las velocidades serán: 50 m/s , 150 m/s , 300 m/s , 450 m/s y 600 m/s .

De acuerdo con la Figura 4.16, se puede ver que la primera frecuencia de resonancia se mantiene en los 300 Hz , pero que mientras mayor es la velocidad, menos peaks de resonancia se producen. Además, se observa que, a partir de los 300 m/s , la atenuación es prácticamente constante y no varía con el aumento de la velocidad.

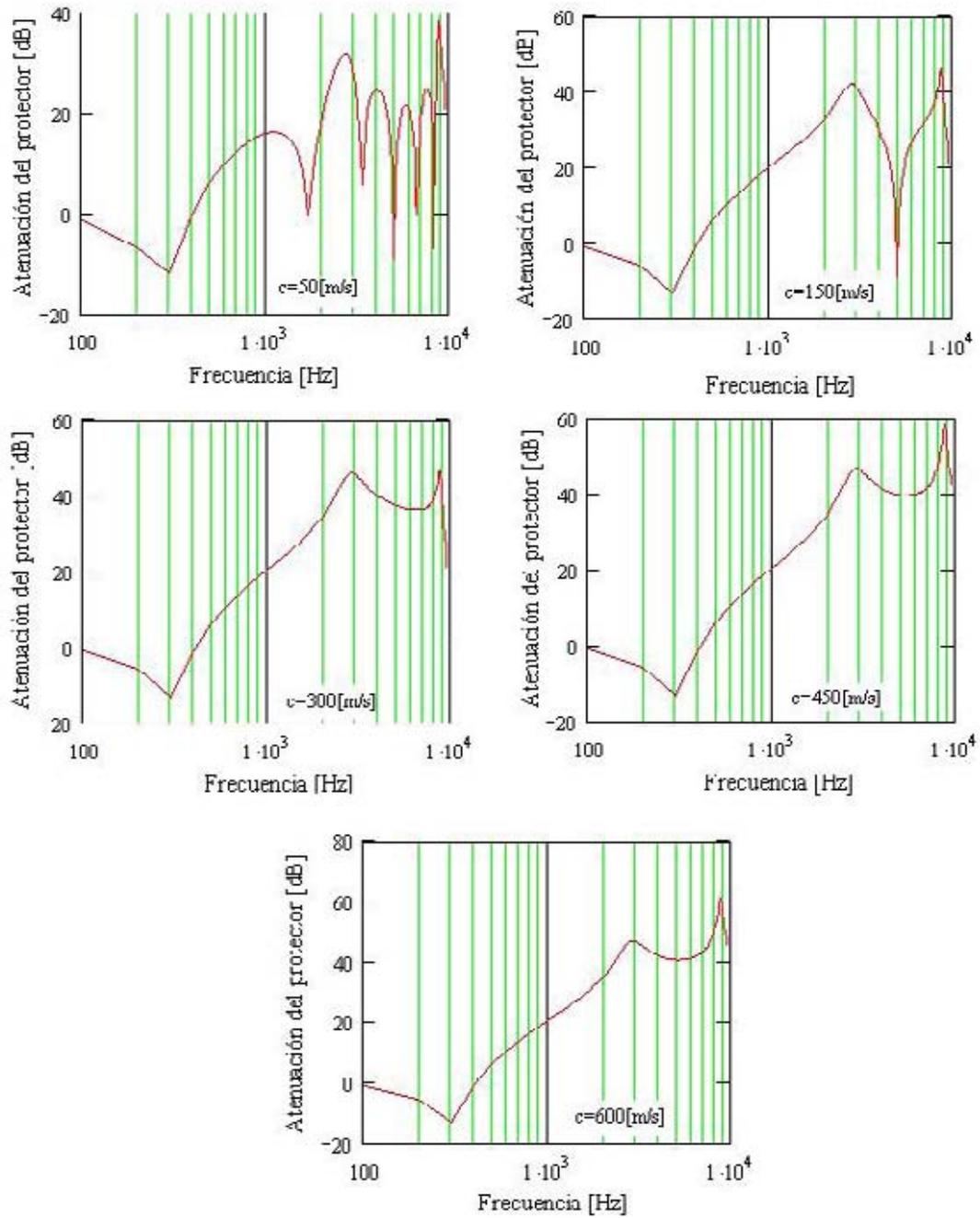


Figura 4.16: Variación de velocidad de onda longitudinal del protector auditivo.

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo, consistió en determinar la atenuación sonora para ruido continuo de un tipo de protector auditivo de inserción, a través de un método analítico que considerara el coeficiente de absorción del material del cual es fabricado el protector.

En términos generales, el desarrollo experimental para determinar el coeficiente de absorción del material del protector, usando el tubo de impedancia, permitió concluir que el material del protector auditivo no se comporta como un material absorbente. Para esto, se tomaron varias muestras del material, con diferentes tamaños de diámetro, con y sin la capa superior e inferior.

El material utilizado para las mediciones tiene, tanto en la parte superior como inferior, capas más densas, las cuales dificultan el paso de aire y, aparentemente, podrían afectar el coeficiente de absorción del material. Sin embargo, se demostró que estas no influyeron en los resultados, obteniéndose valores muy similares en todos los casos estudiados.

Tanto en las mediciones en el tubo grande como en el tubo pequeño, no se observaron diferencias entre las mediciones del lado a y b del material. En el tubo grande, el coeficiente de absorción entre los 300 y 800 Hz es del orden de 0,1 y a partir de los 900 a los 2.000 Hz, aumenta a 0,2. En el tubo pequeño, donde el rango de frecuencia es confiable a partir de los 2 kHz hasta los 7 kHz, se tiene que el coeficiente de absorción se mantiene relativamente constante en 0,2, sufriendo un pequeño aumento en los 6,5 kHz. Por lo tanto, en ninguno de los dos casos se comporta como material absorbente.

Posteriormente, se desarrolló un método analítico del canal auditivo para obtener, a través de ecuaciones exactas, las curvas de atenuación sonora con y sin el protector auditivo.

Al desarrollar analíticamente el modelo del canal auditivo sin protector auditivo, que corresponde a un modelo simple de un solo medio, se puede observar que la presión en la entrada del canal se comporta de una forma relativamente constante, presentando dos frecuencias de resonancia, una cercana a los 3 kHz y otra cercana a los 9 kHz, mientras que la presión en la membrana timpánica casi no varía. Luego, la presión sonora total, que está dada por la relación $PT = 20\log(PTf/PTe)$, también presenta las resonancias antes mencionadas, las cuales coinciden con los valores obtenidos a partir de la expresión teórica para la frecuencia de resonancia en un tubo abierto - cerrado.

El caso del modelo del canal auditivo con protector auditivo, por el hecho de ser un modelo de tres medios, tiene un comportamiento diferente. Para este caso, se realizó el desarrollo analítico para ambos casos: 1) considerando y 2) sin considerar la absorción del material. Esto con el objeto de apreciar si la absorción influenciaba los resultados. En ambos casos, la razón de presión sonora entre la entrada del canal y el tímpano, presenta la primera resonancia en 300 Hz y la segunda cercana a los 9 kHz.

Finalmente, la atenuación total entregada por el protector auditivo, es dada por la diferencia entre el nivel de presión sonora en la membrana timpánica, sin y con el protector auditivo. La máxima atenuación se presenta en los 3 kHz, alcanzando un valor de 40 dB.

Posteriormente, se modificaron algunos parámetros, tales como el tamaño, densidad y velocidad de onda longitudinal del protector auditivo, para ver como reaccionaba la atenuación ante estos cambios.

El tamaño varió entre 15 mm y 25 mm, manteniendo constante la densidad en 98 kg/m³ y la velocidad de onda longitudinal en 320 m/s. En este caso, la primera frecuencia de resonancia se mantiene constante, pero a medida que aumenta el tamaño, la segunda frecuencia va disminuyendo.

La frecuencia de resonancia se explica por el hecho que las dimensiones del canal auditivo son pequeñas en comparación a la longitud de onda y, en este caso, el movimiento es equivalente al de un cuerpo rígido vibrando en el interior de un tubo, como un resonador de Helmholtz.

La atenuación se mantuvo constante hasta los 3 kHz pero, a partir de este valor, la atenuación comienza a reducirse, cayendo hasta 40 dB en los 6,5 kHz.

Al variar la densidad, se tomaron cinco valores arbitrarios entre 15 kg/m³ y 950 kg/m³. La velocidad y tamaño se mantuvieron constantes. A medida que aumenta la densidad, la primera frecuencia de resonancia va disminuyen-

do, manteniéndose constante la segunda.

Finalmente, al variar la velocidad de onda longitudinal entre 50 m/s y 600 m/s, se pudo observar que la primera frecuencia de resonancia se mantiene constante, pero mientras menor es la velocidad van apareciendo más frecuencias de resonancia.

En resumen, podemos decir que la primera frecuencia de resonancia depende exclusivamente de la densidad del material poroso del cual es fabricado el protector auditivo. Tanto el tamaño como la velocidad de onda longitudinal influyen a partir de la segunda frecuencia de resonancia. El tamaño afecta en la ubicación de la frecuencia de resonancia y la velocidad en la cantidad. Esta segunda frecuencia corresponde a la resonancia del aire entre el protector auditivo y la membrana timpánica.

Anexo 1 - Programa para Cálculo de Impedancia Acústica de Materiales Porosos por Función de Transferencia con MatLab

```
% DATOS DEL TUBO DE IMPEDANCIA

clear all; clc;

% Programa para Cálculo da Impedancia Acústica de Materiales
Porosos por método de la Função Transferência %

e=0.018; % espesor de la muestra

nlines=6401; %tubo pequeño 12800Hz
frange=1:6401; %1:3501; % Rango de frecuencia = 900Hz a 7000Hz
tubo pequeño
namostras=6; %numero de amostras

for cont = 1:nmuestras

%_____diretorio de archivos del Pulse_____

dir = ['C:\Documents and Settings\Maysa\Desktop\TESIS\Maysa\
```

```

Calculos\Tubo_28mm\a18_' int2str(cont) '\'];

% LECTURA DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

% Medición en el Punto 1
a = fopen(strcat(dir, 'p1.txt'));
for x=1:130
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end
spec_1 = fscanf(a,'%i %e %e \n',[3 nlines]);
spec_1 = spec_1';
for x=1:141
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end
h1_1 = fscanf(a,'%i %e %e %e \n',[4 nlines]);
h1_1 = h1_1';
for x=1:141
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end
coe_1 = fscanf(a,'%i %e %e \n',[3 nlines]);
coe_1 = coe_1';
fclose(a);

% Medición en el Punto 2
a = fopen(strcat(dir, 'p2.txt'));
for x=1:130
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end
spec_2 = fscanf(a,'%i %e %e \n',[3 nlines]);
spec_2 = spec_2';
for x=1:141
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end
h1_2 = fscanf(a,'%i %e %e %e \n',[4 nlines]);
h1_2 = h1_2';
for x=1:141
test=fscanf(a,'%s \n',1);
end

```

```

coe_2 = fscanf(a,'i %e %e \n',[3 nlines]);
coe_2 = coe_2';
fclose(a);

% GEOMETRIA
erro=0;
s21=0.019+erro; %distancia entre los puntos del microfono
x21=0.084-e-erro; %distancia entre la muestra y el punto mas alejado

% Condiciones del ambiente
TC=26;
TK=TC+273;
c0=343.2*sqrt(TK/293);
Tref=293;
pref=1.01325e5;
rhoref=1.186;
pa=1.01325e5;

rho0=rhoref*(pa*Tref)/(pref*TK);

% CALCULO
%ind=0;

for m=1:nlines

    H21(m)=(h1_1(m,3)+i*h1_1(m,4))/(h1_2(m,3)+i*h1_2(m,4));

    k(m)=2*pi*((m-1)*2)/c0;
    fq(m,cont)=(m-1)*2;

% Coeficiente de Absorción - Factor de Reflexión - Impedancia Normalizada
r21(m,cont)=((H21(m)-exp(-i*k(m)*s21))/(exp(i*k(m)*s21)-H21(m)))
*exp(i*2*k(m)*x21);
alfa21(m,cont)=1-abs(r21(m,cont))^2;
Z21(m,cont)=(1+r21(m,cont))/(1-r21(m,cont));

end

```

```

fid = fopen(['C:\Documents and Settings\Maysa\Desktop\TESIS\
Maysa\Calculos\Tubo_28mm\amostra_aa18_' int2str(cont) '.txt'], 'w');
fprintf(fid, '%12.6f %12.6f %12.6f %12.6f %12.6f %12.6f\n', [fq(:,cont)
alfa21(:,cont) real(r21(:,cont)) imag(r21(:,cont)) real(Z21(:,cont))
imag(Z21(:,cont))]);
fclose(fid);

end

cont

% Graficos
f=min(frange)*2:2:max(frange)*2;

for cont=1:nmuestras

subplot(2,1,1);
semilogx(f, alfa21(frange, cont), '-b');
hold on;

subplot(2,1,2);
semilogx(f, real(Z21(frange, cont)), '-b');
hold on;
semilogx(f, imag(Z21(frange, cont)), '-r');
hold on;

end

subplot(2,1,1);
title(['Impedance Tube 28 mm Diameter - ', blanks(2), int2str(nmuestras), '
foam samples with', blanks(1), int2str(e*1000), ' mm thick']);
xlabel('Frequency [Hz]');
ylabel('Sound Absorption Coefficient');
axis([100 10000 0 1]);
whitebg('w');
grid;
subplot(2,1,2);
xlabel('Frequency [Hz]');

```

```
ylabel('Normal Surface Impedance');  
legend('real part','imaginary part');  
axis([100 10000 -1500 1500]);  
whitebg('w');  
grid;
```

Bibliografía

- [1] Gerges, S.N.Y., *Ruído, Fundamentos e Controle*. Florianópolis. Editora UFSC. 1ª Edição, 1992. p. 493-528.
- [2] Hammershoi, D. and Moller, H., *Sound Transmission to and within the Human Ear Canal*, JASA 100(1). pp. 408-427. July 1996.
- [3] ISO 4869 - International Standards Organization. *Acoustics - Hearing Protectors: Part 1: Subjective Method for the Measurement of Sound Attenuation*. Geneva, Switzerland.
- [4] ANSI S3.19 1974 - American National Standard Institute. *Standard Method for the Measurement of Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of earmuffs*.
- [5] ANSI S12.6 1984 - American National Standard Institute. *Method for the Measurement of Real-Ear Protection of Hearing Protectors and Physical Attenuation of earmuffs*.
- [6] ANSI S12.6 1997 - American National Standard Institute. *Methods for Measuring the Real-Ear Attenuation of Hearing Protectors*.
- [7] Gerges, S.N.Y. y Arenas, J.P., *Fundamentos y Control del Ruido y Vibraciones*, NR Editora, Florianópolis, 1º Edición en Español, 2004.
- [8] Bolton, J.S. and Kang, Y.J., *Elastic Porous Materials for Sound Absorption and Transmission Control*, Society of Automotive Engineers, Inc, 1997.
- [9] Foam-X, User Guide, 2003.

- [10] ISO 10534-2 - International Standards Organization. *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method*
- [11] Rabbit, D.R., *A Fibrous Dynamic Continuum Model of the Tympanic Membrane*, JASA 80(6). pp. 1716-1728. December 1986.
- [12] Crocker, M.J. ,*Encyclopedia of Acoustics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1997.
- [13] Mourad, K.M., *The Application of the Boundary Element Method to Predict the Response of a Differential Operator Model for a Coupled Viscoelastic-Acoustic System*, PhD. Thesis, North Carolina State University, 1990.
- [14] Blackstock, D.T., *Fundamentals of Physical Acoustics*, Wiley-Interscience, New York, 2000.
- [15] Hall, D.E., *Basic Acoustics*, Krieger Publishing Company, Florida, 1993
- [16] Bavastri, Y.N.E., *Determinação da atenuação sonora por métodos computacionais e método objetivo.*, Tesis para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería de Producción, UFSC, 2001.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la colaboración de varias personas:

Jorge Arenas de la Universidad Austral de Chile, por su apoyo, colaboración y orientación a distancia, a Felipe Vergara por su orientación, Victor Cumián e Hilda Negrón por siempre estar dispuestos a ayudar y Andrea Maud Contreras y Rodrigo Muñoz Salas por su amistad y por ayudarme incondicionalmente en todo.

Quisiera agradecer en forma muy especial a Samir N.Y. Gerges, quien no solo me ofreció toda la infraestructura necesaria para el desarrollo de mi tesis sino que también me acogió como una hija, y a todos mis amigos del LVA (Laboratório de Vibrações e Acústica) de la UFSC por hacerme sentir siempre como en casa.

No puedo dejar de agradecer a mi familia, en especial a mi hermana Mónica por confiar en mí, creer en mis sueños y apoyarme SIEMPRE.