



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

*ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD CULHUACAN*

ANÁLISIS Y DISEÑO DEL TUBO DE IMPEDANCIAS
BAJO EL MÉTODO DE FUNCIÓN DE
TRANSFERENCIA

TESIS

*PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA*

*PRESENTA:
LUIS HERNÁNDEZ QUINTERO*

*ASESORES:
ING. ADAN RICARDO QUINTANA OLGUIN
ING. JORGE ANTONIO CRUZ CALLEJA*

MEXICO D.F., MARZO 2009

Con toda mi admiración y respeto,
dedico esta tesis a la memoria
de mis abuelos
Modesta Oropeza †
Efren Quintero †

Ustedes iniciaron este sueño que poco a poco se construyó, ante la adversidad, con sus consejos, experiencias y amor.

Agradecimientos

A mí mas grande inspiración para realizar mis sueños, mis anhelos, objetivos y caprichos ...

A mis Asesores y Profesores:

Ing. Adán Ricardo Quintana, Ing. Jorge A. Cruz Calleja, Ing. Sarudy E. Suñiga, Ing. Eduardo Márquez Tafolla.

Agradecimientos Especiales:

M. en I. Antonio Pérez López, Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz & Ing. Arturo Machuca (CCADET) por el valioso apoyo brindado, Lic. José Antonio Flores (Acervo Bibliográfico BNCT IPN), Dr. Andrés Esteban Pérez Matzumoto (CENAM).

A mi familia:

Julia(Jufu), José (Che) gracias por tu valioso apoyo en el diseño & Fernando; por comprender y aguantar mis días de estudio y sacrificios ...

A mis familiares que nunca me desampararon y apoyaron:

Tío Santiago, Tía Marcela , Tía Rosa, Tía Amelia, Tío Germán; Primas Nallely, Larisa, Arlett, Gladis, a mis Primos; Carlos, Adad, Efen, Kike.

A mi segunda familia:

Profesor Oscar, Karen (Bely), Janeth (Bela), Allyson, Uriel , Sra. Marisol.

A mis amigos y compañeros:

Ing. Gabriel gracias por sus consejos y enseñanzas, Ing. León Paul Piquard Buere por la oportunidad de colaborar a su lado, Ing. Jordán Romero, Lic Miguel Spindola, Ing. Tonatiuh, amigo gracias por tu apoyo incondicional, Carlos Sandoval, Compadre Jaime, Luis Felipe Campa, David (Pollo), Oscar (Poca Luz), Angie, Diego (Willies).

INTRODUCCIÓN

Luis Hernández Quintero

Instituto Politécnico Nacional
“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

Antecedentes

La dependencia tecnológica que tiene el país es cada vez más notable, por lo que el reto para las nuevas generaciones no es el solo aportar nuevas teorías y tecnologías, sino darle un valor más, con su talento, dedicación e innovación. Teniendo en cuenta que la globalización es una realidad, la cual exige a cada minuto que pasa, siendo las nuevas tecnologías renovables, sustentables y a un bajo costo.

Teniendo como referencia el fenómeno de fuga de cerebros en el que otros países aprovechan el talento, disciplina y conocimiento de los Mexicanos, me hace reflexionar en la falta de decisión en el poder hacer cosas importantes en nuestro país.

Esta tesis defiende el talento y creatividad del Instituto Politécnico Nacional, con el tema de “Análisis y Diseño del Tubo de Impedancias Bajo el Método de Función de Transferencia”; teniendo como referencia el tubo del CCADET y CENAM.

INDICE

<i>CAPITULO I</i>	8
<hr/>	
<i>Bases y Fundamentos de Acústica</i>	8
<hr/>	
1.1 Características del Sonido.....	9
1.2 Suma de las ondas senoidales.....	10
1.3 Presión Sonora.....	10
1.4 El decibel.....	12
1.5 Interacción entre ondas.....	14
1.6 Tipos de fuente de sonido.....	15
1.7 Frecuencias de Resonancia.....	17
1.8 La velocidad del sonido.....	21
<i>CAPITULO II</i>	23
<hr/>	
<i>Fundamentos del Tubo de Impedancias</i>	23
<hr/>	
2.1 Superposición e Interferencia.....	23
2.2 Ondas Estacionarias.....	26
2.3 Tubos.....	28
2.4 Tubos Abiertos.....	28
2.5 Tubos Cerrados.....	29
2.6 Ondas Estacionarias en Tubos Abiertos y Cerrados.....	30

2.7 Tubo de Kundt.....	31
2.8 Coeficiente de Absorción.....	32
2.9 Análisis para un tubo de Impedancia.....	34
2.10 Impedancia Acústica Específica.....	35
CAPITULO III	38
<hr/>	
<i>Tubo de Impedancias</i>	38
<hr/>	
3.1 Características.....	39
3.2 Uso.....	39
3.3 Operación.....	40
3.4 Componentes Principales del Tubo de Impedancias.....	40
CAPITULO IV	42
<hr/>	
<i>Análisis y Diseño del Tubo de Impedancias por el Método de Función de Transferencia</i>	42
<hr/>	
4.1 Diseño del Tubo de Impedancias.....	43
4.2 Ancho de Banda del tubo de Impedancias.....	43
CAPITULO V	47
<hr/>	
<i>Planos del Tubo de Onda Estacionaria</i>	47
<hr/>	

CONCLUSIONES 54

APENDICE 56

Estudio Económico 56

BIBLIOGRAFÍA 58

CAPITULO I

Bases y Fundamentos de Acústica

En este capítulo se expondrán los principios fundamentales de la Acústica, para comprender mejor el desarrollo de la presente tesis, comenzaremos por definir el sonido, ya que este es un insumo fundamental en el quehacer de la Acústica como área del conocimiento que le permite al Instituto Politécnico Nacional formar recursos humanos en el campo de la ciencia y la tecnología.

El sonido se compone de fenómenos tanto físicos como psicológicos.

El sonido analizado como un fenómeno físico “Es el movimiento organizado de las moléculas causado por un cuerpo que vibra en un medio elástico: agua, aire, rocas o cualquier estado conformado por moléculas”.

Analizando el sonido como un fenómeno psicológico “Es una sensación codificada solo por la mente, siendo redundante, una experiencia sensible que podemos relacionar con nuestra vida física y emocional”.

El sonido se produce cuando un cuerpo vibra con suficiente rapidez para enviar una onda a través del medio en el que se encuentra; sin embargo, el sonido, como sensación, debe ser recibido por el oído, y transmitirlo hacia el cerebro, el cual lo registrará como un fenómeno o un hecho que ocurre en el mundo que rodea al oyente.

Se puede comprender claramente como se transmite el sonido haciendo un examen atento de las características del aire. Sus moléculas se mueven continua y erráticamente entregadas en un aire desordenado, como ocurre con las parejas en un atestado salón de baile, su poniendo un caso en el que en ese salón de baile, un camarero invade la pista de baile y con ello obliga a las parejas a que le abran paso; estas al retirarse, chocan con las parejas que lo rodean, la reacción en cadena; los encontronazos recorren el lugar formando una onda de empuje y de choque que va del camarero hacia afuera, a través de las parejas, hasta llegar a los bordes opuestos de la pista. En seguida las parejas tratan de volver a ocupar el espacio que tenían, y volverán a ser empujadas cuando otro camarero invada el lugar de baile.

El sonido se mueve de la misma forma que el encontronazo se mueve en el salón de baile; en lugar del camarero, se trata de una fuente de sonido que puede ser una campana, un tambor, unas cuerdas vocales o un altavoz. El objeto vibrante empuja repetidamente las moléculas de aire que lo tocan, del mismo modo que el camarero empuja a las parejas; las moléculas perturbadas chocan con sus vecinas y regresan a sus posiciones originales, para ser empujadas nuevamente. Las moléculas vecinas hacen lo mismo, y el proceso se repite indefinidamente; en este proceso, las moléculas, al igual que las parejas de baile, no se

desplazan mucho. Lo que si viaja a través del aire es la perturbación. Las moléculas que chocan entre si forman una compresión, y las que al rebotar se apartan, forman una rarefacción; las compresiones y rarefacciones se extienden por el aire y forman la onda de presión llamada sonido.

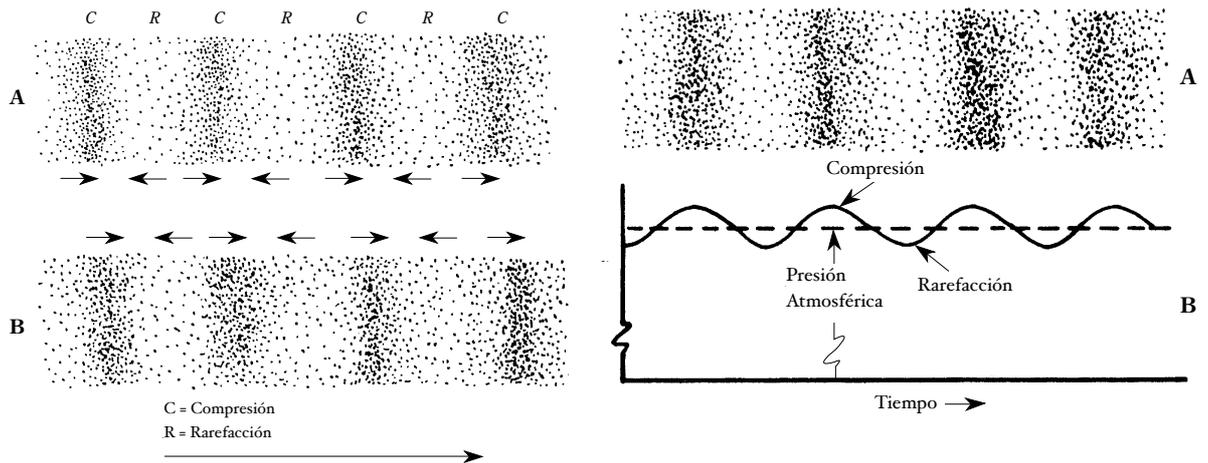


Figura ilustrativa de compresión y rarefacción en relación a la presión atmosférica

1.1 CARACTERÍSTICAS DEL SONIDO

Si conectáramos un micrófono a un sistema de registro gráfico, y este trazara las variaciones de presión de las ondas sonoras que le lleguen. La presión sube a un máximo de compresión y luego baja a un mínimo de rarefacción de las moléculas de aire en la onda de presión; pero la gráfica revela más: la altura de las ondulaciones, que indica la presión máxima, da una medida exacta de la intensidad del sonido, la cual esta relacionada (aun que no es lo mismo) con la sonoridad. La distancia entre las cimas adyacentes, que indica el número de veces que éstas pasan, ante el micrófono, es una medida de la frecuencia del sonido, la cual se encuentra relacionada (subjetivamente) con el tono del sonido.

La frecuencia es por consiguiente, el número de vibraciones por segundo que da, de un lado al otro el objeto que perturba las moléculas del aire. La frecuencia de las ondas de

presión aumenta al vibrar más aprisa el objeto que produce el sonido. Las notas musicales o tonos se definen por la frecuencia; el **la** que esta sobre el **do** medio, tiene 440 vibraciones por segundo. El **do** medio tiene 216.6; a mayor frecuencia corresponde tono más alto.

1.2 SUMA DE LAS ONDAS SENOIDALES

La suma de las ondas senoidales como elementos constitutivos de sonidos (complejos) es una onda compleja a la onda original o fundamental. Este descubrimiento se hizo en 1810 formalmente por Jean Baptiste Fourier.

El gran descubrimiento de Fourier consistió en relacionar la complejidad del movimiento de una onda, sea de radio, calor, luz, sonido o de agua con una idea matemática tan antigua, que el matemático griego Pitágoras, había descubierto como una simple relación numérica entre los sonidos de la música.

La descomposición que hizo Fourier de los sonidos en las ondas senoidales que los constituyen significó un adelanto gigantesco. Pues es en base a este descubrimiento que se sabe que las ondas senoidales que forman una nota musical tienen una relación entre sí, cada una es un sobretono o red armónica de la nota fundamental; es decir, la nota más baja, y la frecuencia de cada armónica es un múltiplo de la frecuencia fundamental.

Al tocar la nota **la** de un violín se produce no sólo la nota **la**, de 440 vibraciones por segundo, si no también la segunda armónica, una octava más alta, de 880 vibraciones, la tercera armónica de 1320 vibraciones, y así sucesivamente.

1.3 PRESIÓN SONORA

Cuando una fuente, tal como un diapasón, vibra fija; las variaciones de presión radian en un patrón circundante. Las emisiones de la variación de presión puede ser comparada a la ondulación en una charca causada por una piedra lanzada en el agua. La ondulación se separó hacia fuera de la punta donde la piedra entró. Sin embargo el agua por sí misma no se mueve lejos desde el centro. El agua permanece donde está, moviéndose hacia arriba y hacia abajo para producir una ondulación en la superficie. La piedra es una fuente, la charca es el aire, y la ondulación es la onda acústica que resulta.

PRESION SONORA

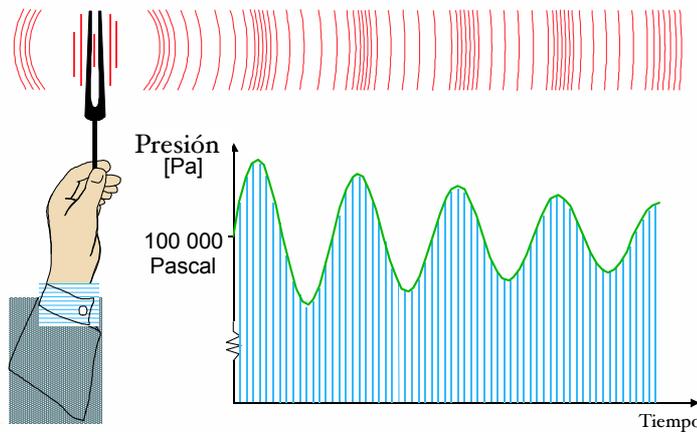


Figura ilustrativa de la presión atmosférica respecto al tiempo

Las vibraciones acústicas de la presión se superponen en la presión de aire estática que tiene un valor de 10^5 PASCAL. Comparado con la presión del aire estática, la dimensión de las variaciones de presión del sonido audible se cuantifican en un valor pequeño, cerca de los 20μ Pascales, en esta referencia la presión más pequeña es perceptible, en promedio por el oído, y por lo tanto se le llama el umbral de audición. La presión del sonido aproximadamente a 100 Pascales es tan ruidosa que causa dolor, y por lo tanto se le llama umbral del dolor.

PRESION SONORA

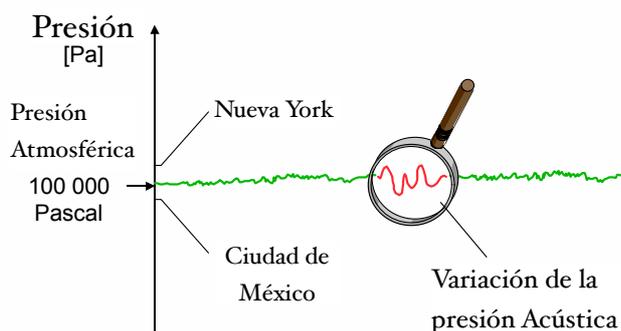


Figura ilustrativa de la presión atmosférica en distintos lugares Cd. De México y Nueva York

Su aplicación directa es la escala lineal, en PASCAL, que se emplean para dimensionar la presión sonora, sin embargo; esto conduciría al uso de números enormes y poco manejables. Y si adicionalmente, abonos que el oído no responde linealmente, sino de forma logarítmica se ha encontrado más práctico expresar parámetros acústicos, aplicando una relación de transformación logarítmica, llamada decibel (dB).

1.4 EL DECIBEL

Para medir la intensidad relativa de diferentes sonidos, se han formulado relaciones o índices entre sonidos fuertes y suaves. La unidad científica de medición del sonido es el Decibel.

El decibel, es la relación que existe entre dos cantidades de la misma especie (unidad nombrada así por el científico Alexander Graham Bell, es por eso el uso de “B” de dB).

Los físicos miden la intensidad del sonido tomando como base los vatios de potencia que dan en un centímetro cuadrado de cualquier superficie (por ejemplo la del tímpano). Mas aun que el tímpano es una cantidad, es, a pesar de ello, inmensa para medir el sonido. A 0.000001 de vatio, que es el ruido que produce, un torno automático, este sonido es ya un ruido molesto. A 0.001 de vatio, que es la intensidad de sonido de una batería de cañones, diez billones de veces más intenso que el más débil sonido perceptible, este ruido causa dolor físico.

Un sonido diez veces más fuerte que otro es diez decibeles más intenso; cada diez veces de aumento en la intensidad significa un aumento de diez decibeles en el sonido. Un sonido mil veces más intenso que otro es treinta decibeles más fuerte.

Por definición el logaritmo de 100 en base 10 es igual a dos, comúnmente se representa $\log_{10} 100 = 2$, simplificado es $\log 100 = 2$, por que regularmente el logaritmo de un número esta basado en base 10.

Forma Decimal	Forma Aritmética	Forma Exponencial
100,000	$10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 10$	10^5
10,000	$10 \times 10 \times 10 \times 10$	10^4
1,000	$10 \times 10 \times 10$	10^3
100	10×10	10^2
10	10×1	10^1
1	$10/10$	10^0
0.1	$1/10$	10^{-1}
0.01	$1/(10 \times 10)$	10^{-2}
0.001	$1/(10 \times 10 \times 10)$	10^{-3}
0.0001	$1/(10 \times 10 \times 10 \times 10)$	10^{-4}

Tabla de relación exponencial Logarítmica

El decibel es una medida que establece una relación aproximada entre la intensidad física del sonido y la sonoridad subjetiva con que se percibe.

La razón por lo que es usado el decibel, es por que es logarítmica, y por lo tanto se puede expresar cantidades numéricas pequeñas así como cantidades numéricas muy grandes que se relacionan entre si. Sin embargo, es la percepción del sonido en el oído humano, que es un factor muy importante, ya que es logarítmica la forma en que el oído percibe el sonido.

Sin embargo la sonoridad no guarda relación directa con la intensidad. Un mecanismo interconstruido disminuye la sensibilidad del oído al aumentar la intensidad; gracias a él, una batería de cañones no la oímos diez billones de veces más fuerte que el zumbido de un mosquito.

1.5 INTERACCIÓN ENTRE ONDAS

Sonido en el espacio libre

El sonido en el espacio libre viaja en líneas rectas, sin obstáculos y sin desvíos. El sonido sin obstáculos, es un sonido que no se puede reflejar, absorber, difractarse, refractarse, difundirse y por lo tanto no está sujeto a efectos de resonancia.

El espacio libre no debe confundirse con el espacio cosmológico. El sonido no puede viajar a través del vacío, el sonido requiere de un medio de propagación (en este caso el aire).

Como se muestra en la figura, la fuente en un punto, radia sonido con una intensidad fija. Los círculos representan esferas que tienen radios en múltiplos simples; toda la intensidad del sonido pasa a través de una pequeña área cuadrada de radio " d ", también pasan a través de las áreas $2d$, $3d$, $4d$, etc. La intensidad del sonido disminuye conforme la distancia de la fuente es incrementada. En el espacio libre, lejos de la influencia de objetos circundantes, el sonido de una fuente se propaga uniformemente en todas las direcciones. Como el área de una esfera es $4\pi r^2$, el área de un pequeño segmento en la superficie de la esfera, también varía como el cuadrado del radio. Doblando la distancia de " d " a " $2d$ ", reduce la intensidad a $1/4$; triplicando la distancia; se reduce a $1/9$; cuadruplicando la distancia, reduce la intensidad a $1/16$. La intensidad del sonido disminuye en la forma en que se muestra:

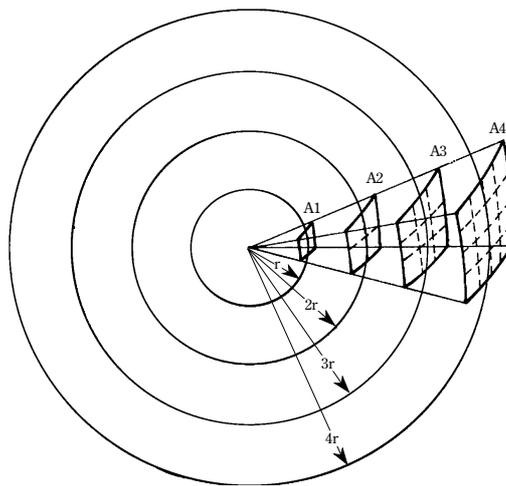


Figura de la intensidad del sonido respecto a su propagación

Esto significa que la potencia sonora por unidad de área (intensidad) disminuye a la raíz del radio. Doblar la distancia reduce la intensidad a un cuarto del valor inicial. La ley del cuadrado inverso indica que la intensidad del sonido en un campo libre es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente.

En campo libre no existen paredes que interrumpan la difusión del sonido, en cualquier punto del espacio las ondas solo vienen de la fuente sonora, decreciendo su presión con la distancia, de manera que llega a hacerse imperceptible cuando la distancia es grande.

Sonido en un local cerrado

En cambio, en un lugar cerrado existen unas colindancias, sobre las que colisionará la onda sonora. Parte de la energía de la onda será absorbida por las colindancias y el resto reflejada nuevamente a la sala, de manera que, en un punto cualquiera el sonido no llega solamente de la fuente, sino también de las colindancias que lo reflejan. El campo sonoro ahora no decrece ahora de forma tan sencilla con la distancia: incluso supera en la sala, la potencia sonora que existiría en campo libre a igual distancia.

Campo difuso

El caso ideal de campo dentro de un recinto sería el campo difuso, en el que todos los puntos tienen la misma presión sonora, no dependiendo de la distancia. Para ciertas mediciones, como el medir el coeficiente de absorción, se construyen locales especiales, en el que se pueda crear un campo difuso. Estos locales se denominan cámaras de ensayo o reverberantes.

Para cada aplicación necesitamos características diferentes, un tamaño y diseño, que nos de la reverberación adecuada.

1.6 TIPOS DE FUENTE DE SONIDO

Fuente Puntual

La fuente que podemos observar en la ilustración, es llamada fuente en un punto; y para dicha fuente, la intensidad del sonido disminuye conforme la distancia de la fuente es incrementada. La presión es la mitad del valor cuando la distancia a la fuente se dobla.

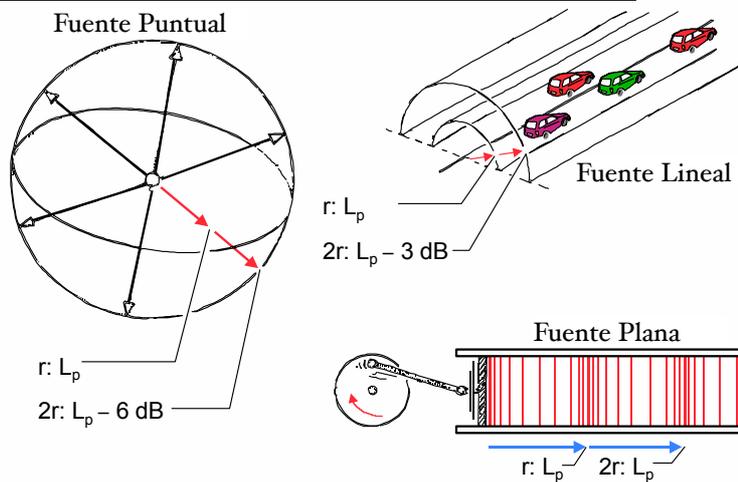
Fuente lineal

Otro tipo de fuente es la fuente lineal, cual podrían ser un tubo que lleva un líquido turbulento, o un camino con una alta circulación. La presión sonora de una fuente lineal cae solamente por 3dB al doblar la distancia de la fuente. Por que el sonido se separa hacia afuera de la fuente como una frente de onda perpendicular a la dirección de la fuente lineal.

Fuente plana

El más raro tipo de sonido cuando es de medir el ruido normal, es la fuente plana. El principio de la fuente plana consiste en un pistón del cual radia energía dentro de un tubo, formando una señal en el tubo. Donde la intensidad es la misma en cualquier parte del tubo el nivel de presión del sonido no disminuye al incrementar la distancia del pistón.

Tipos de Fuentes Sonoras



1.7 FRECUENCIAS DE RESONANCIA

Como consecuencia de las reflexiones consecutivas en las paredes aparecen las denominadas ondas estacionarias, que se asocian a los modos normales de vibración del local. Estas dependen de la forma y dimensiones del mismo y se ven incrementadas frente a los demás generando una deformación del mensaje original. Se denominan también frecuencias propias del local.

Onda estacionaria

Constituye el sistema de onda resultante de la diferencia de ondas que tengan la misma frecuencia, amplitud y longitud de onda, pero se propagan en direcciones opuestas. Es decir, las ondas reflejadas interfieren con las incidentes originando ondas estacionarias. Los puntos de amplitud máxima (antinodos) ocurren en una dimensión de tiempo (X), en donde $X = n\lambda/4$ para n impar. Los puntos de amplitud cero (nodos) ocurren en $X = n\lambda/2$ para valores enteros de n .

Onda longitudinal

Las oscilaciones de las partículas están a lo largo de una línea paralela a la dirección de propagación.

Onda plana

A distancias de la fuente que son grandes en comparación con la longitud de onda se pueden aproximar los frentes de onda por planos paralelos. Cualquier pequeña porción de una onda esférica que esté lejana de la fuente puede considerarse como onda plana. En donde la presión es constante durante su propagación.

Frente de Onda

Puntos que se encuentran en fase a distancias equivalentes a una longitud de onda, forman parte de una de las superficies imaginarias continuas. Los frentes son perpendiculares a la dirección de propagación.

Reflexión

Generalmente una onda acústica sufrirá una reflexión siempre que exista una discontinuidad o un cambio en el medio a través del cual se propaga una onda.

Como se ilustra en la figura, la reflexión de las ondas de una fuente, en una superficie rígida, (barrera de superficie plana). Análogamente como la luz en un espejo, la onda incidente será, como si estuviese una fuente en el otro lado del muro. Esta imagen de la fuente está situada a la misma distancia a la original.

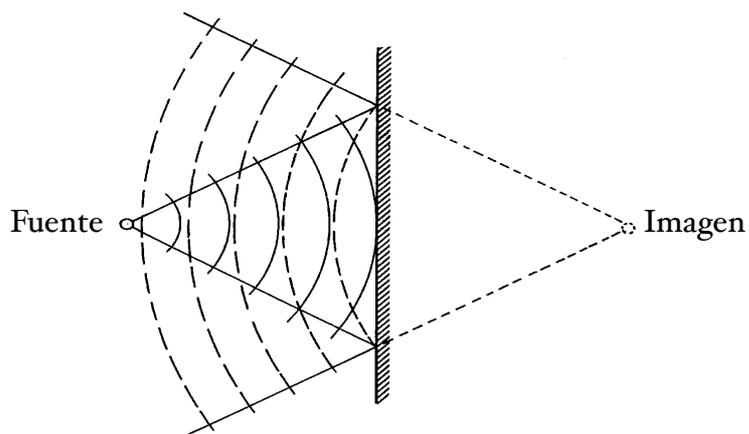
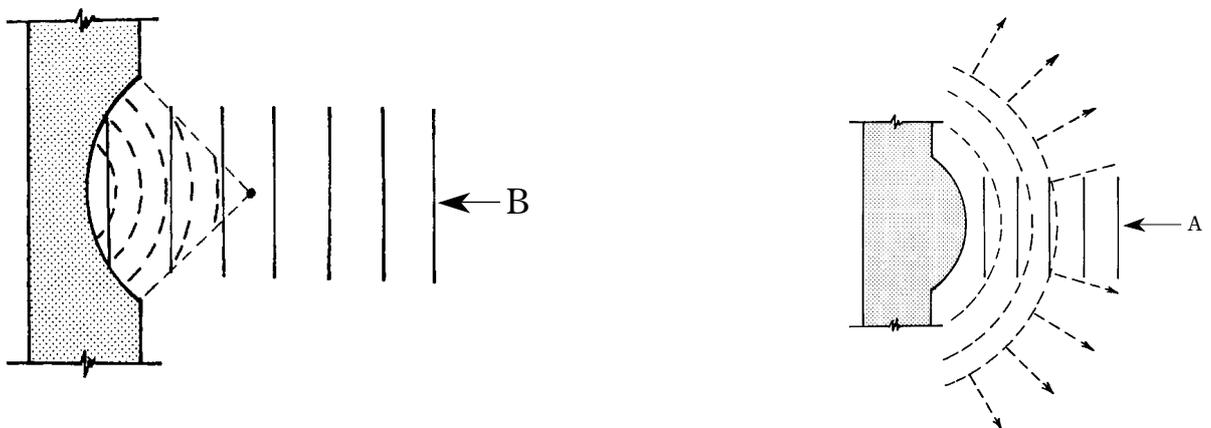


Figura de Reflexión en una superficie plana

La presión sonora en una superficie normal de una onda incidente, es igual a la presión original. El ángulo de incidencia es igual a el ángulo de reflexión.

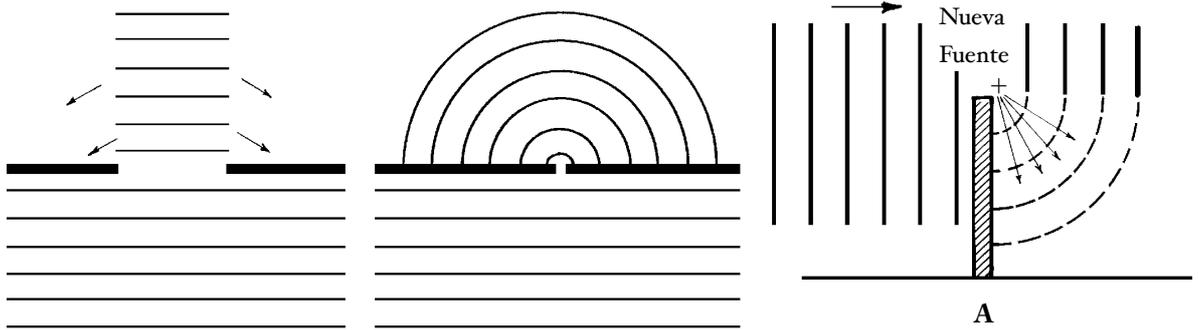
Las reflexiones de las ondas, toman la forma de la superficie en la que inciden, como podemos verificar en las ilustraciones.



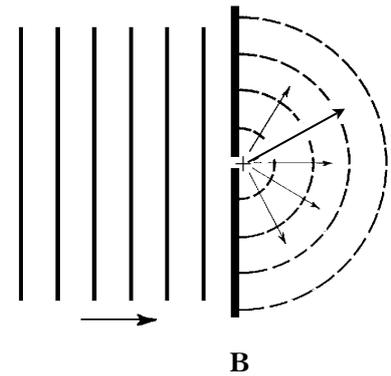
Figuras de Reflexión en superficies onda y con relieve

Difracción

Cuando reproducimos una de nuestras canciones preferidas en la sala de nuestra casa y podemos escucharla tanto en la cocina, en nuestra recámara, en el jardín o en otro cuarto. Esto se debe a la difracción, ya que es un mecanismo envolvente. La sonoridad de la canción es diferente en cada uno de los lugares, en algunos sitios las ondas de frecuencias bajas son más intensas que en otros, esto se debe a que las bajas frecuencias tienen la facilidad de difractarse alrededor de los obstáculos y esquinas.



La efectividad de un obstáculo en difractar es determinado por el tamaño acústico del obstáculo. El tamaño acústico es determinado mediante la medición en términos de la longitud de onda del sonido. Entre mas baja sea la frecuencia de la onda difractada, la involucencia con el obstáculo será mayor con respecto a una frecuencia alta.



La difracción del sonido por obstáculos, está en función al tamaño del obstáculo y a la longitud de onda del sonido, cuando el obstáculo es mas pequeño con respecto a la longitud de onda del sonido, la onda es difractada con una involucencia muy buena; casi no hay perdida, en cambio si el obstáculo es mayor con respecto a el tamaño de la longitud de onda, la onda difractada dejara una sombra (un espacio vacío) por la cual no habrá sonido en esa área.

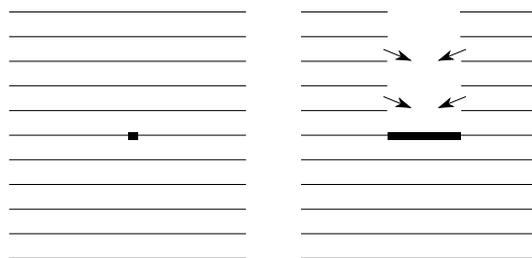


Figura de difracción através de obstáculos pequeños

Refacción

La refacción, cambia la dirección del viaje del sonido por diferencias en la velocidad de propagación del sonido. Difracción es el cambio de dirección de viaje del sonido por un inesperado cambio de estado y obstrucciones físicas.

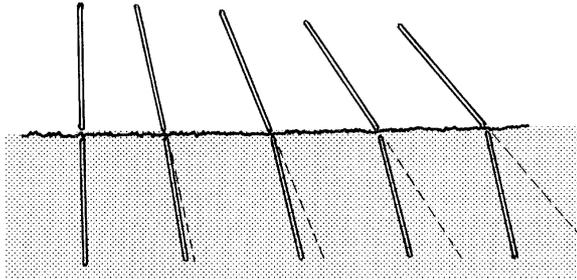


Figura de refacción

La refacción de una onda sonora se produce cuando el medio en el que viaja la onda sonora sufre un cambio de estado en función a la densidad del medio y de la temperatura, y este fenómeno cambia su velocidad de propagación y su dirección.

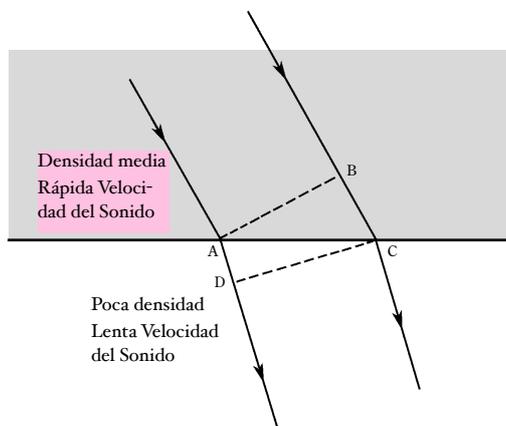
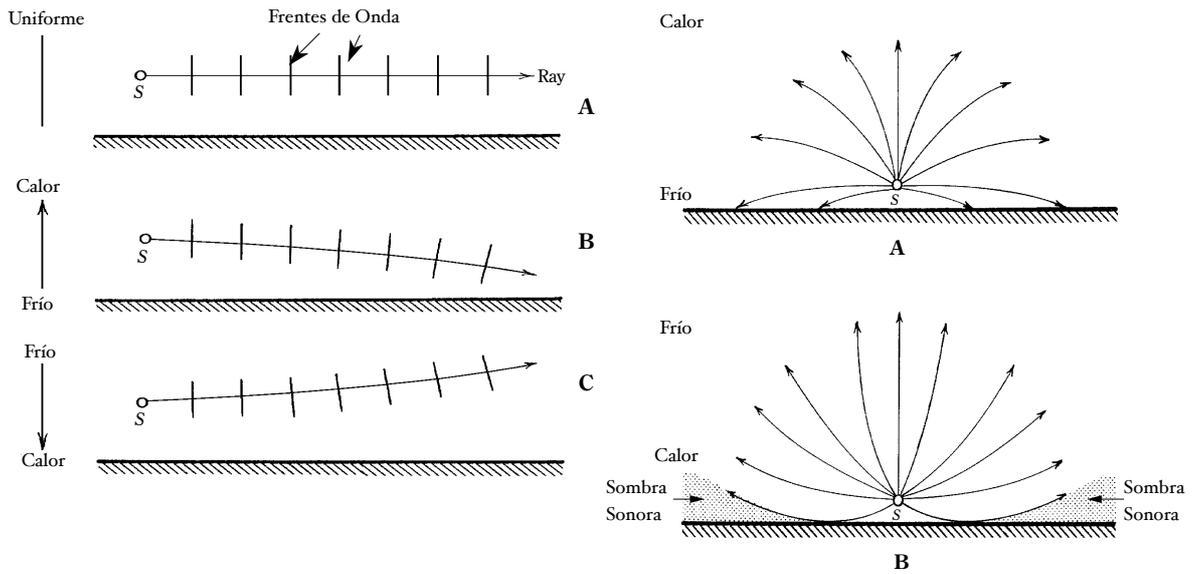


Figura de refacción con distintas densidades

La refacción del sonido en la atmósfera, se da de manera uniforme, debido a que la atmósfera es un medio estable normalmente. El aire que esta cerca de la tierra es mas caliente que aire a grandes alturas, algunas veces este está congelado.



Figuras de la refracción con distintas temperaturas

1.8 LA VELOCIDAD DEL SONIDO

La velocidad del sonido fue medida por primera vez hacia 1640 por el matemático francés Marín Mersenne, quien calculó el tiempo que tardó en regresar el eco a la fuente en una distancia conocida. Calculó esa velocidad en 316.38 metro por segundo.

Unos veinte años después, dos investigadores Italianos, Borelli y Viviani, idearon un método más exacto para medir la velocidad del sonido, el cual se basaba en el tiempo que tardaba en llegar a un observador el estampido de un cañón. Este método fue perfeccionado en 1708 por el Ingles William Derham, que incluso tomó en cuenta el efecto de los vientos en sus mediciones de la velocidad del sonido. Midió el intervalo entre el momento en que produjo el estallido y aquel en que se oyó la explosión; repitió las medidas para tomar en cuenta los cambios en el viento y promediando los resultados, obtuvo una cifra muy cercana a la verdadera: 342.90 metros por segundo a 20° centígrados.

La temperatura es importante, ya que afecta la velocidad del sonido. En un medio frío, las moléculas se mueven con lentitud y ello reduce la velocidad a la que se transmite el sonido, si este medio es calentado, sus moléculas chocan entre si con más rapidez, y ello aumenta la velocidad del sonido. Así, a 0° centígrados, que es la temperatura de congelación

del agua, la temperatura viaja por el aire a 331.31 metros por segundo, y a 100°, que es su punto de ebullición, aumenta su velocidad a 385.87 metro por segundo.

La naturaleza del medio tiene efectos aun más marcados en la velocidad del sonido. Así, por ejemplo, el agua a 20° transmite las ondas sonoras con una rapidez cuatro veces mayor que el aire a la misma temperatura, es decir, a unos 1479 metros por segundo. Los sólidos transmiten el sonido todavía más aprisa: el cuarzo a 5486 metros por segundo y el acero a 6096 metros por segundo, por ejemplo.

CAPITULO II

Fundamentos del Tubo de Impedancias

2.1 SUPERPOSICIÓN E INTERFERENCIA

Las ondas sonoras son el ejemplo más ilustrativo de las ondas longitudinales. Pueden desplazarse a través de cualquier medio material (gases, sólidos o líquidos) con una rapidez que depende de las propiedades del medio. Cuando las ondas sonoras viajan por un medio, las partículas del medio vibran a lo largo de la dirección del movimiento de la onda. Los desplazamientos que ocurren como resultado de las ondas sonoras comprenden los desplazamientos longitudinales de las moléculas a partir de sus posiciones de equilibrio, lo que produce una serie de regiones de alta y baja presión. Si la fuente de las ondas sonoras, tal como el diafragma de un altavoz, vibra senoidalmente, las variaciones de presión también serán senoidales.

Un problema importante que surge cuando se trata con ondas es el que se refiere al efecto combinado de dos o más ondas que viajan en el mismo medio.

En un medio isótropico, se puede aplicar el principio de superposición para obtener la perturbación resultante. Este principio es aplicable a muchos tipos de ondas, incluyendo las ondas en cuerdas, ondas sonoras, ondas superficiales en el agua y ondas electromagnéticas. Este principio establece que el desplazamiento real de cualquier parte del medio perturbado es igual a la suma algebraica de los desplazamientos causados por cada una de las ondas.

Se aplicara este principio de superposición a dos ondas armónicas que viajan en la misma dirección en cierto medio. Si el movimiento de las dos ondas es hacia la derecha y tiene las misma frecuencia, longitud de onda y amplitud, pero difieren en fase, se pueden expresar sus funciones de ondas individuales como:

$$y_1 = A_0 \text{ sen } (kx - \omega t) \text{ ----- (1)}$$

$$y_2 = A_0 \text{ sen } (kx + \omega t - \phi) \text{ ----- (2)}$$

Con una amplitud

En consecuencia de (1) y (2), la función de onda resultante “Y” se obtiene:

$$Y_{\text{resultante}} = y_1 + y_2 = A_o [\text{sen}(kx - wt) + \text{sen}(kx - wt - \phi)] \text{ - - - - - (3)}$$

Para simplificar esta expresión, es conveniente emplear la identidad trigonométrica siguiente:

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2 \cos (a - b)/2 \cdot \text{sen } (a+b)/2$$

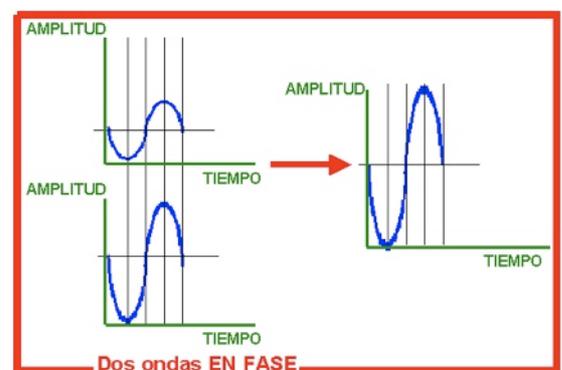
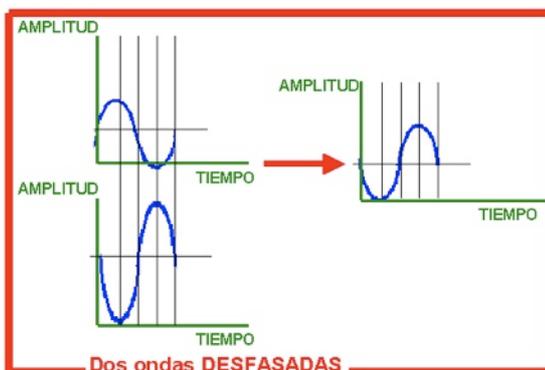
Si se hace $a = kx - wt$ y $b = kx - wt - \phi$, se encuentra que la onda resultante Y (3), se reduce a:

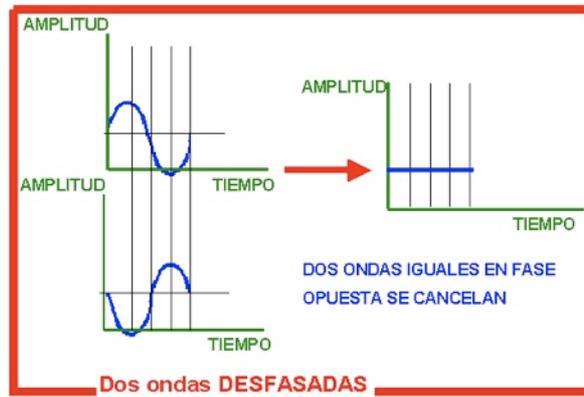
$$Y = 2A_o \cos (kx - wt - kx + wt + \phi) / 2 \cdot \text{sen } (kx - wt + kx - wt - \phi) / 2$$

$$Y = 2A_o \cos (\phi / 2) \cdot \text{sen } [(2kx - 2wt - \phi) / 2]$$

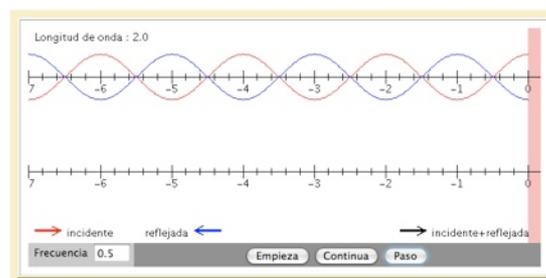
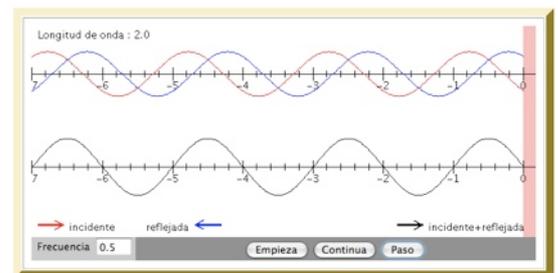
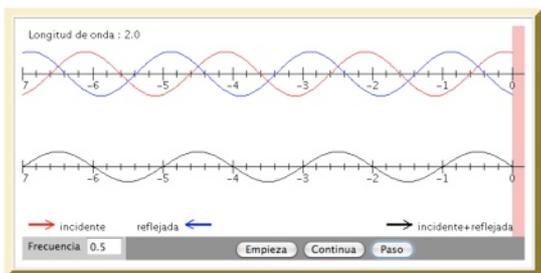
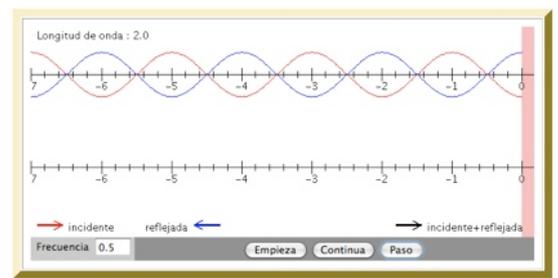
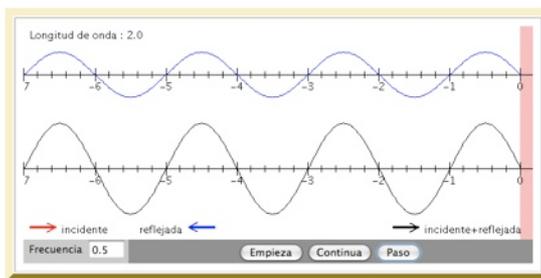
$$Y = 2A_o \cos (\phi/2) \cdot \text{sen } (kx - wt - \phi/2)$$

Se presentan varias características importantes en el resultado. La función de onda resultante Y es también armónica y tiene la misma frecuencia y longitud de onda que las ondas individuales. La amplitud de la onda resultante es $2A_o \cos (\phi/2)$, y su fase es igual a $\phi/2$. Si la constante de fase ϕ es igual a cero, entonces $\cos \phi/2 = \cos 0 = 1$ y la amplitud de la onda resultante es $2A_o$.





En otras palabras, la onda resultante es el doble de la larga que cualquier onda individual. En este caso se dice que las ondas están en fase en todas partes de esta manera se interfieren constructivamente; es decir, las crestas y valles de las ondas individuales ocurren en las mismas posiciones. Y Cuando no están en fase en todas partes se destruyen; es decir, las crestas y valles de las ondas individuales no ocurren en las mismas posiciones.



Si este tipo de ondas se llega a combinar en determinado medio y sucede que tiene las misma frecuencia, amplitud y longitud de onda pero se propagan en direcciones opuestas, se encuentra que una onda estacionaria puede producirse.

2.2 ONDAS ESTACIONARIAS

Consideremos dos ondas senoidales de la misma amplitud, frecuencia y longitud de onda, pero viajando en direcciones opuestas. Siendo sus funciones de onda :

$$y_1 = A_o \text{ sen } (kx - wt) \quad \text{y} \quad y_2 = A_o \text{ sen } (kx + wt)$$

Donde “ y_1 ” representa una onda viajando hacia la derecha y “ y_2 ” representa una onda que viaja hacia la izquierda. La onda incidente y la onda reflejada se combinan obedeciendo al principio de la superposición; por lo tanto la adición de estas dos funciones produce la función de onda resultante Y .

$$Y = y_1 + y_2 = A_o \text{ sen } (kx - wt) + A_o \text{ sen } (kx + wt) \text{ ----- (I)}$$

Donde $k = 2\pi/\lambda$ y $w = 2\pi f$. Empleando la identidad trigonométrica en (I):

$$\text{Sen } (a \pm b) = \text{sen } a \text{ cos } b \pm \text{cos } a \text{ sen } b$$

$$Y = A_o (\text{sen } kx \text{ cos } wt - \text{cos } kx \text{ sen } wt) + A_o (\text{sen } kx \text{ cos } wt + \text{cos } kx \text{ sen } wt)$$

$$Y = A_o \text{ sen } kx \text{ cos } wt - \cancel{A_o \text{ cos } kx \text{ sen } wt} + A_o \text{ sen } kx \text{ cos } wt + \cancel{A_o \text{ cos } kx \text{ sen } wt}$$

$$Y = 2 A_o \text{ sen } (kx) \text{ cos } (wt)$$

Esta expresión representa la función de onda, de una onda estacionaria. A partir de este resultado, se observa que una onda estacionaria tiene una frecuencia angular “ w ” y un amplitud dada por $2 A_o \text{ sen } kx$.

Puesto que la amplitud de la onda estacionaria, en cualquier valor de x , es igual a $2 A_o \text{ sen } kx$, se observa que la amplitud máxima tiene el valor $2A_o$. Esto ocurre cuando la coordenada “ x ” satisface la condición $\text{sen } kx = 1$, o cuando:

$$kx = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2, \dots$$

Ya que $kx = \pi/2$, las posiciones de las amplitudes máximas, denominadas antinodos, se obtienen mediante:

$$x = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4, \dots = n\lambda/4$$

Donde $n = 1, 3, 5, \dots$ obsérvese que los antinodos adyacentes están separados por una distancia de $\lambda/2$. En forma similar, la onda estacionaria tiene una amplitud mínima cero cuando “ x ” satisface la condición $\sin kx = 0$, o cuando:

$$kx = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

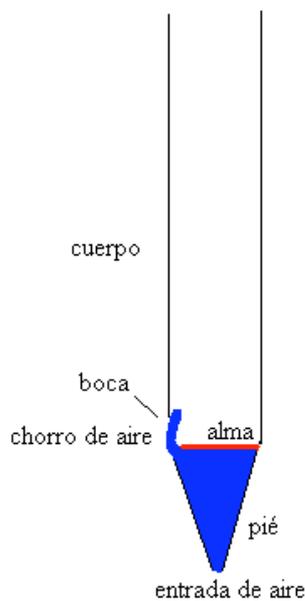
Así se obtiene:

$$x = \lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots = n\lambda/2$$

Donde $n = 1, 2, 3, \dots$ estos puntos, cuya amplitud es cero, se llaman NODOS, también están separados por $\lambda/2$. La distancia que existe entre un nodo y un antinodo adyacente es $\lambda/4$.

2.3 TUBOS

El tubo de un 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.



2.4 TUBOS ABIERTOS

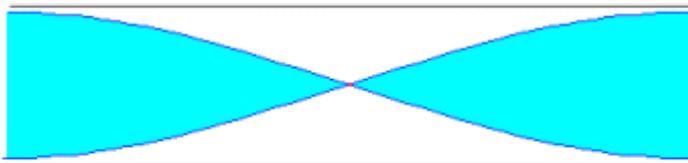
Si un tubo es abierto, el aire vibra con su máxima amplitud en los extremos. En la figura, se representan los tres primeros modos de vibración.

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

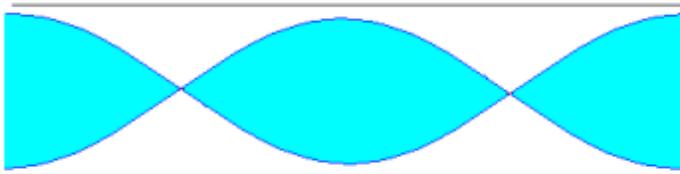
$$L = \lambda/2, L = \lambda, L = 3\lambda/2, \dots \text{ en general } L = n \frac{\lambda}{2}, n = 1, 2, 3, \dots \text{ es un número entero}$$

Considerando que $\lambda = c / f$ (coeficiente de la velocidad del sonido sobre la frecuencia).
 Las frecuencias de los distintos modos de vibración responden a la fórmula :

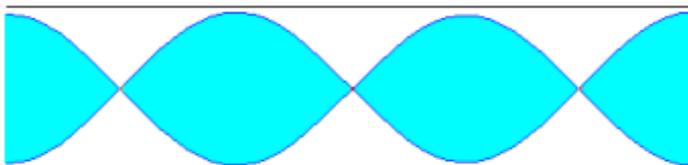
$$f = \frac{n}{2} \frac{c}{L} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$



Fundamental



Primer Sobretono



Segundo Sobretono

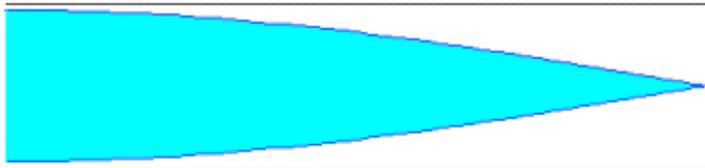
2.5 TUBOS CERRADOS

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 $L = \lambda / 4$, $L = 3 \lambda / 4$, $L = 5 \lambda / 4 \dots$

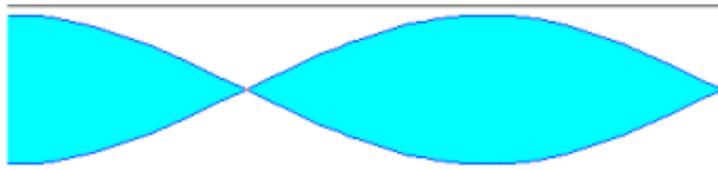
En general, $L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$, $n = 0, 1, 2, \dots$

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

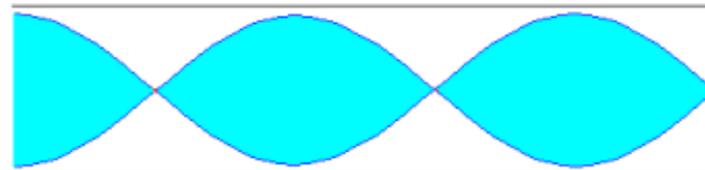
$$f = \frac{2n + 1}{2} \frac{v_s}{L} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$



Fundamental



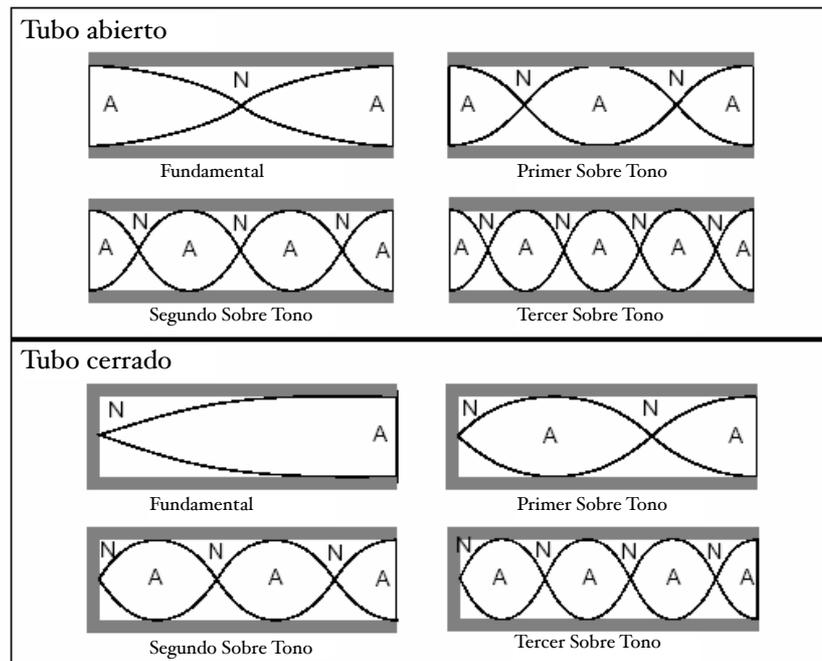
Primer Sobretono



Segundo Sobretono

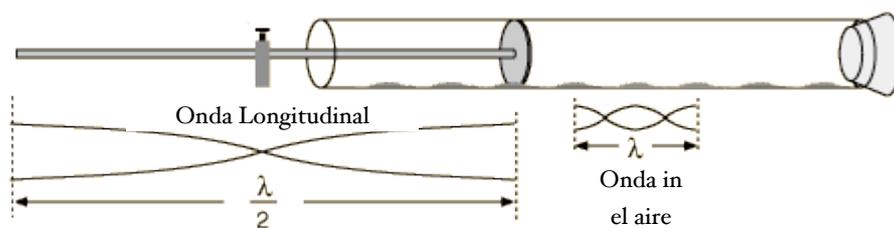
Las frecuencias más bajas que se obtienen según las expresiones anteriores reciben el nombre de fundamentales. Las que se obtienen con valores sucesivos de n reciben el nombre de armónicos o sobretonos.

En las siguientes figuras se muestran las configuraciones de desplazamiento relativo del medio para los cuatro primeros estados de resonancia.



2.7 TUBO DE KUNDT

El sonido en el aire es propagado solo por las principales ondas longitudinales, ondas en cuales el movimiento de las partículas que oscilan hacia atrás, y después retomando su dirección de propagación. Si se tiene un metal rígido como prueba, el sonido puede ser transmitido también como un onda longitudinal o transversal. Usando el tubo de Kundt, se puede determinar la velocidad del sonido debido a que se utilizan las propiedades del movimiento de onda.



El aparato consiste en un tubo de vidrio soportado en una base de metal. Una abrazadera en el final de la base metálica la cual tiene un disco de metal. La barra y el disco se introducen en el tubo de vidrio, cuya posición puede ser ajustada al centro del tubo sobre el disco. Es importante que el disco no toque ni roce el vidrio ya que las vibraciones pueden hacer que el vidrio se estrellé. Un tapón cierra el otro lado del tubo. La velocidad de las ondas esta dada por:

$$v = f \lambda$$

Donde “ f ” es la frecuencia y λ es la longitud de onda. En este experimento, la barra es frotada ligeramente y puesto en vibración, y las ondas estacionarias están instaladas en la vibración de la barra. Desde que la barra es fijada al punto central, este punto es un nodo (cero amplitud o movimiento) y al final donde es libre para vibrar es antinodo (máxima amplitud del movimiento de las partículas a lo largo de la dirección de la barra).

Cuando la barra vibra con la frecuencia fundamental, la longitud de onda y su onda estacionaria, es ambas la longitud de la barra.

Las vibraciones de las barras son transmitidas por el disco a el aire en el tubo de vidrio. Las ondas instaladas en el aire del tubo de vidrio, tiene la misma frecuencia que en la barra. Las ondas son reflejadas en la parte cerrada del tubo y el aire en el tubo es sobre puesto en la onda que incide en la dirección opuesta, originando así una onda estacionaria.

La velocidad del sonido entonces la podemos determinar con la ecuación anterior, teniendo en cuenta la temperatura del lugar, longitud de la onda y la frecuencia.

2.8 COEFICIENTE DE ABSORCIÓN

El coeficiente de absorción (α_n) se define como la relación entre la energía acústica absorbida por la muestra y la energía acústica que incide sobre dicha muestra.

Usando el aparato de ondas estacionarias, es sencilla la medición del coeficiente de absorción (α_n), interactuando la Relación de Onda Estacionaria (**ROE**) y el Coeficiente de Reflexión de presión (**R**), la razón de la amplitud de presión máxima (P_{max}) a la presión mínima (P_{min}) es lo que se define como relación de onda estacionaria (ROE).

$$ROE = P_{max} / P_{min} \text{ ----- (I)}$$

Esta ecuación también puede escribirse como :

$$\text{ROE} = \frac{P_i + P_r}{P_i - P_r} \text{ ----- (2)}$$

Donde:

P_i , Presión incidente

P_r , Presión reflejada

Dividiendo la ecuación (2) entre P_i tenemos:

$$\text{ROE} = \frac{(1 + P_r / P_i)}{(1 - P_r / P_i)} \text{ ----- (3)}$$

Sabemos que P_r / P_i es el coeficiente de reflexión de presión (R), por lo tanto la ecuación (3) puede escribirse como:

$$\text{ROE} = \frac{1 + R}{1 - R} \text{ ----- (4)}$$

Despejando R de la ecuación (4) tenemos:

$$R = \frac{\text{ROE} - 1}{\text{ROE} + 1} \text{ ----- (5)}$$

El coeficiente de absorción puede expresarse en términos de la relación de onda estacionaria como:

$$\alpha_n = 1 - R^2 \text{ ----- (6)}$$

2.9 ANÁLISIS PARA UN TUBO DE IMPEDANCIA

El método para medir el coeficiente de absorción en incidencia normal, midiendo la ROE esta dado por el siguiente análisis. Se produce una onda sonora plana, de cierta frecuencia, dentro del tubo (con radio " d ", longitud " l "), esta onda se refleja por el material bajo medición, colocado en el extremo opuesto del tubo; a consecuencia de esta reflexión se produce un patrón de ondas estacionarias dentro del tubo, este patrón de ondas estacionarias es explorado por un micrófono sonda. El coeficiente de absorción se determina entonces a partir de la ROE. En la siguiente figura se muestra, la representación del patrón de ondas estacionarias dentro del tubo, la curva representa la variación de presión sonora en función de la distancia " X " a partir del material de prueba en medición.

Los sitios en donde la onda incidente y reflejada están en fase, se suman; localizándose ahí los antinodos o máximos de presión sonora (NPS, dB), de la onda estacionaria. Los sitios

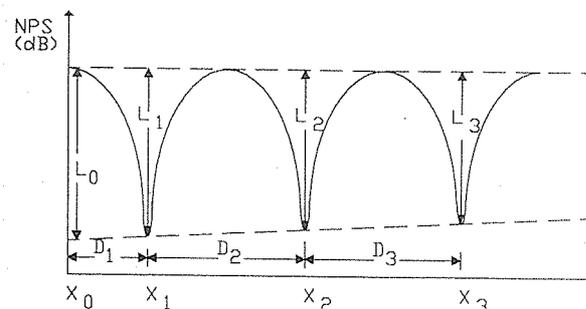


FIGURA 1. Niveles de presión sonora, en decibeles, dentro del tubo.

donde estas ondas están fuera de fase, los niveles se restan, localizándose ahí los mínimos o nodos de la onda estacionaria. La localización de estos nodos esta representada por X_1, X_2, X_3 , de la figura.

Si las envolventes de los niveles máximos y mínimos forman dos rectas paralelas, podemos determinar el coeficiente de reflexión mediante la ecuación (5) y posteriormente el coeficiente de absorción.

Cuando los envolventes para un tubo de impedancia máximos y mínimos ($L_{m\acute{a}x}$ y $L_{m\acute{i}n}$) no forman dos rectas paralelas, se debe a que existe pérdidas a lo largo del tubo. Es decir la energía sonora no solo se pierde por acción de la absorción del material bajo medición, sino que existen otros mecanismos de pérdida. Esto significa que existe cierta atenuación de los niveles en función de la distancia. Una manera de disminuir este efecto es construir el tubo de materiales muy rígidos. Si pese a esto, existe cierta atenuación, se puede aplicar otra ecuación que refleje la curvatura de las envolventes. El efecto de la atenuación es más marcado en la envolvente de $L_{m\acute{i}n}$ que en la de $L_{m\acute{a}x}$. Es probable que la medición del nivel mínimo sea obstaculizado por el nivel de ruido de fondo. Esto constituye una limitante en este método de medición.

Como se analizó, el solamente tomar una medición de L_r es riesgoso para el calculo del coeficiente de absorción, por lo que la Norma ASTM C384-90A, para este método recomienda medir por lo menos dos mínimos y un máximo para el calculo de la ROE.

La relación entre la longitud de onda y la longitud útil del tubo, cuando se desea obtener dos mínimos se expresa en la siguiente ecuación:

$$\frac{3}{4} \lambda < l - d \quad \text{ó} \quad \frac{3}{4} (c / f_{m\acute{i}n}) < l - d$$

Donde " λ " es la longitud de onda (m), " l " la longitud del tubo (m) y " $f_{m\acute{i}n}$ " la frecuencia mínima (Hz).

Esto quiere decir que si se tiene un tubo de 1 metro de longitud y 10 cm de diámetro, considerando una velocidad del sonido promedio de 340 m/s, la frecuencia debe ser mayor a 283 Hz, si se desea medir dos mínimos

Por lo que otra limitante para el tubo, es que debe de tener una longitud muy larga para poder medir frecuencias bajas.

2.10 IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECIFICA

La medición de la impedancia acústica especifica (en incidencia normal) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$z / \rho_c = (r / \rho_c) + j(x / \rho_c) \text{-----} (7)$$

La impedancia acústica específica, esta relacionada con la impedancia acústica del aire “ ρ_c ” por lo que la impedancia definida por la ecuación (7) se denomina como impedancia acústica específica normalizada con, “ r ” como la resistencia acústica específica normalizada y “ x ” como reactancia acústica específica normalizada. Para determinar estas magnitudes es necesario determinar la ROE midiendo las distancias “ D_1 ” y “ D_2 ”.

Para las distancias D_1 y D_2 se debe determinar el ángulo de fase, es decir:

$$\Phi = 360^\circ [(D_1 / D_2) - 1/2]$$

Y con la ROE se puede calcular M y N (Constantes establecidas y recomendadas por la norma ASTM C384 - 90a):

$$M = 1/2 [ROE + (r/ROE)]$$

$$N = 1/2 [ROE - (r/ROE)]$$

Para finalmente:

$$r / \rho_c = r / (M - N \cos \Phi)$$

$$x / \rho_c = r / (\rho_c \sin \Phi)$$

Como el ángulo de fase depende de las distancias se debe tener especial cuidado en medir las distancias X_1 , X_2 , X_3 a partir del origen X_0 (la posición de la cara del material a medir).

Tanto el coeficiente de absorción como la impedancia acústica específica son funciones de la frecuencia, dado que las mediciones se realizan con tonos puros a determinadas frecuencias, el proceso es muy lento cuando se desea conocer el comportamiento de estos parámetros, en una gama grande de frecuencias. Esto representa otra limitante en este método de medición.

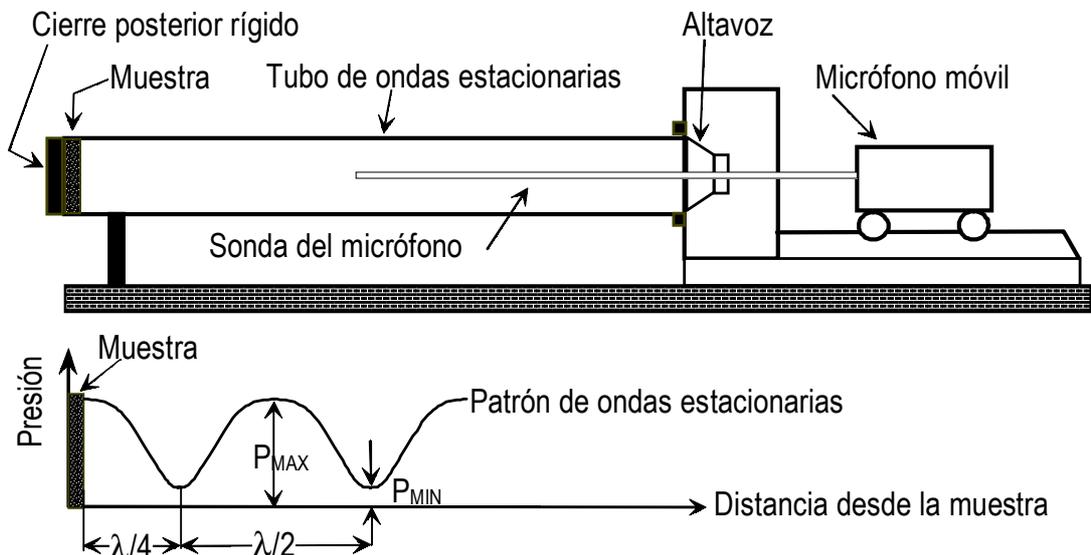
Es importante tener en cuenta, la resonancia en el tubo; de la onda incidente (con amplitud A) y reflejada (con amplitud B), que define el campo sonoro dentro del tubo que se expresa como:

$$\rho(x,t) = Ae^{j(\omega t + kx)} + Be^{j(\omega t - kx)} \text{-----} (8)$$

CAPITULO III

Tubo de Impedancias

El tubo de Impedancias es un aparato que consta esencialmente de un tubo recto que aloja un espécimen en un extremo y generalmente un altavoz como fuente sonora en el otro extremo. Con un micrófono sonda, que se puede mover a lo largo del tubo, se explora la onda estacionaria generada dentro de éste, detectando las variaciones dentro de esta. esta conformado por un altavoz colocado en el extremo del tubo, el cual transmite ondas planas; estas se reflejan en un material absorbente (muestra) colocada en el otro extremo del tubo. Debido a la reflexión de la muestra, se producen ondas estacionarias en el tubo. Midiendo la relación entre la máxima y mínima presión del sonido, el coeficiente de absorción de la muestra puede ser determinado. El tubo de medición es diseñado con una sección circular y los soportes de la muestra son de base muy densa para que únicamente una cantidad prácticamente despreciable de energía de sonido sea absorbida por el aparato.



3.1 CARACTERÍSTICAS

1. Mediciones ágiles sobre muestras pequeñas.
2. Intervalo de frecuencia de 283 a 6500 Hz.

3.2 USO

Medición del coeficiente de absorción acústico de materiales.

El tubo de ondas estacionarias está diseñado para mediciones de coeficiente de absorción de muestras circulares de materiales absorbentes de sonido.

Para poder llevar a cabo mediciones en un relativo amplio intervalo de frecuencias, el aparato de ondas estacionarias es equipado con dos tubos de medición de diferentes diámetros. El grande (con un diámetro de 100 mm) es usado en el intervalo de frecuencias de 100 a 1800 Hz. Y el más pequeño (con un diámetro de 30 mm) debe usarse de 800 a 6500 Hz. Ambos tubos son provistos con un soporte para muestras con una profundidad variable desde 0 hasta 100 mm.

Para configurar el arreglo se hace un corte circular del material absorbente y se coloca en uno de los soportes de muestras proporcionados. Por medio de una grapa el soporte de la muestra se sujeta a un extremo del tubo de medición, el otro extremo del tubo se atornilla a la caja que contiene el altavoz.

A través de un agujero en el altavoz se guía una varilla de aluminio con el micrófono.

El micrófono de prueba es colocado en un extremo de la varilla de aluminio, el otro extremo de la varilla es soportado por un pequeño carro deslizante. El carro del micrófono se guía por rieles de latón y su posición se indica sobre una regla.

3.3 OPERACIÓN

La principal función del tubo de ondas estacionarias es para la determinación de coeficientes de absorción de materiales acústicos por el método de ondas estacionarias. Las ventajas de este método comparado con las mediciones en un cuarto reverberante son:

1. Solo requiere de muestras pequeñas circulares (ya sean de 100 a 30 mm de diámetro)
2. Las mediciones son reproducibles.

El principio de operación se basa en la interferencia de dos ondas planas. Se sitúa a un altavoz en el extremo del tubo y una muestra del material para ser probado en el otro extremo. Se proporciona una señal del tono puro al altavoz y se genera una onda plana en el tubo en la dirección de la muestra.

A partir de las mediciones de los niveles y posiciones de la presión del sonido máxima y mínima puede determinarse la absorción acústica.

3.4 COMPONENTES PRINCIPALES DEL TUBO DE IMPEDANCIAS

- TUBO (Metal u otro material lo suficientemente rígido): 100 mm. de diámetro y 1 metro de longitud, el tubo debe de ser recto su superficie interior lisa y libre de polvo para que la atenuación sea mínima.
- ALTAVOZ: Se considero un altavoz de 7" de diámetro (17.8 cm), 6 Watts de potencia y 4 Ohms de impedancia. El tubo es sujetado por medio de 4 tornillos que tiene el gabinete.
- MICROFONO: El micrófono que se emplea es de tipo lavalier, patrón omnidireccional. Se une al micrófono una varilla y estas varilla a su vez se monta sobre un carro . Este carro tiene la función de desplazar dentro y a lo largo del tubo el micrófono e indicar la máxima y la mínima presión.
- ESCALA: El riel de medición esta graduado (1000 mm) y tiene la función de indicar la posición de los máximos y mínimos niveles de presión dentro del tubo. Esta esca-

la debe de ser lo suficientemente larga para cubrir la longitud del tubo, que es el de bajas frecuencias.

- GENERADOR DE AUDIO FRECUENCIA:** La señal de prueba que se le suministra al Tubo de Ondas Estacionarias durante la medición es por bandas de octava en las frecuencias normalizadas de 125, 250, 500, 1000, 2000 Hz.
- MATERIAL:** El material de prueba tiene que ser cortado cuidadosamente, empleando una sierra, y la muestra circular debe de ser colocada cómodamente dentro del soporte. El soporte es de profundidad variable desde 0 hasta 100 mm. Una grapa de seguridad debe de abrazar el soporte contra el tubo debiéndose de atornillar firmemente para prevenir que ocurran vibraciones.

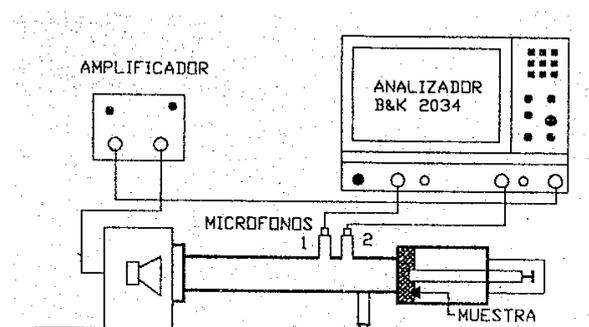
CAPITULO IV

Análisis y Diseño del Tubo de Impedancias por el Método de Función de Transferencia

El tubo de ondas estacionarias es un aparato que consta esencialmente de un tubo recto o redondo con un espécimen en un extremo y un altavoz como fuente sonora en el otro extremo. Con dos micrófonos, se obtiene la medición a partir de la función de transferencia (H) entre las señales de los micrófonos colocados en la pared del tubo, detectando las variaciones dentro de esta. La función de Transferencia representa físicamente la relación de la transformada de Fourier de la presión sonora en la localización de los dos micrófonos.

Las pruebas de este método cubre el uso del tubo de impedancia, mediante dos micrófonos y un analizador digital de frecuencias para la determinación del coeficiente de absorción sonora en el modo normal de incidencia. Este puede ser utilizado también para la determinación de la impedancia acústica de los materiales o la admitancia de los materiales.

Este método opera de forma similar al método de onda estacionaria, en la cual emplea también un tubo de impedancia con una fuente sonora conectada en un extremo y el material en prueba en el otro extremo. En el método de función de transferencia varía la forma en que se obtienen las mediciones, ya que en vez de generar una onda plana; se genera un ruido aleatorio y la descomposición del campo de interferencia es analizado por la medición de la presión acústica en dos puntos fijos usando dos micrófonos montados paralelamente, y subsecuentemente se calcula la función de transferencia acústica, la absorción en incidencia normal y la impedancia acústica en el material. Este método es más rápido que el método de onda estacionaria. El rango de frecuencia de funcionamiento del tubo depende de la longitud del tubo y de la separación entre los dos micrófonos.



4.1 DISEÑO DEL TUBO DE IMPEDANCIAS

El tubo puede estar hecho de metal, madera u otro material que sea conveniente, como el plástico. Su sección transversal debe ser uniforme de extremo a extremo y puede ser circular ó rectangular. El tubo debe ser recto y su superficie interior lisa y libre de polvo para que la atenuación sea mínima. Las paredes deben ser lo suficientemente rígida para que la disipación de energía sonora por vibración sea despreciable. Las aperturas para los micrófonos esta localizada en dos o tres posiciones fijas a través del tubo.

Las paredes del tubo que se empleara es de 0.005 metros, por lo que se puede considerar rígida. El diámetro del tubo es de 0.127 metros, y su longitud es de 0.995 metros. El tubo con el cual se va a trabajar cabe mencionar es un material que se tratara de acondicionar a las especificaciones lo más que se pueda ya que es un material que se esta reciclando.

4.2 ANCHO DE BANDA DEL TUBO DE IMPEDANCIAS

El rango operacional de frecuencia esta dado por:

$$f_l < f < f_u$$

Donde:

f_l : Es el rango de bajas frecuencias, en la cual operara.

f : Es el rango de frecuencias medias, en la cual operara.

f_u : Es el rango del límite superior de frecuencia, del ancho de banda útil.

f_l , es limitado por la capacidad de medición del analizador digital de frecuencias, así como en la separación de los micrófonos.

f_u , para un tubo circular debe de cumplir la siguiente condición:

$$d < K c / f_u ; f_u < K c / d$$

Donde:

c: Velocidad del sonido en el tubo, m/s.

K: 0.586 (Constante establecida y recomendada por la norma ASTM E1050-98) .

d: Diámetro del tubo, m.

f_u : Es el rango del límite superior de frecuencia del ancho de banda útil, Hertz.

Sin embargo, se debe de tomar en cuenta que la separación de los micrófonos (m_1 & m_2), ya que es la referencia, que delimitara la distancia entre el micrófono m_2 (que es el más cercano a la muestra) y la muestra. Debido a la explicación de la Referencia 13, en donde se analiza dicha distancia, y la relación que tienen con el factor de error de medición. Por lo tanto:

$s < 0.45 c / f_u$ donde; s = Separación entre los micrófonos,m.

c = Velocidad del sonido,m/s.

$c = 343.2\sqrt{T/293}$ donde; T = Temperatura en grados Kelvin.

Donde se midió una temperatura dentro del tubo de 20° C, haciendo la conversión en Kelvin nos da 293.15° K, por lo tanto:

$c = 343.29 \text{ m/s}$ & $s = 0.1170 \text{ m}$

Para elegir tanto la distancia, s, entre los micrófonos, como su posición con relación a su posición a la muestra, nos basamos en el análisis de errores establecido en la referencia 13, donde establece que la longitud del tubo sea concretamente $L \sim 5$ a 10 veces el diámetro del tubo, por lo que en nuestro caso no hay problema.

La posición del micrófono 1, debe colocarse lo más cerca posible respecto al material de prueba, aunque tomando en cuenta la referencia 14, no debe acercarse tanto a la superficie de la muestra para evitar el efecto de campo cercano, una distancia limite de una diámetro del tubo es lo estipulado para el micrófono 1, por lo que la distancia será de 13 cm., para que sea un valor absoluto.

La separación “s”, entre los micrófonos, define él limite superior de la frecuencia máxima de medición, como se analizo anteriormente; sin embargo se debe de tomar en cuenta el análisis de la referencia 13, en la que, en una separación menor a 5 cm, los errores por longitud serian dominantes, por lo que una separación de 5 cm o mayor es lo recomendable, por lo que la separación calculada será la asignada para la separación entre los micrófonos.

Para este tubo se sabe que la gama de menor sensibilidad de errores está definida por:

$$k_s = \pi/2$$

Entonces para evitar la sensibilidad a los errores en datos de entrada, el método será aplicable en la gama definida por:

$$0.1\pi < k_s < 0.8\pi$$

Los cuales definen las siguientes cotas:

$$f_l > 0.1c / 2s \quad \text{y} \quad f_u < 0.8c / 2s$$

Por lo tanto para los rangos de frecuencias son:

$$f_l = 150 \text{ Hz}$$

$$f_u = 1,200 \text{ Hz}$$

Por lo cual se debe de contemplar un altavoz que pueda reproducir el ancho de banda de frecuencias sonoras que se está calculando.

El campo sonoro dentro del tubo esta dado por:

$$P(x, \omega) = P_+(\omega)e^{-jkx} + P_-(\omega)e^{jkx} \text{ ----- (15)}$$

Que representa la transformada de Fourier de la ecuación (6), donde P_- representa la presión incidente y P_+ la presión reflejada. Para dos posiciones, separadas una cierta distancia "s", tendríamos:

$$P_1(\omega) = P_+(\omega) + P_-(\omega)$$

$$P_2(\omega) = P_+(\omega)e^{-jks} + P_-(\omega)e^{jks} \text{ ----- (16)}$$

Tanto la ecuación (14) como la ecuación (15) se ha considerado que no existe flujo y, de momento, se ignoran los efectos de atenuación. El coeficiente de reflexión es la razón entre la presión incidente y la reflejada, es decir:

$$R(\omega) = P_-(\omega) / P_+(\omega) \text{ ----- (17)}$$

En esta relación se considera que el tubo en una dirección se puede considerar como un sistema acústico pasivo lineal y que existe una relación lineal entre P_+ y P_- , por lo tanto, la presión entre los dos puntos de medición puede expresarse mediante la función de transferencia, es decir:

$$H_{12}(\omega) = P_2 / P_1 \text{ ----- (18)}$$

Combinando las ecuaciones (15), (16) y (17); tendremos:

$$R(\omega) = [H_{12}(\omega) - e^{(j\omega s)}] / [e^{(j\omega s)} - H_{12}(\omega)] \text{ ----- (19)}$$

Y mediante la ecuación (6) se determina el coeficiente de absorción.

$$\alpha_n = 1 - R^2$$

La resistencia acústica específica normalizada puede calcularse mediante:

$$r / \rho_c = \alpha_n / [2(1 - R_r) - \alpha_n]$$

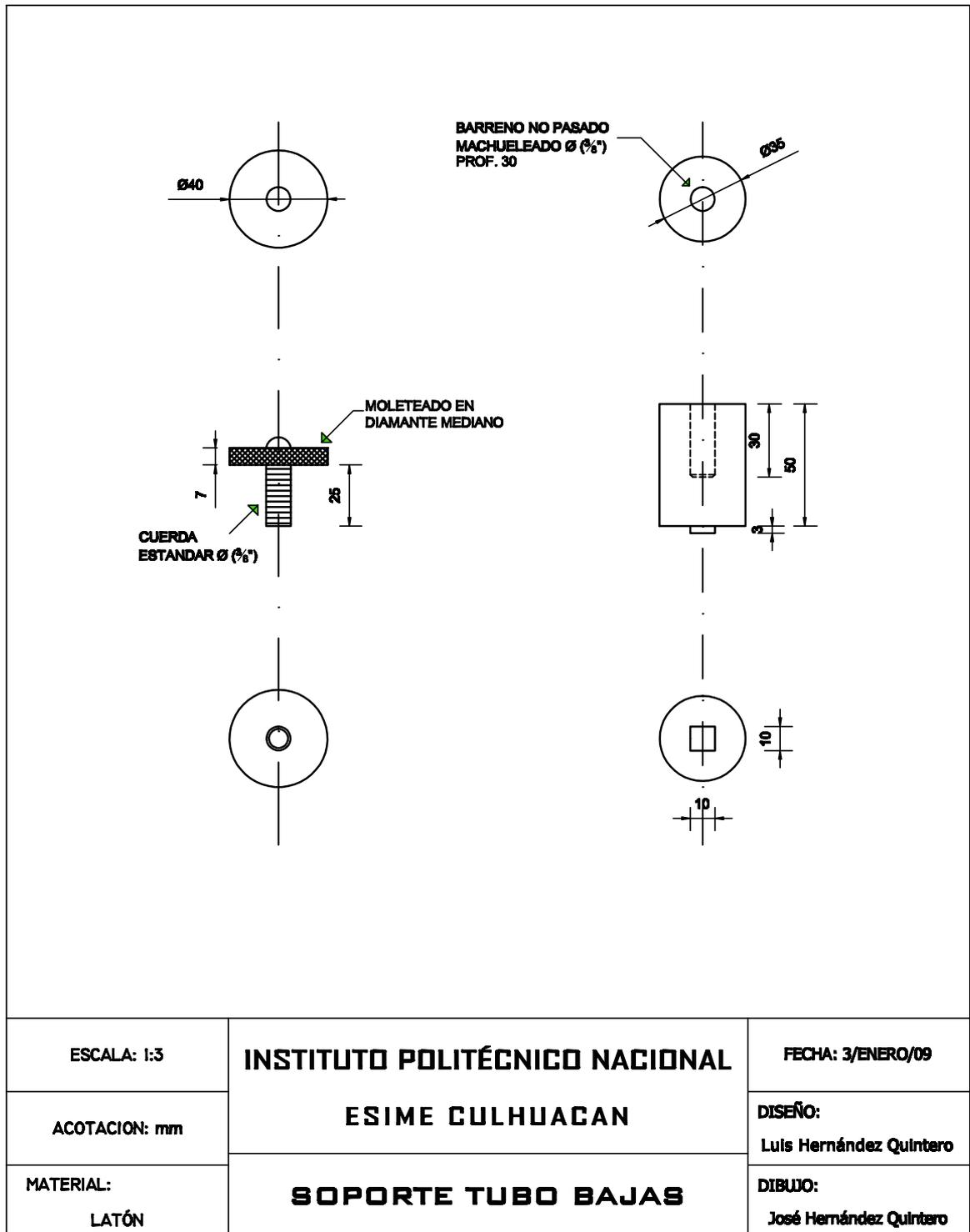
Y la reactancia acústica específica normalizada a través de:

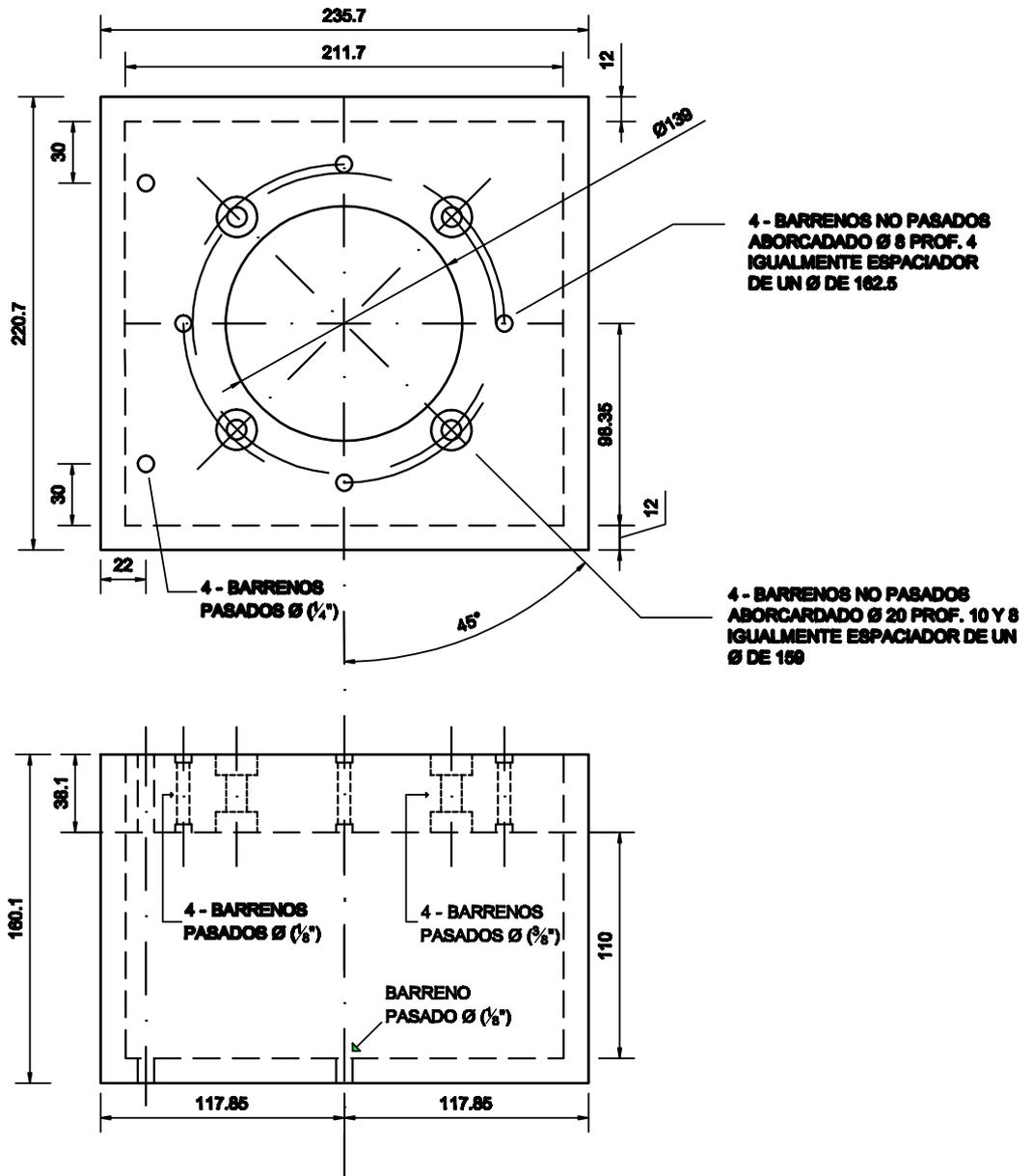
$$x / \rho_c = 2R_i / [2(1 - R_r) - \alpha_n]$$

Donde R_r y R_i son, respectivamente, la parte real e imaginaria del coeficiente de reflexión definido por la ecuación (19).

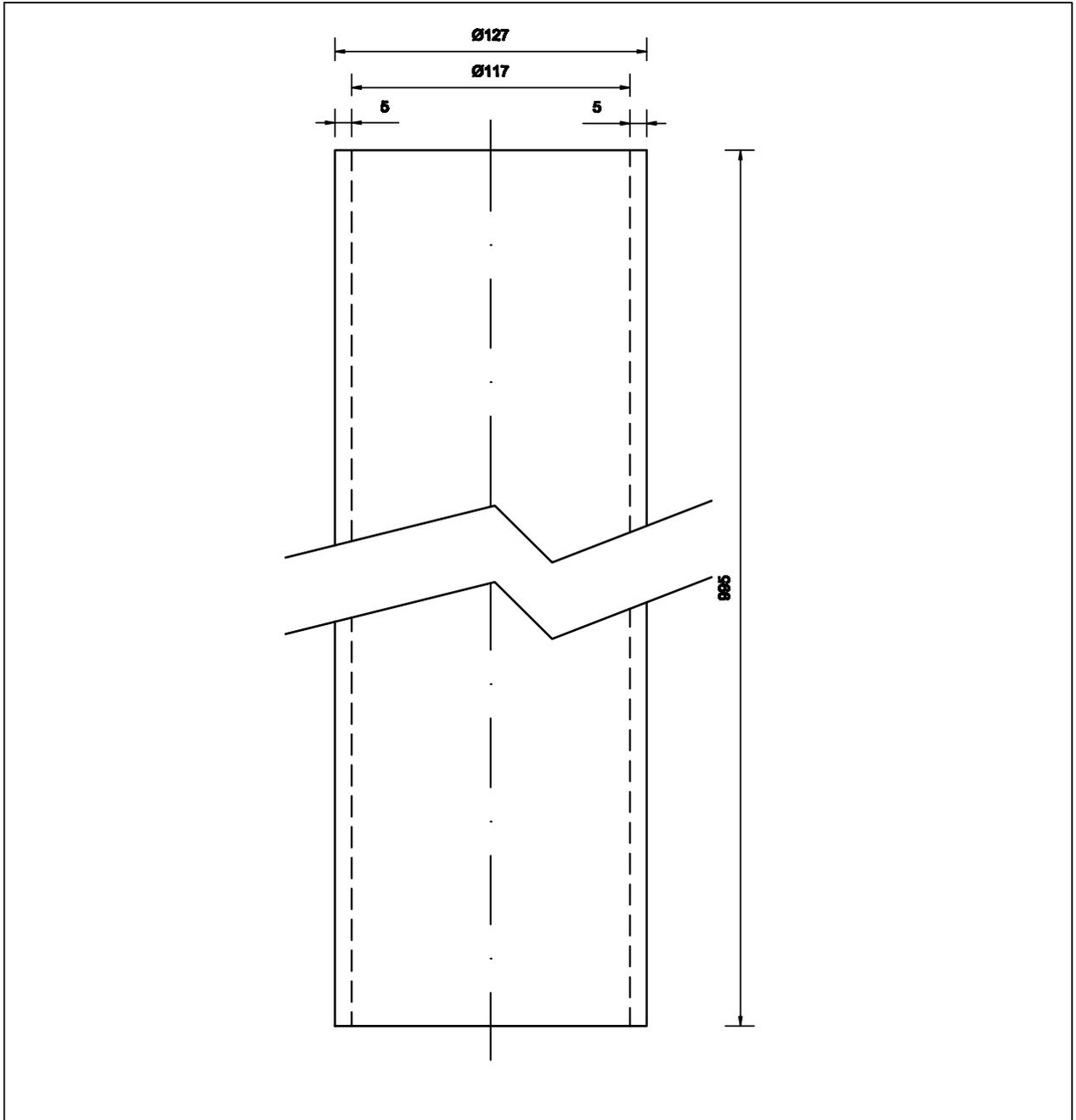
CAPITULO V

Planos del Tubo de Onda Estacionaria

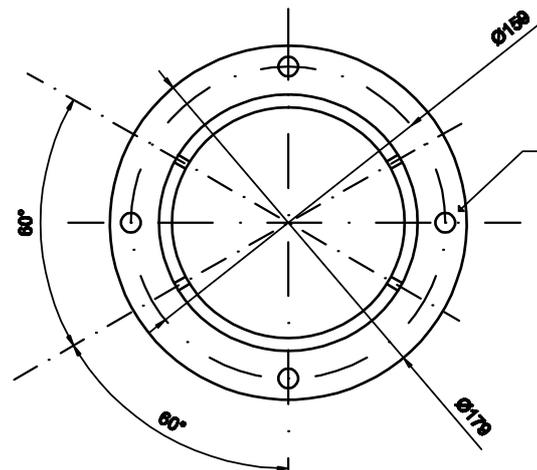




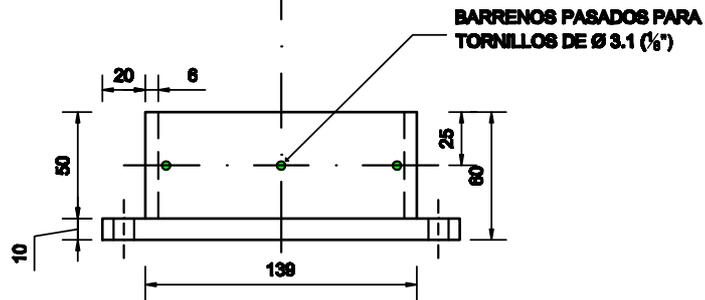
ESCALA: 1:3	INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL	FECHA: 3/ENERO/09
ACOTACION: mm		ESIME CULHUACAN
MATERIAL: MADERA	BAFLE	DISEÑO: Luis Hernández Quintero
		DIBUJO: José Hernández Quintero



<p>ESCALA: 1:3</p>	<p>INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL</p> <p>ESIME CULHUACAN</p>	<p>FECHA: 3/ENERO/09</p>
<p>ACOTACION: mm</p>		<p>DISEÑO: Luis Hernández Quintero</p>
<p>MATERIAL: ALUMINIO</p>	<p>TUBO BAJAS</p>	<p>DIBUJO: José Hernández Quintero</p>

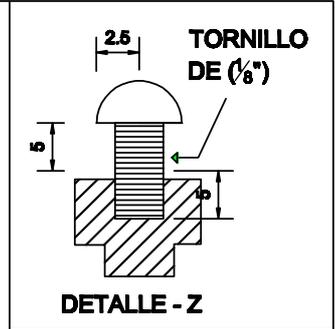
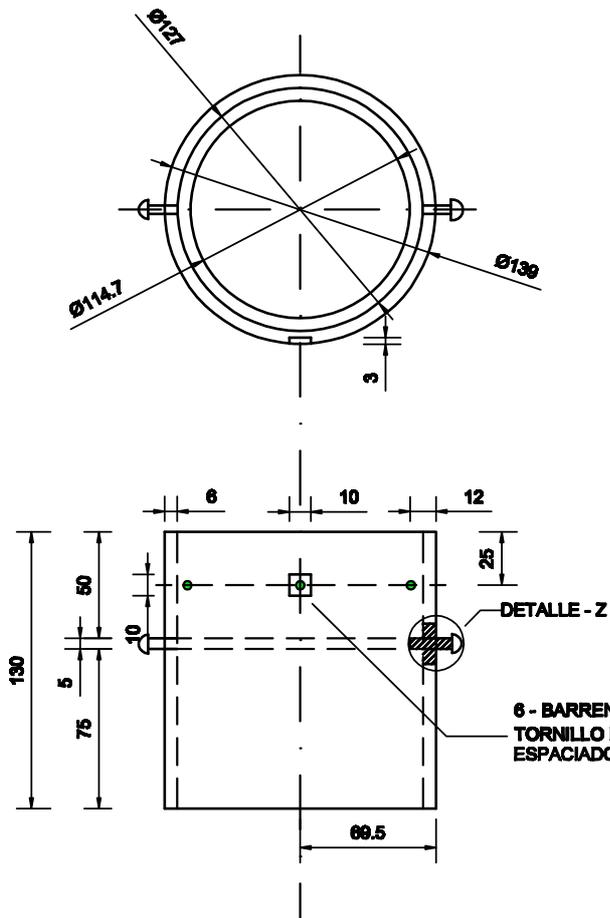


4 - BARRENOS PASADOS PARA
TORNILLOS DE Ø 9.5 (3/8")
IGUALMENTE ESPACIADOR EN
UN Ø DE 159

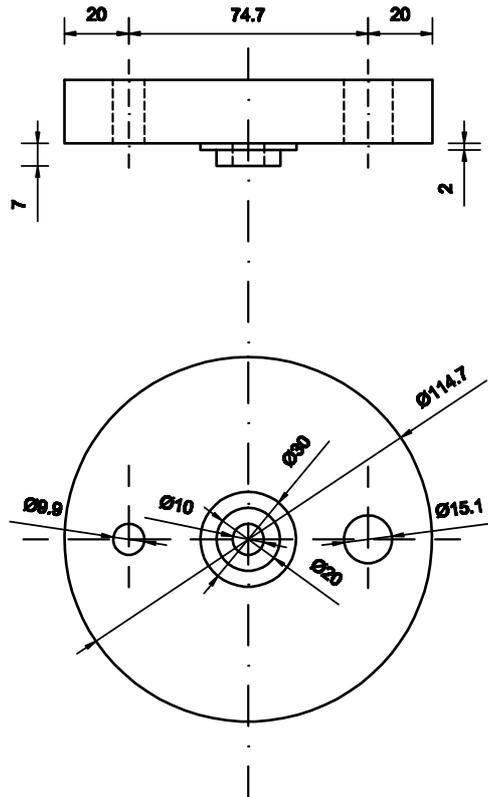


BARRENOS PASADOS PARA
TORNILLOS DE Ø 3.1 (1/8")

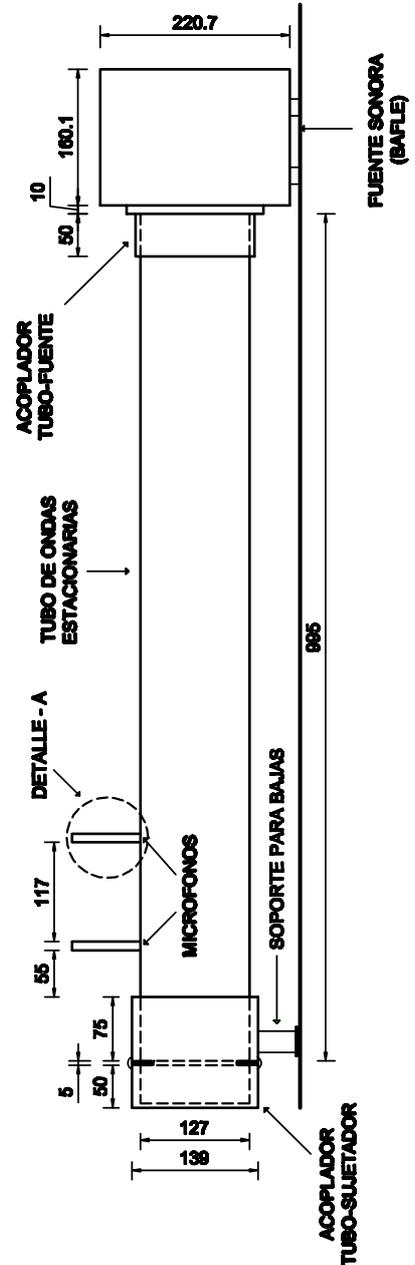
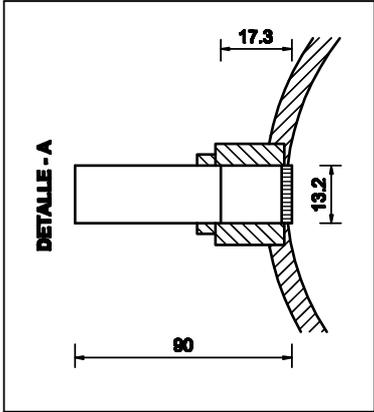
ESCALA: 1:3	INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESIME CULHUACAN	FECHA: 3/ENERO/09
ACOTACION: mm		DISEÑO: Luis Hernández Quintero
MATERIAL: DURALUMINIO	ACOPLADOR TUBO - FUENTE	DIBUJO: José Hernández Quintero



ESCALA: 1:3	INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESIME CULHUACAN	FECHA: 3/ENERO/09
ACOTACION: mm		DISEÑO: Luis Hernández Quintero
MATERIAL: DURALUMINIO	ACOPLADOR TUBO - SUJETADOR	DIBUJO: José Hernández Quintero



ESCALA: 1:3	INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL ESIME CULHUACAN	FECHA: 3/ENERO/09
ACOTACION: mm		DISEÑO: Luis Hernández Quintero
MATERIAL: DURALUMINIO	TAPA DEL SUJETADOR	DIBUJO: José Hernández Quintero



<p>ESCALA: 1:3</p>	<p>INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL</p> <p>ESIME CULHUACAN</p>	<p>FECHA: 3/ENERO/09</p>
<p>ACOTACION: mm</p>		<p>DISEÑO: Luis Hernández Quintero</p>
<p>MATERIAL: VARIOS</p>	<p>ENSAMBLE GENERAL</p>	<p>DIBUJO: José Hernández Quintero</p>

CONCLUSIONES

El Principal objetivo que fue el diseño y análisis del tubo de impedancias con el método de función de transferencia, como una nueva opción de equipamiento en el Laboratorio de Acústica, así como su posible construcción independiente cubrirá una gran expectativa, ya que en este equipo se puede analizar, comprender y experimentar todos los fenómenos acústicos que en su conjunto hace posible la obtención del coeficiente de absorción de un material. Logrando así implementar nuevas practicas de laboratorio haciendo uso del tubo y con mayor rapidez, precisión y aun bajo costo. Para su correcto uso debe de también contemplar un analizador de espectros, un amplificador y un generador de ruido aleatorio, conectados al tubo de impedancias, para la obtención del Coeficiente de Absorción y adicionalmente poder obtener la Resistencia Acústica especifica y Reactancia Acústica Especifica.

Este proyecto es viable ya que se puede considerar dos alternativas en su construcción, tanto el análisis del método con un tubo de impedancias; y el método de función de transferencia para el entendimiento de las practicas que en cada uno de los métodos se puede enfocar.

El tiempo de medición entre el método de tubo de Impedancia y el método de Función de Transferencia es mucho ya que en el primero, el tiempo para realizar las mediciones es de aproximadamente dos o tres horas; mientras que con el tiempo de Función de Transferencia es de media hora a una hora.

Para su construcción se cuenta con Laboratorios Especializados en la Unidad Profesional de la ESIME Culhuacan, como el Taller de Maquinas y Herramientas, Control y Automatización, Electromagnetismo, Electrónica, Computación, Física y Acústica; los cuales cuentan con las herramientas especializadas para su construcción (la construcción de este Tubo es un Tema de Tesis para un futuro egresado de la carrera especializado en Acústica,

Electrónica, Control y Automatización & Computación, ya que se requiere de los componentes antes mencionados para que todo el instrumento sea con accesorios e instrumentos Nacionales).

En base al estudio socioeconómico, el cual arroja, que es más económico por una gran diferencia la construcción de este proyecto. Ya que si se comprara con una empresa especializada en equipos de metrología acústica, su costo aproximado es de \$USD 22,531 en el sistema básico (como se especifica en el Apéndice), es importante mencionar que el sistema PULSE, puede ser sustituido por un analizador de Función de Transferencia, ya que es más económico así como el amplificador de poder, y emplear en su lugar un amplificador comercial más económico, obteniendo los resultados deseados y confiables. Por lo que si se desea construir el costo de la inversión en los materiales que se emplean son más baratos comparados con los costos del tubo de marca, ya que se cuenta con distintos componentes como el tubo (un material reciclado, solo hay que darle el tratamiento adecuado para reutilizarlo), generadores de ruido blanco y rosa, micrófonos de alta captación, altavoz; entre otros instrumentos con los cuales se puede trabajar de forma adecuada como lo requiere según lo estipulado en las normas ISO y ASTM.

En el contexto del vínculo con los procesos productivos y de servicio por parte de la Academia de Acústica este proyecto ofrecerá una vigorizante alternativa de trabajo a través de la prestación de servicios a la industria de los materiales para la construcción, automotrices, aeroespaciales, etc.

Por último, se debe hacer mención que los materiales que se emplean son reciclados y materiales con los que cuenta el laboratorio de Acústica de la ESIME Culhuacan.

Solo se realizó el tubo de ondas estacionarias en base a los standards ISO e ASTM, por los cuales los resultados y diseño son propiedad intelectual registrada por el autor de esta tesis.

APENDICE

Estudio Económico

La finalidad del estudio económico, es dar un costo aproximado para la construcción del prototipo y la comparación del precio respecto al tubo de la marca que a continuación se presenta, para poder emplear materiales baratos o reciclados así como de los laboratorios de la ESIME Culhuacan .

Se enlistaran los materiales con los que se cuenta; tanto materiales reciclados, así como con los que cuenta el Laboratorio de Acústica de la ESIME Culhuacan.

MATERIALES	RECICLADO	LABORATORIO	PRECIO
Tubo de Impedancia para Bajas	Ok		
Micrófonos de Alta Captación (2)		Ok	
Altavoz con Gabinete de Madera			\$ 800.00
Acoplador Tubo - Sujetador			\$ 175.00
Soporte	Ok		\$ 0.00
Acoplador Tubo - Fuente			\$ 175.00
Diseño y Ensamble			\$ 1,500.00
		SubTotal	\$ 2,650.00
		IVA	\$ 397.50
		Total	\$ 3,047.50

En atención a la solicitud realizada por C. Luis Hernández Quintero se recibió la cotización de INyMET INSTRUMENTACION S.A. De C.V., de los equipos y accesorios de la marca Bruel & Kjaer el 19 de Enero del 2009, en la que se presentan los precios en dólares Americanos (USD).

Partida	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Importe
1	4206-*-- Kit Tubo de impedancias (50 Hz - 6.4 KHz)	1	\$ 22,531.00	\$ 22,531.00
2	4206-T-- Kit Tubo para Calcular Perdida de Transmisión (50 Hz - 6.4 KHz)	1	\$ 33,771.00	\$ 33,771.00
Accesorios opcionales para Tubo de Perdida de Transmisión.				
3	-2716-C- Amplificador de Poder para 4206, 4206A y 4206T	1	\$ 3,369.00	\$ 3,369.00

Partida	Descripción	Cantidad	Precio Unitario	Importe
1	-3560-B-T72- PULSE Acoustic Material Test - Single Sided Incluye: Software 7770-N2, 7758, panel 3560-B-030 y contrato por un año de mantenimiento de software.	1	\$ 43,440.00	\$ 43,440.00
2	-3560-B-T73- PULSE Acoustic Material Test - Double Sided Incluye: Software 7770-N4, 7758, panel 3560-B-030 y contrato por un año de mantenimiento de software.	1	\$ 54,474.00	\$ 54,474.00

Como se observa si seleccionamos el sistema básico de tubo de impedancias con el sistema PULSE (Analizador de Función de Transferencia) nos arroja el gran Total de:

TOTAL: \$USD 65,971 + Impuestos

Si se quisiera comprar el sistema con todos los accesorios el costo incrementaría en casi el doble del básico.

Concluyendo que el precio del prototipo es más barato siendo los resultados confiables en base al diseño. Así como la posible construcción de este instrumento para el equipamiento del Laboratorio de Acústica así como la realización de una micro empresa dando el servicio a distintas empresas y fomentando el empleo profesional.

BIBLIOGRAFÍA

Beranek Leo, L. "ACOUSTICS". 1a ed. USA, Edit. McGraw - Hill, 1954, pag. 306.

Everest, F. Alton. "MASTER HANDBOOK OF ACOUSTICS". 4a ed. USA, Edit. McGraw - Hill, 2001, pags. 2 - 39; 83 - 88; 235 - 237; 245 - 265; 353 - 355.

Davis, Gary & Jones, Ralph. "THE SOUND REINFORCEMENT HANDBOOK". 2a ed. Edit. HP Hal Leonard Publishing Corporation, 1990, pags. 9 - 17; 19 - 21.

Stevens, S., Warshofsky, Fred. "SONIDO Y AUDICIÓN". 1a ed. Edit. Time Life, 1971, pags. 8 - 30.

Per V. Brüel, "Basic Concepts of Sound". Edit. Brüel & Kjaer, 1998, pags 6 - 10; 12 - 19.

Pérez L., Antonio. Tesis IPN, México, D.F., 1987.

Gutiérrez, Mayela. Tesis IPN, México, D.F., 1996.

ASTM C384-90a, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by the Impedance Tube Method, (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990).

ASTM E1050-98, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System, (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2006).

ISO 10534-2: 1998, "Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes", Part 2: Transfer - function method.

J.Y.Chung, D.A.Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties" .I. Theory, J.Acoustic.Soc.Am. vol.68, 907-913, Sept.1980.

J.Y.Chung, D.A.Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties" .II. Experiment, J.Acoustic.Soc.Am. vol.68, 914-921, Sept.1980.

Hans Bodén, Mats Abom, "Influence of errors on the two - microphone method for measuring acoustics properties in ducts". J.Acoustic.Soc.Am. vol. 79, 541-549, Feb.1986.

Michael G. Jones, Patricia E. Stiede, "Comparison of methods for determining specific acoustic impedance" J.Acoustic.Soc.Am. vol. 101, 2694-2704, May 1997.