

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE MATERIALES**

**JHON ARBEY ÁLVAREZ SÁNCHEZ
GUSTAVO LOZANO GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTA DE JUNIO
2007**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR
COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE MATERIALES**

**JHON ARBEY ÁLVAREZ SÁNCHEZ
GUSTAVO LOZANO GONZÁLEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al titulo de ingeniero
de sonido**

**Presentado a.
MÓDULO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA DE SONIDO**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA DE SONIDO
BOGOTA JUNIO
2007**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, D.C, Junio de 2007

DEDICATORIA

A todas aquellas personas que contribuyeron de alguna forma para la realización de este proyecto, a la Universidad de San Buenaventura, la facultad de ingeniería de sonido y los autores de las publicaciones que nos sirvieron de guía y apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de familiares, compañeros y profesores que estuvieron con nosotros a lo largo de todo este proceso, al ING. Francisco Ruffa por su interés, ING. Abelardo Álvarez por todo el tiempo que dedico al proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN	
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	01
1.1 ANTECEDENTES.....	01
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	02
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	03
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	04
1.4.1 Objetivo General.....	04
1.4.2 Objetivos Específicos.....	04
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	04
1.5.1 Alcances.....	04
1.5.2 Limitaciones.....	05
2. MARCO DE REFERENCIA	06
2.1 Marco Conceptual.....	06
2.1.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SONIDO.....	06
2.1.1.1 Definición del sonido.....	06
2.1.1.2 Generación y propagación del sonido.....	06
2.1.1.3 Frecuencia del sonido (f).....	08
2.1.1.4 Clasificación de los sonidos.....	08
2.1.1.4.1 Sonidos deterministas.....	09
2.1.1.4.1.1 Sonido periódico simple (tono puro).....	09
2.1.1.4.1.2 Sonido periódico complejo.....	09
2.1.1.4.2 Sonidos aleatorios.....	10
2.1.1.5 Velocidad de propagación del sonido (c).....	10
2.1.1.6 Longitud de onda del sonido (λ).....	11
2.1.1.7 Nivel de presión sonora (SPL).....	12
2.1.1.8 Sonido reflejado.....	13
2.1.1.9 Tiempo de reverberación RT.....	13
2.1.1.10 Función de onda.....	13
2.1.1.11 Ecuación diferencial del movimiento ondulatorio.....	15
2.1.1.12 ONDAS ESTACIONARIAS.....	17
2.1.1.13 Ondas estacionarias en tubos abiertos y cerrados.....	20
2.1.1.14 Leyes de Bernoulli.....	22

2.1.2	Absorción del sonido	22
2.1.2.1	Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto.....	23
2.1.2.2	Absorción del aire.....	24
2.1.2.3	Absorción de las superficies vibrantes.....	25
2.1.3	Materiales absorbentes	26
2.1.3.1	Coefficiente de reducción acústica NRC.....	28
2.1.3.2	Variación de la absorción en función del espesor del material.....	28
2.1.3.3	Variación de la absorción en función de la porosidad del material..	30
2.1.3.4	Variación de la absorción en función de la densidad del material... 30	
2.1.3.5	Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida.....	31
2.2	Marco Legal o Normativo.....	35
2.3	Marco Teórico.....	35
2.3.1	Medición del coeficiente de absorción.....	35
2.3.2	Determinación de la impedancia acústica específica.....	39
3.	METODOLOGÍA	41
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	41
3.2	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	41
3.3	TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	41
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	43
3.5	HIPÓTESIS.....	47
3.6	VARIABLES.....	47
3.6.1	Variables independientes.....	47
3.6.2	Variables dependientes.....	47
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.1	Procedimiento para la obtención de los coeficientes de absorción de materiales acústicos por medio del dispositivo de ondas estacionarias.....	52
4.2	Comparación de valores de coeficientes de absorción medidos y dados por el fabricante.....	53
5.	DESARROLLO INGENIERIL	62
5.1	Partes del tubo de ondas estacionarias.....	62
5.2	PARÁMETROS DE DISEÑO	63
5.3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUBO.....	65
5.4	Procedimiento para determinar el coeficiente de absorción acústico de materiales.....	75

6.	CONCLUSIONES	77
7.	RECOMENDACIONES	78

	BIBLIOGRAFÍA.....	79
--	-------------------	----

ANEXOS

	ANEXO A Tubo de ondas estacionarias para baja frecuencia.....	80
	ANEXO B Tubo de ondas estacionarias para alta frecuencia.....	81

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura. 1 Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora.....	07
Figura. 2 Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.....	07
Figura 3 Se observan dos ejemplos de presión sonora p asociada a oscilaciones de diferente frecuencia.....	08
Figura 4 Tono puro y su espectro frecuencial.....	09
Figura 5 Sonido periódico complejo y su espectro frecuencial.....	09
Figura 6 Sonido aleatorio y correspondiente densidad espectral de potencia.....	10
Figura. 7 Longitud de onda (λ) del sonido.....	11
Figura. 8 Relación entre longitud de onda (λ) y frecuencia (f) en el aire.....	12
Figura. 9 Onda longitudinal es un pulso de sonido.....	15
Figura. 10 Nodos y antinodos de una onda estacionaria.....	17
Figura. 11 Tubos abiertos.....	20
Figura 12 Tubos cerrados.....	21
Figura 13 Gráficas para la determinación del producto $4m$ (m es la constante de atenuación del sonido en el aire).....	24

Figura 14 Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida.....	27
Figura 15 Evolución de la amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D \ll \lambda'$).....	29
Figura 16 Evolución de la amplitud de la velocidad“u” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D = \lambda'/4$).....	29
Figura 17 Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad.....	30
Figura 18 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m ³	31
Figura 19 Amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d = \lambda/4$	32
Figura 20 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m ³ de densidad, montada: a) sobre una pared de hormigón; b) a una distancia de 50 mm de la pared.....	32
Figura 21 Coeficientes de absorción de una tela porosa situada a una distancia “d” de una pared rígida, en función de d/λ , para los siguientes valores de r_s : a) $r_s = 0,25 \rho_{0c}$; b) $r_s = \rho_{0c}$; c) $r_s = 4 \rho_{0c}$	33
Figura. 22 Coeficientes de absorción en función de la frecuencia de una cortina fruncida al 180% montada: a) Sobre la pared; b) separada, en promedio, 14cm de la misma.....	34
Figura 23 SWR.....	37
Figura 24 Ábaco de Smith.....	40
Figura 25 ISOVER ANDINA “CORAL PLUS” 25mm	43
Figura 26 ISOVER ACUSTIVER P/VN “ARENA ABSORCIÓN” 25 mm.....	44
Figura 27 FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC.....	45
Figura 28 FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW.....	46
Figura 29 CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG.....	47

Figura 30 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante ISOVER ANDINA "CORAL PLUS.....	56
Figura 31 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante ISOVER ACUSTIVER P/VN "ARENA ABSORCIÓN".....	57
Figura 32 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC.....	58
Figura 33 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW.....	59
Figura 34 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG.....	60
Figura 35 Tubo de ondas estacionarias para baja frecuencia.....	62
Figura 36 Tubo de ondas estacionarias para alta frecuencia.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1 Coeficientes de absorción α SAB de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos.....	23
Tabla 2 Coeficientes de absorción ISOVER ANDINA "CORAL PLUS.....	53
Tabla 3 Coeficientes de absorción ISOVER ACUSTIVER P/VN ARENA ABSORCIÓN.....	54
Tabla 4 Coeficientes de absorción FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC.....	54
Tabla 5 Coeficientes de absorción FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW.....	55
Tabla 6 Coeficientes de absorción CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG.....	55
Tabla 7 Frecuencia máxima según el diámetro del tubo de ondas Estacionarias.....	66
Tabla 8 Limite de baja Frecuencia según la longitud del tubo de ondas Estacionarias.....	67
Tabla 9 Características técnicas parlante VIFA P11wh00011.....	68
Tabla 10 Características técnicas parlante B&C.....	69
Tabla 11 Características técnicas parlante 405-8h.....	70
Tabla 12 Características técnicas parlante p11wh0008.....	71
Tabla 13 Medición parlante p11wh0008.....	72
Tabla 14 Circuito de polarización para micrófono.....	73
Tabla 15 Medición baffle con p11wh0008.....	75

LISTA DE IMÁGENES

	Pag.
Imagen 1 Tubo de ondas estacionarias para bajas frecuencias.....	48
Imagen 2 Tubo de ondas estacionarias para altas frecuencias.....	49
Imagen 3 tubo portamuestras y pistón para bajas frecuencias.....	49
Imagen 4 tubo portamuestras y pistón para altas frecuencias.....	50
Imagen 5 tubo Baffle exterior e interior.....	50
Imagen 6 sonda con carrito introducido en el tubo de baja frecuencia.....	51
Imagen 7 Dispositivo para medir coeficiente de absorción.....	51

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta la importancia del control de ruido, el tratamiento acústico de recintos y la caracterización de materiales para propósitos técnicos o comerciales, es necesario conocer los valores de absorción acústica de los mismos, además, en diferentes proyectos e investigaciones es necesario medir el coeficiente de absorción de los materiales que se pretenden utilizar.

Por estas razones, se desarrollo y se construyo un dispositivo capaz de cuantificar la cantidad de energía acústica que absorbe un material, mediante la técnica de ondas estacionarias. Este dispositivo está provisto de un tubo equipado con un parlante que produce ondas acústicas, las cuales son reflejadas por el material de muestra que se encuentra en uno de los extremos.

Con este dispositivo es posible crear espacios acústicos ideales y apropiados, alterando y modificando sus características físicas con el objetivo de mejorarlo, implementando de esta forma materiales acústicos con acertados valores de absorción en función de la frecuencia, y así saber cuál es el material más apropiado, para reducir la energía acústica en la frecuencia en que se presentan problemas de aislamiento o del tiempo de reverberación para un recinto

Existen diferentes métodos para la medición de coeficientes de absorción acústica de materiales, de los cuales se obtienen valores de la cantidad de energía acústica que absorbe un material. Normalmente la medida de coeficiente de absorción es hecha en un cuarto reverberante, conforme a la norma ISO 354. Este involucra la colocación de una unidad de área de material (un metro cuadrado) en un cuarto especial de reverberación. La diferencia entre el tiempo de reverberación con y sin el material, permite determinar las propiedades absorbentes del mismo. La técnica de Intensidad Sonora cuenta con el uso de la medición de intensidad como una "medida de impedancia" y en la cual la impedancia se obtiene por la presión sonora y la relación de la velocidad de partícula. Este método de Intensidad sólo usa los conceptos de intensidad sonora y densidad de energía, no necesita conocimiento previo de la intensidad incidente, obtenida por una medida de referencia de la misma fuente sonora en un campo libre, una sola medida cerca de la superficie absorbente es todo lo que se requiere para extraer los

resultados, el coeficiente de absorción puede calcularse con la medida de la intensidad sonora y la densidad de energía de campo sonoro, en la base de una simple relación matemática que existe entre ellos, estas relaciones permiten conocer cual es la intensidad sonora reflejada e incidente, para que el coeficiente de absorción pueda calcularse.

Existen métodos estadísticos para la predicción del coeficiente de absorción acústica de material, los cuales son una de las herramientas más rápidas y sencillas para la predicción matemática de coeficientes de absorción. Estas predicciones, basadas en teorías geométricas y también en las propiedades físicas propias del material como son sus características, dimensiones, composición; son la principal herramienta para predecir su comportamiento acústico.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

En el siglo XIX el físico alemán August Kundt desarrolló el método (tubo de Kundt) para determinar la velocidad de propagación del sonido en un gas, “método basado en el hecho de que un polvo finamente dividido en el interior de un tubo donde se ha establecido una onda acústica, tiende a reunir las muestras de polvo en nodos y antinodos; midiendo la distancia entre cada uno de ellos es como se obtiene la velocidad del sonido específica para cada gas que circula dentro del tubo”¹.

El físico Alemán Georg Herman Quincke Construyó diversos aparatos de medida, como un termómetro acústico y un manómetro magnético. El tubo de Quincke es un aparato que permite medir la longitud de onda de las ondas sonoras mediante fenómenos de interferencia. “El dispositivo consta de dos tubos en forma de U, uno fijo de diámetro interno de 1 a 3cm, y otro corredizo, cuyo diámetro interior es igual al diámetro exterior del tubo fijo. El sonido emitido por un altavoz, conectado a un generador de frecuencias viaja por dos caminos diferentes, por el lado derecho y por el lado izquierdo, el micrófono capta la superposición de ambas ondas y la señal eléctrica generada se analiza con un osciloscopio”².

A través del siglo XX se han desarrollado varios métodos para determinar coeficientes de absorción acústica, ya que se ha demostrado su importancia en muchos campos de la ciencia, uno de estos métodos es por medio de una cámara reverberante, método que consiste en la determinación del coeficiente de absorción acústica, por medio de la medida, de la diferencia en el tiempo de reverberación de un recinto altamente reflectivo, con una muestra de material de área finita en su interior y el tiempo de reverberación del recinto vacío.

¹ www.physics.ucla.edu/demoweb/acosticefect.html

² www.physicsforums.com

En el año 2005 en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Pedro Alexander Gutiérrez Tovar, construyó un tubo de impedancia para la medición del coeficiente de absorción el cual utilizó el método de función de transferencia, se realizó una tesis, cuyo objetivo permite medir las propiedades acústicas de los materiales de construcción mediante la incidencia de ondas estacionarias hacia muestras del material al interior del tubo, permitiendo obtener el coeficiente de absorción.

En la revista Scientia et Technica Año X, No 25, Agosto 2004 de la Universidad Tecnológica de Pereira, Jaime Andrés Castañeda y Héctor Álvaro González, presentan una metodología para la medición del coeficiente de absorción de sonido utilizando un tubo de impedancia provisto de un parlante y un micrófono, herramientas de la estadística inferencial y materiales que juegan un papel muy importante para el caso de aislamiento acústico arquitectónico. Este trabajo aportará bibliografía y gráficas de coeficientes de absorción de material hecho en Colombia.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

“El coeficiente de absorción de un material se refiere a la relación de la potencia sonora incidente que es absorbida o no reflejada por el material, y la energía reflejada por el mismo”³. Dada esta formulación su valor siempre está comprendido entre cero y uno. El máximo coeficiente de absorción está determinado por un valor de uno donde toda la energía que incide en el material es absorbida por el mismo, y el mínimo es cero donde toda la energía es reflejada.

¿Cómo desarrollar un dispositivo método para medir el coeficiente de absorción acústica de un material, mediante un instrumento basado en la medición de la energía que disipa?

³ RUSSELL, Daniel, Coefficients and impedance Science, Mathematics Department, GMI Engineering Institute pag. 23.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta la importancia que tiene el control de ruido, el tratamiento acústico de recintos y la acústica en general, es de gran importancia conocer y comprobar las características acústicas de los materiales, esto abrirá la posibilidad de que el mercado conozca y utilice sistemas de aislamiento y acondicionamiento con materiales fabricados en el país, de este modo se empleará en una aplicación concreta de absorción como solución para un determinado problema de acondicionamiento acústico o para investigaciones que requieran el conocimiento de este parámetro.

En el campo laboral el conocimiento del coeficiente de absorción de materiales permitirá la implementación de nuevas materias primas a la industria ya que estas pueden ser utilizadas de manera correcta y con un criterio objetivo en diseños acústicos, además algunos materiales no especifican sus características acústicas ni se tiene conocimiento de su comportamiento y utilidad en estas aplicaciones; por otra parte conocer el coeficiente de absorción de un material que compone un recinto, en el que una correcta dispersión acústica sea necesaria, permitirá alterar sus características de forma en que se puedan conseguir los resultados deseados.

Muchas investigaciones requieren conocer el coeficiente de absorción de materiales, porque de este depende la confiabilidad y precisión que se obtenga en sus resultados, como mediciones acústicas de recintos, investigación de nuevas tecnologías de control de ruido, diseño de recintos por medio de modelos a escala o las investigaciones sobre nuevos productos con el fin de mejorar sus características acústicas y de esta forma lograr nuevas aplicaciones de productos existentes, las cuales servirán de base y apoyo a proyectos de carácter ambiental, orientados a mejorar la calidad de vida de las personas, al tener a su alcance herramientas y procedimientos que permitan tener soluciones ante el creciente aumento del nivel de ruido de las ciudades.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General.

Diseñar y construir un dispositivo de medición del coeficiente de absorción e impedancia acústica para materiales acústicos.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Diseñar el dispositivo de medición basado en un tubo de ondas estacionarias.
- Construir el dispositivo según parámetro de diseño.
- Establecer un procedimiento confiable para determinar el coeficiente de absorción acústico de materiales escogidos, para tratamiento acústico.
- Realizar y comparar las mediciones hechas con el dispositivo, frente a tablas y registros similares.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcances.

- Construir un dispositivo de medición que proporcione el valor del coeficiente de absorción de materiales acústicos, con el cual permita desarrollar proyectos a nivel ambiental, científico, tecnológico, social, económico o político.
- Conocer el coeficiente de absorción para implementar técnicas de control de ruido.

- Utilizar material colombiano lo cual reduce los costos de tratamientos contra el ruido, todo esto permitirá que la calidad de vida de la sociedad se vea mejorada y pueda convertirse en una prioridad social.

1.5.2 Limitaciones.

- El proceso de importación de algunos de los elementos que componen el dispositivo puede tomar tiempo, obligando a cambiar o modificar algunos de los parámetros de diseño, como el rango de frecuencia de medición y su diámetro, además retrasaría la construcción del dispositivo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco Conceptual.

2.1.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL SONIDO

2.1.1.1 Definición de Sonido.

“El sonido es una alteración física en un medio (en un gas, líquido o sólido) que puede ser detectada por el oído humano, el medio por el cual viajan las ondas sonoras ha de poseer masa y elasticidad”.⁴

2.1.1.2 Generación y propagación del sonido

La generación del sonido se produce cuando una fuente vibra (El elemento generador del sonido), dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes. Esto quiere decir que las partículas no se desplazan, simplemente oscilan alrededor de su posición de equilibrio. Cuando una oscilación se propaga en un medio la relación que exista entre el sentido de la oscilación y el de la propagación, hablamos de ondas longitudinales, transversales, de torsión, etc.

⁴ HARRYS, Cyril M., Handbook of Noise Control, McGraw-Hill, New York, 1979.página 23

La propagación del sonido en el aire es en forma de ondas longitudinales, ya que el sentido de la oscilación coincide con el de la propagación de la onda, “si se considera como fuente sonora, por ejemplo, un tambor, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión, mientras que en el caso contrario, dichas partículas se separan, lo cual da lugar a una zona de enrarecimiento o dilatación”⁵ (figura 1).

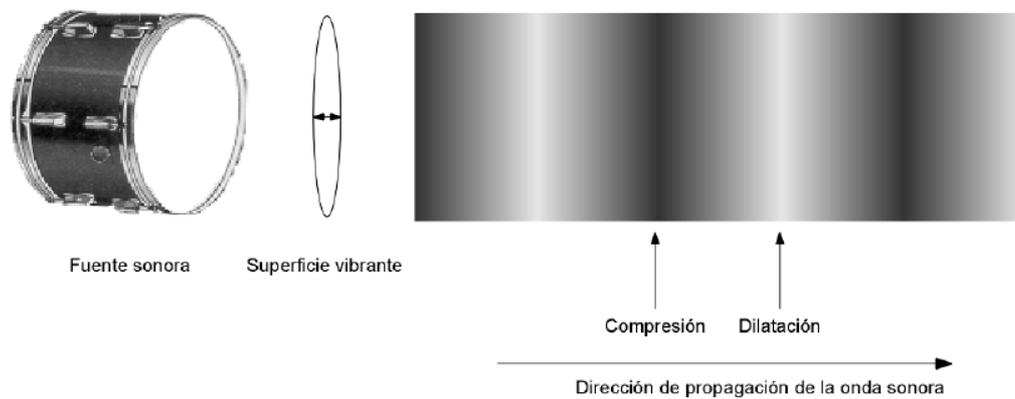


Figura. 1 Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora.

Se expresará cuantitativamente la magnitud de un campo sonoro mediante la presión sonora, en la figura 2 se observa el avance de la presión P_T , en función del tiempo, en un punto de la fuente sonora. La presión p se obtiene de la suma de la presión atmosférica estática P_0 .

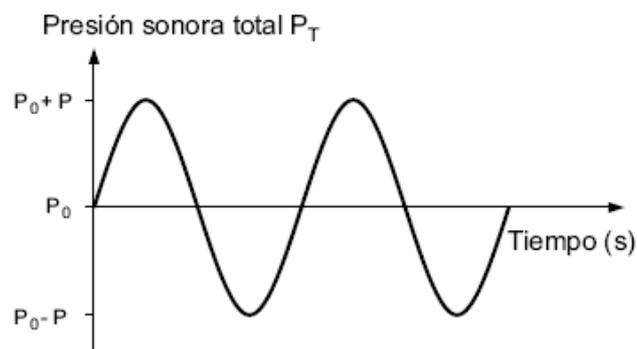


Figura. 2 Evolución de la presión sonora total P_T en función del tiempo en un punto cualquiera del espacio.

Se observan incrementos y disminuciones periódicas de presión sonora alrededor de su valor de equilibrio, correspondiente a la presión atmosférica

⁵ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 27

estática P_0 . Dichas variaciones van asociadas a los procesos de compresión y dilatación comentados anteriormente. El valor máximo de la oscilación respecto a P_0 recibe el nombre de amplitud de la presión asociada a la onda sonora, y se representa por la letra P .

2.1.1.3 Frecuencia del sonido (f)

El número de oscilaciones por unidad de tiempo que equivale a un segundo se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

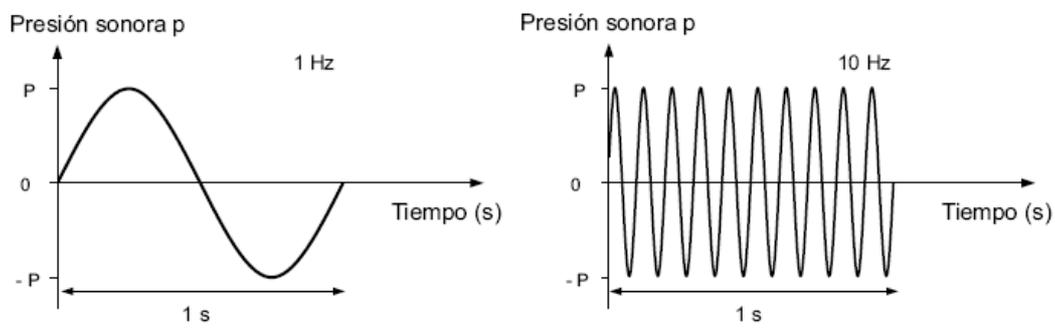


Figura 3 se observan dos ejemplos de presión sonora p asociada a oscilaciones de diferente frecuencia.

2.1.1.4 Clasificación de los sonidos

Los sonidos se dividen en deterministas que se representan por medio de una expresión matemática que indica como varía la presión sonora en función del tiempo, y los aleatorios que van asociados a vibraciones irregulares que nunca se repiten y que, por tanto, solamente se pueden describir mediante parámetros estadísticos.

2.1.1.4.1 Sonidos deterministas

2.1.1.4.1.1 Sonido periódico simple (tono puro)

Se compone de una única frecuencia (f_0) constante, por lo que su espectro es solo una raya (figura 4).

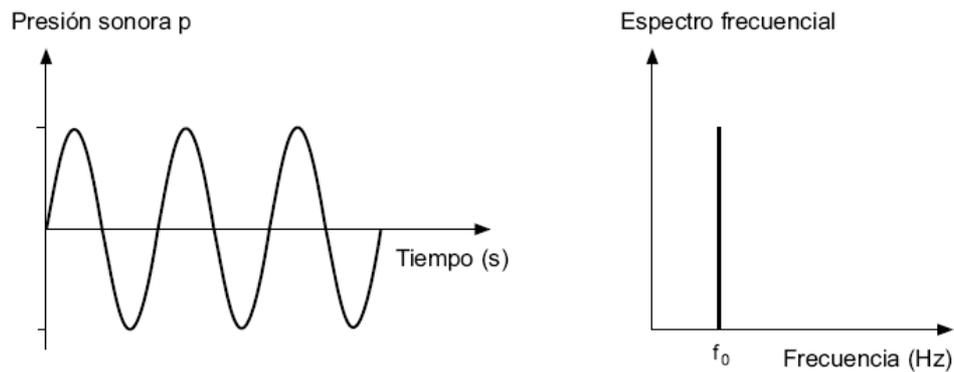


Figura. 4 Tono puro y su espectro frecuencial

2.1.1.4.1.2 Sonido periódico complejo

Sonido caracterizado por una frecuencia origen fundamental o primer armónico, y un conjunto finito (y a veces infinito) de frecuencias múltiplos de ésta, llamados armónicos.

En la figura 5 se representa un sonido de este tipo formado por una frecuencia fundamental o primer armónico (f_0) y su tercer armónico ($3f_0$).

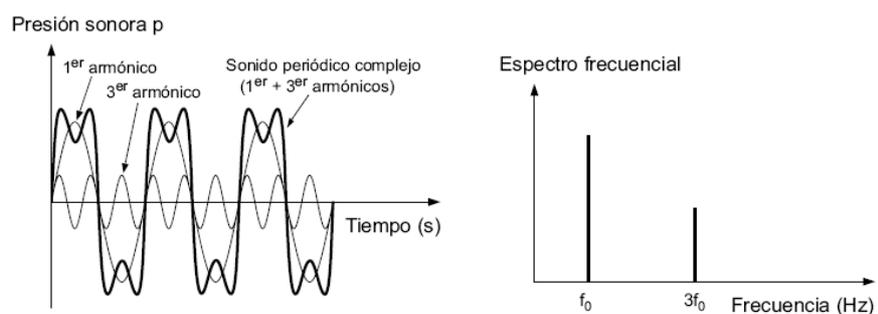


Figura 5 Sonido periódico complejo y su espectro frecuencial

2.1.1.4.2 Sonidos aleatorios

“Los sonidos aleatorios están formados por muchas frecuencias de valor impredecible. Habitualmente reciben el nombre de ruidos (ruido = sonido no deseado). En este caso, en lugar de utilizar el espectro frecuencial, se hace uso de la llamada densidad espectral de potencia, es decir, de la potencia sonora por unidad de frecuencia”. Un sonido aleatorio característico es el ruido blanco. Se define como aquel ruido que presenta una densidad espectral de potencia constante. En la figura 6 se aprecia la evolución temporal de un sonido aleatorio y su correspondiente densidad espectral de potencia.

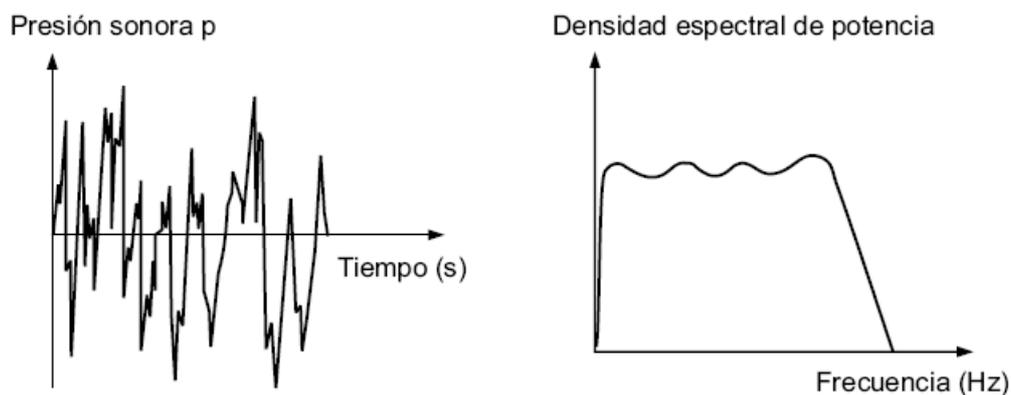


Figura 6 Sonido aleatorio y correspondiente densidad espectral de potencia

2.1.1.5 Velocidad de propagación del sonido (c)

“La velocidad de propagación del sonido (c) es función de la elasticidad y densidad del medio de propagación. Debido a que, en el aire, ambas magnitudes dependen de la presión atmosférica estática P_0 y de la temperatura, resulta que, considerando las condiciones normales de 1 atmósfera de presión y 22 °C de temperatura, la velocidad de propagación del sonido es de, aproximadamente, 345 m/s”⁶.

⁶ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 32

2.1.1.6 Longitud de onda del sonido (λ)

Es la distancia entre dos puntos consecutivos del campo sonoro que se hallan en el mismo estado de vibración en cualquier instante de tiempos.

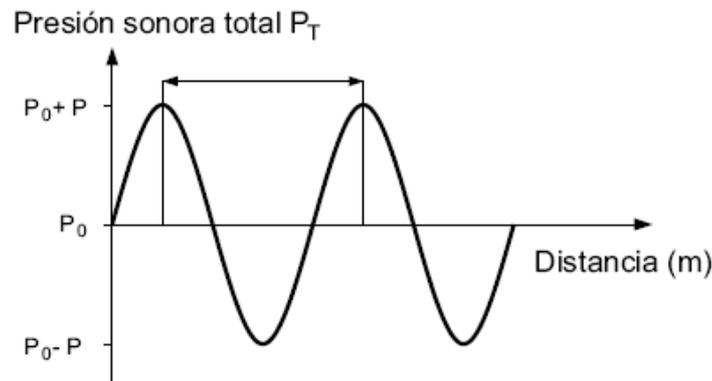


Figura 7 Longitud de onda (λ) del sonido

La relación entre las tres magnitudes: frecuencia (f), velocidad de propagación (c) y longitud de onda (λ), viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Según se observa, para cada frecuencia, la longitud de onda depende del medio de propagación, ya que es proporcional a la velocidad, y ésta varía para cada medio.

Por otro lado, se puede ver que la longitud de onda y la frecuencia son inversamente proporcionales, es decir, cuanto mayor es f menor es λ , y viceversa.

Por ejemplo, en el aire, las longitudes de onda correspondientes a la banda de frecuencias audibles se hallan situadas entre 17,25m ($f = 20$ Hz) y 1,7cm ($f = 20$ kHz).

En la figura 10 se presenta un nomograma que relaciona λ con f , suponiendo que el medio de propagación es el aire.

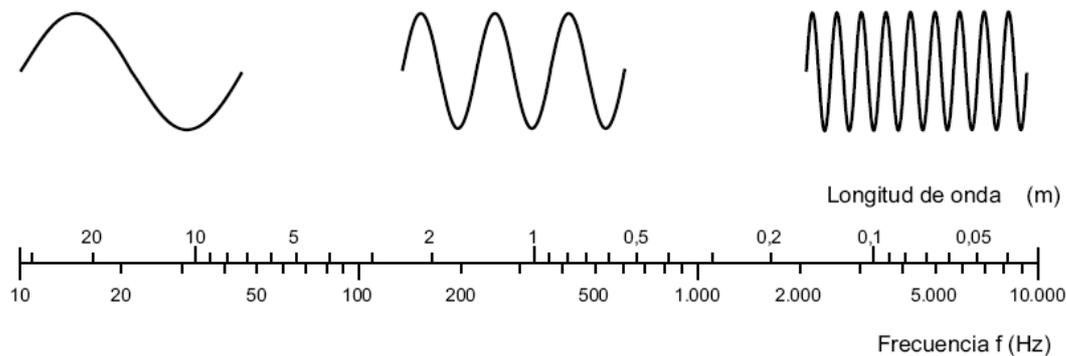


Figura 8 Relación entre longitud de onda (λ) y frecuencia (f) en el aire

2.1.1.7 Nivel de presión sonora (SPL)

“Se define la presión sonora como la variación de presión producida en un punto como consecuencia del paso de una onda sonora que se propaga a través del medio”⁷.

En principio, el valor a considerar es la diferencia entre el valor fluctuante de la presión sonora total P_T y su valor de equilibrio P^0 . Debido a la variación de dicha magnitud con el tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s. (“*root-mean-square*”).

2.1.1.8 Sonido reflejado

“Cuando una onda plana que viaja en un medio 1 se encuentra con una frontera que delimita otro medio 2, se producen dos nuevas ondas a partir de la original, cuyas amplitudes y fases son en general distintas a las de la onda incidente. Una de las ondas continua por el segundo medio, conocida como onda transmitida, mientras que la otra onda es reflejada y vuelve en sentido contrario a la onda incidente, y se le llama onda reflejada. Si p_i es la presión compleja de la onda original, y p_r y p_t las de las ondas reflejadas y transmitidas respectivamente, podemos definir los coeficientes de transmisión T y reflexión R , que en general serian complejos”⁸

⁷ MELLADO R. José Damián, Introducción a los conceptos fundamentales en acústica pag. 29

⁸ MELLADO R. José Damián, Introducción a los conceptos fundamentales en acústica pag. 15

2.1.1.9 Tiempo de reverberación RT

“Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación (de forma abreviada RT) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial”⁹.

El Tiempo de Reverberación se por frecuencia, Ello es debido a que el RT depende del Volumen de la sala, y por los coeficientes de absorción de sus superficies, Como los coeficientes de absorción de los diferentes materiales que componen cualquier local no son iguales para todas las frecuencias, las reflexiones generadas en el interior del local serán diferentes para cada frecuencia y por lo tanto el RT del local es diferente según las frecuencias.

2.1.1.10 Función de onda

“Una onda es una magnitud física que se propaga en el espacio y en el tiempo. Matemáticamente”¹⁰ esta se expresa como una función del espacio y del tiempo, la función representa las variaciones de presión que se propagan en el espacio y el tiempo formando lo que se suele conocer como campo acústico.

“La función de onda, como es válida para todos los puntos y para todos los tiempos, será función de x y de t .

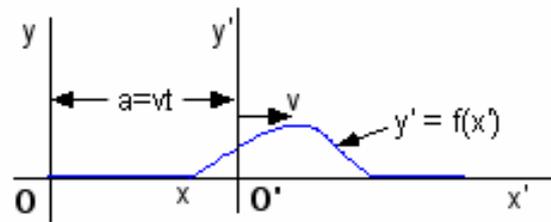
$$y = f(x, t) \quad (2)$$

Cada punto repite lo que hizo el foco en un tiempo anterior. Tenemos una cuerda por la que se propaga un pulso, Situamos la cuerda en un sistema de referencia O y el pulso alejándose del origen.

Se representará la forma del pulso en el instante $t=0$ mediante la función matemática que representa la altura frente a la distancia $y=f(x)$.

⁹ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag. 63

¹⁰ MELLADO R. José Damián, Introducción a los conceptos fundamentales en acústica pag. 3



Se Introduce un nuevo sistema O' , que se mueve con la misma velocidad del pulso v . En este nuevo sistema de referencia el pulso estará descrito por la función matemática $y' = f(x')$ que nos dará su forma en cada instante.

Las coordenadas en los dos sistemas de referencia están relacionadas entre sí:

$$y = y' \quad (3)$$

$$x = x' + a = x' + vt \quad (4)$$

$a=vt$ e igual a la separación de los sistemas de referencia, donde t es el tiempo y la función "se mueve" con velocidad v .

Por lo tanto la forma del pulso en el sistema O puede describirse por:

$$y = f(x - vt) \quad (5)$$

Y describe la propagación de una perturbación representada por la función $f(x)$, sin distorsión, a lo largo del eje X , hacia la derecha y con velocidad v . Esto equivale a conocer en el sistema de referencia O la altura "y" para cada punto "x" en cada instante (ecuación de la ordenada en función de t). Conociendo como varían las posiciones con el tiempo podemos predecir donde estarán en el futuro. Hemos logrado una expresión del tipo $y=f(x,t)$ si se diera un pulso con desplazamiento hacia la izquierda la función sería $y=f(x+a)=f(x+vt)$.

El pulso puede tener cualquier forma, onda, diente de sierra, etc., pero siempre existirá una función matemática que lo describa. Esta función matemática se llama función de onda. En el caso de una onda que se propaga en una cuerda, la función de onda representa el desplazamiento vertical de la cuerda en un punto "x" en el tiempo "t".

Describe la posición de los puntos por los que pasa la onda en función del tiempo que transcurrió desde que se inició y de la distancia al punto donde se originó. La función de onda es la solución matemática de la ecuación de onda. La función de onda se puede aplicar también a una onda longitudinal. En el gráfico inferior la perturbación que recorre un medio es un pulso y las partículas están vibrando y separándose de la posición de equilibrio.

El pulso que origina en este ejemplo una onda longitudinal es un pulso de sonido, pero el tratamiento matemático es el mismo que vimos para las transversales. El desplazamiento horizontal variable "X", es función de la posición y del tiempo: $X = f(x-vt)$ ¹¹

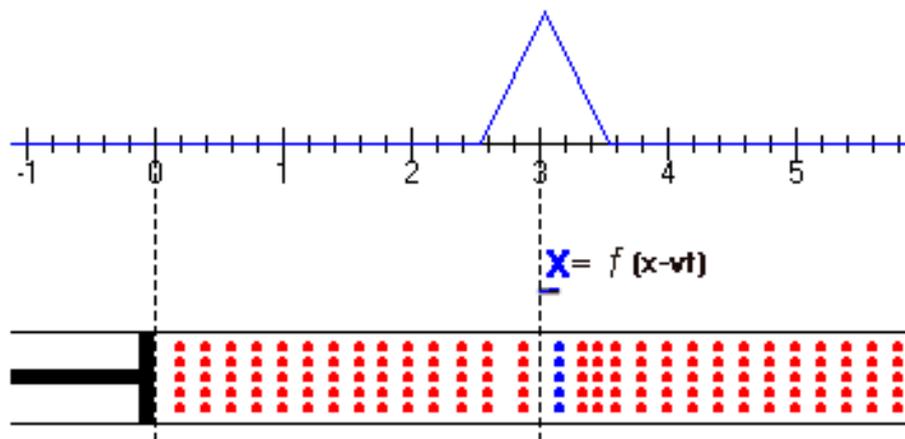


Figura 9 onda longitudinal es un pulso de sonido

2.1.1.11 Ecuación diferencial del movimiento ondulatorio

“Conociendo una propiedad física del medio en que se transmite la onda (la presión de un punto del aire, el campo eléctrico o simplemente el desplazamiento de un punto en una cuerda), podemos escribir una ecuación diferencial que exprese su comportamiento en función del tiempo.

En el desplazamiento de una cuerda arriba y abajo al pasar la onda esa propiedad es "y" (el desplazamiento vertical):

¹¹ <http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/Sonido/Sonido.html>>Características de las Ondas Acústicas

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (6)$$

Estamos describiendo un movimiento ondulatorio que se propaga a lo largo del eje X, sin distorsión y con velocidad v . Podemos comprobar que una solución de ésta ecuación diferencial es la función de onda $y = f(x - vt)$.

La función de onda armónica satisface la ecuación diferencial. La función de onda que describe cualquier movimiento ondulatorio armónico (el pulso no es armónico) que se propaga con velocidad v y sin distorsión, a lo largo del eje de abscisas es:

$$y(x, t) = A \text{sen}k(x - vt) \quad (7)$$

Esta expresión corresponde a la de una onda armónica y satisface la ecuación diferencial anterior. Podemos comprobarlo derivando dos veces, primero respecto a t y luego respecto a x :

$$\frac{\partial y}{\partial t} = A \cos k(x - vt)k(-v) = -A \cos k(x - vt) \quad (8)$$

Derivando de nuevo:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = Akv(-\text{sen}k(x - vt))k(-v) = -Ak^2v^2 \text{sen}k(x - vt) \quad (9)$$

Análogamente derivando respecto a x :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = Ak^2 \text{sen}k(x - vt) \quad (10)$$

Se cumple que¹²:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (11)$$

¹² <http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/Sonido/Sonido.html>>Características de las Ondas Acústicas.

2.1.1.12 ONDAS ESTACIONARIAS

“Las ondas estacionarias no son ondas de propagación sino distintos modos de vibración de una cuerda, de una membrana, del aire en un tubo, etc. Lo que sucede en una cuerda con ondas estacionarias, (o en cualquier otro medio), se debe al efecto de la superposición de ondas que al cruzarse dan lugar a que determinados puntos del medio estén estacionarios, que otros pasen por diferentes estados de vibración y que algunos alcancen estados de vibración máximos.

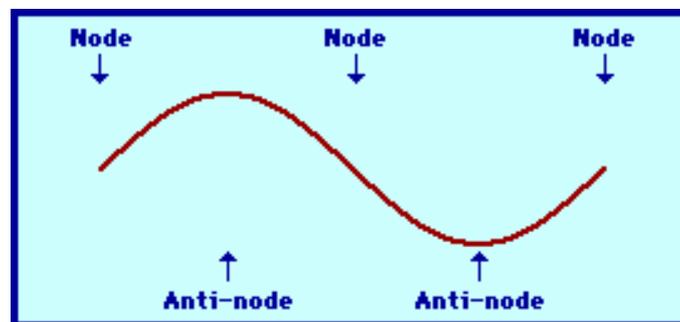


Figura 10 nodos y antinodos de una onda estacionaria

Una onda estacionaria se puede considerar como la interferencia de dos ondas de la misma amplitud y longitud de onda: una incidente que se propaga de izquierda a derecha y la otra que resulta de reflejarse esta en el extremo y se propaga de derecha a izquierda.

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \text{ de izquierda a derecha} \quad (12)$$

$$y_2 = A \sin(kx + \omega t) \text{ de derecha a izquierda} \quad (13)$$

La onda estacionaria resultante es la suma de las dos:

$$y_{\text{resultante}} = y_1 + y_2 = 2A \sin(\omega t) \quad (14)$$

Para que la función anterior sume cero la única justificación es que las amplitudes se inviertan en el punto de rebote de la onda (el punto fijo) y que una valga +A y la otra -A. Sumando las funciones y sabiendo que:

$$\text{Sen}(a) - \text{Sen}(b) = \frac{2\text{Sen}(a-b) * \text{Cos}(a-b)}{2} \quad (15)$$

Obtenemos:

$$y_{\text{resultante}} = y_1 + y_2 = 2A \text{sen}(\omega t) \text{cos}(\omega t) \quad (16)$$

Como vemos esta no es una onda de propagación, no tiene el término $(kx - \omega t)$, sino que cada punto vibra con una frecuencia angular ω y con una amplitud $2A \text{sen}(kx)$. La amplitud puede alcanzar distintos valores según la posición, x , del punto. Algunos puntos tendrán amplitud cero y no vibrarán nunca (puntos estacionarios): son los llamados nodos. Los puntos que pueden alcanzar un máximo de amplitud igual a "2A" sólo pueden hacerlo cada cierto tiempo, cuando $\text{cos}(\omega t)$ sea igual a 1.

Se llaman **nodos** a los puntos x que tienen una amplitud mínima, $2A \text{sen}(kx) = 0$, por lo que $kx = n\pi$ siendo $n = 1, 2, 3$, (recuerda que $k = 2\pi/l$), o bien, $x = l/2, l, 3l/2$. La distancia entre dos nodos consecutivos es media longitud de onda, $l/2$. Supongamos ahora una cuerda de longitud L fija en los extremos. La cuerda tiene un conjunto de modos normales de vibración, cada uno con una frecuencia característica. Las frecuencias se pueden calcular fácilmente. En primer lugar, los extremos de la cuerda deben de ser nodos ya que estos puntos se encuentran fijos. El primer modo de vibración será aquel en el que la longitud de la cuerda sea igual a media longitud de onda $L = l/2$.

Para el segundo modo de vibración -un nodo en el centro-, la longitud de la cuerda será igual a una longitud de onda, $L = l$, para el tercer modo, $L = 3l/2$, y así sucesivamente.

Podemos proceder al revés y variar las longitudes de onda, manteniendo la longitud de la cuerda fija, para obtener diferentes modos de vibración. Se producirán nodos para una cuerda de longitud "L" cuando la l de la onda tenga los valores dados por la fórmula:

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

Como la frecuencia y la longitud de onda están relacionadas con la velocidad de propagación, para hallar las frecuencias que puede tener la onda empleamos la relación $\lambda = v_T$, o bien $\lambda = v/u$.

$$v_n = \frac{n}{2L}v \quad (18)$$

En una cuerda de longitud "L" obtenemos un sonido de frecuencia fundamental dada por la fórmula al sustituir "n" por 1. También se pueden obtener los armónicos de las frecuencias dadas por la fórmula anterior para $n = 1, 2, 3, \dots$. La velocidad de propagación v de la onda está relacionada con la tensión que se aplique a la cuerda y con el tipo de cuerda. Ver velocidad de propagación de ondas transversales.

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (19)$$

¿La fórmula que indica que frecuencia debe tener una onda que rebota entre los extremos de una cuerda de longitud L y masa m atada por los extremos y tensada con una fuerza T es:

$$v_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (20)$$

Una vez encontrada la frecuencia del primer modo de vibración (frecuencia fundamental o primer armónico), se pueden encontrar rápidamente los restantes armónicos.

La frecuencia del segundo modo es el doble que la del modo fundamental, la frecuencia del tercer modo es triple, y así sucesivamente".¹³

¹³ <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html>

2.1.1.13 Ondas estacionarias en tubos abiertos o cerrados

“Los tubos de caña o de otras plantas de tronco hueco, constituyeron los primeros instrumentos musicales. Emitían sonido soplando por un extremo. El aire contenido en el tubo entraba en vibración emitiendo un sonido.

Las versiones modernas de estos instrumentos de viento son las flautas, las trompetas y los clarinetes, todos ellos desarrollados de forma que el intérprete produzca muchas notas dentro de una amplia gama de frecuencias acústicas.

El tubo de órgano es excitado por el aire que entra por el extremo inferior. El aire se transforma en un chorro en la hendidura entre el alma (una placa transversal al tubo) y el labio inferior. El chorro de aire interacciona con la columna de aire contenida en el tubo. Las ondas que se propagan a lo largo de la corriente turbulenta mantienen una oscilación uniforme en la columna de aire haciendo que el tubo suene.

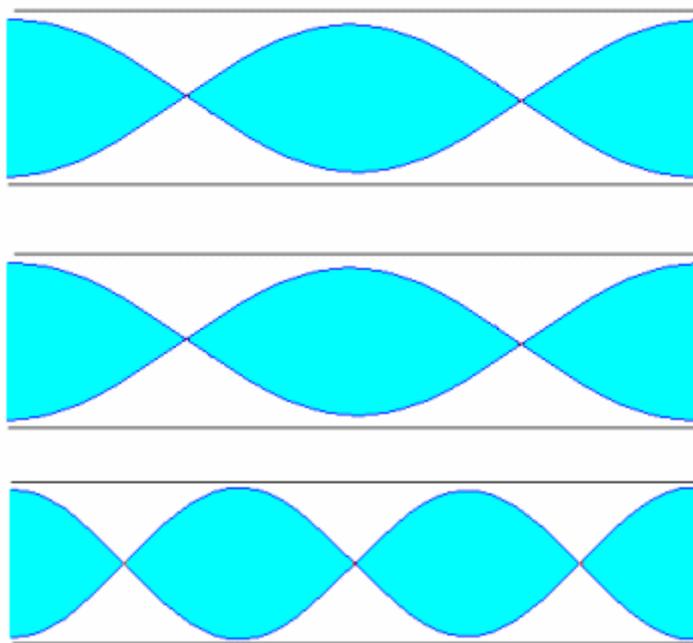


Figura 11 Tubos abiertos

Si un tubo es abierto, el aire vibra con su máxima amplitud en los extremos. En la figura, se representan los tres primeros modos de vibración

Como la distancia entre dos nodos o entre dos vientres es media longitud de onda. Si la longitud del tubo es L , tenemos que

$L = \lambda/2, L = \lambda, L = 3\lambda/2, \dots$ en general $L = n\lambda/2$, $n = 1, 2, 3, \dots$ es un número entero

Considerando que $\lambda = v_s/f$ (velocidad del sonido dividido la frecuencia)

Las frecuencias de los distintos modos de vibración responden a la fórmula

$$f = \frac{n v_s}{2 L} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (21)$$

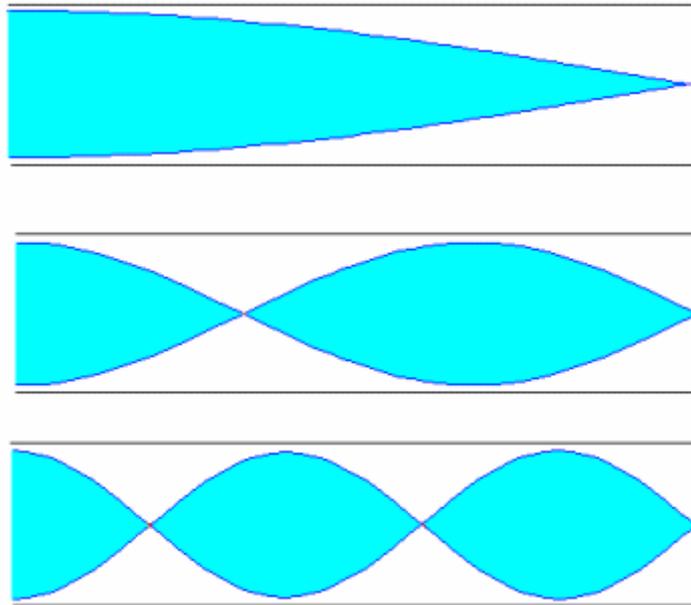


Figura 12 Tubos cerrados

Si el tubo es cerrado se origina un vientre en el extremo por donde penetra el aire y un nodo en el extremo cerrado. Como la distancia entre un vientre y un nodo consecutivo es $\lambda/4$. La longitud L del tubo es en las figuras representadas es $L = \lambda/4, L = 3\lambda/4, L = 5\lambda/4, \dots$

En general $L = (2n+1)\lambda/4$; con $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Las frecuencias de los distintos modos de vibración responden a la fórmula

$$f = \frac{2n+1}{2} \frac{v_s}{L} \quad n = 1,2,3\dots \quad (22)$$

2.1.1.14 Leyes de Bernoulli

Las fórmulas obtenidas explican las denominadas leyes de Bernoulli:

La frecuencia del sonido en un tubo es:

1. Directamente proporcional a la velocidad del sonido v_s en el gas que contiene el tubo
2. Inversamente proporcional a la longitud del tubo L
3. En un tubo abierto, se puede producir el sonido que corresponde a la frecuencia fundamental ($n=1$) y sus armónicos ($n=2, 3, 4, \dots$)
4. En un tubo cerrado, se puede producir el sonido que corresponde a la frecuencia fundamental y los armónicos impares ($2n+1=3, 5, 7, \dots$).
5. En dos tubos idénticos y con el mismo gas, uno abierto y otro cerrado, el abierto produce un sonido cuya frecuencia (fundamental) es el doble que la del cerrado¹⁴.

2.1.2 ABSORCIÓN DEL SONIDO

“En un recinto cualquiera, la reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre sus superficies límite, es determinante en la calidad acústica final del mismo. Básicamente, dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por:

- ◆ El público y las sillas.
- ◆ Los materiales absorbentes y/o los absorbentes selectivos (resonadores), expresamente colocados sobre determinadas zonas a modo de revestimientos del recinto.
- ◆ Todas aquellas superficies límite de la sala susceptible de entrar en vibración (como, por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras).
- ◆ El aire

¹⁴ <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/MovOndulatorio.html>

- ◆ Los materiales rígidos y no porosos utilizados en la construcción de las paredes y techo del recinto (como, por ejemplo, el hormigón)¹⁵.

2.1.2.1 Absorción de los materiales utilizados en la construcción de las paredes y techo de un recinto

“Dichos materiales, por regla general muy rígida y con porosidad nula, dan lugar a una mínima absorción del sonido. Si bien, desde un punto de vista físico, la disipación de energía en forma de calor, y por tanto la absorción del sonido, se produce en las capas de aire adyacentes a cada una de las superficies consideradas, a efectos prácticos, dicho fenómeno habitualmente se representa en forma de coeficientes de absorción asignados a dichas superficies. Su efecto es únicamente apreciable cuando no existe ningún material absorbente en el recinto, ya sea en forma de revestimiento de alguna de sus superficies, o bien de público presente en el mismo. Es el caso, por ejemplo, de las mencionadas cámaras reverberantes, especialmente diseñadas para obtener tiempos de reverberación muy altos.

En la tabla 2 se indican los valores de los coeficientes de absorción α_{SAB} de una serie de materiales utilizados comúnmente en la construcción de recintos.

Tabla 1. Coeficientes de absorción α_{SAB} de materiales habitualmente utilizados en la construcción de recintos

FRECUENCIA (HZ)	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
Bloques de hormigón pintados	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Ladrillo revestido con yeso	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Según se observa, si bien todos los valores son extremadamente bajos, el material con una mayor rugosidad presenta unos coeficientes de absorción ligeramente más elevados. Ello es debido a que su superficie es mayor y, por tanto, la capa de aire adyacente donde se produce la disipación de energía también lo es¹⁶.

¹⁵ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 71

¹⁶ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 73

2.1.2.2 Absorción del aire

“La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas ($\geq 2\text{kHz}$) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m . En la figura 13 se presenta un conjunto de gráficas mediante las que es posible determinar el valor del producto $4m$ en condiciones normales de presión y temperatura ($P_0 = 105\text{Pa}$ y 20°C), para cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire.

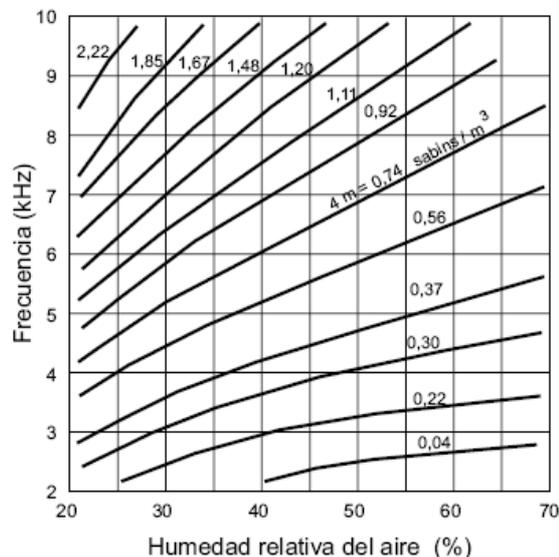


Fig. 13 Gráficas para la determinación del producto $4m$ (m es la constante de atenuación del sonido en el aire)

A partir del conocimiento del producto $4m$ y del volumen V del recinto, es posible calcular el valor del tiempo de reverberación RT del mismo, teniendo en cuenta la atenuación producida por el aire. La fórmula a utilizar es la de Sabine completa:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{\text{tot}} + 4mV} \quad (\text{en s}) \quad (23)$$

Siendo A_{tot} la absorción total del recinto (en sabins).

Por ejemplo, considerando una humedad relativa del 25% y la frecuencia de 4 kHz, el producto $4m$ valdrá 0,56 sabins/m³. Por lo tanto, para un recinto de volumen 5.000 m³, la absorción producida por el aire a dicha frecuencia será¹⁷:

$$4mV = 2.800 \text{ sabins} \quad (24)$$

2.1.2.3 Absorción de las superficies vibrantes

“La presencia en una sala de superficies límite susceptibles de entrar en vibración, como por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras, también da lugar a una cierta absorción que en principio conviene tener presente. En el caso de los materiales absorbentes, la mayor absorción se produce de una forma totalmente controlada y va asociada a un proceso de disipación de energía, es decir, de conversión de energía sonora en calor. En cambio, en el caso de una superficie vibrante, una parte de la energía vibracional es radiada hacia el exterior. Aunque en realidad la energía no es disipada, el efecto es equivalente a una verdadera absorción, ya que dicha energía es sustraída de la energía sonora incidente. En este sentido, una ventana abierta puede considerarse como un absorbente muy efectivo, ya que actúa a modo de sumidero de toda la energía sonora incidente.

La expresión aproximada del coeficiente de absorción α de una superficie vibrante, en función de la frecuencia, es:

$$\alpha = \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right) \quad (25)$$

Donde:

- ρ_0 = Densidad del aire = 1,18 Kg/m³
- ω = $2\pi f$
- f = Frecuencia (en Hz)
- M = Masa por unidad de superficie (en Kg/m²)

Dicha aproximación es solamente válida en el caso habitual de que el numerador sea pequeño comparado con el denominador.

¹⁷ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 73

Según se puede observar, la absorción sólo puede llegar a ser mínimamente significativa a bajas frecuencias, aunque los valores habituales de α son siempre pequeños. A título de ejemplo, el coeficiente de absorción de un cristal de 4 mm de espesor ($M \approx 9 \text{ Kg/m}^2$) a la frecuencia de 125 Hz es únicamente de 0,01.

Por otra parte, el hecho de que una pared entre en vibración puede dar lugar a una falta de aislamiento acústico entre el espacio considerado y el exterior¹⁸.

2.1.3 Materiales absorbentes

“La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimientos de las superficies límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. En consecuencia, la correcta elección de los mismos permitirá obtener, en cada caso, la absorción más adecuada en todas las bandas de frecuencias de interés. Existen dos tipos genéricos de elementos específicamente diseñados para producir una determinada absorción: los simplemente denominados materiales absorbentes, y los llamados absorbentes selectivos o resonadores. En ambos casos, cuando la absorción en una o más bandas de frecuencias es muy elevada, puede ocurrir que el coeficiente de absorción medido α_{SAB} sea superior a 1. Ello no debe conducir a la interpretación totalmente errónea y carente de sentido desde un punto de vista físico de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente. La justificación proviene de la existencia de un efecto de difracción que hace que la superficie efectiva de la muestra de material utilizada para la medida sea mayor que la superficie real.

Los materiales absorbentes se utilizan generalmente para conseguir uno de los siguientes objetivos:

- Obtención de los tiempos de reverberación más adecuados en función de la actividad (o actividades) a la cual se haya previsto destinar el espacio objeto de diseño
- Prevención o eliminación de ecos
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.)

Estos materiales presentan un gran número de canales a través de los cuales la onda sonora puede penetrar. La disipación de energía en forma de calor se

¹⁸ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 74

produce cuando la onda entra en contacto con las paredes de dichos canales. Cuanto mayor sea el número de canales, mayor será la absorción producida. El correspondiente coeficiente de absorción α es asignado a la superficie del material.

En la figura 14 se representa dicho proceso de forma gráfica y simplificada. Se parte de un material poroso y homogéneo, situado delante de una pared rígida.

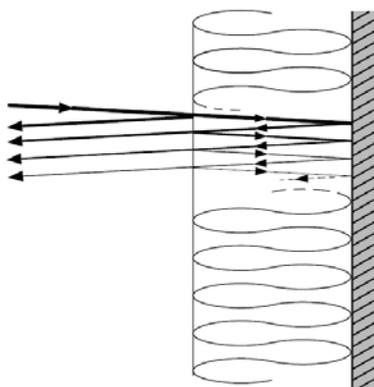


Figura. 14 Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida

La onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía permanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior a través del material. Desde un punto de vista teórico, este proceso continúa indefinidamente. Esta explicación cualitativa sirve para demostrar que la onda sonora reflejada por el material puede imaginarse como compuesta por un número ilimitado de componentes sucesivas, cada una más débil que la precedente a causa de la considerable atenuación que tiene lugar en el interior del material.

El mencionado mecanismo de absorción del sonido es propio de todos los materiales porosos, siempre y cuando los poros sean accesibles desde el exterior. Normalmente tales materiales están formados por sustancias fibrosas o granulares a las que se les confiere un grado suficiente de compacidad a través de un proceso de prensa o de tejeduría. Los materiales absorbentes comerciales de este tipo se manufacturan básicamente a partir de¹⁹:

- Lana de vidrio.
- Lana mineral.
- Espuma a base de resina de melamina.
- Espuma de poliuretano.

¹⁹ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 75

2.1.3.1 Coeficiente de reducción acústica NRC

“En ocasiones, en lugar de hacer uso de todos los valores de los coeficientes de absorción por bandas de frecuencias, el grado de absorción acústica de un material absorbente se indica con un único coeficiente. Dicho coeficiente, denominado coeficiente de reducción acústica NRC (“Noise Reducción Coefficient”), se define como la media aritmética de los coeficientes de absorción correspondientes a las bandas centradas en 250Hz, 500Hz, 1kHz y 2kHz:

$$NRC = \frac{\alpha(250Hz) + \alpha(500Hz) + \alpha(1kHz) + \alpha(2kHz)}{4} \quad (26)$$

Si bien presenta la ventaja de la simplicidad, se desaconseja su utilización en la fase de diseño acústico, debido a que dicho diseño se lleva a cabo teniendo en cuenta seis bandas de frecuencias por separado (de 125Hz a 4Hz)²⁰.

2.1.3.2 Variación de la absorción en función del espesor del material

“Siguiendo con la hipótesis anterior de que el material absorbente está colocado delante de una pared rígida y partiendo de que su espesor inicial es D, al aumentar dicho espesor también aumenta la absorción que produce, especialmente a frecuencias bajas y medias. A continuación se expone el motivo por el cual existe dicho incremento de absorción con el espesor.

En primer lugar, es preciso tener en cuenta que la absorción es baja a todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor D es mucho menor que la longitud de onda λ' del sonido dentro del material:

$$D \ll \lambda' \quad (27)$$

En efecto, el hecho de que la pared sea rígida obliga a que las partículas de aire situadas en sus inmediaciones no se muevan, es decir, a que su velocidad sea nula. Además, al alejarse de la pared, los valores de dicha velocidad seguirán siendo próximos a cero, ya que $D \ll \lambda'$. En la figura 15 se observa la variación de la amplitud de la velocidad de las partículas de aire “u” en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D \ll \lambda'$.

²⁰ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 77

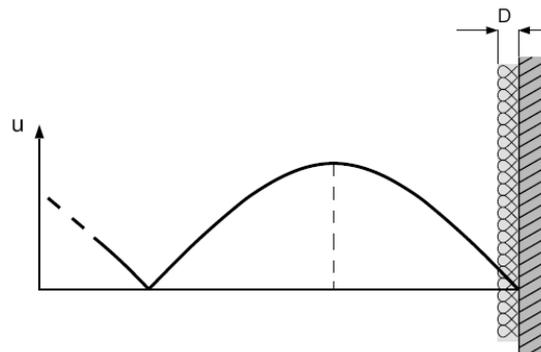


Figura 15 Evolución de la amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D \ll \lambda'$)

Al ser dicha velocidad tan baja en todos los puntos del material absorbente, la fricción de las partículas de aire con las paredes de los canales del material es reducida y, en consecuencia, la transformación de energía sonora en energía calorífica es mínima. En cambio, a medida que la frecuencia aumenta, la longitud de onda λ' disminuye, con lo cual el espesor D será cada vez mayor en comparación con λ' . Ello significa que la velocidad “u” dentro del material irá aumentando, la energía disipada se verá incrementada y, por lo tanto, la absorción será mayor.

En la figura 16 se muestra la variación de la velocidad de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida, para una frecuencia tal que $D = \lambda'/4$.

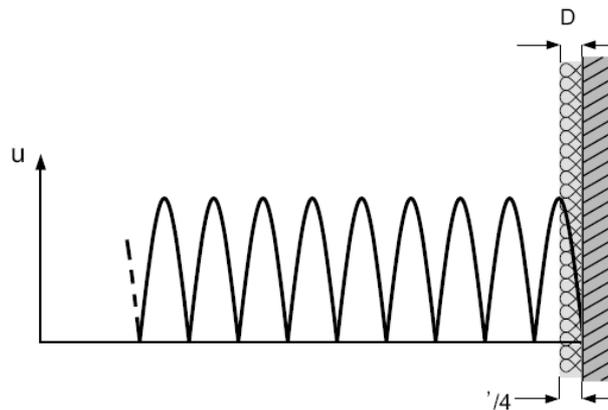


Figura 16 Evolución de la amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared rígida ($D = \lambda'/4$)

2.1.3.3 Variación de la absorción en función de la porosidad del material

“Partiendo de la misma hipótesis anterior en cuanto a la situación del material, al aumentar su porosidad también aumenta la absorción a todas las frecuencias. Este efecto era de esperar, ya que la penetración de la onda sonora incidente es mayor a medida que se incrementa el grado de porosidad.

En la figura 17 se observa la evolución del coeficiente de absorción en función de la frecuencia de un mismo material con tres grados de porosidad diferentes, en el supuesto de que la onda sonora se vea sometida a una fuerte atenuación en el interior del material”²¹.

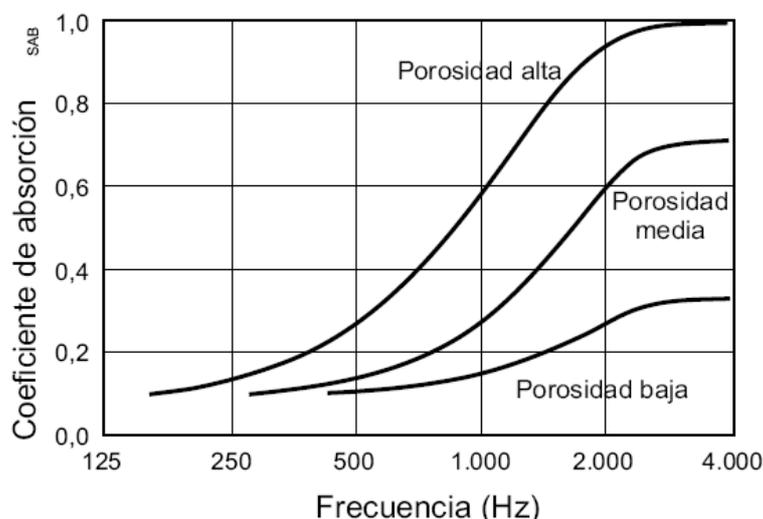


Figura 17 Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad

2.1.3.4 Variación de la absorción en función de la densidad del material

“Si la densidad del material es baja, existen pocas pérdidas por fricción y, en consecuencia, la absorción es pequeña. A medida que la densidad va aumentando, se produce un incremento progresivo de absorción hasta llegar a un valor límite, a partir del cual la absorción disminuye, debido a que existe una menor penetración de la onda sonora en el material, es decir, una mayor reflexión de energía.

²¹ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 79

Desde un punto de vista práctico, es aconsejable que los materiales absorbentes utilizados en el acondicionamiento acústico de recintos tengan una densidad situada entre, aproximadamente, 40 y 70 Kg/m³, no debiéndose superar en ningún caso los 100 Kg/m³.

En la figura 18 se muestran los valores de los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m³, respectivamente”²².

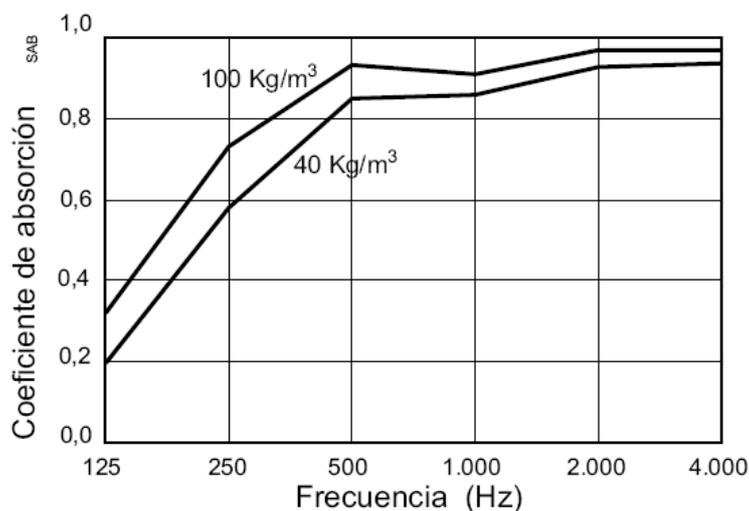


Figura. 18 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60 mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m³

2.1.3.5 Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida

“Si se pretenden obtener coeficientes de absorción elevados a bajas frecuencias, no es imprescindible hacer uso de materiales muy gruesos. Basta con utilizar un material con un espesor medio y colocarlo a una cierta distancia de la pared rígida, sabiendo que la máxima absorción se producirá a aquella frecuencia para la cual la distancia “d” del material a la pared sea igual a $\lambda/4$ (en este caso, λ es la longitud de onda del sonido cuando se propaga a través del aire existente entre el material y la pared). Ello es debido a que la amplitud de la velocidad de las partículas de aire es máxima para $d = \lambda/4$ (figura 27)”²³.

²² ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 80

²³ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 81

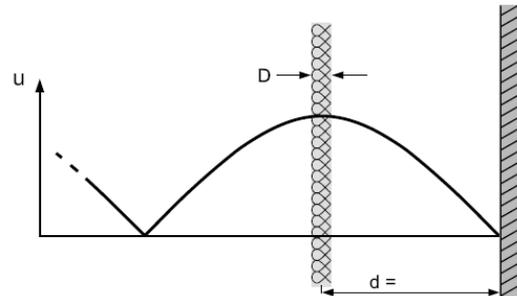


Figura 19 Amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d = \lambda/4$

Cuanto mayor sea “d”, menor será la frecuencia a la que la absorción será máxima. Por lo tanto, para aumentar la absorción a bajas frecuencias, es preciso incrementar la separación entre el material y la pared. De todas formas, dicha mejora se ve contrarrestada por una disminución de absorción a frecuencias más elevadas.

En la figura 20 se muestran los coeficientes de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m³ de densidad, montada de dos maneras distintas: sobre una pared rígida y a una distancia de 50 mm de la misma. Según se observa, con el segundo sistema

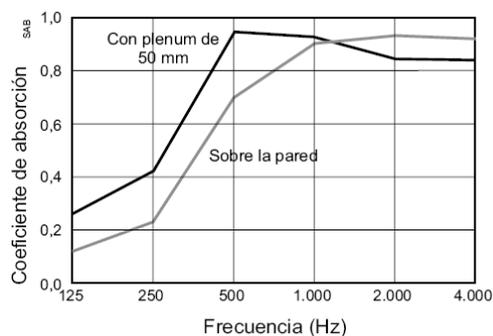


Figura. 20 Coeficientes de absorción de una lana de roca de 30 mm de espesor y 46 Kg/m³ de densidad, montada: a) sobre una pared de hormigón; b) a una distancia de 50 mm de la pared

de montaje es posible obtener un coeficiente de absorción de 0,95 a la frecuencia de 500 Hz, mientras que con el primero dicho valor no se alcanza

hasta los 2 kHz. En la situación límite de que el espesor del material tienda a cero, el comportamiento del mismo es análogo al de una tela porosa colocada a una distancia “d” de una pared rígida y paralela a la misma. En tal caso, y partiendo de la hipótesis teórica de que el material es tan pesado que no vibra bajo la influencia de la onda sonora incidente, los valores del coeficiente de absorción α oscilan de forma periódica entre un máximo y un mínimo.

En la figura 29 se muestra la evolución de α en función de d/λ , para tres valores diferentes de la resistencia de flujo r_s (se define como la relación entre la diferencia de presiones correspondientes a las dos caras del material y la velocidad del flujo de aire que atraviesa sus poros), suponiendo que la onda sonora incide perpendicularmente sobre el material.

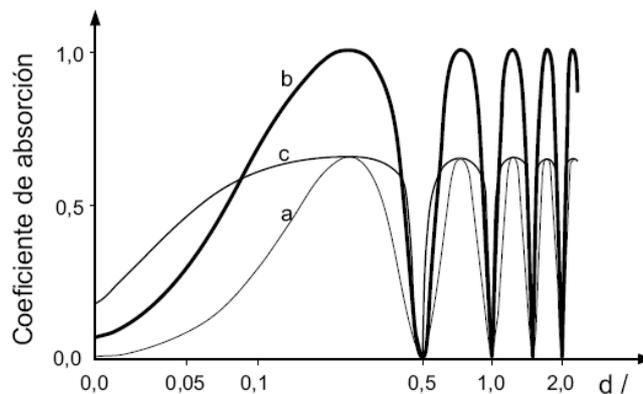


Figura. 21 Coeficientes de absorción de una tela porosa situada a una distancia “d” de una pared rígida, en función de d/λ , para los siguientes valores de r_s : a) $r_s = 0,25 \eta_0 c$; b) $r_s = \eta_0 c$; c) $r_s = 4 \eta_0 c$

La resistencia de flujo r_s engloba todas las pérdidas de energía que tienen lugar en el material. Según se puede observar, la máxima absorción se produce a aquellas frecuencias para las cuales “d” es un múltiplo impar de $\lambda/4$, dependiendo su valor del valor de r_s . En cambio, la mínima absorción (absorción nula) tiene lugar a todas las frecuencias para las que “d” es un múltiplo par de $\lambda/2$. Ello también es lógico ya que, a dichas distancias, la velocidad de las partículas de aire en el plano del material es cero y la disipación de energía sólo es posible si el aire situado en los poros del mismo está en movimiento.

Debido a que la mayoría de materiales no son lo suficientemente pesados como para garantizar la ausencia completa de vibraciones, las características de absorción pueden diferir de las expuestas anteriormente. De todas formas, en general se pueden considerar válidas. Por otro lado, en la práctica, se recomienda colocar el material en forma de zigzag con objeto de tener una

distancia variable entre el mismo y la pared y, de esta forma, suavizar las irregularidades del coeficiente de absorción.

A modo de ejemplo, en la figura 30 se muestran los coeficientes de absorción de una cortina fruncida al 180%, montada de dos formas distintas: adosada a la pared y con una separación media de 14 cm de la misma. Como cabía esperar, al separar la cortina de la pared aumenta la absorción a bajas frecuencias y, además, el alto porcentaje de fruncido suaviza la curva de absorción obtenida. Otro ejemplo es el mostrado en la figura 2.31. Se trata de un material absorbente a base de lana de vidrio moldeada de tal manera que la distancia del mismo a la pared es variable. Con este diseño se consiguen unos valores del coeficiente de absorción en función de la frecuencia más regulares que si el material fuese plano.

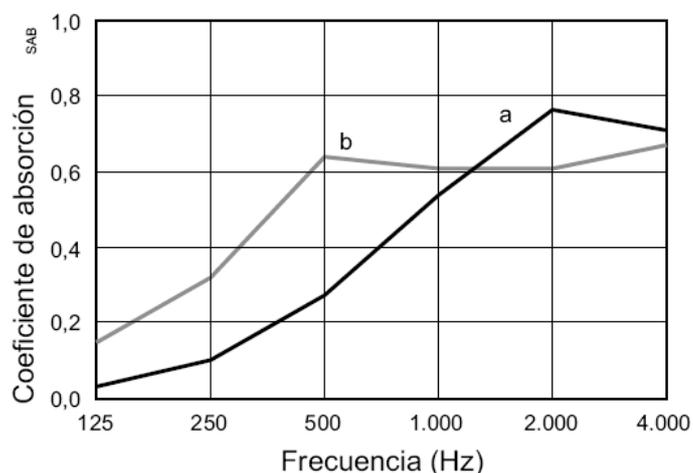


Figura. 22 Coeficientes de absorción en función de la frecuencia de una cortina fruncida al 180% montada:
a) Sobre la pared; b) separada, en promedio, 14 cm de la misma

Finalmente conviene tener presente que, con independencia del grosor del material, cuando éste se separa de forma ostensible de la pared, todos los razonamientos anteriores dejan de ser válidos. En tal caso, es necesario tratar los espacios situados a ambos lados del material como dos cavidades acopladas”.²⁴

²⁴ ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, pag 81

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO.

- ISO 10534-1 medición del coeficiente de absorción en tubo de ondas estacionarias.

2.3 MARCO TEÓRICO.

2.3.1 Medición del coeficiente de absorción

“Asuma que un tubo tiene un área de sección transversal S y longitud L son drive por un pistón en $x=0$. El tubo se termina en $x=L$ por una impedancia mecánica Z_{mL} . Si el pistón vibra armónicamente a una frecuencia suficientemente baja que solo se propagan ondas planas entonces la presión sonora en el tubo puede ser de esta forma.

$$p = \mathbf{A}e^{i[\omega t + k(L-x)]} + \mathbf{B}e^{i[\omega t - k(L-x)]} \quad (28)$$

Donde A y B son determinados por las condiciones de frontera en $x=0$ y $x=L$. usando la ecuación de Euler's uno puede obtener la velocidad de partícula en el tubo.

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (29)$$

$$\vec{u} = \frac{1}{\rho c} \left(\mathbf{A}e^{i[\omega t + k(L-x)]} - \mathbf{B}e^{i[\omega t - k(L-x)]} \right) \quad (30)$$

La impedancia acústica de una onda plana en un tubo puede ser expresada como

$$Z_A(x) = \frac{P}{\vec{u}S} = \frac{\rho c}{S} \left[\frac{\mathbf{A}e^{ik(L-x)} + \mathbf{B}e^{-ik(L-x)}}{\mathbf{A}e^{ik(L-x)} - \mathbf{B}e^{-ik(L-x)}} \right] \quad (31)$$

La impedancia mecánica en $x=L$ puede ser escrita en términos de impedancia acústica así:

$$\mathbf{Z}_{mL} = S^2 \mathbf{Z}_A = \rho c S \left[\frac{\mathbf{A} + \mathbf{B}}{\mathbf{A} - \mathbf{B}} \right] = \rho c S \left[\frac{1 + \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}}{1 - \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{A}}} \right] \quad (32)$$

O

$$\mathbf{A} = A \quad \mathbf{B} = Be^{i\theta} \quad (33)$$

Entonces

$$Z_{mL} = \rho c S \left[\frac{1 + \frac{B}{A} e^{i\theta}}{1 - \frac{B}{A} e^{i\theta}} \right] \quad (34)$$

De esta manera, se da la relación entre amplitud incidente y reflejada, y el ángulo de fase θ , la impedancia mecánica de la muestra puede ser obtenida. Sustituyendo (5) en (1) y solucionando para la amplitud de presión $P=|\mathbf{p}|$ de la onda, uno obtiene

$$P = |\mathbf{p}| = \left\{ (A+B)^2 \cos^2 \left[k(L-x) - \frac{\theta}{2} \right] + (A-B)^2 \sin^2 \left[k(L-x) - \frac{\theta}{2} \right] \right\}^{1/2} \quad (35)$$

Esta amplitud de presión es mostrada abajo. La curva punteada representa el caso cuando no hay absorción; la onda es 100% reflejada. La curva continua representa el caso cuando ocurre algo de absorción.

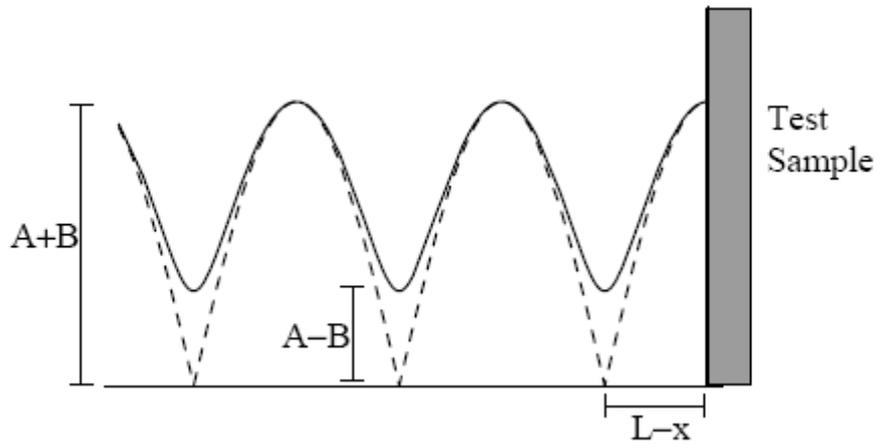


Figura 23 SWR

Para una onda de guía circular (tubo) lleno de aire, las altas frecuencias en que solo ondas planas podrán propagarse es dado por

$$f_{\max} \approx \frac{101}{a} \quad (36)$$

Donde a es el radio de el tubo, para un tubo de 10cm usado en este experimento $f_{\max} = 2000\text{Hz}$.

La amplitud de presión en un antinodo (máxima presión) es $A+B$, y la amplitud de presión en un nodo (minina presión) es $A-B$, no es posible medir A o B directamente. Sin embargo podemos medir $A+B$ y $A-B$ usando el tubo de ondas estacionarias.

Se define la relación de presión máxima con presión mínima como la standing wave ratio

$$SWR = \frac{A + B}{A - B} \quad (37)$$

Puede ser arreglada para proporcionar el coeficiente de absorción de energía sonora.

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (38)$$

La Presión mínima A ocurre cuando

$$\cos\left[k(L - x) - \frac{\theta}{2}\right] = 0 \quad \text{y} \quad \sin\left[k(L - x) - \frac{\theta}{2}\right] = 1 \quad (39)$$

Que requiere que

$$k(L - x) - \frac{\theta}{2} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\pi \quad (40)$$

O

$$\theta = 2k(L - x) - (2n - 1)\pi \quad (41)$$

Donde la cantidad (L-x) es igual a la distancia entre la muestra y el primer mínimo de presión (n=1).

La impedancia mecánica compleja de la muestra de prueba es obtenida al sustituir (41) y (38) en (34). La impedancia mecánica de la muestra de prueba puede ser una función complicada de frecuencia, y este puede ser necesario para repetir la medición anterior sobre el rango de frecuencias de interés. Donde un largo número de frecuencias es medido, esto es inconveniente e innecesario para llevar a cabo todos los cálculos anteriormente. En cambio, el uso de un calculo (Elmore and Heald, Physics of Waves, Appendix B, (Dover reprint, 1985). Un mapa nomo gráfico, permite determinar rápidamente las partes reales e imaginarias de la impedancia desde de la medición de SWR y la posición del nodos mas cercano de la muestra.

El coeficiente de energía sonora para la muestra de prueba par una frecuencia esta dada por

$$\alpha = 1 - R^2 = 1 - \frac{(SWR - 1)^2}{(SWR + 1)^2} \quad (42)$$

Como fue el caso para la impedancia el coeficiente de absorción puede estar en función de la frecuencia y mediciones sobre un rango de frecuencia de interés puede ser requerido”.²⁵

2.3.2 DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA

“Por medio del ábaco de Smith, se determina la relación:

$$R = \frac{B}{A} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad (43)$$

A partir de

$$R = \sqrt{1 - \alpha} \quad (44)$$

Se anotaran las distancias desde la muestra al primer y segundo mínimo (y_2 e y_1), $y_2 - y_1 = \lambda/2$.

De la definición de impedancia acústica sabemos que ésta puede ser perfectamente determinada conociendo el factor de reflexión R y su ángulo de fase Δ .

$$\frac{z}{\rho_0} = \frac{1 + Re^{j\Delta}}{1 - Re^{j\Delta}} = a + jb \quad (45)$$

El Angulo de fase se puede determinar por medio de la ecuación:

²⁵ Daniel A. Russell, Absorption Coefficients and Impedance Science and Mathematics Department, GMI Engineering & Management Institute, Flint, MI, 48504.

$$\Delta = \left(\frac{x}{\lambda} - 1 \right) \pi \quad (46)$$

x es la distancia al primer mínimo, o sea y_1 y que $\lambda/4 = (y_2 - y_1)/2$:

$$\Delta = \left(\frac{2y_1}{y_2 - y_1} - 1 \right) \pi \quad (47)$$

Insertando los valores de R y Δ en el ábaco de Smith se determina la componente real e imaginaria de la impedancia acústica específica, se dibuja primero el segmento que une al centro del ábaco con el valor de Δ^2 sobre este segmento se lleva el valor de R, de acuerdo a la escala que se indica debajo del ábaco".²⁶

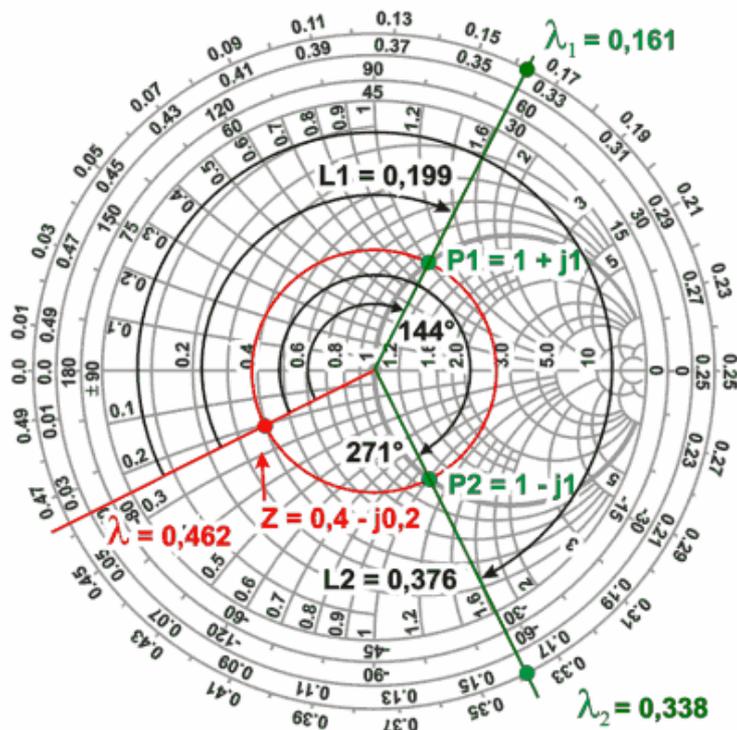


Figura 24 Ábaco de Smith

²⁶ Bruel & Kjaer, Teletechnical Review, Standing Wave Apparatus, pag.11.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.

El enfoque dado a esta tesis es Empírico-analítico, ya que se fundamenta en la construcción de un prototipo para medir coeficiente de absorción de materiales, que será diseñado y construido por los investigadores de esta tesis.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

El campo temático de la investigación se enfoca en la acústica, de la sub línea de sonido de la facultad de ingeniería, del cual se desprende la línea de investigación Tecnologías actuales y sociedad.

La línea de investigación a la cual pertenece el proyecto corresponde a tecnologías actuales y sociedad, ya que este proyecto ofrece la oportunidad a una gran parte de la sociedad de mejorar su calidad de vida por medio de diseños acústicos apropiados, que se ajustan a los requerimientos actuales de un mercado en crecimiento, brindando la posibilidad de que más personas puedan acceder a una solución ante problemas de contaminación acústica.

3.3 TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.

Para medir el coeficiente de absorción se emplea como instrumento de medición el Osciloscopio y un micrófono, con el cual se tomaran diferentes lecturas de un mismo material. La validez de un instrumento de medición es aceptada cuando mide aquello a lo que esta destinado, en este caso el Osciloscopio proporcionará lecturas de voltaje; variable importante para la determinación del coeficiente de absorción de sonido.

Al medir una magnitud un cierto número de veces con el mismo instrumento y en las mismas condiciones, se encontrará que los valores difieren entre sí en pequeñas cantidades, esto se debe a muchísimos factores fuera del control del experimentador estarán influyendo en la determinación, tales como temperatura, presión, movimiento de los soportes, etc. Estos errores no previsible y de origen prácticamente indeterminados. Para su estimación es necesario hacer un número más o menos grande de observaciones. La teoría estadística de los errores se basa en los siguientes postulados fundamentales.

1° El valor medio o promedio aritmético de una serie de observaciones realizadas en iguales condiciones.

$$X = \frac{1}{n} (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (48)$$

Donde los X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) son los n valores medidos, X es el valor más probable, es decir, que más se acerca al valor verdadero de la magnitud que se está midiendo.

2° Es igualmente probable cometer errores del mismo valor absoluto y distinto signo, es decir, que en una serie de observaciones, realizadas en idénticas condiciones, hemos cometido diez veces un error de $+0,2$ cometeremos aproximadamente diez veces el error $-0,2$. Esto ya lo tuvimos en cuenta al considerar el error de una determinación y ponerle el doble signo.

3° En una serie de observaciones los errores de pequeño valor absoluto son los más probables.

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

Corresponde a materiales que tienen un uso específico en aplicaciones acústicas, estos poseen valores de coeficiente de absorción dados por el fabricante, son fabricados a base de lana de vidrio con diferentes compuestos.

Material 1 ISOVER ANDINA “CORAL PLUS” 25mm

Techo acústico de lana mineral con velo de vidrio moteado. Cara oculta reforzada con velo de vidrio.

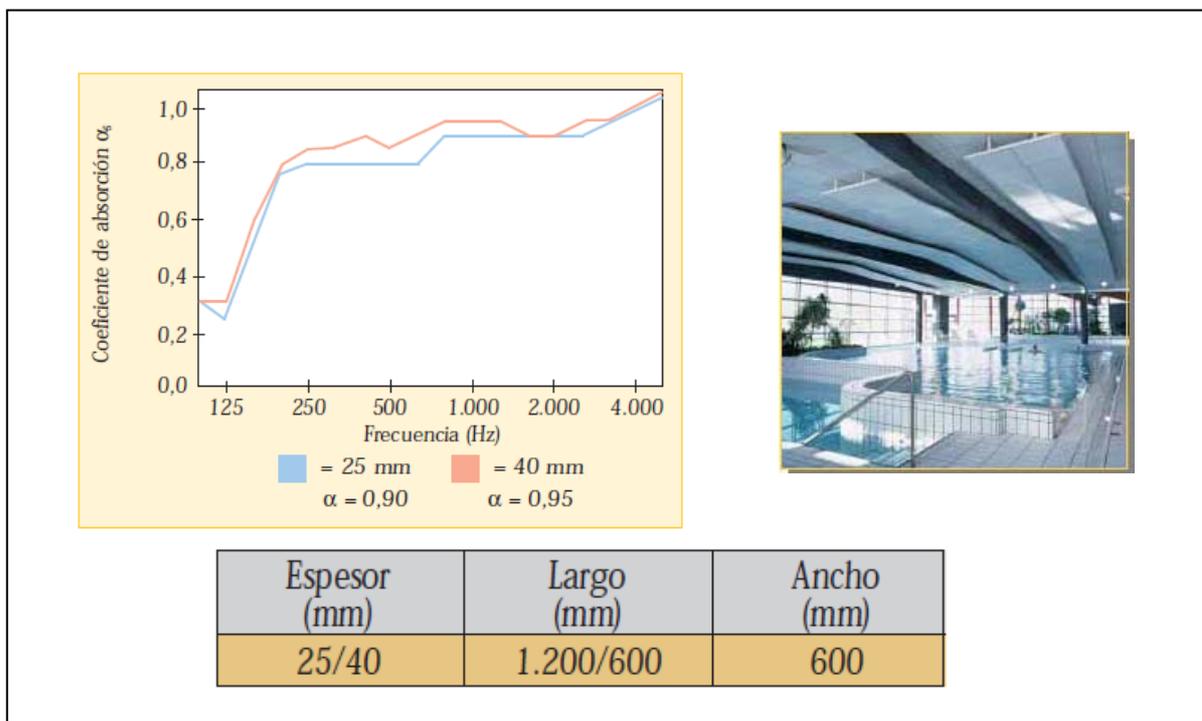


Figura 25 ISOVER ANDINA “CORAL PLUS” 25mm

Material 2 ISOVER ACUSTIVER P/VN “ARENA ABSORCIÓN” 25 mm

Panel semirrígido de lana mineral arena, revestido por una cara con un velo de vidrio de color negro.

Aplicaciones

Absorbente acústico en techos perforados, dimensiones adaptadas a los diferentes tipos de bandejas metálicas. Rapidez de montaje, construcción de baffles acústicos y pantallas.

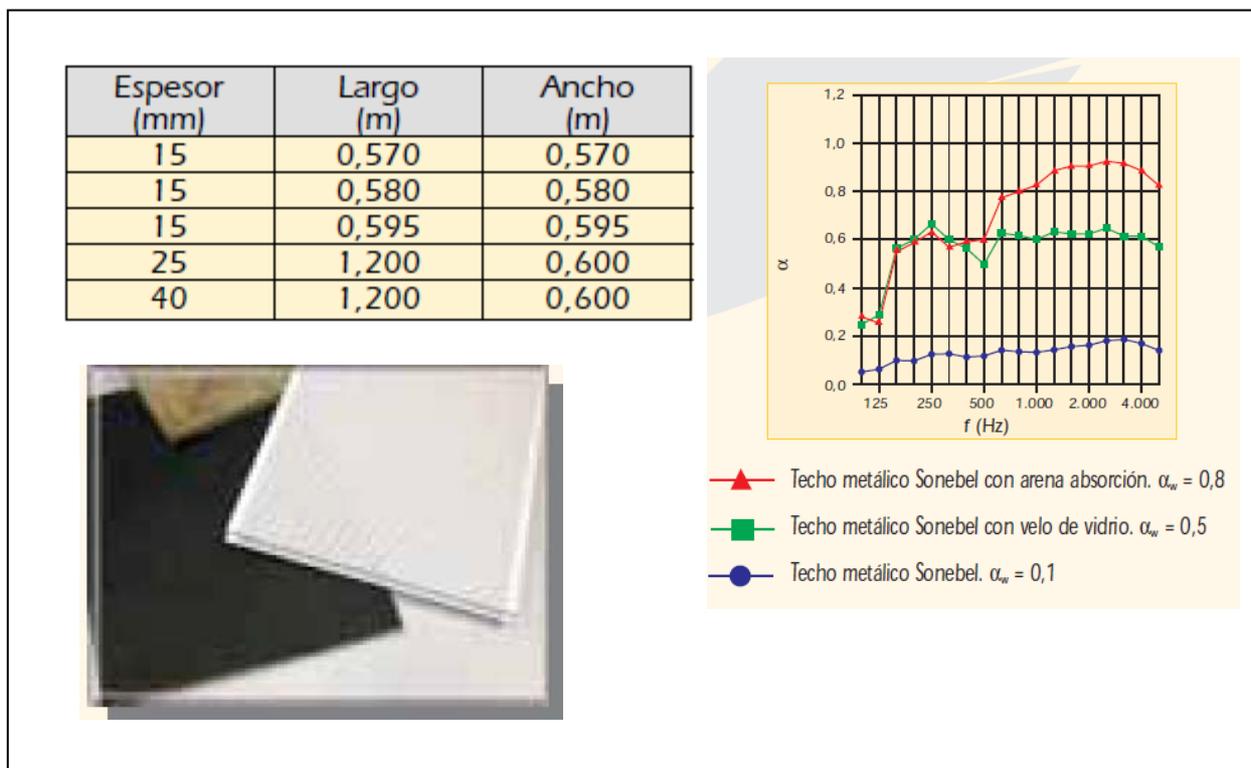
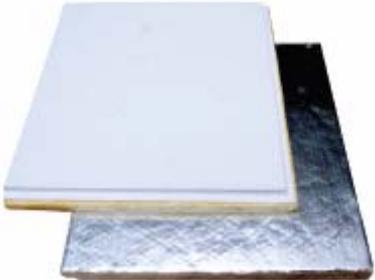


Figura 26 ISOVER ACUSTIVER P/VN “ARENA ABSORCIÓN” 25 mm

Material 3 FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC

Cielo raso en fibra de vidrio con funciones de aislamiento acústico y térmico, compuesto por una lamina rígida de fibra de vidrio recubierta en una de sus caras por una película PVC.



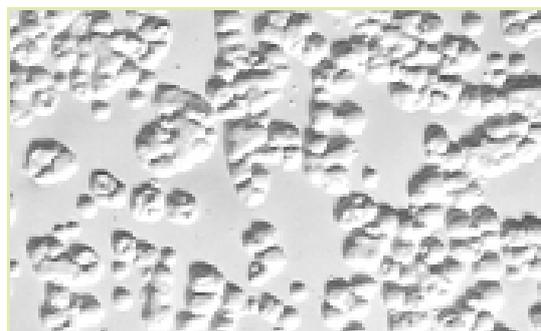
125	250	500	1000	2000	4000
0,72	0,65	0,66	0,73	0,73	0,68

LONGITUD	ANCHO	ESPESOR	PESO NETO	ÁREA /LÁMINA	EMPAQUE	TIPO DE BORDE
1.21 m	0.60 m	16 mm	0,90 Kg/m ²	0.74 m ²	16 láminas por empaque.	Plano.

Figura 27 FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC

Material 4 FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW

Cielo raso con funciones de aislamiento acústico y térmico y compuesto por una lamina rígida de fibra de vidrio, recubierto en una de sus caras por una película de PVC



PRODUCTO	4' x 2' x 5/8"
DIMENSIONES	1.213 m x 603 mm x 13.9 a 15.95 mm
COLOR	Blanco
TEXTURA	Cirocco ■ Rocks ■ Rough Hewn ■ Vintage
ACABADO	Película vinílica perforada o sin perforar
RESISTENCIA TÉRMICA	0.43 °C.m/w valor típico (2.40 h. °F.ft ² /BTU)
CARACTERÍSTICAS DE QUEMADO SUPERFICIAL	ASTM E 84 FS/SD 25/50

125	250	500	1000	2000	4000
0,55	0,39	0,35	0,76	0,67	0,61

Figura. 28 FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW

Material 5 CLOUDS PANELS CAUSTICS USG

Aislamiento acústico y térmico de lana de vidrio, aglomerado con resina termo-resistente, de textura uniforme con un acabado pintable no tejido en fibra de vidrio, para uso en cielo rasos y sistemas de control acústico.



Figura 29 CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG

3.5 HIPÓTESIS.

Por medio de un dispositivo de medición se podrá establecer el coeficiente de absorción de un material en función de la frecuencia.

3.6 VARIABLES.

3.6.1 Variables independientes.

- Temperatura ambiente.
- Materiales acústicos de medición.

3.6.2 Variables dependientes.

- Absorción acústica de los materiales que componen el dispositivo.
- Posición del material en el portamuestras.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Dispositivo de medición del coeficiente de absorción de materiales acústicos que consta de dos tubos de ondas estacionarias en acero inoxidable.

Tubo para baja frecuencias

Imagen 1 tubo de ondas estacionarias para bajas frecuencias



Tubo para alta frecuencia

Imagen 2 Tubo de ondas estacionarias para altas frecuencias



Portamuestras

Para baja frecuencia

Imagen 3 tubo portamuestras y pistón para bajas frecuencias



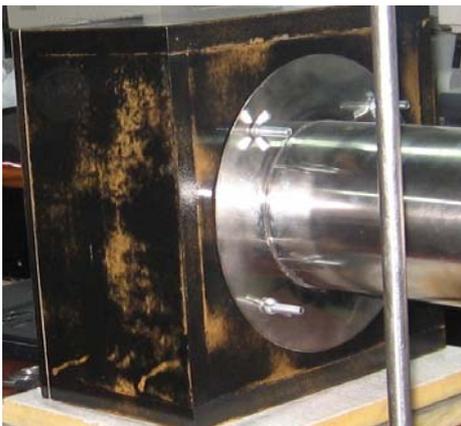
Para alta frecuencia

Imagen 4 tubo portamuestras y pistón para altas frecuencias



Baffle

Imagen 5 tubo Baffle exterior e interior



Sonda

Imagen 6 sonda con carrito introducido en el tubo de baja frecuencia



Imagen 7 Dispositivo para medir coeficiente de absorción



4.1 Procedimiento para la obtención de los coeficientes de absorción de materiales acústicos por medio del dispositivo de ondas estacionarias.

- a) Auto calibrar el osciloscopio mediante la colocación de una sonda en el punto dispuesto para este propósito en el osciloscopio. Esto brindara datos exactos y evitara errores en la medición ya que es el principal dispositivo de recolección y validación de datos.
- b) Colocar la sección de material acústico en el portamuestra, este debe estar al limite de la sección del tubo y quedar sellado herméticamente con las paredes laterales del mismo, para esto las muestras de material deben ser tomadas con la mayor precisión posible sin alterar sus características y ser ajustado por el pistón del portamuestra.
- c) Conectar el micrófono de la sonda directamente a la entrada del osciloscopio, para con este realizar la medición de voltaje obtenido por el micrófono, ya que este valor nos dará el nivel de intensidad propio para cada frecuencia, en cada punto de fase.
- d) Conectar el generador de frecuencias al parlante, al canal dos del osciloscopio y regular la amplitud de la señal para obtener un buen nivel de intensidad que permita generar ondas estacionarias al interior del tubo
- e) Fijar en el Osciloscopio una velocidad de barrido y una ganancia en el canal ya que con el ajuste de estos parámetros es posible observar los niveles de voltaje de cada onda según su frecuencia. Estos parámetros pueden variar dependiendo del material y pueden ser ajustados a consideración del usuario.
- f) Fijar el generador de señales para producir la frecuencia de interés Hz. En onda sinusoidal ya que según estos valores de frecuencia varia la medición y el nivel de absorción de energía del material.
- g) Fijar el osciloscopio para obtener figuras de Lissajous, mediante la activación del modo xy. Por medio de este procedimiento podrá observarse la relación de fase entre las dos señales y la posición en que se encuentra la sonda, con respecto a la fase de compresión y dilatación de la onda.
- h) Obtener del osciloscopio la lectura de la amplitud de la onda; este es el valor correspondiente a $(A+B)$ o el valor de mayor amplitud de la onda.
- i) Desplazar el micrófono hasta obtener en el osciloscopio la primera onda con la menor amplitud; este valor corresponde a $(A-B)$.
- j) El procedimiento debe realizarse para 30 datos como mínimo con el fin de determinar un reducido margen de error entre mediciones.

- k) Determinar que la confiabilidad de los datos para cada frecuencia sea mayor al 99% o de lo contrario, aumentar el tamaño de la población para obtener la confiabilidad deseada.

4.2 Comparación de valores de coeficientes de absorción medidos y dados por el fabricante.

Se utilizaron materiales que corresponden a tres empresas dedicadas a la fabricación y comercialización de material acústico, que utilizan diferentes técnicas de medición del coeficiente de absorción acústico. Se realizó una comparación con los materiales fabricados con técnicas similares y con usos idénticos.

Material 1 ISOVER ANDINA "CORAL PLUS"

Material para techo acústico de lana mineral con velo de vidrio moteado, cara oculta reforzada con velo de vidrio.

Aplicaciones: techo acústico con velo de vidrio decorativo moteado. Cara oculta reforzada con velo de vidrio (20, 25 y 40 mm)

Técnica de medición: cámara reverberante

Tabla 2 Coeficientes de absorción ISOVER ANDINA "CORAL PLUS"

ISOVER ANDINA "CORAL PLUS"								
50	63,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0	0,25	0,79	0,79	0,74	0,9	0,9	0

Material 2 ISOVER ACUSTIVER P/VN "ARENA ABSORCIÓN"

Panel semirígido de lana mineral arena revestido por una cara con un velo de vidrio de color negro.

Aplicaciones: absorbente acústico en techos perforados, construcción de baffles acústicos y pantallas

Técnica de medición: cámara reverberante

Tabla 3 Coeficientes de absorción ISOVER ACUSTIVER P/VN "ARENA ABSORCIÓN"

ISOVER ACUSTIVER P/VN "ARENA ABSORCION"								
50	63,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0	0,8	0,45	0,66	0,72	0,95	0,95	0

Material 3 FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC

Cielo raso en fibra de vidrio con funciones de aislamiento acústico y térmico, compuesto por una lamina rígida de fibra de vidrio recubierta en una de sus caras por una película PVC.

Técnica de medición: modelo matemático

Tabla 4 Coeficientes de absorción FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC

FIBERGLASS DR PERFORADO								
50	63,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0	0,72	0,65	0,66	0,73	0,73	0,68	0

Material 4 FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW

Cielo raso con funciones de aislamiento acústico y térmico y compuesto por una lamina rígida de fibra de vidrio, recubierto en una de sus caras por una película de PVC

Técnica de medición: modelo matemático

Tabla 5 Coeficientes de absorción FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW

DURACUSTIC SHOW WHITW								
50	63,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0	0,55	0,39	0,35	0,76	0,67	0,61	0

Material 5 CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG

Aislamiento acústico y térmico de lana de vidrio, aglomerado con resina termo-resistente, de textura uniforme con un acabado pintable no tejido en fibra de vidrio, para uso en cielo rasos y sistemas de control acústico.

Aplicaciones: cielos rasos, paredes y baffles colgantes.

Técnica de medición: tubo de ondas estacionarias

Tabla 6 Coeficientes de absorción CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG

CLOUDS PANELES ACÚSTICOS								
50	63,5	125	250	500	1000	2000	4000	8000
0	0	0,06	0,25	0,62	0,91	0,99	0,98	0

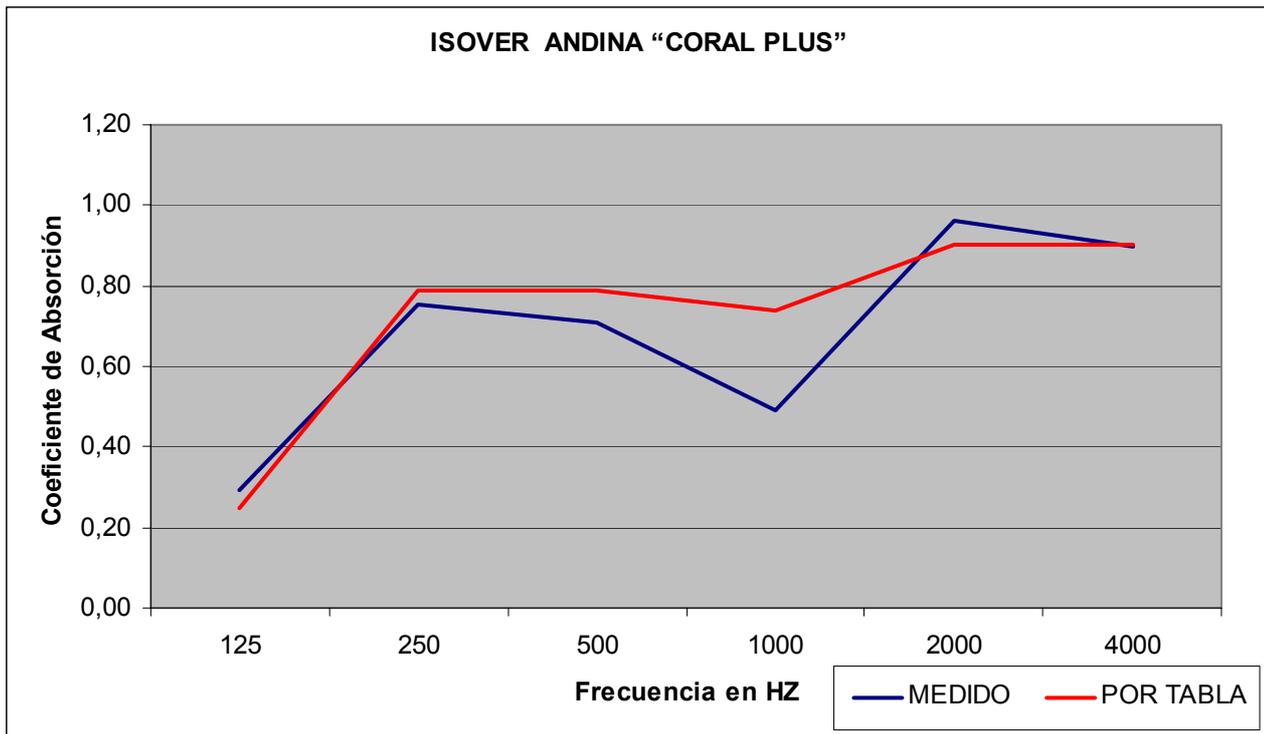


Figura 30 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante ISOVER ANDINA "CORAL PLUS"

Esta comparación corresponde a un material que fue medido con la técnica de cámara reverberante, en baja frecuencia los valores se acercan a los de valores que expone el fabricante, a partir de 500Hz los valores varían en un 20% aproximadamente, en la frecuencia de 1000Hz existe un valor de coeficiente mucho menor al de la tabla manteniendo el mismo decaimiento.

No se puede determinar el comportamiento en 1000Hz, ya que desconocemos las condiciones de medición en la cámara reverberante

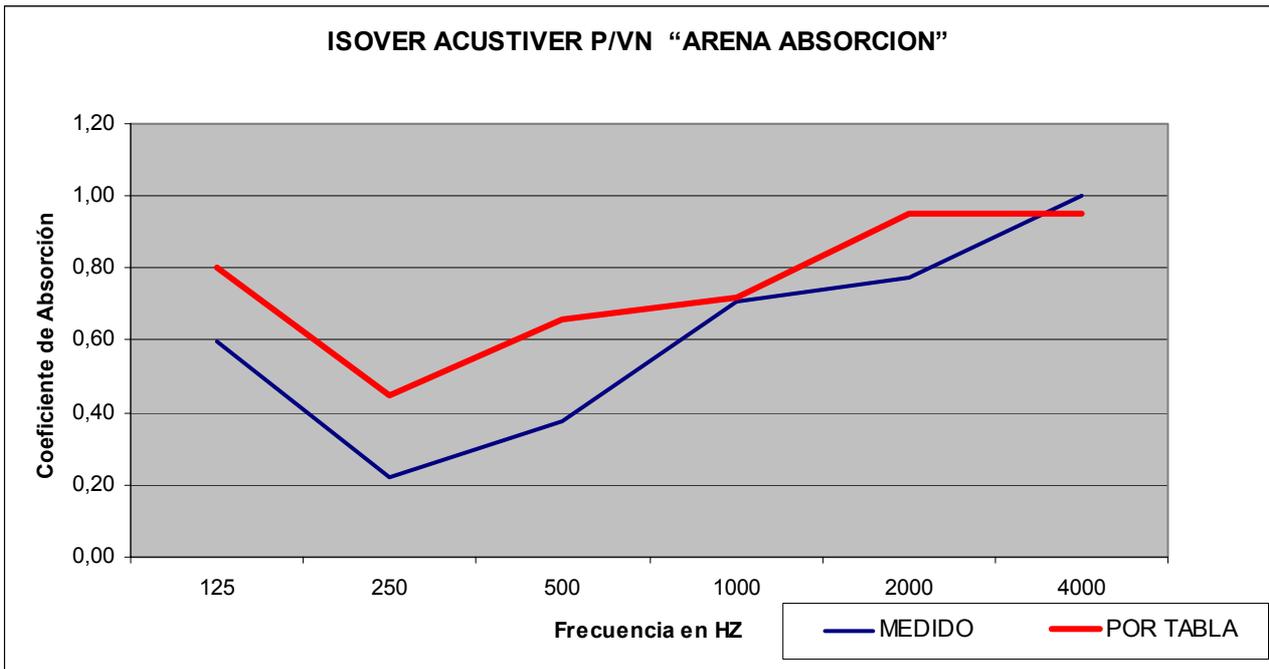


Figura 31 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante ISOVER ACUSTIVER P/VN "ARENA ABSORCIÓN"

Los valores del coeficiente de absorción que presenta el fabricante corresponden a la técnica de cama reverberante, para baja frecuencias el coeficiente de absorción medido tienen un comportamiento muy similar al de tabla pero 20% menos, a partir de 1000Hz los valores medidos son un 16% mayores, con esta segunda prueba se encontró que la diferencia se encuentra en las demás frecuencias y a diferencia de la medida con el anterior material en la frecuencia de 1000Hz los valores son muy aproximados

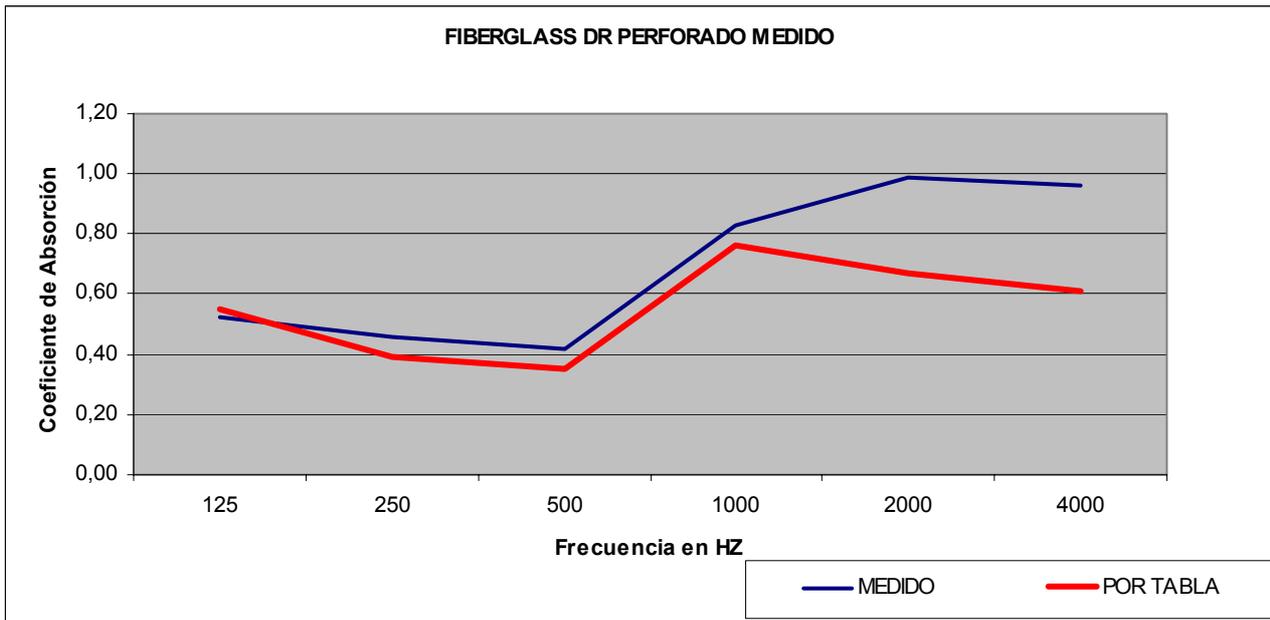


Figura 32 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante FIBERGLASS DR PERFORADO DURACUSTIC

El método de medición hecho por el fabricante corresponde a modelos matemáticos, esta comparación es más aproximada a la del fabricante, sin embargo en altas frecuencias los valores medidos son mayores que a los de la tabla. En esta comparación se puede observar que para baja frecuencia el comportamiento del dispositivo es muy parecido al que el fabricante expone.

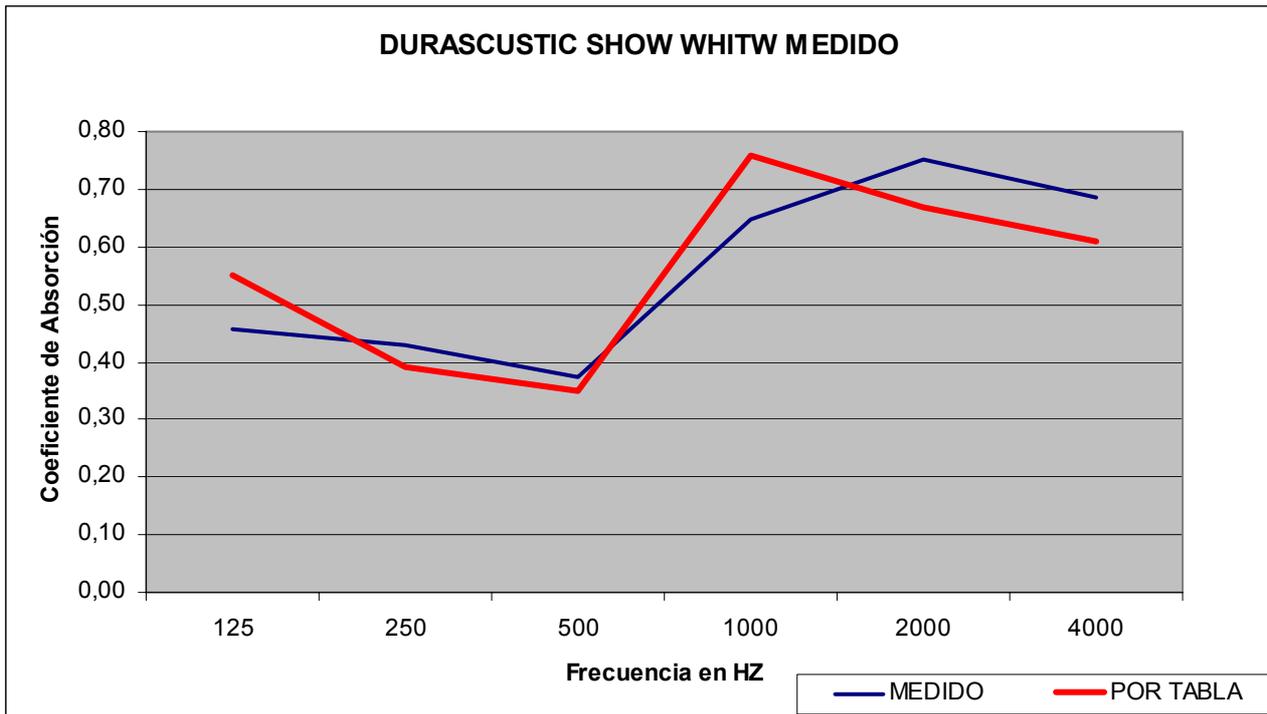


Figura 33 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante FIBERGLASS DURACUSTIC SHOW WHITW

El fabricante utiliza modelos matemáticos para determinar el coeficiente de absorción, en esta comparación se ven valores muy aproximados a los de la tabla.

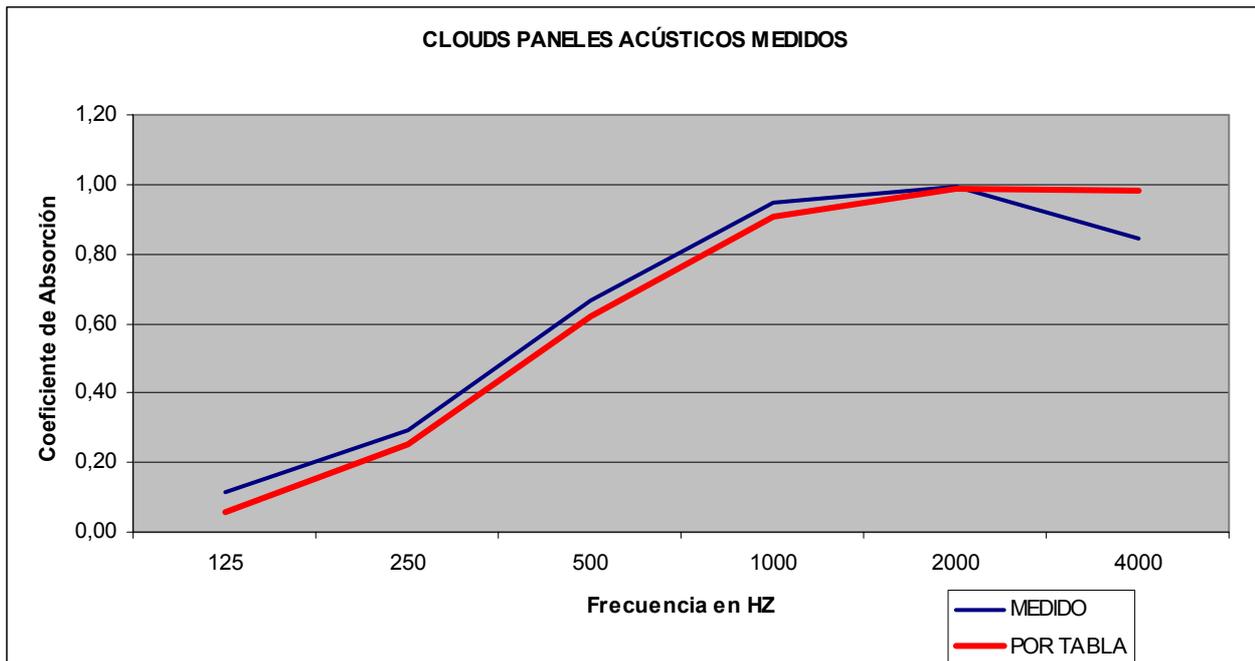


Figura 34 Comparación entre los valores medidos y por tablas de fabricante CLOUDS PANELES ACÚSTICOS USG

En la grafica se muestran los resultados para una medición con tubo de ondas estacionarias en tabla y medido. Este método es el que brinda los valores más cercanos entre los valores medidos y los que brinda la tabla del fabricante.

En la primera y segunda comparación corresponde a materiales medidos en cámara reverberante, en estas se observan diferencias con los medidos con el dispositivo, esto puede deberse a que el método de cámara reverberante tiene en cuenta una gran área del material a medir en cambio el dispositivo solo cuenta con 4,5" o 1", reduciéndose considerablemente el área de prueba del material. Para materiales los cuales su coeficiente de absorción fue calculado con modelos matemáticos se presenta una gran diferencia en frecuencias altas esto puede deberse a que los modelos matemáticos tienen en cuenta características físicas de los materiales para todo el rango de frecuencia en cambio en el dispositivo se debe medir con diferentes tubos el rango de frecuencia, cuando se comparo el dispositivo con un material medido con la misma técnica demostró una gran similitud con los resultados del dispositivo lo cual demuestra que en este caso el coeficiente varia dependiendo del método de medición.

En la comparación de los materiales se estableció una gran diferencia en alta frecuencia y una gran similitud en baja frecuencia con el método de modelos matemáticos, para el método de cámara reverberante los valores medidos son diferentes en todo el rango de frecuencia medido y finalmente con la técnica de ondas estacionarias los valores medidos son muy cercanos a los suministrados por el fabricante

5. DESARROLLO INGENIERIL

5.1 Partes del tubo de ondas estacionarias

Consta de un tubo metálico pulido en su parte interior, en un extremo posee un altavoz y en el otro una sección de tubo acondicionada para colocar el material de prueba (portamuestras), de forma que no interfiera con sus propiedades. El parlante posee una perforación axial por donde se introduce una sonda tubular deslizante, cuyo extremo libre se encuentra dentro del tubo y el otro extremo esta conectado a un micrófono, que se desliza conjuntamente con la sonda sobre un riel, con marcas de distancias grabadas.

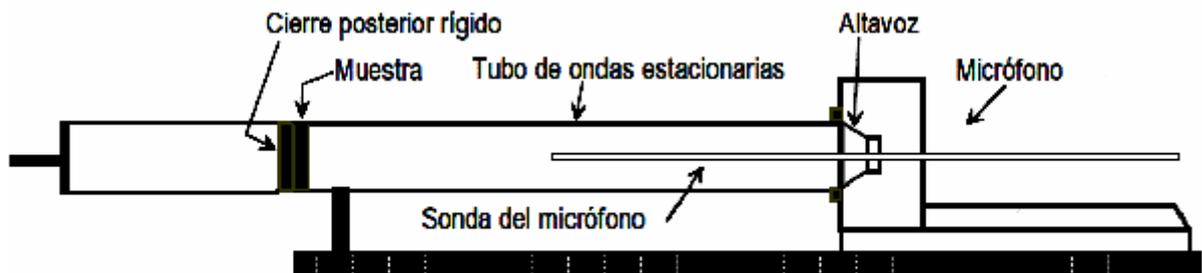


Figura 35 Tubo de ondas estacionarias para baja frecuencia

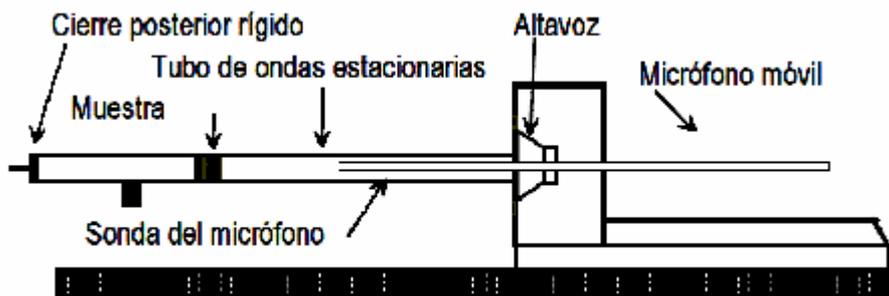


Figura 36 Tubo de ondas estacionarias para alta frecuencia

5.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

El equipo de medida consiste en un tubo rígido, donde uno de sus extremos es cerrado con la muestra del material a ensayar; el otro extremo está equipado con un altavoz para generar ondas armónicas planas (tonos puros). Una sonda, que puede desplazarse por su interior, capta la presión acústica en diferentes posiciones del eje del tubo y la transmite hasta el micrófono móvil, el cual está conectado al sistema de análisis capaz de medir esta presión.

ANCHO DE BANDA

Limite en alta frecuencia

Según la norma ISO 10534-1 (medición del coeficiente de absorción en tubo de ondas estacionarias), el diámetro del tubo D debe de ser pequeño comparado con la longitud de onda del sonido. En concreto, se debe verificar que:

$$f_{\max} = \frac{c}{1.707 * D} \quad (49)$$

Así aseguramos que no se propagan ondas transversales en el mismo y que los frentes de onda son planos e inciden normalmente sobre la muestra. Por encima de esta frecuencia se genera una serie de armónicos relacionados con la frecuencia emitida, los cuales hacen que las medidas tomadas sobre este límite superior no sean válidas y no se tomen en cuenta.

Limite en baja frecuencia

Mediciones a frecuencias más altas que las obtenidas por la relación de:

$$f_{Min} = \frac{c}{4l} \quad (50)$$

Donde l es longitud del tubo; Serán correctas debido que a partir de esta, se generan ondas planas consecuentes con la longitud del tubo.

Ya que existe la posibilidad de una primera resonancia transversal en esta frecuencia. Como el método debe garantizar un campo de ondas planas, en la sección trasversal del tubo de medición, no pueden permitirse las resonancias transversas ya que esto daría lugar a una presión sonora variante en la dirección transversal del tubo.

Para hacer que la longitud del tubo sea $\frac{1}{4}$ de la longitud de onda de la frecuencia mas baja, es una condición que el campo sonoro, sea simétrico a lo largo de la longitud total del tubo, es decir que la fuente sonora debe estar colocada de forma simétrica en un extremo del tubo. Si esto no se cumple es necesario extender el tubo por lo menos una media longitud de onda, para dar una distribución transversal suficientemente uniforme de la presión sonora, en la parte del tubo en que la medida está teniendo lugar.

Cobertura en frecuencia

Es aceptado un SWR menor a 2 dB para obtener datos precisos entre los límites de frecuencia.

PORTAMUESTRA

La muestra debe estar perfectamente bien adaptada en el portamuestras, ya que debe ser tomada exactamente al mismo diámetro del tubo para alta frecuencia y baja frecuencia. Para evitar el efecto de borde, se deben evitar intersticios entre la muestra y el portamuestras, no debe tampoco aplastarse demasiado ni dejarse floja. En muestras cuya superficie es perforada, hay que tener en cuenta que el porcentaje de perforaciones sea igual tanto en la muestra, como en el área del material a usar en la medición.

5.3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL TUBO

Material de los tubos

“El acero inoxidable es un tipo de acero resistente a la corrosión, dado que el cromo que contiene posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro, contiene, por definición, un mínimo de 10,5% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes; los principales son el níquel y el molibdeno. Sus características se obtienen mediante la formación de una película adherente e invisible de óxido de cromo. La aleación 310 la cual fue usada para el desarrollo del dispositivo de medición de coeficientes de absorción es un acero inoxidable autentico de uso general con una estructura cúbica de caras centradas”²⁷. Es esencialmente no magnético en estado recocido y sólo puede endurecerse en frío. Adiciones suplementarias de cromo y níquel otorgan una mejor resistencia al calor.

En el acero inoxidable austenítico el carbono está en una concentración tal, que permite la formación de austenita a altas temperaturas
Los aceros inoxidables martensíticos tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico, presentando cuando templados una microestructura acicular.

Los metales en general presentan un alto índice de reflectividad acústica ya que las superficies pulidas por tener un bajo índice o porcentaje de porosidad Tienden a obtener un menor índice o coeficiente de absorción, esto para superficies metálicas de tipo laminar.

Ya que este material permite una reflexión casi total de la energía acústica, necesaria para que el material del tubo no interfiera en la onda incidente y por consiguiente en la medición, el acero inoxidable fue considerado como el “material mas idóneo para la medición, ya que con el tiempo y la influencia del medio, en especial la humedad del ambiente, no habrá alteraciones físicas del dispositivo debido a oxido ni corrosión, además de ser este limpio y no contaminante para las personas que lo operan, a diferencia de otros metales considerados para la construcción del dispositivo como el acero y el hierro fácilmente oxidables a temperatura y niveles de humedad ambiente, lo que traería como consecuencia alteraciones en la medida al interior del tubo, por cambios físicos del conducto y cambios en la reflectividad del mismo en su

²⁷ CHAMPION, F.A. 1976 Ensayos de Corrosión España : Urmo S.A. de Ediciones - FLINN, Richard

interior, otra opción como material es el aluminio, descartado por ser contaminante y poco apropiado para la manipulación de personas”²⁸.

Los metales mencionados cumplen con las demandas de la construcción del dispositivo, ya que su densidad y rigidez por sección cúbica, al calibre seleccionado son suficientes para evitar modos transversales que puedan alterar los valores de medición.

Diámetro del tubo.

Para garantizar que en el interior del tubo se desplazan ondas planas, se debe restringir el diámetro del tubo, ya que en este, solo pueden desplazarse ondas planas inferiores de $Co/1.7 D$, por esta razón se deben construir dos tubos con diferentes diámetros, para cubrir el rango de frecuencia para el cual fue diseñado el dispositivo.

Para el tubo de alta frecuencia el diámetro es de 1” con el cual se pueden producir sin alteraciones ondas planas hasta una frecuencia máxima de 7934Hz aproximadamente.

Para el tubo de baja frecuencia el diámetro corresponde a 4.5” el cual permite el desplazamiento de ondas planas a baja frecuencia hasta 1763Hz aproximadamente ya que la velocidad del sonido puede variar según la temperatura ambiente.

Tabla 7 Frecuencia máxima según el diámetro del tubo de ondas estacionarias

frecuencia maxima según el diametro		
	Tubo alta frecuencia	Tubo baja frecuencia
D, en pulgadas	1	4,5
D, en metros	0,025	0,114
fmax	7934	1763

²⁸ TROJAN, Paul Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones México: Mc Graw Hill pag 34

Longitud del tubo

Este parámetro depende de la frecuencia mas baja, ya que el límite esta comprometido por la razón, de que el tubo de ondas estacionarias debe ser mayor o igual a un cuarto de la longitud de onda, a la que el dispositivo pretende funcionar, para este caso se emplea para el tubo de baja frecuencia una longitud 2m con una frecuencia mínima a partir de 43Hz y para el tubo de alta frecuencia una longitud 0.6m con una frecuencia mínima a partir de 143Hz

Tabla 8 Limite de baja Frecuencia según la longitud del tubo de ondas estacionarias

Limite de baja frecuencia según la longitud		
	Tubo para alta frecuencia	Tubo para baja frecuencia
Longitud en metros	0,6	2
fmin	143	43

Portamuestras

Se construye un portamuestras que posee un sistema de sujeción, compuesto por una abrazadera que lo asegura al tubo, haciendo de este y el portamuestras una sección de tubo continua, para no intervenir en la trayectoria de la propagación de las ondas planas y evitar la difracción de borde.

El dispositivo portamuestras esta construido al igual que el tubo completamente en acero inoxidable y esta compuesto por un pistón que permite variar la profundidad del portamuestra dependiendo del calibre del material de prueba; hecho también de acero inoxidable y sellado herméticamente por anillos (o rings) de poliuretano.

Parlante

El parlante escogido como radiador para el tubo de ondas estacionarias es el modelo P11wh00011 de VIFA corp. Denmark. El altavoz utilizado posee un rango de frecuencia extendido y el diametro para alcanzar los límites de frecuencia para los cuales, fueron diseñados los dos tubos, tanto en alta como en baja frecuencia.

Características técnicas

Tabla 9 Características técnicas parlante VIFA P11wh00011

DATOS ELECTRICOS		
Impedancia nominal	Zn	8ohm
Impedancia maxima	Zo	29ohm
Resistencia DC	Re	5.4
Inductancia	Le	0.38mH
PARAMETROS THIELE SMALL		
Frecuencia de resonancia	fs	52
Q macanico	Qms	qms1.1
Q electrico	Qes	.26
Q total	Qts	.21
Force factor	Bl	5.9Tm
Resistencia mecanica	Rms	1.48Kg/s
Masa movil	Mms	5.3 g
Area de piston efectiva	Sd	58 Cm ²
Volumen equivalente	Vas	10
Sensibilidad		87 dB
POWER HANDLING		
Potencia maxima de sistema continua'''		90 W
Potencia maxima de sistema corto'''		150 W
PARAMETROS DE BOBINA Y UNIDAD MAGNETICA		
Diametro de bobina		25 mm
Altura de bobina		7.5mm
Capas de bobina		
Altura de		4 mm
Peso del magneto		0.415 kg

La firma B&C ofrece parlantes de excelente calidad con muy buenas características técnicas y bobina ventilada fue descartado por su rango dinámico el cual comienza a radiar desde los 130Hz y sus mínimas dimensiones comerciales que para estas características son de 7.5" lo cual supera el diámetro especificado para las dimensiones del tubo de medición de 4.5"

Parámetros técnicos

Tabla 10 Características técnicas parlante B&C

DATOS ELECTRICOS		
Impedancia nominal	Zn	8ohm
Impedancia minima	Zo	6.5 ohm
Resistencia DC	Re	5.7
Inductancia	Le	0.38mH
PARAMETROS THIELE SMALL		
Frecuencia de resonancia	fs	130 hz
Rango de frecuencia		150 - 6000
Q macanico	Qms	3.7
Q electrico	Qes	.49
Q total	Qts	.44
Force factor	Bl	5.9Tm
Resistencia mecanica	Rms	
Masa movil	Mms	12 g
Area de piston efectiva	Sd	sd 132 cm ²
Volumen equivalente	Vas	3(0.1) dm ³
Sensibilidad		90 dB spl
POWER HANDLING		
Potencia maxima de sistema continuo		240w
Potencia maxima de sistema corto""		120 W
PARAMETROS DE BOBINA Y UNIDAD MAGNETICA		
Diametro de bobina		38 mm
Altura de bobina		7.5mm
Capas de bobina		
Peso del magneto		0.415 kg

Electrovoice 405-8h ofrece un rango de frecuencia de 60hz a 15kHz el cual posee el rango de frecuencia mas amplio entre los seleccionados pero sus dimensiones se sobrepone a las mínimas del diseño y al no poseer la cavidad de ventilación de bobina no es posible introducir la sonda de medición a través del eje axial del altavoz.

Parámetros técnicos

Tabla 11 Características técnicas parlante 405-8h

DATOS ELECTRICOS		
Impedancia nominal	Zn	8ohm
Impedancia maxima	Zo	
Resistencia DC	Re	5.4
Inductancia	Le	0.38mH
PARAMETROS THIELE SMALL		
Rango de Frecuencia	fs	60 - 15000hz
Q macanico	Qms	
Q electrico	Qes	
Q total	Qts	
Force factor	Bl	5.9Tm
Resistencia mecanica	Rms	
Masa movil	Mms	
Area de piston efectiva	Sd	
Volumen equivalente	Vas	
Sensibilidad		90 dB spl
POWER HANDLING		
Potencia maxima de sistema	16 W (ruido rosa continuo sobre 50 hz)	
Potencia maxima de sistema corto""	120 W	
PARAMETROS DE BOBINA Y UNIDAD MAGNETICA		
Diametro de bobina	25 mm	
Altura de bobina	7.5mm	
Capas de bobina		
Altura de	4 mm	
Peso del magneto	0.415 kg	

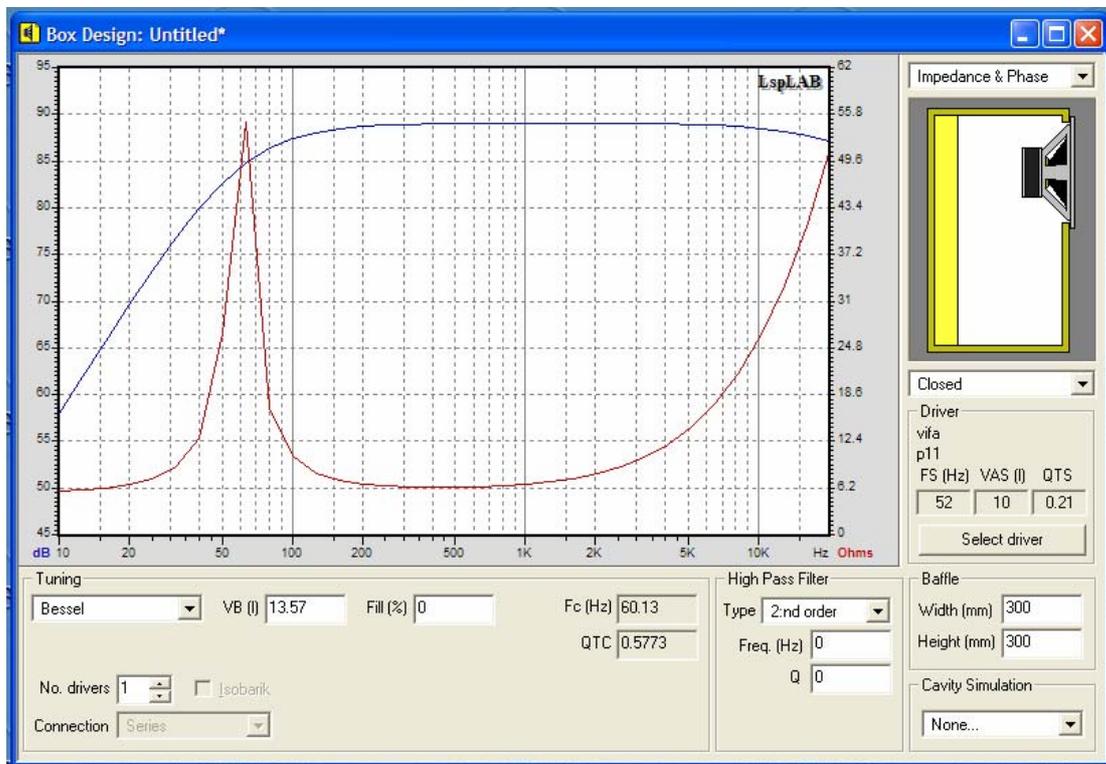
Dentro de las opciones disponibles como altavoz radiador para el tubo de ondas estacionarias después de las comparaciones fue escogido el parlante de la firma danesa VIFA modelo p11wh0008 ya que su reducido diámetro, rango de frecuencia extendido y bobina ventilada hacen del radiador el más apto para el funcionamiento del tubo. Es primordial para obtener el SWR un altavoz con bobina ventilada, ya que la existencia de la cavidad axial de ventilación, permitirá la introducción de la sonda de medición a lo largo del tubo, sobre el centro acústico de radiación.

Características técnicas

Tabla 12 Características técnicas parlante p11wh0008

DATOS ELECTRICOS		
Impedancia nominal	Zn	8ohm
Impedancia maxima	Zo	29ohm
Resistencia DC	Re	5.4
Inductancia	Le	0.38mH
PARAMETROS THIELE SMALL		
Frecuencia de resonancia	fs	52
Q macanico	Qms	qms1.1
Q electrico	Qes	.26
Q total	Qts	.21
Force factor	Bl	5.9Tm
Resistencia mecanica	Rms	1.48Kg/s
Masa movil	Mms	5.3 g
Area de piston efectiva	Sd	58 Cm2
Volumen equivalente	Vas	10
Sensibilidad		87 dB
POWER HANDLING		
Potencia maxima de sistema continua""		90 W
Potencia maxima de sistema corto""		150 W
PARAMETROS DE BOBINA Y UNIDAD MAGNETICA		
Diametro de bobina		25 mm
Altura de bobina		7.5mm
Capas de bobina		
Altura de		4 mm
Peso del magneto		0.415 kg

Tabla 13 medición parlante p11wh0008



Es primordial un altavoz con bobina ventilada, ya que la existencia de la cavidad axial de ventilación, permitirá la introducción de la sonda de medición a lo largo del tubo, sobre el centro acústico de radiación.

La firma B&C ofrece parlantes de excelente calidad con muy buenas características técnicas y bobina ventilada fue descartado por su rango dinámico el cual comienza a radiar desde los 130Hz y sus mínimas dimensiones comerciales que para estas características son de 7.5" lo cual supera el diámetro especificado para las dimensiones del tubo de medición de 4.5"

Electrovoice 405-8h ofrece un rango de frecuencia de 60hz a 15kz el cual posee el rango de frecuencia mas amplio entre los seleccionados pero sus dimensiones se sobreponen e las mínimas del diseño y al no poseer la cavidad de ventilación de bobina no s posible introducir la sonda de medición a través del eje axial del altavoz.

Sonda

La sonda construida en acero inoxidable, corresponde a una sección longitudinal de tubo 2.34m de longitud y 0.007m de diámetro, para ser introducido sin intersticios en la cavidad axial de ventilación de la bobina del radiador, ya que el desplazamiento de la misma permitirá alcanzar los puntos de compresión y dilatación de las ondas planas, que se desplazan al interior del tubo y así, obtener los valores de máxima y mínima presión de dichas ondas. La sonda contiene en el extremo introducido en el tubo un modulo de desplazamiento, que permite que la sonda a lo largo de su recorrido se mantenga en todo momento al centro de la cavidad y cuyo diseño plano no intervenga, de manera significativa con la propagación de ondas longitudinales a través del tubo, para no producir vibraciones indeseadas las ruedas del modulo de desplazamiento se encuentran aisladas con secciones de poliuretano en cada una de ellas.

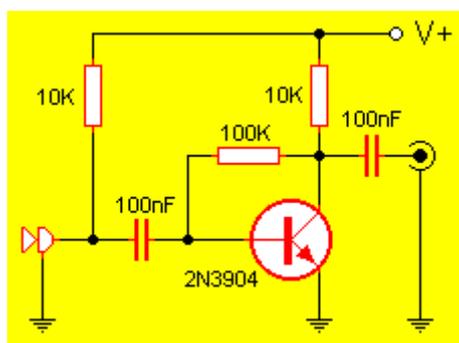
Micrófono

Electret MICME16

- Cápsula micrófono electret omni direccional
- Frecuencia de trabajo de 50 a 13K Hz.
- Sensibilidad 67 +/- 3 dB, Impedancia 1K ohmio
- Alimentación de 1,5 a 10V, Consumo 0,5 mA máximo
- Tamaño 8x10 mm

Escogido principalmente por sus dimensiones que no intervendrán en la propagación de ondas planas dentro del tubo y por su amplio espectro en frecuencia.

Tabla 14 Circuito de polarización para micrófono



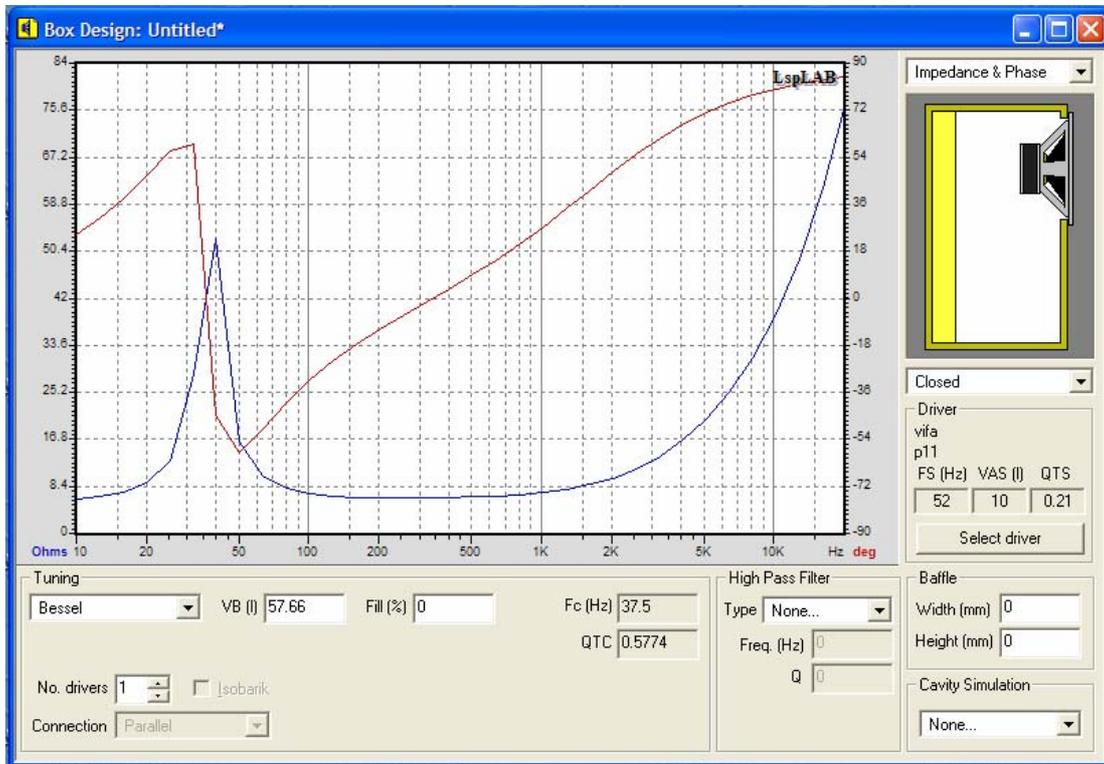
La resistencia de 10K sobre el terminal positivo del micrófono le provee a esta tensión necesaria para su funcionamiento, el capacitor de 100nF sobre la misma conexión bloquea la componente DC de la señal permitiendo a la AC perteneciente al audio ingresar al transistor amplificador por su base, la resistencia de 10K conectada al transistor por su colector permite la polarización de ese elemento, mientras que la de 100K efectúa la realimentación de la señal, el capacitor de salida bloquea la componente DC dejando ir hacia la siguiente etapa sólo la señal de audio.

El circuito puede ser alimentado con cualquier tensión comprendida entre 3 y 9 volts sin necesariamente estar estabilizada. Pero es importante que la fuente esté bien filtrada y desacoplada. Para ello es posible colocar un capacitor de 100 μ F junto con uno de 100nF en paralelo con la alimentación sobre el circuito.

Baffle

Construido en plywood de 0.018m, con revestimiento interior de fibra de vidrio de 0.025m unido con pegamento y tornillos auto perforantes de 1", con el fin de obtener la mayor rigidez de conjunto posible. Sus dimensiones de 0.3m de ancho, 0.3m de alto y 0.15m de profundidad permiten bajar la frecuencia de resonancia a 40Hz y al mismo tiempo servir de soporte estructural del dispositivo, ya que los tubos de medición se soportan de él.

Tabla 15 Medición baffle con p11wh0008



5.4 Procedimiento para la obtención de los coeficientes de absorción de materiales acústicos por medio del dispositivo de ondas estacionarias.

- Auto calibrar el osciloscopio mediante la colocación de una sonda en el punto dispuesto para este propósito en el osciloscopio. Esto brindara datos exactos y evitara errores en la medición ya que es el principal dispositivo de recolección y validación de datos.
- Colocar la sección de material acústico en el portamuestra, este debe estar al limite de la sección del tubo y quedar sellado herméticamente con las paredes laterales del mismo, para esto las muestras de material deben ser tomadas con la mayor precisión posible sin alterar sus características y ser ajustado por el pistón del portamuestra.
- Conectar el micrófono de la sonda directamente a la entrada del osciloscopio, para con este realizar la medición de voltaje obtenido por el

micrófono, ya que este valor nos dará el nivel de intensidad propio para cada frecuencia, en cada punto de fase.

- d) Conectar el generador de frecuencias al parlante, al canal dos del osciloscopio y regular la amplitud de la señal para obtener un buen nivel de intensidad que permita generar ondas estacionarias al interior del tubo
- e) Fijar en el Osciloscopio una velocidad de barrido y una ganancia en el canal ya que con el ajuste de estos parámetros es posible observar los niveles de voltaje de cada onda según su frecuencia. Estos parámetros pueden variar dependiendo del material y pueden ser ajustados a consideración del usuario.
- f) Fijar el generador de señales para producir la frecuencia de interés Hz. En onda sinusoidal ya que según estos valores de frecuencia varía la medición y el nivel de absorción de energía del material.
- g) Fijar el osciloscopio para obtener figuras de Lissajous, mediante la activación del modo xy. Por medio de este procedimiento podrá observarse la relación de fase entre las dos señales y la posición en que se encuentra la sonda, con respecto a la fase de compresión y dilatación de la onda.
- h) Obtener del osciloscopio la lectura de la amplitud de la onda; este es el valor correspondiente a $(A+B)$ o el valor de mayor amplitud de la onda.
- i) Desplazar el micrófono hasta obtener en el osciloscopio la primera onda con la menor amplitud; este valor corresponde a $(A-B)$.
- j) El procedimiento debe realizarse para 30 datos como mínimo con el fin de determinar un reducido margen de error entre mediciones.
- k) Determinar que la confiabilidad de los datos para cada frecuencia sea mayor al 99% o de lo contrario, aumentar el tamaño de la población para obtener la confiabilidad deseada.

6. CONCLUSIONES

Por medio de la teoría de ondas estacionarias se diseñó y construyó un dispositivo que mide el coeficiente de absorción de materiales acústicos.

Se estableció un procedimiento por medio del cual se obtiene el valor del coeficiente de absorción de materiales acústicos con un dispositivo basado en el principio de ondas estacionarias.

Se realizaron comparaciones entre materiales de iguales características de fabricación y uso, que fueron medidos por los fabricantes con diferentes métodos para determinar el coeficiente de absorción, demostrando que el dispositivo arroja valores aproximados de los coeficiente de absorción.

La calibración de los instrumentos son determinantes al momento de realizar la medición como es el osciloscopio y el generador de ondas, ya que pequeños cambios en los valores de medición alterarán de manera considerable los resultados.

Se encontró una diferencia entre las longitudes de onda teóricas y medidas a causa de la variación de la temperatura del aire al interior del tubo.

6. RECOMENDACIONES

La marcación de la sonda debe hacerse cada vez que se realicen mediciones con los valores de longitud de onda de $1/4$ de octava de cada frecuencia, ya que la medida puede tener diferencias entre mediciones, esto debido a cambios de temperatura lo que altera la velocidad del sonido al interior del tubo.

Al preamplificar el micrófono con phantom power se sobrecarga y se acorta considerablemente su vida útil, los micrófonos electret son muy sensibles a cambios de humedad y temperatura lo que junto con el polvo, deterioran su rendimiento con el uso. El micrófono electret debe ser retirado o reemplazado cuando se producen zumbidos y ruido.

Es posible que en un futuro, se pueda adecuar el tubo de ondas estacionarias al método de función de transferencia, solamente realizando las perforaciones de los micrófonos a la medida específica en cada uno de los tubos.

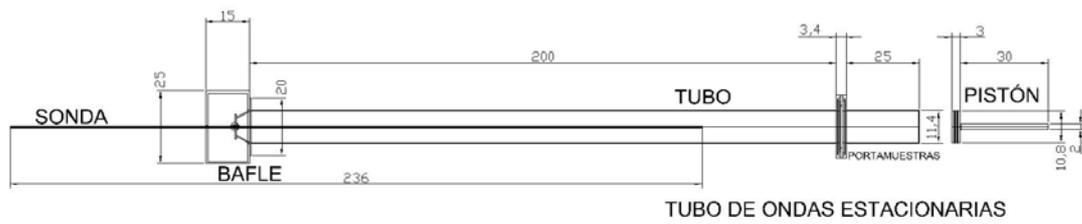
Se recomienda recoger en toda la longitud del tubo la sonda de medición, al momento de realizar el cambio de tubo para frecuencias altas, ya que puede doblarse.

BIBLIOGRAFÍA

- ALTON Everest F., The Master Handbook Of Acoustics 4ta Edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
- ANGELO Farina, ANNA Torelli, Measurement of the sound absorption coefficient of materials with a new sound intensity technique.
- ANTONI Carrión Isbert, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.
- BERANEK , Leo, Noise and Vibration Control, McGraw-Hill, New York
- Bruel & Kjaelr, Teletechnical Review, Standing Wave Apparatus, Copenhagen 1955.
- Daniel A. Russell, Absorption Coefcients and Impedance Science and Mathematics Department, GMI Engineering & Management Institute, Flint, MI, 48504.
- HARRYS, Cyril M., Handbook of Noise Control, McGraw-Hill, New York, 1979.
- KINSLER, Lawrence E. Fundamentos de acústica.
- MELLADO R. José Damián, Introducción a los conceptos fundamentales en acústica

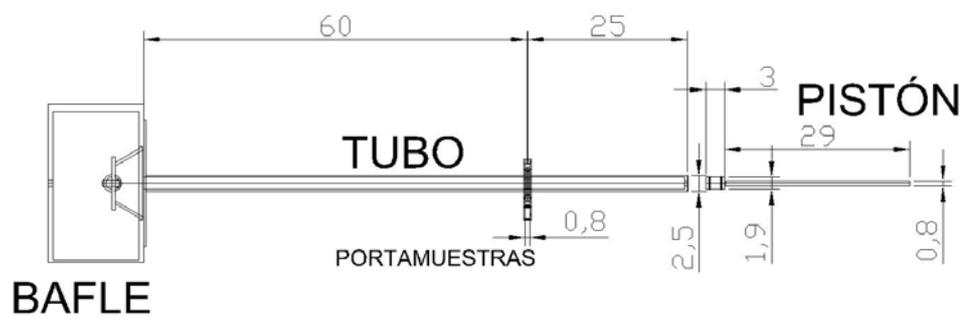
ANEXO A

TUBO DE ONDAS ESTACIONARIAS PARA BAJA FRECUENCIA



ANEXO B

TUBO DE ONDAS ESTACIONARIAS PARA ALTA FRECUENCIA



TUBO DE ONDAS ESTACIONARIAS