



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

TEORÍA ELECTROACÚSTICA

Fredy Ademar Ordoñez Alonzo
Asesorado por el Ing. Armando Rivera

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

TEORÍA ELECTROACÚSTICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

FREDY ADEMAR ORDOÑEZ ALONZO
ASESORADO POR EL ING. ARMANDO RIVERA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Julio César Solares Peñate
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Orozco
EXAMINADOR	Ing. Francisco González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

TEORÍA ELECTROACÚSTICA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 28 de febrero de 2007.

Fredy Ademar Ordoñez Alonzo



Guatemala 9 de marzo de 2009

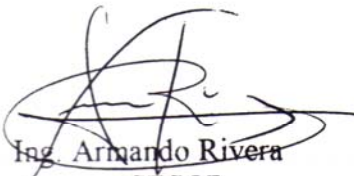
Ingeniero
Otto Andrino
Coordinador área electrotecnia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Estimado Ingeniero:

Por este medio le informo que el trabajo de Graduación titulado:
TEORIA ELECTROACUSTICA, elaborado por el estudiante Fredy Ademar Ordoñez
Alonzo.

A cumplido los requisitos para dar mi aprobación, e indicarle que el autor y mi
persona somos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,


Ing. Armando Rivera
ASESOR



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 18. 2009.

Guatemala, 05 de mayo 2009.

Señor Director
Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: TEORÍA ELECTROACÚSTICA, del estudiante; Fredy Ademar Ordóñez Alonzo, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área de Electrotécnica

OFAG/sro



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 22.2009.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; Fredy Ademar Ordóñez Alonzo, titulado: **TEORÍA ELECTROACÚSTICA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 07 DE MAYO 2,009.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 157.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **TEORÍA ELECTROACÚSTICA**, presentado por el estudiante universitario **Fredy Ademar Ordoñez Alonzo**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy  Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, mayo de 2009



/adech

ACTO QUE DEDICO A

Dios, por acompañarme en todo momento durante los días difíciles y apacibles de mi vida.

Mis padres: Marta Eliza Alonzo Soto y Justo Ordoñez González, por ese cariño y sacrificio conmigo.

Mis hermanas: Ana, Silvia y Magaly Ordoñez, por estar siempre en los momentos difíciles de mi vida; a mis sobrinos Allan y Alejandro, por su cariño.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI

1. ONDAS SONORAS

1.1 Velocidad de las ondas sonoras.....	2
1.2 Fenómenos de las ondas sonoras.....	3
1.2.3 Reflexión, refracción y transmisión.....	6
1.2.4 Difracción.....	6
1.2.5 Eco y reverberación.....	7
1.3 Cómo se mide el nivel sonoro.....	8
1.3.1 Pérdida de nivel por distancia.....	9
1.3.2 Intelelegibilidad.....	10
1.4 Psicoacústica.....	10
1.4.1 Oído externo.....	11
1.4.2 Oído medio.....	12
1.4.3 Oído interno.....	15
1.4.4 Umbrales auditivos.....	22
1.5 Técnicas de insonorización ambiental.....	24
1.5.1 Aislantes acústicos.....	25
1.5.2 Formas de aislar.....	27
1.6 Normas de sonido.....	28
1.6.1 Introducción a la norma internacional ISO 1999:1990.....	29

2. MODELADO ACUSTICO POR MEDIO DE CIRCUITOS

2.1	Circuitos electromecánicos.....	39
2.1.1	Resistencia mecánica.....	40
2.1.2	Masa mecánica.....	41
2.1.3	Compliance mecánica.....	43
2.1.4	Generadores mecánicos.....	45
2.2	Circuitos acústicos.....	47
2.2.1	Resistencia acústica.....	49
2.2.2	Masa acústica.....	50
2.2.3	Compliance acústica.....	53
2.3.1	Micrófonos y su circuito.....	55
2.3.2	Circuito equivalente de los micrófonos.....	55
2.4	Altavoces y su circuito.....	58
2.5	Electrónica en el sonido.....	62
2.5.1	Ecualizadores gráficos.....	63
2.5.2	Ajustes de ganancia de frecuencia seleccionada.....	68
2.5.3	Correcta ecualización.....	70

3. DISEÑO ELECTROACÚSTICO DE SALAS

3.1	Respuesta impulsional al sonido.....	77
3.1.1	Reflexiones tempranas.....	77
3.1.2	Ambiencia.....	78
3.1.3	Absorción sonora.....	79
3.2	Tiempo de reverberación.....	79
3.3	Ganancia acústica.....	81
3.4	Potencia de los altavoces.....	83
3.5	Potencia del amplificador.....	83
3.6	Cobertura de la sonorización.....	85
3.6.1	Método centralizado.....	85

3.6.2	Método distribuido.....	86
3.7	Análisis acústico geométrico de salas cerradas.....	87
3.8	Análisis acústico estadístico de salas cerradas.....	89
3.9	Análisis acústico ondulatorio de salas cerradas.....	91

4. ANÁLISIS ACÚSTICO DE LOS SALONES DE CALSE DE INGENIERÍA USAC GUATEMALA

4.1	Encontrando el tiempo de reverberación.....	95
4.2	Cálculo del tiempo de reverberación por método de Sabine.....	96
4.3	Estadísticas para encontrar el tiempo de reverberación.....	97
4.4	Diseño de un medidor de tiempo de reverberación.....	105
4.4.1	Algoritmo básico para la medición del tiempo de reverberación.....	106
4.4.2	Circuito básico para la implementación del algoritmo.....	107

CONCLUSIONES.....	109
--------------------------	------------

RECOMENDACIONES.....	111
-----------------------------	------------

BIBLIOGRAFÍA.....	113
--------------------------	------------

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Corte transversal del oído derecho.....	11
2.	Huesecillos del oído medio.....	13
3.	Deformación de la membrana timpánica.....	15
4.	Aspecto idealizado del oído interno.....	16
5.	Corte transversal del conducto coclear.....	17
6.	Cóclea.....	18
7.	Onda viajera en la membrana basilar.....	19
8.	Envolvente espacial de las ondas viajeras.....	20
9.	Resonancia a lo largo de la membrana basilar.....	20
10.	Movimiento de membrana basilar.....	20
11.	Neurona típica.....	21
12.	Contornos de Fletcher y Munson.....	33
13.	Curvas de compensación.....	34
14.	Resistencia mecánica.....	42
15.	Masa mecánica.....	44
16.	Compliance mecánica.....	46
17.	Generador de fuerza constante.....	48
18.	Generador de velocidad constante.....	49
19.	Volumen cerrado.....	50
20.	Resistencia acústica.....	52
21.	Masa acústica.....	53
22.	Corrección por terminación simple.....	55
23.	Compliance acústica.....	56
24.	Micrófono como transductor.....	58
25.	Onda plana incidente.....	59

26. Sección de un altavoz.....	61
27. Sistema centrador o araña.....	62
28. Sección de un diafragma.....	62
29. Vista de un imán y la bobina de un altavoz dinámico.....	63
30. Bobina móvil de cobre en reposo.....	64
31. Frecuencias centrales.....	68
32. Frecuencias centrales de las bandas de octava.....	69
33. Ecualizador de bandas de octava.....	71
34. Posición de los controles después de centrar al máximo las frecuencias.....	72
35. Posición de los controles después de atenuar.....	72
36. Posición de los controles para una ecualización determinada.....	73
37. Pantalla de un analizador de espectro.....	74
38. Disposición para llevar a cabo la ecualización de un sistema de sonido	75
39. Filtro RC con una respuesta con pendiente -3dB/ oct.....	76
40. Líneas de dispersión.....	82
41. Cálculo de la ganancia de dirección.....	86
42. Cálculo de ganancia.....	87
43. Amplificador de potencia.....	89
44. Recubrimiento de un altavoz.....	90
45. Altavoces de pared.....	91
46. Gráfica de reverberación.....	95
47. Salón de clases 401 T3 Ingeniería.....	105
48. Algoritmo de medición para tiempo reverberante.....	110
49. Diseño de circuito para implementar algoritmo.....	111

TABLAS

I	Coeficientes de absorción.....	6
II	Parámetros característicos de las bandas de ecualización.....	67
III	Frecuencias estándar utilizadas en los ecualizadores.....	70
IV	Materiales existentes en los salones de clase.....	101
V	Materiales existentes en los salones de clase.....	102
VI	Tabla de coeficientes de absorción de materiales existentes.....	102
VII	Tabla de evaluación de salón 401.....	104
VIII	Tabla de evaluación de salón 403.....	106
IX	Tabla de evaluación de salón 412.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS

B	Ancho de banda
C	Velocidad del sonido
CA	Compliance acústica
cm	centímetro
Cm	Compliance mecánica
dB	decibelios
f	frecuencia
F	Faradios
HZ	hercios
IRAM	Instituto Argentino de la Normalización
ISO	Organización Internacional de Estandarización
K	potasio
Lp	Presión sonora
m	metros
mm	milímetro
Mm	Masa mecánica
ms	milisegundo

mV	milivoltio
Na	sodio
OSHA	Occupational Safety Health
Pa	Pascal
RTA	Analizador en tiempo real
s	segundo
TC	Comité técnico
TME	Transductor mecánico
TR	Tiempo de reverberación
V	velocidad
ZA	Impedancia acústica
Zm	Impedancia mecánica
Ω_{mec}	ohmio mecánico

GLOSARIO

Absorción	Es cuando una onda sonora penetra el material y no se refleja en el mismo
Algoritmo	Diagrama empleado para representar las partes secuenciales de un proceso
Ambiéntica	Es la identificación espacial al escuchar una onda sonora
Ancho de banda	Se define como el conjunto de frecuencias utilizadas para transmitir o recibir información tomando ciertos límites dependiendo del canal
Bobina	Dispositivo que consiste en un arroyamiento de alambre, el cual produce campo magnético al circular corriente sobre él.
Caja timpánica	Parte del oído medio encargada de elevar la potencia de las ondas sonoras
Caracol	Es parte del oído interno es el encargado de comunicar al tímpano con las células sensoras.
Ciliadas	Son células que se comportan como micrófonos generando pequeños impulsos eléctricos.

Clúster	Dispositivo electromecánico dedicado a reproducir sonidos altos
Compliance acústica	Son cambios en el volumen de aire en un recinto pequeño
Compliance mecánica	Es la capacidad que tiene un resorte para almacenar energía.
Condensador	Dispositivo electrónico que guarda energía por medio de campos eléctricos
Densidad	Es la relación proporcional entre la masa y volumen de un objeto
Diafragma	Superficie construida de un material con capacidad de oscilar
<i>Doppler</i>	Efecto producido por movimientos relativos de la fuente sonora
Ecualizador	Dispositivo electrónico empleado para subir o bajar potencia de distintas frecuencias.
Fórmula de Sabine	Es la fórmula que nos indica la reverberación de un recinto por medio de su volumen y áreas
Ganancia Acústica	Es el aumento favorable de sonido

Impedancia mecánica	Es la representación de la oposición que hace un cuerpo con respecto al movimiento
Infrasónicas	Son las frecuencias que se encuentran bajo el rango de audición
Inteligibilidad	Es la comprensión correcta de los sonidos
Masa acústica	Es la cantidad en kilogramos de masa de aire contenida en un recinto.
Masa mecánica	Es la energía guardada en una masa o la utilizada al moverla
Módulo volumétrico	Es la relación inversa con respecto a la densidad
Neurona	Es la célula cerebral encargada de generar pulsos eléctricos
Nivel de sonoridad	Es la percepción e inteligibilidad que tengamos del sonido
Octavas	Es la división que se hace de las frecuencias perceptibles por el oído humano
Onda	Es la sucesión de movimientos que ocurren en un Medio

Pasa altos	Es un filtro que nos deja pasar sólo frecuencias altas
Pasa bajos	Es un filtro que nos deja pasar frecuencias bajas
Potencial	Es la energía almacenada por las cargas
Psicoacústica	Es el estudio biológico del oído humano
Red lógica	Es un circuito que realiza un proceso de decisión
Reflexión	Es cuando una onda no penetra un material y toma otra dirección
Resistencia acústica	Es la fricción que ocurre cuando las ondas atraviesan materiales
Resistencia mecánica	Es la fricción que ocurre cuando una masa se moviliza sobre una superficie
Reverberación	Es el sonido existente aun cuando las fuentes sonoras se extinguen
Transductor	Elemento que existe para transformar un tipo de energía en otra.
Transitorio	Espacio de tiempo en el cual la onda no ha alcanzado características permanentes

Ultrasónicas

Son el tipo de ondas cuya frecuencia de oscilación está por encima del rango auditivo

.

RESUMEN

Este proyecto consiste en el análisis acústico de salas. Y su comprensión por medio de modelos teórico circuitales. Estudiando así los parámetros acústicos y las auralizaciones que llevarán consigo una muy buena instalación acústica.

Inicialmente, se resumen los conceptos teóricos necesarios para la correcta interpretación de los fenómenos acústicos y la forma de medir su energía.

A continuación se detallan las tres teorías, que se pueden usar para el diseño electroacústico, siendo el principal eje de estudio, el diseño por métodos estadísticos.

Finalmente, llegamos al diseño de un dispositivo electrónico capaz de medir el fenómeno acústico de reverberación. Y su posterior implementación en tecnologías del futuro.

Tras el análisis con nuestro medidor y nuestras estadísticas se propone una mejora en los materiales que conforman las aulas del cuarto nivel de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

OBJETIVOS

General

Describir la importancia que tiene la teoría acústica en el diseño de ambientes, así como examinar la acústica de los salones de clases del cuarto nivel del edificio T3 ,Facultad de Ingeniería, USAC. Así mismo proponer soluciones para mejorar la acústica.

Específicos

1. Describir la teoría acústica por medio de modelos de circuitos
2. Describir la importancia que tienen los materiales usados en la construcción de un ambiente en el fenómeno acústico.
3. Construir un dispositivo capaz de medir uno de los parámetros más importantes en el diseño electroacústico. (Tiempo de reverberación).
4. Examinar el desempeño actual de las aulas de clases desde el punto de vista acústico
5. Sugerir soluciones (materiales, amplificación) para la corrección de la acústica de las aulas

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el estudio de la acústica de salas de aprendizaje es muy importante, pues una mejor comprensión del sonido, implica confort y un mejor aprovechamiento del evento sonoro.

Para la comprensión de la teoría acústica nos valemos del diseño de circuitos eléctricos para analizar el comportamiento de fenómenos a través de las ondas sonoras, se tomarán los cambios de presión, y perturbaciones del ambiente como entorno de variables eléctricas.

Teniendo la comprensión de los fenómenos, nos dedicamos al estudio de los materiales que conforman un ambiente acústico, para luego sugerir mejoras en los diseños, por medio de una teoría de análisis estadístico.

Con el medidor propuesto se realizó un recorrido por las aulas de ingeniería y se verificó el tiempo de reverberación determinándose la necesidad de cambios en los ambientes.

1. ONDAS SONORAS

Las ondas sonoras son el ejemplo más importante de las ondas longitudinales. Pueden viajar con una velocidad que depende de las propiedades del medio, a medida que una onda sonora se mueve a través de algún medio, las partículas¹ en el medio vibran para producir cambios de densidad y presión a lo largo de la dirección del movimiento de la onda, esto es en contraste con una onda transversal, donde las partículas se mueven en la dirección perpendicular a la dirección de propagación.

Los desplazamientos longitudinales de las moléculas respecto de su posición de equilibrio da por resultado una serie de regiones de alta y baja presión llamadas condensaciones y rarefacciones, respectivamente. Si la fuente de las ondas sonoras, tales como una membrana o un altavoz, vibra senoidalmente, las variaciones de presión también son senoidales.

Existen tres categorías de ondas mecánicas longitudinales que cubren diferentes rangos de frecuencias:

- 1) Ondas audibles: son ondas sonoras que caen dentro del rango de la sensibilidad del oído humano, por lo general de 20 Hz a 20 000 Hz. Se pueden generar en diferentes formas, tales como instrumentos musicales, cuerdas vocales y altavoces, etc.
- 2) Ondas infra-sónicas: son ondas longitudinales con frecuencias abajo del rango audible. Las ondas de terremotos son un ejemplo.
- 3) Ondas ultrasónicas: son ondas longitudinales con frecuencias por arriba del rango audible. Se pueden generar, por ejemplo, en cristales de cuarzo induciendo vibraciones al aplicar un campo eléctrico variable.

¹ Una partícula es la abstracción de un cuerpo dotado de masa, o una parte de él, concentrada idealmente en un punto

Cualquier dispositivo que transforma un tipo de potencia a otro se llama un transductor. Además de los altavoces y de los cristales de cuarzo, las agujas magnéticas y de cerámicas en los tocadiscos son ejemplos comunes de transductores; algunos transductores pueden generar ondas ultrasónicas. Dichos dispositivos se utilizan en limpiadores de ultrasonido y en la navegación submarina.

1.1 Velocidad de las ondas sonoras

Las ondas sonoras son de compresión rarefacción que se mueven a través de un medio compresible, tal como el aire. La región de aire comprimida que se propaga corresponde a una variación en el valor normal de la presión. La rapidez de tales ondas compresibles depende de la compresibilidad del medio y de la inercia del mismo. Si el medio compresible tiene un módulo volumétrico² B y una densidad de equilibrio ρ ³ la rapidez del sonido en ese medio es:

$$v = \sqrt{\frac{b}{\rho}} \quad (1.1)$$

El módulo volumétrico se define como la razón del cambio en la presión, ΔP a la fracción resultante del cambio en el volumen

$$b = -\frac{\Delta P}{\Delta v / v} \quad (1.2)$$

B siempre es positivo, ya que un aumento en la presión (ΔP es positivo) da por resultado una disminución en el volumen. Por lo tanto, la razón $\Delta P / \Delta V$ siempre es negativa.

² El módulo volumétrico (K) de un material mide su resistencia a compresión y por tanto indica el aumento de presión requerido para causar una disminución de volumen dada.

³ La densidad denominada en ocasiones masa específica, es una magnitud referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen, y puede utilizarse en términos absolutos o relativos.

Es posible comparar la ecuación (1.1) con la rapidez de una onda transversal en una cuerda. En ambos casos, la rapidez de la onda depende de una propiedad elástica del medio y una propiedad inercial. En resumen, la rapidez de todas las ondas mecánicas se describe por la siguiente ecuación.

$$v = \sqrt{\frac{\text{propiedad elástica}}{\text{propiedad de inercia}}} \quad (1.3)$$

1.2 Fenómenos de las ondas sonoras

Los fenómenos que ocurren en las ondas sonoras son los que a continuación se describen:

Efecto Doppler

El efecto Doppler en ondas sonoras se refiere al cambio de frecuencia que sufren las ondas cuando la fuente emisora de ondas y/o el observador se encuentran en movimiento relativo⁴ al medio. La frecuencia aumenta cuando la fuente y el receptor se acercan y disminuye cuando se alejan.

Absorción

Cuando una onda sonora llega a una pared rígida (ideal) se refleja totalmente ya que la pared no se mueve y no absorbe energía de la onda. Las paredes reales no son nunca completamente rígidas, por lo que pueden absorber parte de la energía de las ondas incidentes.

Coefficiente de absorción

Sea E_i la energía de la onda incidente y E_r la de la onda reflejada por una pared. La diferencia entre estas dos energías E_a , se denomina energía

⁴ Movimiento relativo, cambio de posición respecto de un sistema de referencia que a su vez se mueve respecto a otro sistema de referencia. No se puede hablar de un sistema de referencia

absorbida, y es la suma de las energías disipada(E_d) y transmitida(E_t) por la pared:

$$E_a = E_i - E_r = E_d + E_t \quad (1.4)$$

Algunos coeficientes importantes para el diseño acústico se muestran a continuación.

Se define el coeficiente de absorción del material como $\alpha = E_a / E_i$. El valor del coeficiente de absorción depende del material en el que se refleja la onda y de la frecuencia misma.

Tabla I Coeficientes de absorción

Tabla de Coeficientes de Absorción.							
	Nombre del material	Frecuencia					
		125	250	500	1000	2000	4000
1	Pared de Ladrillo, sin pintar	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
2	Pared de Ladrillo, pintada	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
3	Revoque, yeso sobre ladrillos huecos, pintado o sin pintar	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
4	Enlucido de yeso sobre pared	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
5	Revoque de cal	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
6	Enlucido rugoso de cemento	0.02	0.02	0.06	0.08	0.04	0.05
7	Hormigón enlucido con cemento	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
8	Mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
9	Hormigón, sin pintar	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
10	Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
11	Vidrio de ventanas normal	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02
12	Vidrio de Láminas de 0,3 a 0,5 cm de espesor	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
13	Vidrio de Espejo	0.035	0.025	0.019	0.012	0.07	0.04
14	Ventana abierta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	Rejilla de Ventilación	0.50	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
16	Madera Maciza y pulida de 5cm	0.10	---	0.05	---	0.04	0.04
17	Madera Barnizada	0.05	---	0.03	---	0.03	---
18	Madera, plataforma con gran espacio de aire debajo	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
19	Entablado de madera de 2,5cm	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06
20	Madera de 1,5cm barnizada con 5cm de cámara	0.10	0.11	0.10	0.08	0.08	0.01
21	Madera de 0,3cm con 5cm de cámara	0.25	0.34	0.18	0.10	0.10	0.06

22	Madera de 0,3cm con 5cm de cámara rellena de fibra de vidrio	0.61	0.65	0.24	0.12	0.10	0.06
23	Placa de madera de 1,6cm sobre listones de 4cm	0.18	0.12	0.10	0.09	0.08	0.07
24	Panel perforado de fibra-yeso	0.40	0.80	0.62	0.92	0.81	---
25	Panel de fibra de madera	0.47	0.52	0.50	0.55	0.58	0.63
26	Corcho sobre cemento	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
27	Corcho en General	0.12	0.27	0.72	0.79	0.76	0.77
28	Contrachapado de madera sobre pared	0.05	0.06	0.06	0.10	0.10	0.10
29	Papel mural grueso	0.02	---	0.04	---	0.07	---
30	Lana mineral de 2,5cm	0.06	0.19	0.39	0.54	0.59	0.75
31	Lana mineral de 10cm	0.42	0.66	0.73	0.74	0.76	0.79
32	Lana de vidrio de 6cm	0.09	0.39	0.61	0.74	0.83	0.87
33	Lana de vidrio de 9cm	0.32	0.40	0.51	0.60	0.65	0.60
34	Lana de vidrio con Papel, 9cm	0.20	0.43	0.62	0.53	0.30	0.12
35	Lana mineral a granel de 10cm	0.42	0.66	0.73	0.74	0.76	0.80
36	Lana Mineral con cubierta de metal perforado con 10 aberturas de 1.5mm de diámetro a 1cm3	0.09	0.25	0.48	0.66	0.57	0.47
37	Fibra de Vidrio 4cm	0.20	0.35	0.65	0.80	0.75	0.65
38	Fibra de Vidrio 10cm	0.75	0.96	0.96	0.90	0.84	0.74
39	Tela algodón, 0,5 Kg/m2, colgando sobre la pared	0.04	---	0.35	---	0.32	---
40	Tela algodón, plegada a un 50%	0.04	0.23	0.40	0.57	0.53	0.40
41	Tela algodón, plegada a un 75%	0.07	0.31	0.49	0.81	0.66	0.54
42	Tela aterciopelada extendida 0,35 Kg/m2	0.04	0.05	0.11	0.18	0.30	0.35
43	Tela aterciopelada extendida 0,45 Kg/m2	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35
44	Tela aterciopelada extendida 0,6 Kg/m2	0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36
45	Tela aterciopelada plegada a la mitad 0,45 Kg/m2	0.07	0.31	0.49	0.75	0.70	0.60
46	Tela aterciopelada plegada a la mitad 0,6 Kg/m2	0.14	0.35	0.55	0.75	0.70	0.60
47	Fieltro 2.5cm	0.13	0.41	0.56	0.69	0.65	0.49
48	Alfombra 0.5cm	0.04	---	0.15	---	0.52	---
49	Alfombra de lana sobre hormigón 1cm	0.09	0.08	0.21	0.26	0.27	0.37
50	Alfombra de lana acolchada 1,5cm	0.20	0.25	0.35	0.40	0.50	0.75
51	Alfombra de fibra vegetal	0.08	---	0.17	---	0.30	---
52	Parquet	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
53	Goma de 0.5cm sobre cemento	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10
54	Linóleo sobre cemento	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
55	Parquet 2cm puesto sobre asfalto	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
56	Arena seca	0.15	0.35	0.40	0.50	0.55	0.80
57	Arena húmeda	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15
58	Capa de nieve recién caída 6cm	---	0.95	---	0.95	---	0.98
59	Agua quieta	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02

	Persona u objeto	Frecuencia					
		125	250	500	1000	2000	4000
60	Músico con Instrumento Incluido	0.40	0.85	1.15	1.40	1.20	1.20
61	Persona adulta	0.23	0.33	0.39	0.42	0.47	0.47
62	Muchacho	0.18	0.20	0.27	0.30	0.36	0.36
63	Espectador	0.36	0.43	0.47	0.44	0.49	0.49
64	Feligreses en banco de una Iglesia	0.20	0.25	0.31	0.35	0.33	0.30
65	Público Mixto Sentado	0.30	0.32	0.37	0.44	0.36	0.36
66	Pupitre de madera	0.04	---	0.04	---	0.04	---
67	Pupitre y silla con alumno	0.24	---	0.39	---	0.43	---
68	Público de Pie	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
69	Butaca tapizada con fieltro o terciopelo	0.30	0.32	0.27	0.30	0.33	0.33
70	Butaca tapizada con plástico	0.20	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30
71	Butaca de madera	0.01	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04
72	Butaca de madera con asiento tapizado	0.06	0.08	0.10	0.12	0.12	0.12
73	Público en asiento de madera	0.15	0.25	0.35	0.38	0.38	0.35
74	Público en asiento tapizado	0.30	0.35	0.42	0.45	0.48	0.40
75	Jóvenes sentados en escuela	0.22	0.30	0.33	0.40	0.44	0.45
76	Niños sentados en escuela	0.18	0.23	0.28	0.32	0.35	0.40

1.2.3 Reflexión ,refracción y transmisión

Cuando una onda incide sobre una superficie límite de dos medios, de distintas propiedades mecánicas, ópticas, etc., parte de la onda se refleja, parte se disipa y parte se transmite. La velocidad de propagación de las ondas, v , cambia al pasar de un medio a otro, pero no cambia la frecuencia angular w . Cuando la onda incidente llega formando con la superficie límite un ángulo cualquiera, la onda transmitida modifica su dirección original acercándose o alejándose de la normal. A esta desviación de la onda transmitida se le denomina refracción.

1.2.4 Difracción

La difracción consiste en que una onda puede rodear un obstáculo o propagarse a través de una pequeña abertura. Aunque este fenómeno es general, su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de

onda y el tamaño del obstáculo o abertura. Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura. Las longitudes de onda del sonido audible están entre 3 cm y 12 m, y son habitualmente grandes comparadas con los obstáculos y aberturas (por ejemplo puertas o ventanas), por lo que la desviación de las ondas rodeando las esquinas es un fenómeno común.

1.2.5 Eco y reverberación

El eco es un fenómeno consistente en escuchar un sonido después de haberse extinguido la sensación producida por la onda sonora. Se produce eco cuando la onda sonora se refleja perpendicularmente en una pared. El oído puede distinguir separadamente sensaciones que estén por encima del tiempo de persistencia, que es 0.1 s para sonidos musicales y 0.07 s para sonidos secos (palabra). Por tanto, si el oído capta un sonido directo y después de los tiempos de persistencia especificados, capta el sonido reflejado, se apreciará el efecto del eco. Para que se produzca eco, la superficie reflectante debe estar separada del foco sonoro una determinada distancia: 17 m para sonidos musicales y 11.34 m para sonidos secos. Se produce reverberación cuando las ondas reflejadas llegan al oyente antes de la extinción de la onda directa, es decir, en un tiempo menor que el de persistencia acústica del sonido. Este fenómeno es de suma importancia, ya que se produce en cualquier recinto en el que se propaga una onda sonora. El oyente no sólo percibe la onda directa, sino las sucesivas reflexiones que la misma produce en las distintas superficies

del recinto. Controlando adecuadamente este efecto, se contribuye a mejorar las condiciones acústicas de los locales tales como teatros, salas de concierto y, en general, todo tipo de salas. La característica que define la reverberación de un local se denomina **tiempo de reverberación** y se define como el tiempo que transcurre hasta que la intensidad del sonido queda reducida a una millonésima de su valor inicial.

1.3 Cómo se mide el nivel sonoro

El nivel de sonido aumenta en escala logarítmica del mismo modo que las frecuencias, siendo las diferencias apreciables en frecuencias divididas cada 8 tonos⁵, y las diferencias apreciables en nivel sonoro de decibelios (dB).

Un decibelio por si solo no es ninguna unidad real pero si un elemento de referencia de nivel. Solo con una referencia establecida se convierte en una unidad.

Así el dBu se utiliza para niveles de señal eléctrica en relación a 0.775 Volt y dB SPL se utiliza para niveles de presión sonora con relación a 0.00002 Pascal (umbral de la escucha, nominalmente 0 dB SPL).

La fórmula para convertir nivel sonoro en dB SPL es:

$$Nivel(dBSPL) = 20 * \log \frac{(presión.sonora)}{0.00002Pa} \quad (1.5)$$

⁵ Tono. Una onda senoidal pura a una frecuencia dada

La presión sonora de un altavoz es proporcional a su voltaje de entrada. Esto significa que un aumento de nivel de entrada de 6 dB (doblar el voltaje de entrada o 4 veces la energía de entrada), provoca 6dB más de presión sonora (dobla la presión sonora o 4 veces la energía acústica).

1.3.1 Pérdida del nivel por distancia

Al aumentar la distancia, la energía sonora radiada por un altavoz cubre una mayor superficie. Esto produce que la presión sonora sea inversamente proporcional a la distancia de la fuente.

Suma de ondas acústicas

Dependiendo de la longitud de onda, la distancia entre fuentes sonoras y la situación del oyente, se pueden producir diferentes efectos sonoros.

Imaginemos que tenemos dos fuentes sonoras produciendo la misma señal con idéntica fase y amplitud. Si la distancia entre las dos fuentes y el tamaño de las mismas es considerablemente inferior que la longitud de onda (al menos 2 ó 3 veces menor), conseguiremos un aumento de 6 dB en todas direcciones (doble de presión). Esto nos produce el mismo efecto si dos subwoofers⁶ están colocados juntos de lado o uno encima del otro. Si la altura total del clúster⁷ es de 1.2 mts, la eficiencia del sistema se doblará siempre y cuando las frecuencias sean debajo de los 100 HZ (longitud de onda 3.4 m).

En otro caso las señales desfasadas producen idéntica señal pero fuera de fase (180°), ambas señales se cancelaran totalmente si las señales son iguales y tiene el mismo nivel.

⁶ Subwoofers, son bocinas dedicadas a reproducir los tonos bajos de frecuencia

⁷ Clúster, son bocinas dedicadas a reproducir los tonos altos de frecuencia

1.3.2 Inteligibilidad

La inteligibilidad es conseguir que el mensaje que se transmite se entienda, lo que llamamos articulación de la palabra, se mide por el índice de consonancia, es decir, el tanto por ciento de sílabas entendidas sobre las emitidas, por supuesto, en la práctica de medidas acústicas no se usa ese modo de medir sino que se encargan los programas elaborados para este fin que controlan las mediciones.

La inteligibilidad depende de muchos factores:

- Del nivel de reverberación, que es la influencia más notable.

Del ruido ambiente, que hay que superar aumentando la potencia, y si el recinto es reverberante, aumenta el problema.

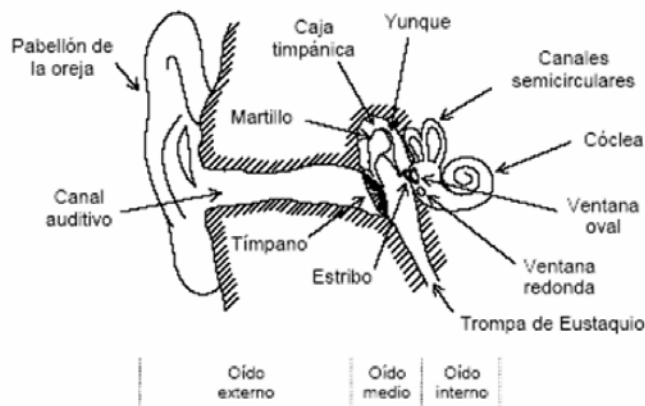
- Del equipamiento electroacústico, si este no es capaz de reproducir con fidelidad entre 250 y 5000 Hz, tendremos serios problemas, y la inteligibilidad variara mucho de unas voces a otras.

- Es importante que a todos los puntos llegue más sonido directo que reflejado. Será fundamental la distribución de altavoces.

1.4 Psicoacústica

El oído está formado por tres secciones: el oído externo, el oído medio y el oído interno, que pasaremos a describir desde los puntos de vista anatómicos y funcionales.

Figura 1. Corte transversal del oído derecho



1.4.1 Oído externo

Consta del pabellón u oreja, y el canal auditivo externo. El pabellón recoge las ondas sonoras y las conduce hacia el canal auditivo mediante reflexiones y difracciones. Si bien es direccional, debido a sus irregularidades es menos direccional que la oreja de otros animales, como el gato, o el perro, que además poseen control muscular voluntario de su orientación. El canal auditivo, que mide unos 25 mm, conduce el sonido al tímpano. La parte más externa está recubierta por pilosidad y por glándulas sebáceas que segregan cerumen. Ejercen una acción higiénica, al fijar y arrastrar lentamente hacia el exterior las partículas de polvo que de otra forma se depositarían en el tímpano. Una segunda función es proteger al oído de ruidos muy intensos y prolongados, ya que la secreción aumenta en presencia de tales ruidos, cerrando parcialmente el conducto. Debido a la forma y las dimensiones físicas el oído externo posee una resonancia cuya frecuencia está en las proximidades de los 3000Hz, esta resonancia incide en la respuesta del oído.

1.4.2 Oído medio

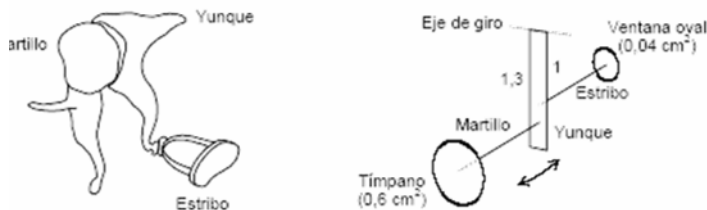
Está ubicado en la caja timpánica, y lo integra el tímpano, los huesecillos y asículos, y la trompa de Eustaquio. El tímpano es una membrana elástica, semitransparente y algo cónica, que comunica el canal auditivo externo con la caja timpánica. Es visible desde el exterior por medio del otoscopio (instrumento óptico que permite iluminar la zona a observar y está dotado a su vez de una lente de aumento). El tímpano recibe las vibraciones del aire y las comunica a los huesecillos. A causa de ruidos muy intensos (por ejemplo una potente explosión cerca del oído) o por determinadas infecciones, esta membrana puede perforarse, lo cual no es irreversible, ya que se cicatriza.

Los huesecillos son una cadena de tres pequeños huesos: el martillo, el yunque y el estribo que comunican al oído interno las vibraciones sonoras se captan en el tímpano. Están sostenidos en su lugar por una serie de pequeños ligamentos y músculos como las hay en el tímpano, en vibraciones de gran amplitud y poca presión, mueven el oído interno. Esta función es asimilable, por consiguiente, a una palanca mecánica y se ilustra en la figura 2 causa del efecto palanca las vibraciones del estribo son de menor amplitud pero mayor fuerza. La ganancia mecánica de esta palanca es de 1,3 veces mayor que la ejercida por el tímpano sobre el martillo. A este efecto de palanca se agrega la gran diferencia de áreas entre el tímpano ($0,6 \text{ cm}^2$) y la ventana oval ($0,4 \text{ cm}^2$), lo cual implica que la relación entre las presiones en el tímpano y en la ventana oval es del orden de:

$$\frac{P_{\text{ventana oval}}}{P_{\text{Tímpano}}} = \frac{1,3 - 0,6}{0,04} = 20 \quad (1.6)$$

Esta diferencia de presiones es necesaria ya que en el tímpano existe una impedancia acústica mucho menor que en el oído interno, éste último contiene agua. El conjunto actúa, por consiguiente, como un ingenioso adaptador de impedancias acústicas.

Figura 2 Huesecillos del oído medio



Los músculos, además de la función de sostén de la cadena osicular⁸, sirven de protección del oído interno frente a sonidos intensos. Cuando penetra en el oído un ruido muy intenso, se produce la contracción refleja de estos músculos rigidizando la cadena, que pierde entonces su eficiencia mecánica, y la energía es disipada antes de alcanzar el oído interno. Esta protección solo es efectiva, sin embargo, para sonidos de más de 500 ms. de duración. En caso de lesión o esclerosamiento (endurecimiento) de la cadena osicular sobreviene un tipo de hipoacusia (sordera) caracterizado por una audición aérea⁹ disminuida y ósea

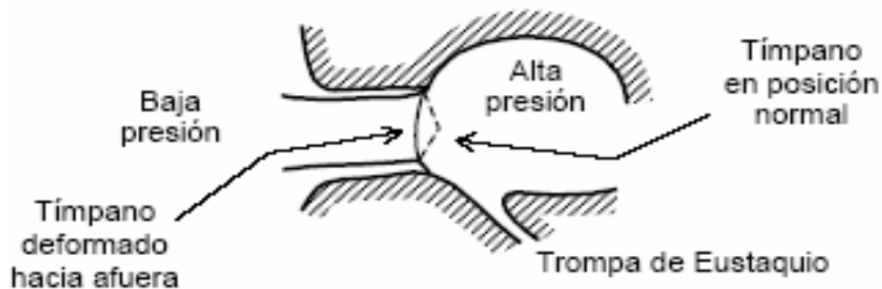
⁸ Osicular es la unión del martillo, yunque y estribo, junto con sus músculos y ligamentos suspensorios.

⁹ Audición aérea está compuesta por el conjunto de tonos graves-medianos y agudos que el paciente logra escuchar en su intensidad más baja con un dispositivo colocado en el hueso mastoideo (ubicado detrás del pabellón auricular).

anormal. En la actualidad es posible remplazar quirúrgicamente algunas partes por prótesis plásticas.

La trompa de Eustaquio es un pequeño conducto que comunica la caja timpánica con la laringe. Su función es la de igualar la presión del oído medio con la presión atmosférica. Normalmente, permanece cerrada, abriéndose en forma reflejada durante la acción de tragar o de bostezar. Si permaneciera siempre abierta, el tímpano vibraría en una diferencia de presión a uno y otro lado de éste. Por consiguiente, para vibrar en concordancia con las variaciones de presión sonora es preciso que la presión dentro de la caja timpánica se mantenga constante. Si en cambio, la trompa de Eustaquio estuviera cerrada permanentemente (o no existiera), al variar la presión atmosférica se produciría una diferencia de presiones medias que curvaría el tímpano hacia afuera o hacia adentro, como se indica en la figura 3 reduciendo notablemente la respuesta auditiva, particularmente para los sonidos agudos (altas frecuencias). Esto es lo que sucede en los cambios bruscos de presión que se dan, por ejemplo al ascender una montaña o al sumergirse varios metros debajo del agua, y el efecto es una sensación de embotamiento. La naturaleza ha provisto la trompa de Eustaquio, que se abre al tragar, acción que se realiza periódicamente, ya sea en forma voluntaria o involuntaria, debido a la secreción permanente de saliva. La apertura de la trompa de Eustaquio provoca un ruido similar a un pequeño crujido, que el cerebro generalmente no tiene en cuenta, salvo que se preste especial atención.

Figura 3. Deformación de la membrana timpánica



1.4.3 Oído Interno

Está constituido por el laberinto, cavidad ósea que contiene a los canales semicirculares, el vestíbulo, y el caracol. Los canales semicirculares son el órgano sensor del sistema de equilibrio. Son tres pequeños conductos curvados en semicírculo, con ejes aproximadamente en cuadratura. Interiormente están recubiertos por terminaciones nerviosas y contienen líquido endolinfático. Al rotar la cabeza en alguna dirección, por inercia el líquido tiende a permanecer inmóvil. Se crea un movimiento relativo entre el líquido y los conductos, que es detectado y comunicado al cerebro por las células nerviosas, lo cual permite desencadenar los mecanismos de control de la estabilidad.

Al haber tres canales en cuadratura se detectan movimientos rotatorios en cualquier dirección. El vestíbulo comunica los canales semicirculares con el caracol, y al mismo tiempo comunica el caracol con la caja timpánica a través de dos orificios denominados ventana oval y ventana redonda (también llamada tímpano secundario). Cubiertos por sendas membranas de unos 3 mm y 2 mm respectivamente (figura 4). El estribo, última pieza de la cadena acicular¹⁰, se encuentra adherido a la ventana oval.

¹⁰ Acicular . Se refiere a su forma de aguja

Figura 4. Aspecto idealizado del oído interno

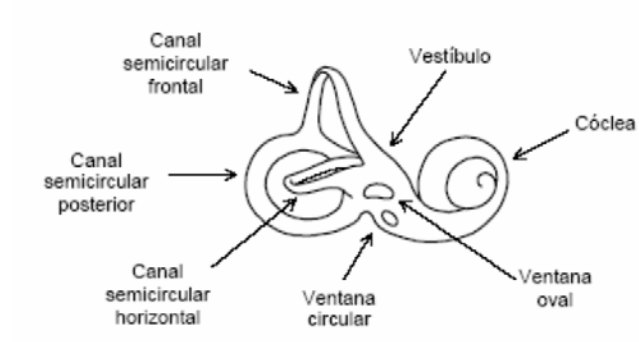
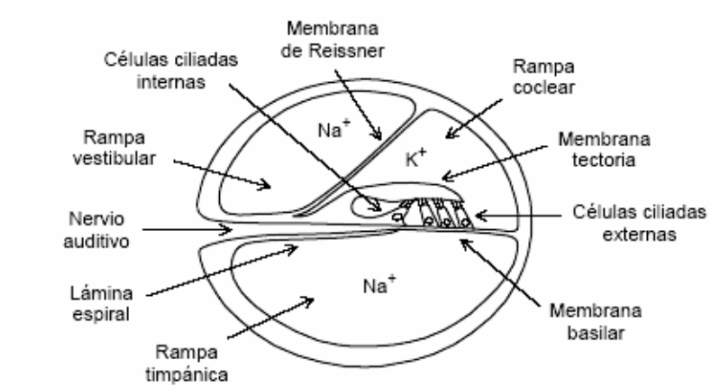


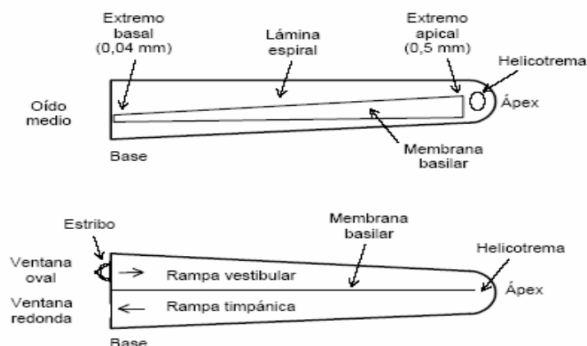
Figura 5 Corte transversal del conducto coclear



El caracol contiene el órgano principal de la audición: la cóclea, que es un tubo enrollado dos vueltas y media e espiral. Tal como se muestra en la figura 5 está dividida en tres secciones. La sección inferior, denominada rampa timpánica y la superior, conocida como rampa vestibular, contiene líquido perilinfático, rico en sodio (Na) y se conecta a través de un pequeño orificio con el helicotrema, ubicado hacia el vértice (ápex) del caracol. La cavidad central es la partición coclear o rampa coclear y contiene líquido endolinfático, rico en potasio (K). La rampa vestibular se comunica con el oído

medio a través de la ventana oval, y la rampa timpánica lo hace a través de la ventana redonda. La Partición coclear contiene la membrana basilar, una membrana elástica sobre la que se encuentra el órgano de Corti, una estructura que contiene las células ciliadas (fig. 5). Las células ciliadas se comportan como diminutos micrófonos, generando pulsos eléctricos (denominados potenciales de acción) de unos 90 mV como respuesta a la vibración. Estos pulsos son enviados al cerebro a través de una serie de células nerviosas (neuronas) reunidas en el nervio auditivo. El potencial de acción de una célula individual no es fácil de medir, pero es posible medir la suma de ellos, aplicando unos electrodos transtimpánicos entre las ventanas oval y redonda. Estas tensiones se denominan microfónicos cocleares, y fueron observadas por primera vez por Wever Bray, en 1930 en gatos. La membrana basilar mide alrededor de 35 mm de longitud y tiene unos 0,04 mm de ancho en su zona basal (la más próxima a la base del caracol) unos 0,5 mm en la zona próxima al vértice. Además, la zona más angosta es también más rígida, lo cual será importante para la capacidad discriminativa de frecuencias del oído interno. En la figura 6 se muestran dos vistas de la membrana con la cóclea hipotéticamente estirada desde su forma helicoidal hasta una forma rectilínea.

Figura 6. Cóclea



Cuando llega una perturbación a la ventana oval, el líquido de la sección superior se encuentra inicialmente a mayor presión que el de la sección inferior, lo cual provoca una deformación de la membrana basilar que se propaga en forma de onda (denominada onda viajera) desde la región basal hasta la región apical, tendiendo a aumentar la amplitud conforme va disminuyendo la rigidez de la membrana va disminuyendo. Cuando la perturbación es periódica, tal como sucede con una vibración sonora, la membrana comienza a vibrar con una envolvente (figura 7 cuyo máximo se produce en cierta posición que depende de la frecuencia del sonido, como se muestra en la figura 8).

Resulta, así, que existe una localización del pico de resonancia de la membrana basilar en función de las frecuencias, que se ha representado gráficamente en la figura 9. Esto confiere al oído interno una cualidad analítica que es de fundamental importancia en la discriminación tonal del sonido, especialmente para los sonidos de frecuencias superiores a los 1000 Hz. El descubrimiento de la mecánica de la membrana basilar se debe a George Békésy.

Como ya se anticipó, el movimiento de la membrana basilar ocasiona que las células ciliadas emitan un pulso eléctrico. El mecanismo para ello se ilustra en la figura 10. Debido a que las membranas basilares y tectoriales tienen ejes diferentes, el movimiento relativo provoca un pandeo de los cilios que fuerza la apertura de unas diminutas compuertas iónicas. El intercambio iónico genera una diferencia de potencial electroquímico que se manifiesta como un pulso de unos 90mV de amplitud o potencial de acción.

Figura 7. Onda viajera en la membrana basilar

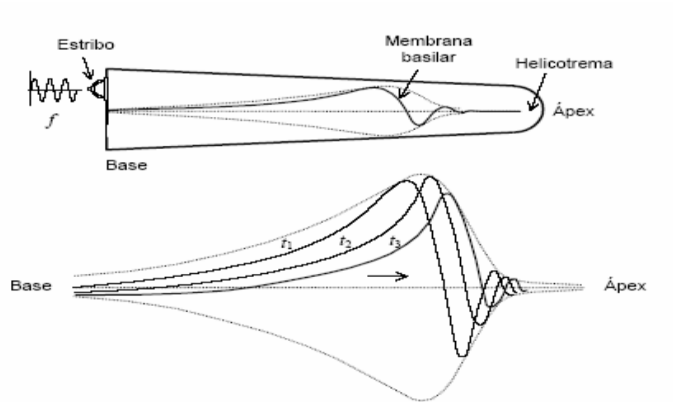


Figura 8. Envolvente espacial de las ondas viajeras

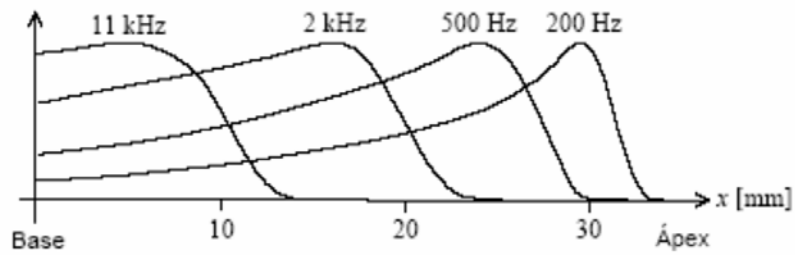


Figura 9. Resonancia a lo largo de la membrana basilar

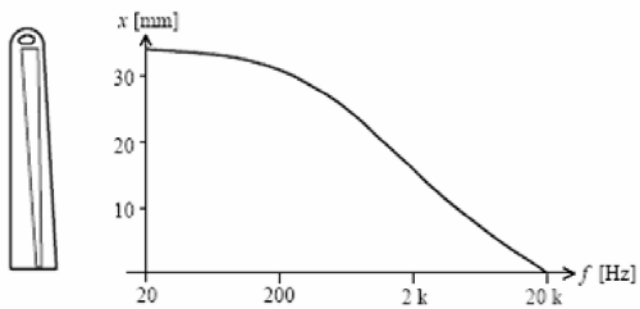


Figura 10. Movimiento de membrana basilar



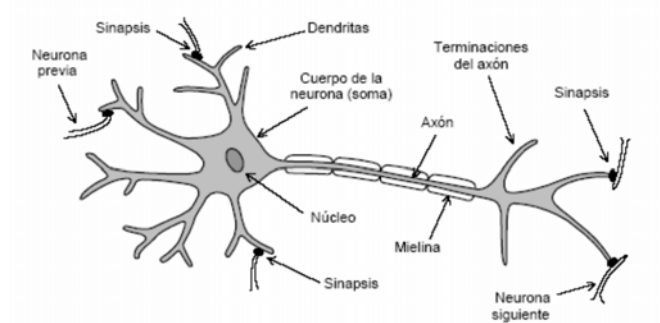
El potencial de acción generado por cada célula ciliada debe ser comunicado al cerebro. Ello se realiza a través de las neuronas. En primera aproximación podría imaginarse las neuronas como simples conductores eléctricos. Un análisis más detallado revela que son en realidad complejos sistemas con varias entradas y varias salidas, capaces de realizar operaciones de moderación, de comparación y de generación de nuevos potenciales de acción. En la figura 11 se ilustra la estructura de una neurona típica, en la que se indica también los contactos con otras neuronas previas y ulteriores.

La neurona recibe potenciales de acción provenientes de neuronas anteriores o de células sensoriales (como las células ciliadas) a través de las dendritas¹¹. Los puntos de contacto se denominan sinapsis. Las dendritas realizan una especie de suma ponderada de las señales recibidas, y si ésta excede cierto umbral, el propio cuerpo de la neurona descarga un nuevo potencial de acción de 90mV y unos 2 ms de duración. Al terminar este pulso sobreviene un tiempo durante el cual no puede volver a emitir pulsos, denominado periodo refractario. La velocidad de propagación depende de si el axón está o no recubierto por una sustancia aisladora llamada mielina. Para las neuronas no mielinizadas es de alrededor de 1m/s, en tanto que para las neuronas

¹¹ Dendritas son prolongaciones ramificadas, bastante cortas, de la célula nerviosa.

recubiertas con mielina¹² puede superar los 100m/s. Una vez alcanzadas las terminaciones del axón, el potencial de acción se transmite a las otras neuronas a través de los contactos sinápticos.

Figura 11. Neurona típica



Cuando se aplica un potencial constante en las dendritas de unas neuronas, el potencial de la neurona tiende a acercarse, con cierta constante de tiempo, al potencial aplicado. Si el potencial aplicado es suficientemente alto, en algún momento se supera el umbral y se produce el disparo, volviendo la neurona a su estado inicial. Después de completarse el período refractario, el ciclo vuelve a empezar, lo cual lleva a que se genere un tren de potenciales de acción. La frecuencia de este tren de pulsos aumenta al aumentar el potencial constante aplicado. Resulta, así, que la neurona se comporta en forma similar a un modulador de frecuencia, codificando las señales recibidas a través de la frecuencia de los potenciales de acción.

La señal que reciben las neuronas que inervan el oído interno proviene de las células sensoriales conectadas a la membrana vacilar (células ciliadas internas). Cuando la membrana se encuentra en reposo (no es excitada por ningún sonido), estas células producen suficiente señal como para estimular una emisión espontánea de potenciales de acción con determinada frecuencia

¹² Mielina permite la transmisión de los impulsos nerviosos entre distintas partes del cuerpo gracias a su efecto aislante

promedio. Cuando aparece un sonido, los movimientos hacia arriba y hacia abajo de la membrana vacilar aumentan y disminuyen respectivamente el nivel de señal de las células sensoriales, de tal manera que en un caso la frecuencia aumenta y en el otro disminuye. Sin embargo, dado que el período refractario de las neuronas es del orden de 2 ó 3 ms, para frecuencias mayores de unos 300Hz, esta variación de frecuencia no puede manifestarse directamente, sino que lo hace en forma estadística. El resultado es una tendencia a alcanzar un “sincronismo ” entre la onda mecánica en la membrana basilar (y, por consiguiente, el sonido que la excita) y las emisiones de potenciales de acción. Este sincronismo se refiere a que los intervalos entre potenciales de acción tienden a ser múltiplos aproximados del período de la señal sonora. La corteza cerebral utiliza esta codificación para asignar una altura a un tono. Es interesante destacar que las curvas de resonancia de la figura 8 son demasiado anchas para explicar la gran discriminación de frecuencias del oído humano. Este problema desconcertó durante años a los investigadores, hasta que se descubrió que la resonancia de la membrana basilar no obedece solamente a sus características elásticas pasivas, sino a un mecanismo de control en el cual intervienen las células ciliadas externas como elementos contráctiles. Estas células realimentan el sistema agudizando la resonancia.

1.4.4 Umbrales auditivos

Dado un tipo de estímulo (como por ejemplo un sonido, una presión sobre la piel o una sustancia agresiva que llega a la sangre), el organismo reacciona con una intensidad que depende, a menudo en forma compleja, de la intensidad del estímulo. En el caso en que el estímulo origina una sensación, es posible medir ésta a través del informe del sujeto¹³, aunque existe el efecto perturbador de la subjetividad, que puede estar influida por diversas circunstancias; hábitos,

¹³ Sujeto . Persona que nos dara resultados sobre la evaluacion

entrenamiento, asociaciones, cultura, etc. En general, el tratamiento de estas reacciones se realiza estadísticamente, sometiendo las variables involucradas a un estricto control. Los resultados suelen ser válidos sólo en determinado contexto socio geográfico. Un caso relativamente fácil de medir es el de los umbrales Psicológicos. Estos corresponden al mínimo nivel de un determinado estímulo para provocar una reacción observable. Existen dos tipos:

- a) Umbrales absolutos
- b) Umbrales diferenciales

Umbral absoluto: Es la mínima intensidad de un estímulo para la cual en un 50% de los intentos el sujeto considera que el estímulo está presente. Siempre se deben especificar cuidadosamente las condiciones en las cuales se determinan el umbral. Por ejemplo, para el umbral absoluto de frecuencia, debe indicarse la intensidad del sonido, si el sujeto se encuentra en un recinto acústicamente aislado, si está descansado auditivamente, etc. Hay dos métodos para determinar el umbral absoluto:

- 1) El de mínimos cambios, que consiste en medición gradualmente desde umbrales bajos hasta que el sujeto declara que el estímulo está presente, y luego desde arriba, bajando hasta que el estímulo desaparece. Se promedian ambos valores.
- 2) El de los estímulos constantes, consiste en exponer al sujeto a estímulos de intensidades fijas alrededor del probable umbral, los cuales se repiten ordenados aleatoriamente. El umbral corresponde al valor que el sujeto declare como presente un 50% de las veces.

3) Umbral diferencial: Es la mínima intensidad con que un estímulo debe exceder a otro para que el sujeto los reconozca como diferentes en un 50% de la prueba. Al igual que en el caso anterior, son importantes las condiciones de ensayo, entre las cuales debe especificarse la intensidad del estímulo más débil. Para la determinación del umbral diferencial pueden utilizarse los dos métodos anteriores, o bien el método del error promedio. En éste, el sujeto controla la intensidad del estímulo variable y lo ajusta hasta hacer “ igual ” al de un estímulo fijo. El error promedio cometido es el umbral diferencial.

Es interesante hacer notar que los umbrales no son valores perfectamente determinados. No solo los diversos métodos pueden arrojar valores diferentes, sino que además un mismo método puede variar de un momento a otro, ya que el sujeto puede cansarse, o bien agudizar su percepción al realizar más intentos.

1.5 Técnicas de insonorización de ambientes

Insonorizar un recinto supone aislarlo acústicamente del exterior, lo implica una doble dirección:

Evitar que el sonido que producimos salga al exterior (evitar la contaminación acústica). Evitar que el ruido exterior penetre y distorsione el sonido de la sala.

Es interesante tener en cuenta que si se reduce el nivel de ruido en un ambiente, también se reduce en los ambientes vecinos, aunque no mejore el aislamiento en sí.

A la hora de insonorizar, hay que diferenciar entre aislamiento acústico y acondicionamiento acústico para utilizar los materiales y técnicas adecuados en cada caso.

El aislamiento acústico permite proporcionar una protección al recinto contra la penetración y salida del ruido.

1.5.1 Aislante acústico

Aislar supone impedir que un sonido penetre en un medio, o que salga de él; por ello, la función de los materiales aislantes, dependiendo de donde estén, puede ser o bien, reflejar la mayor parte de la energía que reciben (en el exterior), o bien, por el contrario, absorberla.

A pesar de ello, hay que diferenciar entre aislamiento acústico y absorción acústica:

El aislamiento acústico permite proporcionar una protección al recinto contra la penetración del ruido, al tiempo, que evita que el sonido salga hacia el exterior.

En cambio, la absorción acústica, lo que pretende es mejorar la propia acústica del recinto, controlando el tiempo de reverberación, etc.

Por ello, los materiales aislantes son, generalmente, malos absorbentes. Es un hecho lógico, la misión de un aislante, si está colocado en el interior puede ser absorber el sonido que le llega, no obstante, colocado en el exterior, tendrá como misión reflejar la mayor cantidad de energía sonora que reciba, para impedir que penetre en el recinto.

Ahora bien, si nos referimos a estructuras, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos tabiques paralelos mejora el aislamiento que ofrecerían dichos tabiques por sí solos.

No se puede decir que existan aislantes acústicos específicos, como existen aislantes térmicos. específicos.

La capacidad de aislamiento acústico de un determinado elemento constructivo, fabricado con uno o más materiales, es su capacidad de atenuar el sonido que lo atraviesa. La atenuación o pérdida de transmisión sonora de un determinado material se define como la diferencia entre la potencia acústica incidente y el nivel de potencia acústica que atraviesa el material.

La pérdida de transmisión sonora depende de la frecuencia, del tamaño del tabique o pared y de la absorción del recinto receptor. El hecho de que la atenuación sonora dependa de múltiples factores hace que no se puede decir, con propiedad, que existan materiales aislantes acústicos.

El aislamiento acústico de un elemento plano se determina en laboratorio, produciendo un sonido en una de sus caras y midiendo el sonido transmitido en la otra. El resultado se expresa en decibelios. Este resultado, si aparece reflejado en las especificaciones técnicas del material, lo hace bajo la nomenclatura de *capacidad de aislamiento* y tiene que hacer referencia a un espesor o espesores concretos.

El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos, aunque una disposición adecuada de materiales puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que, la suma del aislamiento individual de cada elemento, pudiera alcanzar.

Para conseguir un buen aislamiento acústico son necesarios materiales que sean duros, pesados, no porosos, y, si es posible, flexibles. Es decir, es preferibles que los materiales aislante sean materiales pesados y blandos al mismo tiempo.

El plomo es el mejor aislante de todos ya que aísla del sonido y de las vibraciones.

Otros materiales aislantes son materiales tales como hormigón, terrazo, acero, etc. son lo suficientemente rígidos y no porosos como para ser buenos aislantes.

También actúan como un gran y eficaz aislante acústico, las cámaras de aire (un espacio de aire hermético) entre paredes. Si se agrega, además, material absorbente en el espacio entre los tabiques (por ejemplo, lana de vidrio), el aislamiento mejora todavía más. Cuando se realiza un acondicionamiento acústico, no sólo hay que prestar atención a las paredes y suelos del recinto,

sino a los pequeños detalles. Una junta entre dos paneles mal sellada, una puerta que no encaja, etc., pueden restar eficacia al aislamiento.

1.5.2 Formas de aislar

Aislar supone impedir que un sonido penetre en un medio, o que salga de él. Por ello, para aislar, se usan tanto materiales absorbentes, como materiales aislantes. Al incidir la onda acústica sobre un elemento constructivo, una parte de la energía se refleja, otra se absorbe y otra se transmite al otro lado. El aislamiento que ofrece el elemento es la diferencia entre la energía incidente y la energía transmitida, es decir, equivale a la suma de la parte reflejada y la parte absorbida. Existen diversos factores básicos que intervienen en la consecución de un buen aislamiento acústico:

Factor másico. El aislamiento acústico se consigue principalmente por la masa de los elementos constructivos: a mayor masa, mayor resistencia opone al choque de la onda sonora y mayor es la atenuación. Por esta razón, no conviene hablar de aislantes acústicos específicos, puesto que son los materiales normales y no como ocurre con el aislamiento térmico.

Factor multicapa. Cuando se trata de elementos constructivos constituidos por varias capas, una disposición adecuada de ellas puede mejorar el aislamiento acústico hasta niveles superiores a los que la suma del aislamiento individual de cada capa, pudiera alcanzar. Cada elemento o capa tiene una frecuencia de resonancia que depende del material que lo compone y de su espesor. Si el sonido (o ruido) que llega al elemento tiene esa frecuencia producirá la resonancia y al vibrar el elemento, producirá sonido que se sumará al transmitido. Por ello, si se disponen dos capas del mismo material y distinto espesor, y que por lo tanto tendrán distinta frecuencia de resonancia, la

frecuencia que deje pasar en exceso la primera capa, será absorbida por la segunda.

Factor de disipación. También mejora el aislamiento si se dispone entre las dos capas un material absorbente. Estos materiales suelen ser de poca densidad y con gran cantidad de poros y se colocan normalmente porque además suelen ser también buenos aislantes térmicos. Así, un material absorbente colocado en el espacio cerrado entre dos tabiques paralelos mejora el aislamiento que ofrecerían dichos tabiques por sí solos.

La reflexión del sonido puede atenuarse también colocando una capa de material absorbente en los paramentos de los elementos constructivos, aunque estas técnicas pertenecen más propiamente al ámbito de la acústica.

1.6 Normas de sonido

ISO es la sigla en inglés de *International Organization for Standardization*, es decir, Organismo Internacional de Normalización. Esta institución agrupa institutos nacionales como el IRAM (Instituto Argentino de Normalización), y emite normas internacionales luego de someterlas a la votación de sus miembros. Estas normas son el resultado del trabajo de diversos comités técnicos, en los que participan representantes de los diversos organismos nacionales. Una vez que un comité elabora un borrador (draft), el mismo pasa a consideración de sus miembros, y finalmente a votación. Los procedimientos de aprobación son severos, requiriéndose una mayoría especial del 75% para que un borrador se transforme en Norma.

Las normas internacionales, de igual modo que las nacionales, son de adhesión voluntaria, vale decir que constituyen bases para un compromiso o acuerdo explícito o implícito entre dos o más partes. Sin embargo, en muchas

oportunidades pasan a formar parte de legislaciones de alcance local, nacional o internacional.

Las normas correspondientes a Acústica son preparadas y discutidas por el Comité Técnico *ISO/TC 43 Acoustics*, que ha emitido una considerable cantidad de normas internacionales.

Muchas de las normas establecen procedimientos de medición que garanticen resultados correctos y repetibles cuando los mismos son aplicados por diversas personas o laboratorios. Otras normas, como la que nos ocupa, se refieren a los efectos esperables cuando se aplican determinados estímulos al ser humano. Para su trabajo, este Comité reúne resultados de numerosos trabajos científicos, los compara y compatibiliza, obteniendo relaciones que gocen del máximo consenso o acuerdo posible en un determinado estado de avance del conocimiento sobre el asunto considerado.

1.6.1 Introducción a la Norma Internacional ISO 1999 : 1990

La segunda edición de esta Norma Internacional, actualmente en vigencia, se titula “Acústica – Determinación de la exposición a ruido laboral y estimación de la pérdida auditiva inducida por ruido” (ISO, 1975).

A diferencia de la primera edición, la actual no se propone determinar directamente el riesgo auditivo, sino más bien la distribución estadística del daño auditivo expresado en términos del desplazamiento del umbral de audición a las diversas frecuencias.

Para comprender esta diferencia, recordemos que el riesgo auditivo es la diferencia porcentual entre los que adquieren una discapacidad determinada en

un grupo expuesto y los que la adquieren en un grupo no expuesto. Ello implica adoptar un criterio más ó menos arbitrario sobre qué se entiende por “discapacidad”. Ya hemos visto por lo menos dos criterios diferentes:

Que el promedio de los desplazamientos del umbral auditivo en 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz supere los 25 dB (Glorig, ISO 1999 : 1975); y que el umbral auditivo en 4 kHz sufra un desplazamiento de 5 dB .

El criterio es arbitrario porque responde a una decisión de carácter más político que científico.

Por ejemplo, podría considerarse que el tener dificultades para la comprensión oral implica discapacidad (lo cual corresponde al criterio de los 25 dB), pero también podría considerarse una discapacidad cualquier desplazamiento permanente medible del umbral (y entonces estaríamos en el criterio EPA). Aún refiriéndonos a la inteligibilidad oral, podría a su vez depender de la calidad de la inteligibilidad (expresada, por ejemplo, en términos del índice de articulación silábica deseado). El criterio a adoptar puede responder a condicionamientos de tipo económico o ético. Por ejemplo, si la legislación obliga al Estado (o al empleador, o a la compañía aseguradora) a pagar una indemnización a quienes adquieran discapacidad auditiva, la cantidad de indemnizaciones dependerá inversamente de la altura en se ubique la “valla”.

La edición de 1990 de esta norma se aparta explícitamente de esta discusión, la cual se deja en manos de los entes de aplicación, sean éstos reparticiones gubernamentales nacionales, regionales o locales, o los departamentos de personal de las empresas, en caso de que desearan fijar políticas de higiene y seguridad más estrictas que las exigibles por ley (por ejemplo quienes se

encuentren en el nivel 4 de la Ley de Riesgos del Trabajo vigente en la Argentina).

Las razones argumentadas son, esencialmente, la gran cantidad de criterios de discapacidad existentes, muchos de los cuales pueden estar plenamente justificados según el contexto.

El objetivo de esta edición de la norma es, entonces, dar, tan objetivamente como los conocimientos científicos disponibles lo permitan, la distribución estadística del desplazamiento permanente del umbral a diversas frecuencias en función de la edad y del nivel de exposición a ruido normalizado a una jornada laboral de 8 horas. En las secciones que siguen introduciremos los conocimientos esenciales para la comprensión y aplicación satisfactoria de esta Norma.

Medición del ruido

La norma ISO 1999 : 1990 utiliza el *nivel de exposición a ruido*, $L_{EX, 8h}$, como magnitud fundamental para describir la intensidad del ruido. El mismo se origina en el nivel de presión sonora L_p , definido por la ecuación.

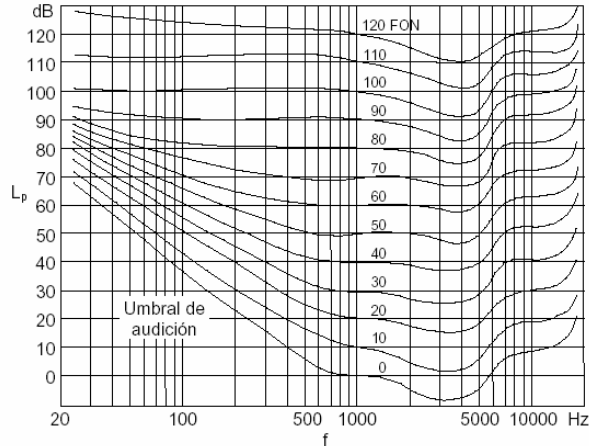
$$L_p = 10 \log(p / p_0)^2 \quad (1. 7)$$

donde p es la *presión sonora*, o diferencia entre la presión instantánea y la presión atmosférica estática, y p_0 es la *presión de referencia*, igual a 20 mPa.

El nivel de presión sonora se expresa en decibeles, abreviados dB. La utilización de una expresión logarítmica para la presión sonora permite comprimir un rango muy amplio (típicamente desde 20 mPa hasta 2000 Pa) de manera de expresarlo con menos órdenes de magnitud (0 dB a 160 dB).

El nivel de presión sonora es un descriptor físico de la intensidad instantánea del sonido, pero no tiene un correlato muy definido con lo que percibe el oído humano. En un intento por lograr una medida mejor correlacionada con la percepción subjetiva del sonido se recurrió a las curvas isofónicas obtenidas en 1933 por Fletcher y Munson (figura 1.12), las cuales indican, en un diagrama $f - L_p$, una serie de contornos para cada uno de los cuales la sonoridad subjetiva es la

Figura 12. Contornos de Fletch y Munson

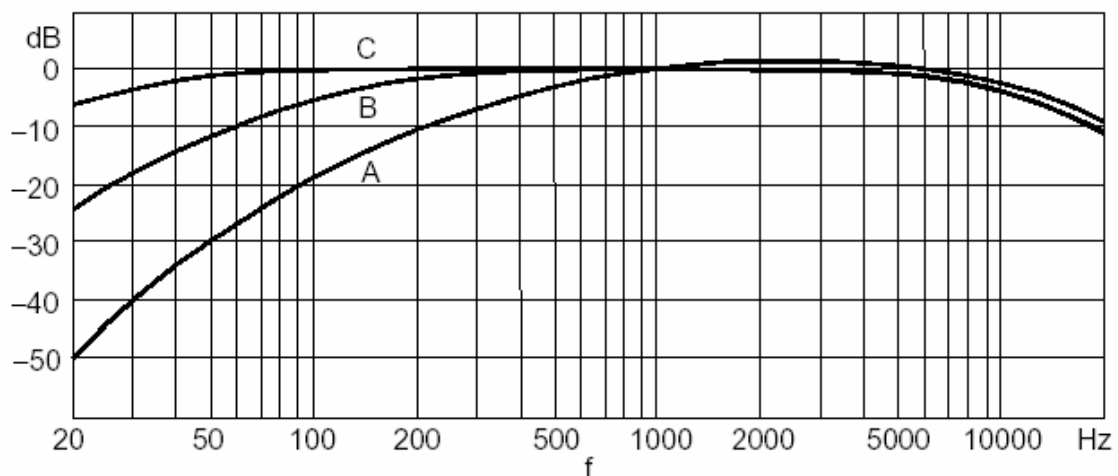


misma. El *nivel de sonoridad*, expresado en *fon*, es el nivel de presión sonora correspondiente a un dado contorno en la frecuencia 1000 Hz. Se observa que en baja frecuencia y en muy alta frecuencia la sensibilidad del oído es menor, ya que a igual L_p el nivel de sonoridad percibido resulta menor. Para realizar una medición que a la vez fuera objetiva pero vinculada a lo percibido, se introdujeron tres filtros, denominados A, B y C, destinados a procesar la señal

sonora previamente a su efectiva medición. El filtro A tenía una respuesta en frecuencia aproximadamente opuesta al contorno de 40 fon, el B, opuesta al de 70 fon, y el C, opuesta al de 100 fon (figura 1.13). De esa manera, cada uno de estos filtros atenúa las frecuencias en que el oído es menos sensible, siendo el resultado aproximadamente indicativo de lo realmente percibido (Fletcher et al. 1933).

El resultado de medir intercalando el filtro A se expresa siempre en dBA, y análogamente en los otros casos. La idea original no funcionó demasiado bien, ya que la sensación de sonoridad en el caso de tonos múltiples o de ruidos de espectro amplio no puede ser determinada mediante los contornos isofónicos, que fueron obtenidos para tonos puros. No obstante, los medidores de nivel sonoro equipados con los filtros A, B y C se popularizaron, y ello puede haber condicionado parcialmente las investigaciones, llevadas a cabo entonces con los instrumentos disponibles.

Figura 13. Curvas de compensación



El resultado fue que los efectos sobre la audición humana exhibían una importante correlación con los niveles sonoros con compensación A (es decir, filtrados con el filtro A), lo cual llevó a adoptar universalmente el nivel sonoro A

para todas las cuestiones relativas a la audición. Formalmente, el *nivel sonoro A* (o *nivel de presión sonora compensado A*) se define como

$$L_{pA} = 10 \log(P_A / P_0)^2 \quad (1.8)$$

donde P_A es la *presión sonora con compensación A*, es decir la presión sonora filtrada con el filtro A. El nivel sonoro se mide en forma directa por medio del *sonómetro* o *medidor de nivel sonoro* (a veces llamado *decibelímetro*), cuyo circuito interno se encarga de realizar las operaciones indicadas en la ecuación. Ahora bien, tanto la presión sonora como el nivel sonoro A son en general muy variables en el tiempo. Con el fin de determinar los efectos a largo plazo es necesario trabajar con niveles medios, surgiendo así el *nivel sonoro continuo equivalente*, o *nivel equivalente*, $L_{Aeq, T}$, definido como

$$L_{Aeq, T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{P_A^2(t)}{P_0^2} dt \right), \quad (1.9)$$

donde T es el intervalo de tiempo considerado. La promediación se hace *energéticamente* porque se utiliza aquí la *teoría de la igualdad de la energía*, según la cual los efectos sobre la audición están determinados por la energía sonora total recibida diariamente. El nivel equivalente se puede determinar hoy en día en forma directa por medio de un sonómetro o medidor de nivel sonoro integrador. Cuando la duración total de la exposición es muy larga pero pueden identificarse intervalos en los que, por tratarse de operaciones repetitivas o sonidos continuos, pueda obtenerse el nivel equivalente mediante mediciones más cortas, será posible aplicar esta otra fórmula:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n T_i 10^{L_{Aeq,T_i}/10} \right) \quad (1.10)$$

donde L_{Aeq, T_i} es el nivel equivalente extendido al intervalo T_i y $T = \sum T_i$. Es de destacar que si dentro de un intervalo T_i hay ciclos repetitivos, es aceptable medir L_{Aeq, T_i} en uno solo de los ciclos, extrapolando el valor obtenido a los restantes. Esto permite ahorrar en general mucho tiempo de medición.

A modo de ejemplo, supongamos que un operario está sometido a tres tipos de exposición durante sus 8 horas de trabajo. En la primera, que dura 1 h, el nivel equivalente es de 80 dBA.

En la segunda, de tres horas de duración, se observa un ciclo que se repite cada 20 minutos, habiéndose medido un nivel equivalente de 92 dBA en uno de los ciclos. En el tercer tipo de exposición se individualizan ciclos cortos de 5 minutos de duración, en cada uno de los cuales el nivel equivalente medido es de 86 dBA. El tiempo total de medición ha sido de 1 h 25 min, en contraposición con las 8 horas que habría requerido una medición directa. El nivel equivalente resultante es:

$$L_{Aeq,8h} = 10 \log \left[\frac{1}{8} \left(1 \times 10^{80/10} + 3 \times 10^{92/10} + 4 \times 10^{86/10} \right) \right] = 89 \text{ dBA} \quad (1.11)$$

Obsérvese que si bien los 92 dBA se midieron durante 20 minutos, se consideró que dicho valor se extendía al intervalo de 3 horas durante el cual se repite dicho ciclo. Lo mismo es válido para los 86 dBA, que se midieron durante 5 minutos.

Dado que el intervalo T es muy variable según la duración administrativa de la jornada laboral, resulta muy conveniente definir un *nivel de exposición a ruido normalizado a 8 h*,

$L_{EX, 8h}$, definido por:

$$L_{EX, 8h} = L_{Aeq, T} + 10 \log (T / T_0) \quad (1.12)$$

donde $T_0 = 8$ h es el *tiempo de referencia*, y T el tiempo efectivo de duración de la jornada laboral.

Este parámetro representa un ruido continuo y constante a lo largo del tiempo de referencia de 8 h que contiene la misma energía total (ponderada por el filtro A) que el ruido real, variable y extendido al tiempo total T dentro de una jornada.

En aquellos casos en que la exposición no pueda describirse con precisión, por ejemplo en el caso de un supervisor que visita en forma aleatoria o según requerimientos diferentes sectores de una planta industrial, suele ser recomendable utilizar medidores personales. Un dosímetro es, esencialmente, un instrumento integrador portable cuyo micrófono se coloca en las proximidades del oído (por ejemplo en el casco, o en la solapa) y que calcula la *dosis* diaria de energía sonora del ruido al que es expuesto del usuario. Dicha dosis se expresa como porcentaje de un nivel sonoro continuo equivalente máximo admisible según la legislación vigente:

$$D = \frac{\int_0^T p_A^2(t) dt}{p_0^2 T_0 10^{L_{MAX}/10}} \cdot 100\% \quad (1.13)$$

donde L_{MAX} es el máximo nivel admisible durante el tiempo de referencia T_0 . Si, por ejemplo, se admiten 90 dBA durante 8 horas diarias, una exposición precisamente de 90 dBA durante 8 horas corresponderá a una dosis del 100%. En cambio, 87 dBA durante 8 horas ó 90 dBA durante 4 horas corresponderán a una dosis del 50%.

Con ciertas precauciones, puede utilizarse un dosímetro para determinar el nivel de exposición.

A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene

$$L_{Aeq,T} = L_{MAX} + 10 \log \left(\frac{T_0}{T} \frac{D}{100} \right) \quad (1.14)$$

y, de (8),

$$L_{EX,8h} = L_{MAX} + 10 \log \left(\frac{D}{100} \right) \quad (1.15)$$

Si, por ejemplo, el nivel máximo para el cual está configurado el dosímetro fuera 90 dBA, y se lee una dosis del 40 %, el nivel de exposición a ruido referido a 8 horas sería 86 dBA.

La ecuación es válida en la medida en que el cálculo de la dosis sea efectuado por el dosímetro de acuerdo con la ley de igualdad de la energía. Dado que no en todos los países la legislación se rige por este criterio, es necesario asegurarse de que el instrumento es compatible con el mismo. Un importante contra ejemplo lo constituyen los dosímetros que responden a la OSHA (*Occupational Safety and Health Act*, es decir la Ley de Seguridad y Salud Laboral de Estados Unidos). Los mismos se rigen por un criterio derivado de la teoría de la igualdad de los efectos temporarios que conduce a que la dosis no sea proporcional a la energía acumulada. En los dosímetros internacionales el usuario puede configurar la forma en que se calcula la dosis mediante el parámetro denominado *tasa de intercambio* (*exchange rate* o *halving rate*). Este parámetro indica en cuántos dB puede incrementarse el nivel sonoro si el tiempo de exposición se reduce a la mitad. Para la OSHA corresponde a 5 dB, mientras que para el criterio de igualdad de la energía corresponde a 3 dB.

2. MODELADO ACÚSTICO POR MEDIO DE CIRCUITOS

2.1 Circuitos electromecánicos

Las analogías electromecánicas permiten representar sistemas mecánicos, es decir, aquellos en los que hay masas que se mueven sujetas, además de la fuerza de inercia, a fuerza elástica y de rozamiento. En un circuito eléctrico, la intensidad se mide abriendo el circuito por algún punto mientras que la tensión se mide directamente sobre los terminales del dispositivo. Análogamente, en los circuitos mecánicos, se puede medir la velocidad sin manipular el dispositivo, por ejemplo, con un acelerómetro, mientras que la medida de la fuerza necesita intervenir sobre el dispositivo de algún modo. Ésta es la razón por la cual se prefiere utilizar la analogía movilidad para modelar los sistemas mecánicos. Además, en un sistema mecánico, por simple inspección, es más fácil averiguar que elementos se mueven con velocidades diferentes y por tanto, es conveniente asociarlas las tensiones eléctricas. Por otro lado, no es inmediato saber qué fuerzas están siendo aplicadas sobre un elemento puesto que lo normal es que sea una suma de diferentes tipos de fuerzas, como ocurre con las corrientes que fluyen sobre un elemento eléctrico. El procedimiento consiste, por lo tanto, en localizar las distintas velocidades de los componentes del sistema y asignarles una tensión eléctrica con la que se construya el circuito equivalente.

La impedancia mecánica Z_M es la relación compleja entre la fuerza y la velocidad en un punto dado de un dispositivo mecánico y viene dada, para un sistema masas-resorte con un grado de libertad, como:

$$Z_M = \frac{f}{\mu} = R_m + j\omega M_m + \frac{1}{j\omega C_m} \quad (2.1)$$

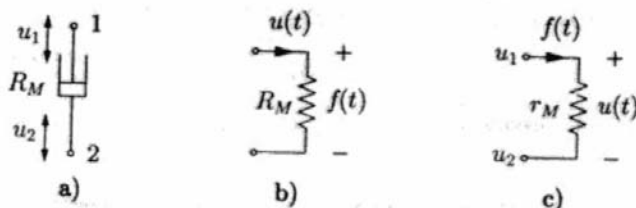
Donde R_M es la resistencia mecánica, M_M la masa mecánica y C_M la compliancia mecánica, que se estudiarán en detalle posteriormente. La unidad de la impedancia mecánica es el ohmio mecánico (Ω_{meca}) o bien, en el sistema internacional, NS/m. la inversa de la impedancia mecánica es la movilidad mecánica Z_M y su unidad es el mohm mec del término inglés mobility ohm o m/Ns.

A continuación, se presentan los tres componentes de la impedancia mecánica, los generadores mecánicos y los transformadores mecánicos que componen parte del circuito equivalente de cualquier transductor electroacústico.

2.1.1 Resistencia mecánica

La resistencia R_M es la parte real de la impedancia mecánica y representa las pérdidas de energía por fricción cuando un elemento roza con otro.

Figura 14. Resistencia mecánica



Formalmente, una estructura o dispositivo mecánico se comporta como una resistencia mecánica cuando, accionada por una fuerza, ésta es proporcional a la velocidad que adquiere. Esta afirmación es la denominada ley de rozamiento, por la cual, en un elemento mecánico que se mueve con una velocidad $u(t)$, se origina una fuerza contraria al movimiento, de valor,

$$f(t) = R_M u(t) \quad (2.2)$$

Que es análoga a la ley de Ohm en una resistencia eléctrica,

$$e(t) = Rf(t) \quad (2.3)$$

Por lo que la resistencia mecánica se representa, en analogía impedancia, por una resistencia eléctrica de valor R_M , cuya unidad es el kg/s o Ns/m. la ley de rozamiento puede expresarse de modo inverso, es decir,

$$U(t) = \frac{1}{R_M} f(t) \quad (2.4)$$

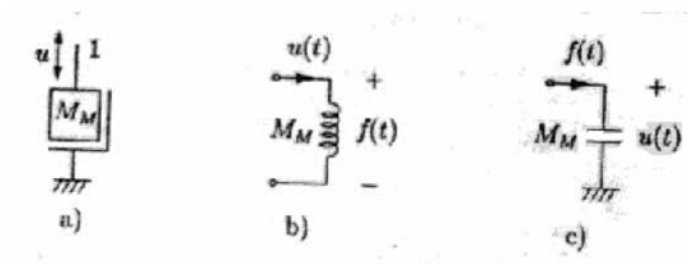
Que puede relacionarse de nuevo con una ecuación eléctrica para obtener el segundo tipo de analogía, movilidad, en la que la resistencia mecánica viene representada por $1/R_M$ o, alternativamente, por $1/R_M$ la inversa de la resistencia mecánica.

El símbolo de la resistencia mecánica en la diagrama mecánico es un pistón, como se muestra en la figura 14, ya que representa el rozamiento de éste con la paredes del cilindro en le que se encuentra. En las figuras 15 se representa los elementos en los circuitos en las analogías impedancia y movilidad, respectivamente. En la analogía impedancia, la velocidad que surge del generador es la diferencia de las velocidades $U_1 - U_2$.

2.1.2 Masa mecánica

La masa mecánica M_M es la parte imaginaria positiva de la impedancia mecánica y representa la capacidad de la materia de almacenar energía en forma de inercia cuando se le aplica una fuerza.

Figura15. Masa mecánica



Formalmente, una estructura o dispositivo mecánico se comporta como una masa mecánica cuando accionada por una fuerza, resulta acelerada en proporción directa con la fuerza, es decir cumple la segunda ley de Newton, por la cual

$$f(t) = M_m \frac{d\dot{u}(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Que es análoga a la ecuación de la autoinducción de una bobina en un circuito eléctrico, que realiza una labor de derivador de la intensidad que la recorre,

$$e(t) = L_E \frac{di(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Por tanto, la masa mecánica se representa, en analogía a la impedancia, por una bobina de valor M_M . Cuya unidad es el Kg. o Ns^2/m . Alternativamente, la segunda ley de Newton puede escribirse en función de la fuerza para obtener.

$$U(t) = \frac{1}{M_m} \int f(t) dt, \quad (2.7)$$

Que posee su analogía en el campo eléctrico en el condensador ya que tensión que cae en esto esta relacionada con su capacidad por:

$$e(t) = \frac{1}{CE} \int i(b) dt \quad (2.8)$$

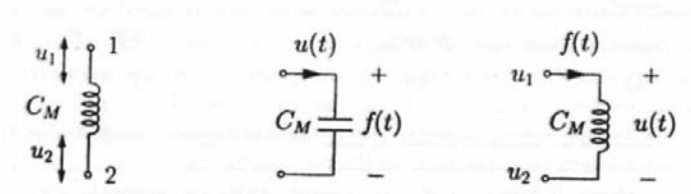
Y, en consecuencia, la masa mecánica se representa como un condensador de valor M_M en la analogía movilidad.

En la figura 16 se representa el símbolo de la masa mecánica. En esta última, uno de los terminales debe estar conectado a masa ya que la velocidad que adquiere la masa es única y está referida al reposo. En analogía a la impedancia, esta condición no supone ningún problema ya que sólo una corriente puede atravesar los terminales de la bobina. Sin embargo, en analogía a la movilidad, podría darse el caso de que la tensión que cae en el condensador fuera la diferencia de las tensiones en sus terminales, algo que contradice el hecho físico de velocidad referida al reposo.

2.1.3 Compliancia mecánica

La compliancia mecánica C_M es la parte imaginaria negativa de la impedancia mecánica, y representa la capacidad de una suspensión de almacenar energía clásica cuando se le aplica una fuerza.

Figura 16. Compliancia mecánica



Formalmente, una estructura o dispositivo mecánico se comporta como una compliancia cuando accionada por una fuerza, sufre un desplazamiento en proporción directa con la fuerza, la cual corresponde con la ley de Hooke.

$$f(t) = \frac{1}{C_m} \int U(t) dt \quad (2.9)$$

Donde $u(t)$ es el desplazamiento del dispositivo mecánico. Esta ecuación es análoga a la de un condensador en un circuito eléctrico,

$$e(t) = \frac{I}{CE} \int i(t) dt \quad (2.10)$$

Por lo que, en analogía impedancia, la Compliancia mecánica se representa por medio de un condensador de valor C_M , cuya unidad es el m/N. por otro lado, expresando inversamente la ley de Hooke,

$$U(t) = C_m \frac{df(t)}{dt} \quad (2.11)$$

Es posible obtener la analogía de movilidad al relacionarla con la compliancia mecánica.

$$e(t) = Le \frac{di(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Y afirmar que la compliancia mecánica es una bobina de valor C_m en analogía movilidad.

En la figura 16 se presenta un muelle que simboliza la compliancia mecánica, junto con los elementos de la analogía impedancia y movilidad. La compliancia mecánica es el valor recíproco a la constante de elasticidad k del muelle por lo que es un indicador de lo “blando” que es el muelle, es decir, a mayor valor de C_M más se estirará ante una fuerza. En un sistema real, con cierto razonamiento, la compliancia tiene asociada una cierta resistencia mecánica puesto que, de lo contrario, el muelle oscilaría indefinidamente a su frecuencia no amortiguada.

2.1.4 Generadores mecánicos

Al igual que en la teoría de circuitos eléctricos, en los que existen generadores de tensión y de intensidad, en los circuitos mecánicos, existen unos elementos que generan una de las dos variables mecánicas. Éstos son los generadores de fuerza y los generadores de velocidad, que pueden representarse en cualquiera de las dos analogías posibles.

En la figura 17 se presenta el generador de fuerza ideal y real, para las analogías impedancias y movilidad. La figura 18 representa un generador de caída $f(t)$ de amplitud constante con una resistencia interna nula, es decir, una impedancia mecánica nula, que produce un flujo $u(t)$ de amplitud constante con resistencia interna infinita, es decir, movilidad mecánica infinita, que produce una caída $u(t)$ dependiente de la carga. En la figura 18 se muestra el generador de velocidad ideal y real, para las analogías impedancia y movilidad.

En la figura 17, los dos extremos del generador de fuerza se mueven con velocidades U_1 y U_2 , que son funciones de la fuerza y de su carga mecánica. En el elemento análogo en modo movilidad, las tensiones en los dos terminales corresponden a las velocidades U_1 y U_2 , del generador mecánico, mientras que en análogo impedancia, la corriente que fluye del generador es la diferencia de las velocidades $U = U_1 - U_2$, de modo que estas dos velocidades no aparecen como variables en el circuito.

Figura 17. Generador de fuerza constante

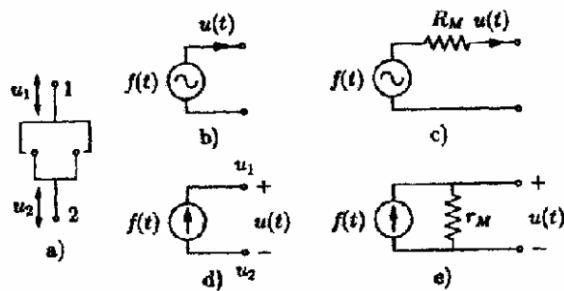
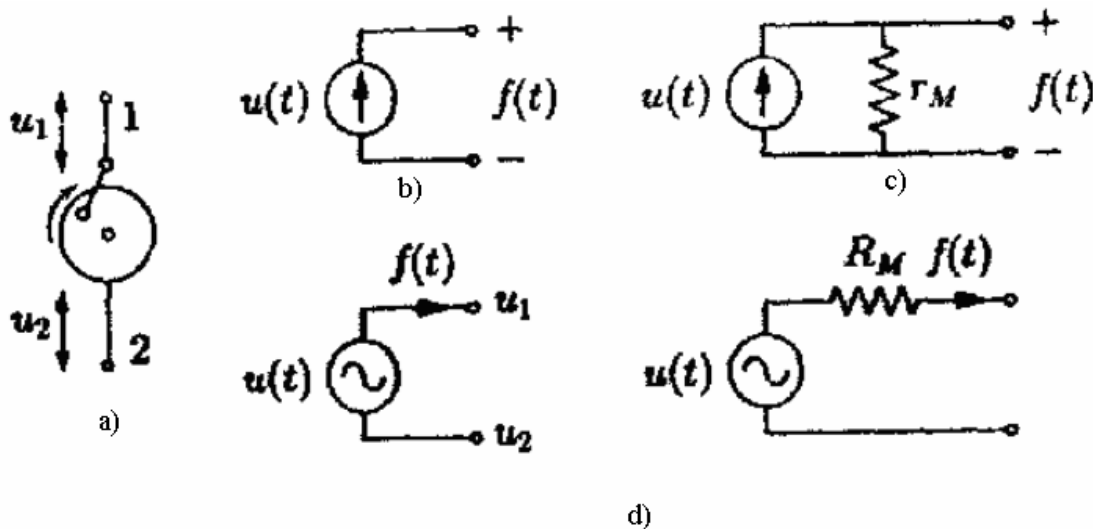


Figura 18. Generador de velocidad constante

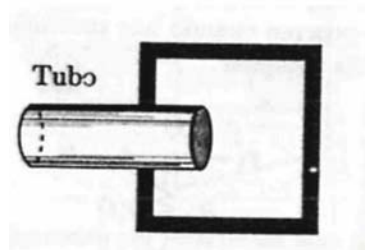


En la figura 18 a, los dos extremos del generador también se mueven con velocidades distintas, sin embargo, al ser un generador ideal de velocidad, éstas son independientes de la carga mecánica. De nuevo, en el elemento análogo en modo movilidad, las tensiones en los dos terminales son análogas a las velocidades u_1 y u_2 , mientras que, en la analogía impedancia, la intensidad que surge del generador es la diferencia de velocidades.

2.2 Circuitos acústicos

Las analogías acústicas permiten representar sistemas acústicos, es decir, aquellos en los que tienen lugar variaciones de caudal y presión en un fluido, líquido o gaseoso, como puede ser el aire o el agua. De modo similar al estudio con circuitos mecánicos, en los circuitos acústicos se trata de encontrar dos magnitudes análogas a la tensión e intensidad, y establecer paralelismo que den lugar a analogías. La analogía preferida en este caso es la analogía impedancia ya que la magnitud que puede medirse sin modificar los dispositivos es la presión sonora, puesto que con un sensor como micrófono de presión, es posible medir el campo sonoro en un punto determinado sin que la presencia de éste perturbe las condiciones del campo. Sin embargo, aún es necesaria una magnitud más que pueda identificarse con la corriente eléctrica. Considerando un recinto cerrado, excepto por un orificio al que se le ha acoplado un tubo y que está representado en la figura 19, ante una onda sonora, la presión en el extremo interior del tubo es la misma que fuera de éste, es decir, existe continuidad de presión. Por otro lado, la cantidad de aire que sale del tubo y entra en el recinto en un intervalo dado es la misma que entra en el tubo por parte exterior. Es decir, la masa de aire por segundo que entra en el volumen. Como la presión es la misma en los dos extremos, la densidad del aire debe ser la misma, por lo que se infiere que existe continuidad de la velocidad volumétrica.

Figura 19. Volumen cerrado



Se concluye por tanto, que la cantidad que fluye a través de los elementos es la velocidad volumétrica u y la magnitud que cae es la presión p . La analogía tipo impedancia se presenta como la idónea en el estudio de circuitos acústicos. Además, en estos sistemas es más sencillo identificar las cavidades, que pueden poseer presiones distintas, que las velocidades volumétricas. De este modo, a cada cavidad se le asignaría un modo en la red eléctrica con su tensión correspondiente. La impedancia acústica Z_A es la relación compleja entre la presión acústica que actúa sobre el área de un sistema acústico y el caudal o velocidad volumétrica que fluye perpendicularmente al área y viene dado, en su aspecto mas general, por

$$Z_A = \frac{P}{U} = R_A + JWMA + \frac{1}{JWCA}, \quad (2.13)$$

Donde R_A es la resistencia acústica, M_A la masa acústica y C_A la compliancia acústica, que se estudiarán en detalle posteriormente. La unidad de la impedancia acústica es el ohmio acústico (Ω_A) o bien, en el sistema internacional, N_s / m^5 . De nuevo, la inversa de la impedancia acústica es la movilidad acústica Z_A y su unidad es $m^5 / (N_s)$.

La relación que existe entre la impedancia mecánica y la acústica es la superficie del sistema acústico que se somete a presión, elevada al cuadrado.

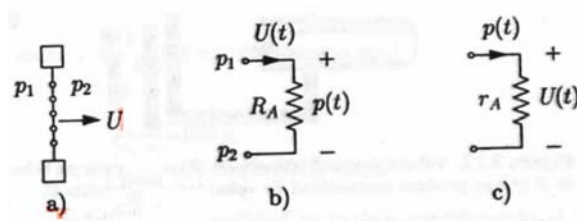
$$R\Delta = \frac{RM}{S^2}, M\Delta = \frac{Mm}{S}, \frac{1}{C\Delta} = \frac{1}{CmS^2} \quad (2.14)$$

Por lo que efectos prácticos, podría decirse que las magnitudes acústicas son las mecánicas por unidad de superficie al cuadrado. A continuación se presenta los tres componentes de la impedancia acústica, los generadores acústicos y los transformadores acústicos que componen el circuito equivalente de cualquier transductor electroacústicos.

2.2.1 Resistencia acústica

La compliancia acústica R_A es la parte real de la impedancia acústica y representa las pérdidas disipativas que ocurren cuando hay movimiento viscoso de una cantidad de gas a través de una malla fina o capilar.

Figura 20. Resistencia acústica



Formalmente, la ley de rozamiento viscoso dice que la presión sobre el flujo p necesaria para vencer la resistencia acústica es proporcional al flujo U :

$$p(t) = R_A U(t) \quad (2.15)$$

La cual es muy parecida a la ecuación de la resistencia mecánica y análoga, a su vez, a la ley de Ohm. Por tanto, en analogía impedancia, la resistencia acústica se representa como una resistencia eléctrica de valor R_A , cuya unidad

es Ns/m^5 . De nuevo, expresando la ley de rozamiento viscoso en modo inverso, es posible obtener el modelo en la analogía movilidad.

$$U(t) = \frac{1}{R_A} p(t) \quad (2.16)$$

Por lo que la resistencia acústica queda representada por una resistencia eléctrica de valor $1/R_A$.

En la figura 20 se presenta el símbolo de la resistencia acústica en forma de la sección de una malla fina. Junto al símbolo, se presenta los elementos en la analogía impedancia de presiones $p_1 - p_2$.

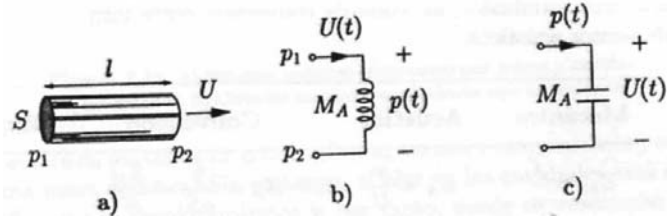
De un modo genérico, no es posible utilizar una expresión simbólica para el cálculo de R_A , puesto que se asocia a pérdidas que sufre la onda cuando atraviesa un material poroso pero no estanco. Las características del mismo en cuanto a relación entre el tamaño de los minúsculos orificios y espesor de la superficie que crea esos orificios determina la resistencia acústicas del material.

Los materiales fibrosos como la fibra de vidrio o lanas minerales presentan una resistencia acústica proporcional a la densidad de empaquetamiento D del material. En general, cualquier material que produzca un cambio de presión en la onda sonora que lo atraviere se comporta como una resistencia acústica. Por ejemplo, un tubo relleno de material fibroso se modela como una masa acústica en serie con una resistencia acústica.

2.2.2 Masa acústica

La masa acústica M_A es la parte imaginaria positiva de la impedancia acústica y, puesto que es proporcional a la masa de aire en el interior de un elemento, representa la capacidad del fluido de almacenar energía de inercia.

Figura 21 Masa acústica



Formalmente, la masa acústica es una cantidad proporcional a la masa mecánica que se asocia a una masa de aire acelerada por una fuerza neta que desplaza el gas sin comprimirlo apreciablemente, lo cual verifica la segunda ley de Newton,

$$P(t) = M_A \frac{dU(t)}{dt} \quad (2.17)$$

Expresión análoga a la de la autoinducción de una bobina en un circuito eléctrico, por tanto, la masa acústica se representa con una bobina de valor M_A , cuya unidad es Ns^2/m^5 . Alternativamente, la segunda ley de Newton puede expresarse en su modo recíproco para obtener.

$$U(t) = \frac{1}{M_A} \int p(t) dt \quad (2.18)$$

La cual es comparable a la ecuación de un condensador, por tanto, la masa acústica se representa por medio de un condensador de valor M_A .

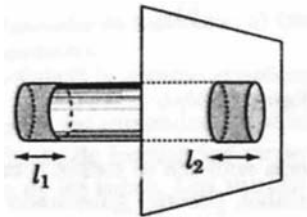
El símbolo de la masa acústica es simplemente un tubo, como se muestra en la figura 21. De hecho, los tubos son elementos que poseen cierta masa acústica puesto que el aire se mueve libremente en su interior y, si no están cerrados, no existe apenas compresión de aire. En la figura 21 se presentan los elementos en las analogías impedancia y movilidad de la masa acústica.

La masa acústica modela el comportamiento del aire en un tubo, por ejemplo, en el tubo que poseen algunas cajas acústicas para aumentar su repuesta en frecuencia baja. En general, la masa acústica de un tubo abierto por sus dos extremos de longitud y sección S viene dada por:

$$M_A = \rho_0 \frac{l}{S} \quad (2.19)$$

Donde ρ_0 es la densidad estática del aire, de valor aproximado 1.21 Kg./m³. Sin embargo, cuando el aire del tubo se mueve, existe un volumen de aire afuera del tubo que se desplaza a la misma velocidad que en el interior. Para modelar correctamente este fenómeno, los dos volúmenes fuera del tubo deben añadirse al volumen del interior, que en conjunto significa mayor masa acústica. Para este fin, se definen unas correcciones a la longitud del tubo que depende del carácter de la terminación: si el tubo termina libremente, es decir, no lleva acoplada ninguna superficie, se dice que es una terminación “ sin pestaña ” (unflanged) y la corrección es l_1 ; si en la terminación hay una superficie plana en el borde del tubo, se denomina terminación “ con pestaña ” (flanged), siendo su corrección de l_2 .

Figura 22. Corrección por terminación simple



Numéricamente, las correcciones de la masa acústica vienen dadas por

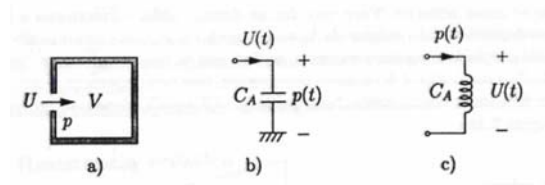
$$l_1 = 0.1952 \pi a_s \quad l_2 = \frac{8}{3\pi} a_s \quad (2.20)$$

Donde, para geometrías distintas de las del tubo, el término a en esta última expresión puede sustituirse por $\sqrt{S/\pi}$ donde S es la superficie de radiación. La longitud efectiva l_{ef} es la suma de la longitud propia del tubo y las correcciones, que, para el caso del tubo en una caja acústica, como el de la figura 22.

2.2.3 Compliancia acústica

La compliancia acústica C_A es la parte imaginaria negativa de la impedancia acústica y representa la propiedad de los medios fluidos por los que se propaga el sonido, según la cual, presenta cierta elasticidad cuando son comprimidos, de la misma forma que un muelle.

Figura 23. Compliancia acústica



Formalmente, la compliancia acústica se asocia a un volumen de aire que se comprime sin desplazamiento apreciable, proceso gobernado por la ley de Hooke según la cual,

$$p(t) = \frac{1}{cA} \int u c D dt \quad (2.21)$$

Lo cual coincide con la expresión de la capacidad de un condensador en un circuito eléctrico. Por tanto, en analogía impedancia, la compliancia acústica se representa por medio de un condensador de valor C_A , cuya unidad es m^5/N . La misma ley de Hooke, expresada en modo inverso, da lugar a

$$U(t) = C_A \frac{dp(t)}{dt} \quad (2.22)$$

Que es la expresión de una bobina eléctrica; por tanto, en analogía la compliancia acústica se modela con una bobina de valor C_A .

El elemento que describe este comportamiento es el volumen, puesto que en el interior de un recinto sin aperturas al exterior, ante una excitación de presión, se producen pequeñas compresiones sin que el aire pueda moverse. Junto a él, representado en la figura 23 se muestran los elementos que satisfacen la analogía impedancia y movilidad. En la analogía impedancia, uno de los terminales del condensador está conectado a tierra ya que la presión en un volumen de aire se mide siempre con respecto a la presión estática.

La compliancia acústica del aire en un volumen arbitrario cualquiera se determine a partir de la expresión.

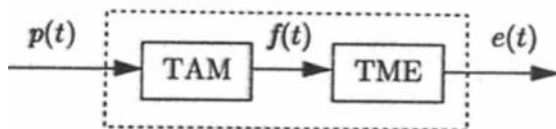
$$C_A = \frac{V}{\gamma p_0} = \frac{V}{\rho_0 c^2} \quad (2.23)$$

Donde P_0 es la presión atmosférica, de valor aproximado 10^5N/m^2 y la letra γ es una constante termodinámica que, para el caso normal de compresión adiabática, tiene un valor de 1,4 atmosferas. La expresión anterior es válida para volúmenes menores de 16 Atmosferas, es decir, dado un volumen determinado, la frecuencia máxima para la cual el modelo da resultado satisfactorio.

2.3.1 Micrófonos y su circuito

El micrófono es un dispositivo que transforma las ondas sonoras en corrientes eléctricas para, por lo general, sean amplificadas. Esta definición supone que el sonido a captar es muy débil o que el dispositivo no es capaz de entregar mucha tensión. Lo primero no es siempre cierto. Pero lo segundo sí, no solo en los primeros años de desarrollo de los micrófonos, sino también en la actualidad, en la que existen sensibilidades muy bajas. Formalmente, el micrófono es el transductor que convierte las señales acústicas en señales eléctricas. El cambio entre energía acústica y eléctrica no es directo, sino que se realiza en dos estados representados en la figura 24.

Figura 24. Micrófono como transductor



El primero transductor y el segundo Transductor Acústico Mecánico, convierte las ondas sonoras o variaciones de presión en movimiento de algún elemento del micrófono, generalmente un pequeño pistón en forma de lámina o diafragma. El Transductor Mecánico eléctrico (TME), que es más complejo y da nombre al micrófono, consiste en un dispositivo que convierte los movimientos del transductor anterior en variaciones de tensión o intensidad acorde al movimiento.

2.3.2 Circuito equivalente de los micrófonos

El circuito equivalente general de un micrófono debe incluir elementos de tres tipos de circuitos: acústico, mecánico y eléctrico. En primer lugar, el circuito acústico contiene ciertos elementos que provienen del transductor acústico

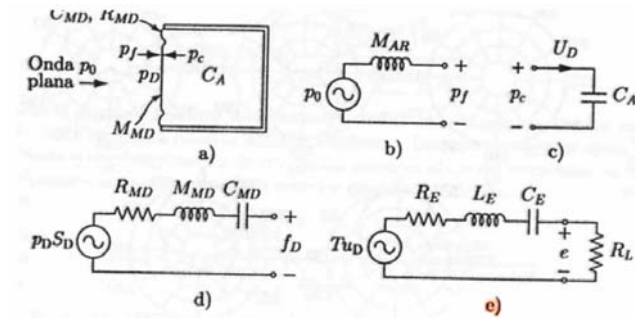
mecánico, es decir, de las cavidades, tubos, etc. y de las características del aire que lo rodea. En segundo lugar, un circuito mecánico modela los elementos físicos de la cápsula, incluyendo masas, elasticidades de la membrana y sus pérdidas asociadas. Finalmente, el circuito eléctrico describe la parte eléctrica del transductor y la adaptación con el dispositivo, amplificador, tornamesa, etc.

Antes de desarrollar el circuito equivalente completo, es necesario obtener uno acústico con el que se pueda predecir la presión media en el diafragma cuando sobre éste incide una onda de presión sonora. Se desprecian los efectos de la masa del diafragma, compliancia y pérdidas puesto que se considerarán más adelante en el circuito mecánico. En primer lugar, se modela la carga del aire sobre la superficie externa del diafragma. Para este fin, se considera que una onda plana de amplitud de presión P_0 incide en un pistón sin masa que se encuentra al final de un tubo, como se aprecia en la Figura 25. El modelo se ilustra con una cápsula de presión típica, que es la más sencilla y consiste en una cavidad a la que se ha acoplado un diafragma. La carga que presenta el aire sobre el pistón sigue al modelo de radiación en un tubo abierto que consiste en una masa acústica de valor p . Este es un buen modelo para frecuencias por debajo del rango del pistón que es precisamente el margen de trabajo de los micrófonos. La Figura 25 representa el circuito acústico del aire en la parte frontal del diafragma.

Modelando el efecto del medio alrededor del diafragma, se estudia su carga acústica trasera, que estará determinada por el tipo de cápsula. El circuito equivalente de la impedancia que presenta el aire en la parte trasera del diafragma corresponde al de un volumen típico, es decir, una compliancia acústica C_A del valor $V/P_0 c^2$. En la Figura P_c es la presión dentro de la cápsula y U_D es la velocidad volumétrica del diafragma.

El conjunto de estos dos fenómenos, externo e interno, describe completamente las variaciones de presión P_D sobre el diafragma y serán utilizados para el posterior análisis.

Figura 25. Onda plana incidente



El diafragma de un micrófono posee una masa mecánica M_{MD} y la suspensión que los rodea exhibe una compilancia C_{MD} y unas perdidas R_{MD} . La fuerza ejercida por la carga de aire sobre ambas caras del diafragma es:

$$f_D = S_D P_D = S_D (P_f - P_c) \quad (2.24)$$

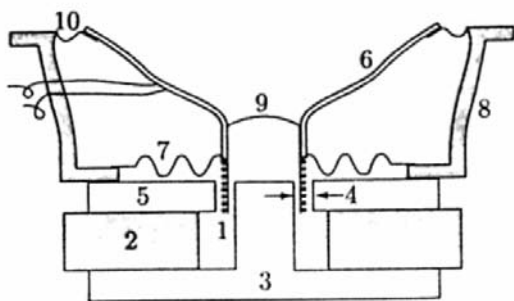
Donde P_D es la presión neta en el diafragma como resta de la presión frontal de P_f y la presión interior P_c . El circuito mecánico equivalente se muestra en la Figura 25 donde la fuerza en el diafragma f_D en circuito abierto es $S_D P_D$.

Globalmente, el micrófono es un generador de tensión controlado por la presión en el diafragma. Transformada ya la presión en movimiento, la última etapa consiste en convertir este movimiento, la última etapa consiste en convertir este movimiento en tensión con algún tipo de transductor. Por tanto, el circuito eléctrico consta de un generador de tensión cuyo valor es T veces la velocidad del diafragma, donde T es el factor de transformación del transductor empleado. Además, los elementos del transductor poseen cierta resistencia R_E inductancia L_E y capacitancia C_E , como puede apreciarse en la figura 25.

2.4 Altavoces y su circuito

El altavoz dinámico de bobina móvil es el transductor electroacústico generalizado y popular. Existe una gran variedad de chasis, imanes y bobinas, así como numerosa geometrías de diafragmas y materiales para escoger. Por este motivo, se ha desarrollado diversas clases de altavoces dinámicos de bobina móvil que cubren bandas de frecuencia y niveles de potencia para cada aplicación. En la figura 26 se muestra la sección de un altavoz dinámico de bobina móvil genérico.

Figura 26. Sección de un altavoz

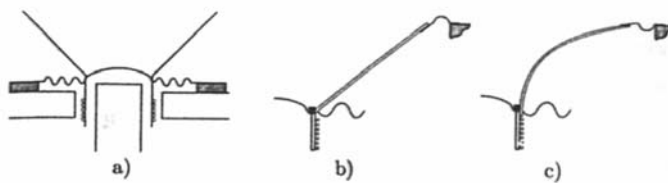


Los elementos más importantes que lo constituyen aparecen indicados en la figura y se detallan a continuación:

Diafragma: La superficie móvil que radia sonido y esta unida a la bobina es el diafragma, también llamado “cono” por su forma cónica. Algunos altavoces tienen diafragmas planos, sin embargo, se prefiere la forma cónica porque posee mayor rigidez. Como contrapartida para las frecuencias por encima del rango del pistón, esta geometría presenta direcciones preferentes de radiación que lo alejan de la teoría fuente puntual omnidireccional. El material utilizado, sobre todo en altavoces grandes, es el cartón fibroso recubierto de una capa de resina que le da mayor rigidez. La parte central tiene una capa que protege al entrehierro de polvo y otras partículas que con el tiempo podrían provocar fricción. Esta tapa antipolvo suele ser de mayor tamaño que la bobina móvil lo

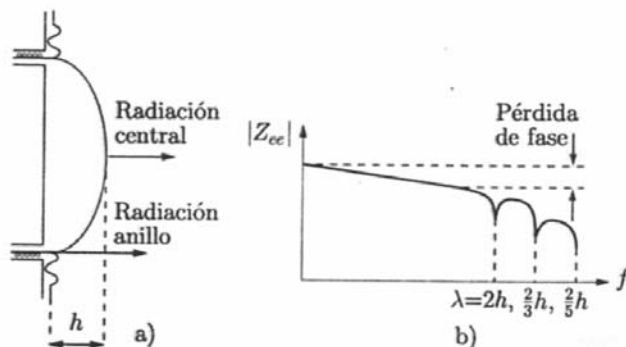
que hace que esta parezca más grande de lo que realmente es. El diafragma está suspendido con un sistema centrador constituido por un anillo elástico periférico que sujeta la carcasa y otro inferior, también llamado “araña” que sujeta la parte central. La función de ambos es absorber las ondulaciones del diafragma evitando todo movimiento que no sea axial. En la Figura 27 se presentan secciones de un altavoz dinámico que muestran la araña y dos geometrías cónicas con distintos anillos elásticos exteriores, el ultimo de ellos inverso.

Figura 27. Sistema centrador o araña



Los altavoces de dimensiones grandes o moderadas, como los altavoces de graves o medios utilizan este tipo de diafragma. Sin embargo, en caso de altavoces de agudos, es frecuente la forma de cúpula (dome en ingles), que proporciona más rigidez y provoca mayor difusión de sonido con directividad no tan acentuada. Considerando la relación entre la longitud de onda emitida y las dimensiones físicas del radiador, la geometría cónica sería impensable.

Figura 28. Sección de un diafragma



Como se aprecia en la figura 28 la bobina se sujeta por la periferia de la cúpula. La geometría en forma de cúpula provoca las llamadas pérdidas de fase a las frecuencias que cumplen la relación

$$f = (2n-1) \frac{c}{2h} \quad (2.25)$$

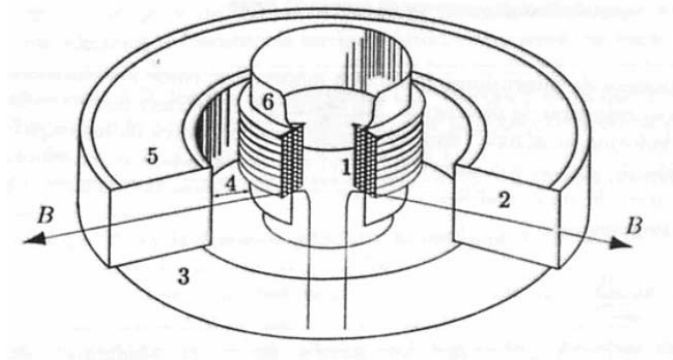
Donde n es un número entero mayor o igual a uno, c^1 es la velocidad del sonido y h es la altura de la cúpula. Por tanto, los altavoces de cúpula se diseñan con un tamaño pequeño para que las pérdidas de fase² se sitúen a frecuencias superiores al límite de percepción humana. Por ejemplo, un tweeter de 19mm de diámetro que posee una altura de 3,75 mm provoca un primer mínimo a 46 Khz., muy por encima del margen audible.

Bobina móvil: La señal eléctrica se aplica a la bobina móvil del altavoz, que está constituida por varias espiras de hilo devanadas sobre un cilindro rígido que va unido al diafragma (Figura 29) El cilindro está fabricado en papel en modelos sencillos o en aluminio en altavoces de gran potencia para disipar el calor producido. El material del que esta fabricado el hilo es cobre esmaltado o aluminio para reducir peso, que es una característica fundamental en el comportamiento del altavoz. Las dimensiones del cilindro deben ser tales que es una característica fundamental en el comportamiento del altavoz. Las dimensiones del cilindro deben ser que le permitan moverse dentro del entrehierro sin peligro de rozamiento.

¹ C. Velocidad del sonido 340 m/s

² Fase. Desplazamiento de una onda con respecto a una referencia dada

Figura 29. Vista de un imán y la bobina de un altavoz dinámico



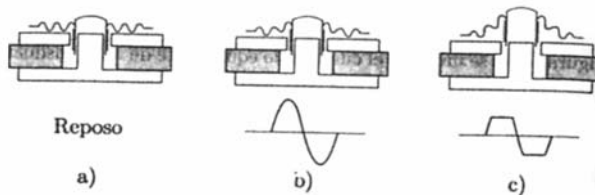
Un problema muy importante es la dilatación del bobinado debido al calentamiento, que tiende a despegarlo del soporte cilíndrico al cual está arrollado. Existen dos soluciones para este problema:

1. Doble bobinado, es decir, un bobinado interior y el otro exterior sobre un soporte de aluminio, lo que contribuye a una buena disipación de energía calorífica.
2. Bobinas autosoportadas, que no poseen soporte cilíndrico porque están pegadas con inmaterial aglutinante de poco peso y gran capacidad de disipación de calor.

Imán: Los altavoces actuales están constituidos por imanes permanentes de forma anular. El campo magnético se cierra a través de la pieza polar, el núcleo cilíndrico concéntrico con el imán y la culata (Figura 30). Entre el núcleo central y el imán queda un pequeño espacio denominado entrehierro, donde se inserta la bobina. El entrehierro debe ser de dimensiones reducidas para aprovechar al máximo la inducción magnética B . La pieza polar, que está fabricada de un campo de metal de alta permeabilidad, forma un camino de baja reluctancia para dirigir el campo magnético a través del entrehierro. La bobina debe constituirse de modo que el número de espiras dentro del entrehierro sea

constante, de no ser así se produciría falta de linealidad y ocasionaría distorsión.

Figura 30. Bobina móvil de cobre en reposo



2.5 Electrónica en el sonido

La electrónica del sonido basa su trabajo en un aparato elemental llamado ecualizador, el cual tiene la capacidad de trabajar en distintos rangos del espectro auditivo.

Un ecualizador permite aumentar o reducir la ganancia selectivamente en tres o más frecuencias para corregir deficiencias en la respuesta frecuencial de un sistema (generalmente electroacústico) o el balance tonal de una fuente. Es posible, así, resaltar frecuencias originalmente débiles, o atenuar otras de nivel excesivo. El ecualizador más sencillo es el clásico control de tono, que permite controlar, según convenga, tres grandes bandas fijas de frecuencia, denominadas genéricamente graves, medios y agudos.

Existen dos tipos de ecualizadores: los ecualizadores gráficos o de bandas (por ejemplo los ecualizadores octava³), que poseen varias bandas fijas (normalmente entre 5 y 31 bandas), y los ecualizadores paramétricos, en los que se puede ajustar la frecuencia central de una o más bandas, así como su

³ Octava es el intervalo que separa dos sonidos cuyas frecuencias fundamentales tienen una relación de dos a uno.

extensión (controlada mediante el factor de calidad Q^4). En ambos casos se dispone de un ajuste para la ganancia o atenuación. Los más difundidos son los ecualizadores gráficos, aunque en general las consolas de mezcla suelen incluir en cada canal de entrada un sencillo ecualizador paramétrico o semiparamétrico.

2.5.1 Ecualizadores gráficos

Analicemos primero ecualizadores gráficos. Como ya se señaló, están divididos en bandas de frecuencia. Cada banda está centrada en una frecuencia determinada., perteneciente a una lista estándar de frecuencias que han sido seleccionadas para que la relación entre dos frecuencias consecutivas sea aproximadamente constante. Este tipo de distribución de las bandas está relacionada con la percepción logarítmica de la escala de frecuencias por el oído. En general se describe el ancho de banda relativo expresándolo en fracciones de octava, como por ejemplo ecualizadores de octava. De tercio de octava, etc. Si llamamos α a la fracción de octava correspondiente a una banda, entonces para cualquier banda k se debe cumplir que:

$$F_{sk} = 2^{\alpha} f_{i,k} \quad (2.26)$$

Donde $f_{2,k}$ y $f_{1,k}$ son la frecuencia superior e inferior de la banda k (definidas por medio de algún criterio conveniente). La frecuencia central $f_{\alpha,k}$ de la banda se define como la media geométrica entre los extremos.

$$f_{s,k} = f_{i,k} \cdot 2^{\alpha k} \quad (2.27)$$

⁴ Factor de calidad Q , de un circuito es la relación entre la energía reactiva que almacena y la energía que disipa durante un ciclo completo de la señal.

Resulta, así,

$$\begin{aligned} f_{i,k} &= 2^{-\alpha/2} f_{o,k} \\ f_{s,k} &= 2^{\alpha/2} f_{o,k} \end{aligned} \quad (2.28)$$

De donde el ancho de banda relativo de cada banda está dado por

$$B = \frac{f_{s,k} - f_{i,k}}{f_{o,k}} = 2^{\alpha/2} - 2^{-\alpha/2} \quad (2.29)$$

Por otra parte, la condición de adyacencia entre las bandas contiguas

$$f_{i,x} = f_{s,k-1} \quad (2.30)$$

Implica que

$$f_{o,k} = 2^{\alpha} f_{o,k-1} \quad (2.31)$$

Es decir, la relación entre frecuencias centrales sucesivas es la misma que entre las frecuencias superior e inferior de cada banda.

En la tabla 2.1 se dan los valores de f_s/f_i y B para varias fracciones de octava α que aparecen habitualmente en los ecualizadores comerciales. Los más comunes son los de octava, en los que cada frecuencia es el doble de la anterior (ya que subir una octava equivale a multiplicar por 2), y los tercio de octava, en los que cada frecuencia es aproximadamente un 25% mayor que la anterior.

Tabla II parámetros características de las bandas de ecualización para diversas fracciones de octava.

α	f_s/ f_i	B
2	4	1,5
1	2	0,707
2/3	1587	0,466
1/3	1414	0,348
1/3	1260	0,232
1/6	1122	0,116
1/12	1059	0.0578

Los ecualizadores de doble octava ($\alpha=2$) son en realidad controles de tono de 5 bandas y se utilizan para correcciones gruesas del balance tonal (como en los canales de entrada de las consolas de mezcla) y no para solución de problemas severos de origen electroacústico de 1/6 y de 1/12 de octava son muy raros y, de hecho muy costosos, pues requieren diseños extremadamente ajustados y una electrónica superior en cuanto a estabilidad térmica y en el tiempo.

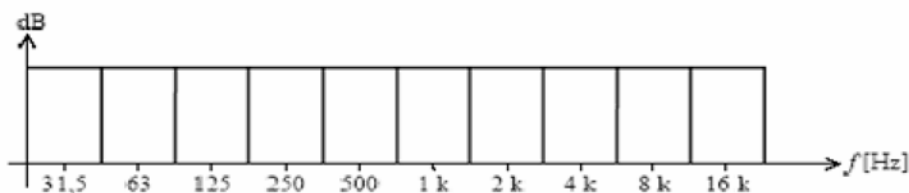
Es interesante observar que para un ecualizador de resolución dada, por ejemplo de bandas de octava, el ancho de banda absoluto es mayor para las bandas de mayor frecuencia central, de modo que en un gráfico con escala lineal de frecuencia las primeras bandas están muy comprimidas . También se observa la asimetría de las bandas con respecto a la frecuencia central (ya que ésta es un promedio geométrico, no aritmético).

Figura 31. Frecuencias centrales



En un gráfico con escala de frecuencia logarítmica (el típico gráfico que se utiliza en la especificación de las respuestas en frecuencia), en cambio, el espacio es uniforme, debido a que una escala logarítmica de iguales proporciones quedan representadas por iguales distancias. Las bandas son, además, simétricas con respecto a las frecuencias centrales respectivas (figura 32).

Figura 32. Frecuencias centrales de las bandas de octava



Las frecuencias centrales para filtros de banda de octava y tercio de octava tales como los que constituyen los ecualizadores están normalizadas nacional e internacionalmente (por ejemplo, a través de las normas IEC 225:1260:1995 e IRAM 4081:1977). Para ello se ha tomado el valor de 1000Hz como punto de partida, y se han modificado ligeramente los valores para lograr a la vez una escala por décadas, por octavas, y por tercios de octava. Una escala es por décadas cuando dado cualquier valor de dicha escala, también aparece la década superior y la década inferior. Así dado que partimos de 1000 Hz, también deberían aparecer 10 Hz, 100 Hz y 10000 Hz. Ello es 1024, que es casi exactamente 3 décadas:

$$2^{10}=1024 \approx 1000 = 10^3.$$

En la tabla II se resumen las frecuencias normalizadas correspondientes a las tres décadas del rango audible para ecualizadores de distintas resoluciones. Podemos apreciar que las décadas son exactas, así como la mayoría de las “octavas” Algunas “octavas ” son sólo aproximadas. Por ejemplo, 315 no es exactamente el doble de 160, ni 125 el doble de 63, aunque el error es en todos los casos menor de un 2%. Es costumbre diseñar los ecualizadores de bandas según la serie de frecuencias teóricas para cada fracción, aunque se las rotula con las designaciones normalizadas.

Tabla III. Frecuencias estándar utilizadas en los ecualizadores de bandas de octava, 2/3 de octava, 1/2 y 3/4 de octava.

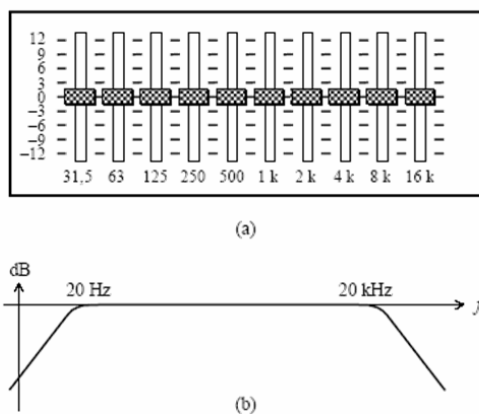
f	1	2/3	1/2	1/3	f [Hz]	1	2/3	1/2	1/3	f [Hz]	1	2/3	1/2	1/3
[Hz]														
20				*	200				*	2.000	*		*	*
22,4			*		224					2.240				
25		*		*	250	*	*	*	*	2.500		*		*
28					280					2.800			*	
31,5	*		*	*	315				*	3.150				*
35,5					355			*		3.550				
40		*		*	400		*		*	4.000	*	*	*	*
45			*		450					4.500				
50				*	500	*		*	*	5.000				*
56					560					5.600			*	
63	*	*	*	*	630		*	*	*	6.300		*		*
71					710					7.100				
80				*	800				*	8.000	*		*	*
90			*		900					9.000				
100		*		*	1.000	*	*	*	*	10.000		*		*
112					1.120					11.200			*	
125	*		*	*	1.250				*	12.500				*
140					1.400			*		14.000				
160		*		*	1.600		*		*	16.000	*	*	*	*
180			*		1.800					18.000				
										20.000				*

2.5.2 Ajustes de ganancia de frecuencia seleccionada.

Para el ajuste de ganancia o atenuación, los ecualizadores gráficos cuentan en cada banda con un potenciómetro deslizante vertical graduado en dB, cuya posición central o neutral corresponde a 0 dB, es decir, una ganancia 1 (salida igual a la entrada). En la posición más alta se tiene una ganancia máxima típicamente de 12 dB, es decir, una ganancia 4 (aunque en algunos equipos puede conmutarse entre 6 dB y 12 dB, y en otros se llega hasta 18 dB), y en la posición más baja una atenuación de -12 dB (ó -6 dB ó -18 dB), correspondiente a una reducción de la señal en un factor 4.

En la figura 33 se muestra el aspecto que presentan los controles de un ecualizador de bandas de octava cuando están todos en la posición central. La respuesta en frecuencia resulta en ese caso plana en toda la banda de audiofrecuencias, como se indica en la figura 33. Las caídas a uno y a otro lado de dicha banda son las normales en todo equipo de audio, colocadas para reducir el ruido fuera de la banda de interés (ya que si bien se trata de un ruido inaudible, consume potencia y resta rango dinámico a la señal útil).

Figura 33. Ecualizador de bandas de octava



Si se eleva una de las bandas hasta el valor máximo de 12 dB figura 33, el punto central de dicha banda se enfatizará en 12 dB, pero el resto de la banda

lo hará en menor cuantía. Debido a que los filtros no son ideales, fuera de la banda habrá cierta ganancia residual que se atenúa rápidamente al alejarse de la banda (figura 33).

Si, en cambio, se lleva una banda al valor mínimo de -12 dB (figura 34), el punto correspondiente respuesta en frecuencia. Se observa que la disposición de los potenciómetros deslizantes es una analogía gráfica bastante representativa de dicha respuesta en frecuencia (salvo las frecuencias muy altas y muy bajas, en donde actúan los filtros pasabajos y pasaaltos incluidos dentro del ecualizador). Esta es la razón por la que estos ecualizadores se denominan ecualizadores gráficos. En algunos ecualizadores de bajo costo los potenciómetros son rotativos, perdiéndose esta característica.

Figura 34. Posición de los controles después de centrar al máximo las frecuencias

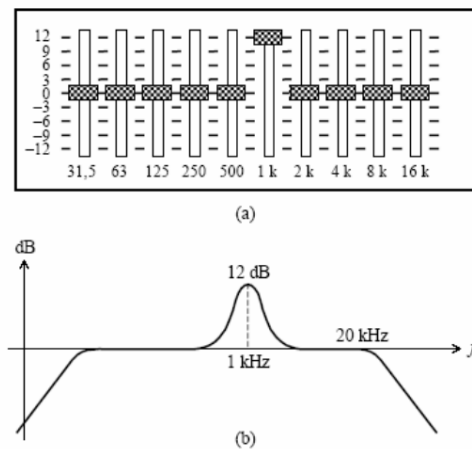


Figura 35. Posición de los controles después de atenuar

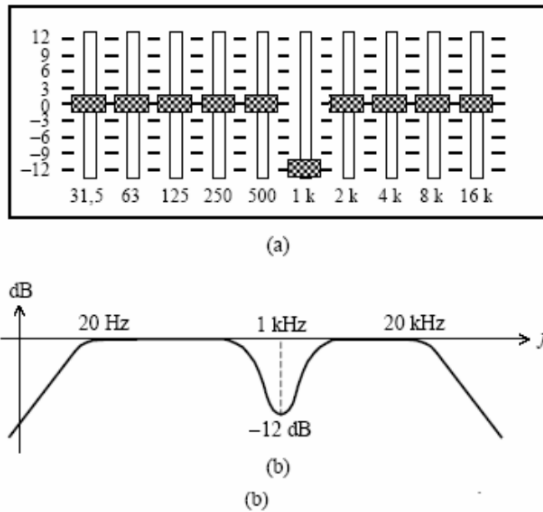
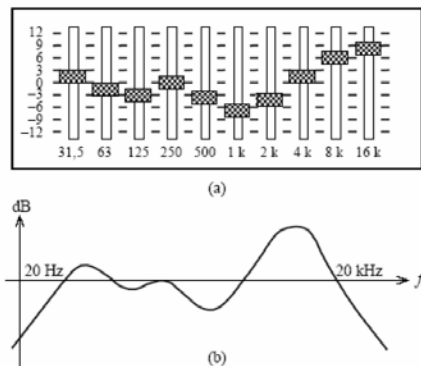


Figura 36. Posición de los controles para una ecualización determinada

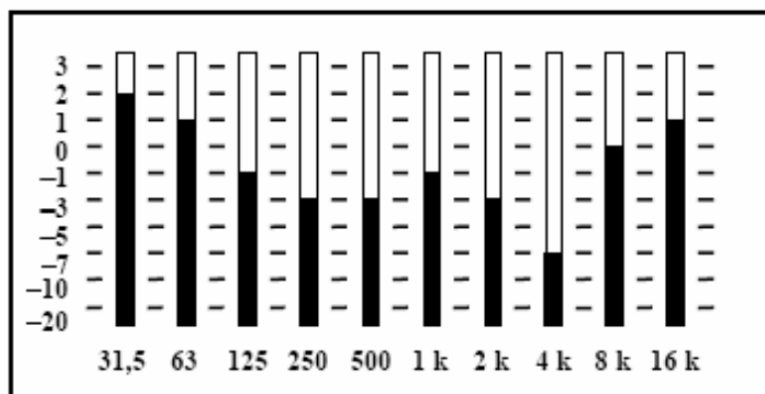


2.5.3 Correcta ecualización

La correcta ecualización de un sistema es un proceso de calibración muy importante porque de él depende que la respuesta obtenida sea espectralmente plana. Por esa razón no es posible ni recomendable realizarla subjetivamente, ya que la percepción humana dista de ser plana y, lo que es peor, es muy variable de individuo a individuo. Para realizar un ajuste objetivo del sistema es necesario utilizar un analizador de espectro en tiempo real (real-time analyzer, RTA), instrumento de medición que muestra en forma gráfica el espectro de bandas de un sonido en cada instante. Más precisamente,

proporciona en forma de un gráfico de barras el nivel de presión sonora en cada banda de octava o en cada banda de tercio de octava, según el tipo de analizador. En la figura 37 se muestra la pantalla de un analizador de bandas de octava. El nivel 0 es relativo a la escala seleccionada, cuyo valor no es esencial en el proceso de ecualización en tanto se esté trabajando dentro del rango lineal de todos los componentes. Generalmente se toma un nivel suficientemente alto como para que el ruido ambiente no afecte la medición, y suficientemente bajo como para evitar distorsiones. También es posible utilizar analizadores por software, basados en general en técnicas de transformada rápida de Fourier⁵ (FFT). En estos casos es necesario tener en cuenta que la placa de adquisición de señal, habitualmente una palanca de sonido, formará parte de la cadena de medición, por lo cual su respuesta en frecuencia debe ser apropiada. Esta observación no es trivial, ya que las placas de sonido más económicas (entre las que se encuentran las que están integradas en la propia placa madre (motherboard)) tienen filtros antialias, cuya respuesta frecuencial puede tener ondulaciones.

Figura 37. Pantalla de un analizador de espectro



⁵ Transformada de Fourier. Operación matemática que representa la situación de una función en un tiempo dado

El ajuste se lleva a cabo según el diagrama de bloques de la figura 38. Se conecta a una entrada de la consola un generador de ruido rosado, definido como un ruido aleatorio cuya densidad espectral de potencia media varía inversamente con la frecuencia.

$$e^2(f_0) = \frac{k}{f} \quad (2.32)$$

Donde e es la potencia de ruido.

f_0 la frecuencia de prueba

k constante de altura de espectro

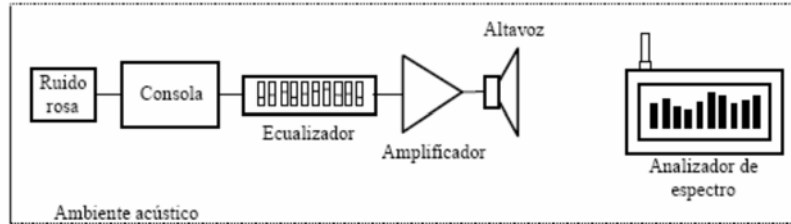
f frecuencia total del sistema

Se utiliza este tipo de señal porque contiene la misma cantidad de energía en cada banda fraccional de octava, lo cual puede comprobarse calculando el valor cuadrático medio en una banda cualquiera de fracción α de octava:

$$E_{RR}[f, 2^\alpha f]^2 = \int_f^{2^\alpha f} \frac{k}{f} df = k \ln \frac{2^\alpha f}{f} = k \alpha \ln 2 \quad (2.33)$$

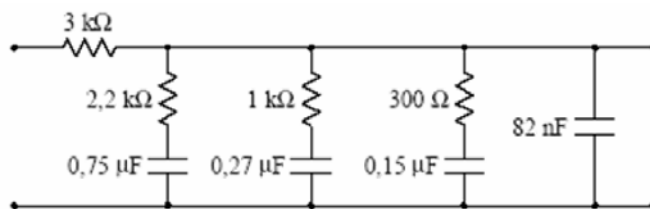
Donde podemos observar el valor independiente de la frecuencia inferior con respecto a la banda fraccional. Por esta razón, si se conectara dicha señal directamente a un analizador de espectro se obtendría la misma indicación en todas las bandas. Las irregularidades espectrales en la respuesta del sistema se traducirían, por lo tanto, en una indicación no uniforme en el analizador.

Figura 38. Disposición para llevar a cabo la ecualización de un sistema de sonido



Si bien los componentes semiconductores contienen ruido $1/f$, el mismo va siempre acompañado por cierta cantidad de ruido blanco. Por lo que no se puede utilizar simplemente este ruido amplificado como fuente para la ecualización. En cambio es posible lograr un ruido blanco bastante puro mediante un diodo zener en la región de ruptura, o bien la junta base-emisor de un transistor polarizada inversamente. También existen integrados que producen ruido blanco espectralmente muy uniforme, como el MM5837⁶. El ruido blanco puede convertirse fácilmente en ruido rosa mediante un filtro con pendiente de -3 dB/oct como el indicado en la figura 39 (basado en Giles, 1980). Los valores de los componentes han sido seleccionados para mantener dicha pendiente constante en todo el rango audible (20 Hz. a 20 kHz.) con una tolerancia mejor que $\pm 0,25$ dB. El filtro debe completarse con un seguidor u otro amplificador de alta impedancia de entrada para evitar que la carga de la impedancia de entrada de la consola afecte la respuesta, sobre todo en baja frecuencia.

Figura 39. Filtro RC con una respuesta con pendiente -3dB/ oct



⁶ MM5837 Circuito integrado que nos produce las bandas espectrales deseadas de ruido

Antes de comenzar con el proceso de ecualización se deben llevar todos los controles de la consola a su posición central o neutral. Así, los controles de ganancia o atenuación deben estar en la posición de ganancia unitaria y los controles de tono o “ecualizadores” de cada canal en posición plana. Esto último es muy importante, ya que la ecualización del sistema debe considerarse como un ajuste de referencia, lo cual significa que se establece un punto de operación en el cual se sabe que la respuesta del sistema es plana. Si posteriormente, por necesidad, gusto, estética o cualquier otra razón se requiere modificar la respuesta en frecuencia parcial de uno o más canales, desde luego podrán efectuarse los cambios deseados.

El micrófono del analizador de espectro debe ubicarse en la posición en la que se quiere lograr la ecualización. Esto es importante porque la ecualización puede no ser la misma en todos los puntos de una sala, especialmente si ésta tiene defectos acústicos notorios. Cuando el ambiente está dedicado a actividades muy sensibles a la uniformidad de la respuesta como una sala de control, de mezcla o de masterizado, la ecualización debe realizarse en el punto de escucha del operador, preferentemente con éste presente a fin de asegurar que las condiciones de ajuste sean similares a las condiciones de operación reales del sistema, si, en cambio, se va a ecualizar una sala de concierto, deberán seleccionarse varias ubicaciones representativas, y realizar un ajuste del ecualizador que sea aproximadamente el promedio de los ajustes en dichas ubicaciones.

Para llevar a cabo la ecualización se ajustan los controles del ecualizador de manera de alcanzar una indicación uniforme en todas las bandas del analizador de espectro. Esta comprobación puede ofrecer algunas dificultades, dado que al ser el ruido rosa un ruido aleatorio, las amplitudes de sus componentes espectrales varían dinámicamente. Esto implica que la imagen obtenida en la pantalla del analizador no es en realidad estática. En general los

analizadores dan varias velocidades de respuesta. En las velocidades más lentas la imagen es más estable. De todas maneras, será necesario efectuar una promediación visual, procurando observar alrededor de que nivel oscila la indicación en determinada banda, en algunos casos, especialmente en los analizadores de espectro digitales o en los basados en software, existe una función de promediación de espectros que provee una imagen lentamente variable. La promediación de gran cantidad de espectros también introduce un retardo ante cambios en la ecualización por lo que la comodidad de un espectro estable se contrapone a la excesiva demora en lograr una imagen que responda al cambio efectuado.

Otra dificultad consiste en la interacción mutua entre las bandas, sobre todo las adyacentes. Esta interacción puede ocasionar un desajuste de una banda ajustada previamente al intentar ajustar una nueva banda. Por esa razón en muchos casos la correcta ecualización del sistema requiere un proceso iterativo.

Una vez ajustado satisfactoriamente el ecualizador, es recomendable anotar la posición de los controles para referencia futura y para devolver el sistema a su situación original en caso de que accidental o intencionalmente se modificara la respuesta del ecualizador.

Finalmente, hay que advertir que el método de ecualización propuesto es un método objetivo, vale decir que su resultado es una respuesta en frecuencia general plana para el sistema. Aún cuando esto sería aparentemente lo deseable en todos los casos, ya que provee un estado de referencia conocido, muchas personas pueden no conformarse con dichos ajustes. Ello puede deberse a diversos factores: el gusto personal, la postura estética, la costumbre de haber operado durante mucho tiempo con un sistema mal ajustado, y las

variadas deficiencias auditivas que sufren las personas que integran una sociedad ruidosa. Estos motivos pueden llevar a que distintas personas exijan más graves, más medios o más agudos de un sistema de sonido, según el caso. Por ejemplo, podría suceder que un músico afamado requiera siempre de sus sonidistas, tanto para sus grabaciones como para sus espectáculos en vivo, una ecualización con predominancia de agudos. Sus seguidores, aun cuando sus preferencias individuales espontáneas pudieran ser diferentes, estarán acostumbrados a ese sonido, y no aceptarán de buen grado ecualizaciones que lo alteren, a pesar de que objetivamente proporcionen una respuesta más plana y natural. Este ejemplo muestra el tipo de dificultades que se encuentran al intentar definir el “sonido perfecto”, dificultades inherentes a cualquier definición que involucra directa o indirectamente el arte y la estética.

3. DISEÑO ELECTROACÚSTICO DE SALAS

3.1 Respuesta impulsional del sonido

El fenómeno más sencillo que tiene lugar en un ambiente con superficies reflectoras del sonido es el eco, consistente en una única reflexión que retorna al punto donde se encuentra la fuente unos 100 ms (o más) después de emitido el sonido. Se produce después de un tiempo t relacionado con la distancia d a la superficie más próxima por la expresión.

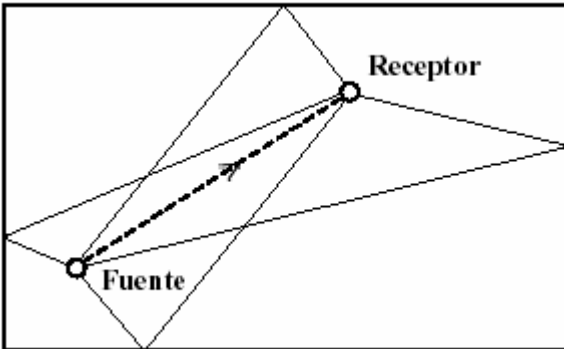
$$t = \frac{2d}{c} \quad (3.1)$$

donde c es la velocidad del sonido, es decir 345 m/s. El factor 2 se debe a que el sonido recorre de ida y de vuelta la distancia entre la fuente sonora y la superficie.

3.1.1 Reflexiones tempranas

Cuando la fuente sonora está rodeada por varias superficies (piso, paredes, techo) un oyente recibirá el sonido directo, y además el sonido reflejado en cada pared. Las primeras reflexiones recibidas, que se encuentran bastante separadas en el tiempo, se denominan reflexiones tempranas. Esta situación se ilustra en la figura 40.

Figura 40. Líneas de dispersión



En salas no demasiado grandes, las primeras reflexiones están bastante cerca en el tiempo unas de otras, de manera que no se llegan a percibir como eco.

3.1.2 Ambiencia

La distribución en el tiempo de las reflexiones tempranas crea la sensación de ambiencia, es decir la sensación que permite al oyente identificar auditivamente el espacio en el que se encuentra. Las personas no videntes desarrollan una especial habilidad para interpretar la información espacial contenida en la ambiencia.

Arquitectónicamente, el control de la ambiencia se puede lograr mediante un cuidadoso diseño que involucra trazar, sobre un plano de la sala, “rayos” acústicos similares a los de la Figura 40, medir cuidadosamente sus recorridos, y de allí determinar los tiempos de llegada de las correspondientes reflexiones. Hoy en día este trabajo se realiza con el auxilio de computadoras digitales y programas adecuados.

3.1.3 Absorción sonora

Las superficies de un recinto reflejan sólo parcialmente el sonido que incide sobre ellas; el resto es absorbido. Según el tipo de material o recubrimiento de una pared, ésta podrá absorber más o menos el sonido, lo cual lleva a definir el coeficiente de absorción sonora, abreviado con la letra griega α (alfa), como el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente:

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbida}}}{E_{\text{incidente}}} \quad (3.2)$$

El coeficiente de absorción tiene una gran importancia para el comportamiento acústico de un ambiente, y por esa razón se han medido y tabulado los coeficientes de absorción para varios materiales y objetos. En general, los materiales duros, como el hormigón o el mármol, son muy reflectores y por lo tanto poco absorbentes del sonido, y en cambio los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, son poco reflectores y por consiguiente muy absorbentes.

En el capítulo 1 se da una tabla completa de índices de absorción sonora de los diferentes materiales.

3.2 Tiempo de reverberación

Después del período de las reflexiones tempranas, comienzan a aparecer las reflexiones de las reflexiones, y las reflexiones de las reflexiones de las

reflexiones, y así sucesivamente, dando origen a una situación muy compleja en la cual las reflexiones se densifican cada vez más. Esta permanencia del sonido aún después de interrumpida la fuente se denomina reverberación.

Ahora bien; en cada reflexión, una parte del sonido es absorbido por la superficie, y otra parte es reflejada. La parte absorbida puede transformarse en minúsculas cantidades de calor, o propagarse a otra habitación vecina, o ambas cosas. La parte reflejada mantiene su carácter de sonido, y viajará dentro del recinto hasta encontrarse con otra superficie, en la cual nuevamente una parte se absorberá y otra parte se reflejará. El proceso continúa así hasta que la mayor parte del sonido sea absorbido, y el sonido reflejado sea ya demasiado débil para ser audible, es decir, se extinga.

Para medir cuánto demora este proceso de extinción del sonido se introduce el concepto de tiempo de reverberación, T , técnicamente definido como el tiempo que demora el sonido en bajar 60 dB por debajo de su nivel inicial (se ha elegido 60 dB porque con esa caída se tiene la sensación de que el sonido se ha extinguido completamente).

En algunas publicaciones se suele representar también este valor con el símbolo RT_{60} , formado por la sigla en inglés de reverberación time (tiempo de reverberación), seguida por la referencia a los 60 dB. Otra abreviatura es T_{60} . Como ejemplo, si al interrumpir un sonido de 90 dB éste se reduce a 30 dB en 3 s, entonces será $T = 3$ s. Salvo para sonidos inicialmente muy intensos, antes de caer 60 dB el sonido se vuelve inaudible por quedar enmascarado por el ruido de fondo o ruido ambiente.

El tiempo de reverberación depende de cuán absorbentes sean las superficies de la sala. Así, si las paredes son muy reflectoras (es decir que reflejan la mayor parte del sonido que llega a ellas), se necesitarán *muchas reflexiones*

para que se extinga el sonido, y entonces T será grande. Si, en cambio, son muy absorbentes, en cada reflexión se absorberá una proporción muy alta del sonido, por lo tanto en unas pocas reflexiones el sonido será prácticamente inaudible, por lo cual T será pequeño. Dado que los materiales duros, como el hormigón o los azulejos, son poco absorbentes del sonido, un ambiente con paredes de este tipo tendrá un tiempo de reverberación largo. Una sala cubierta con materiales absorbentes como cortinados, alfombras, etc., por el contrario, tendrá un tiempo de reverberación corto.

La propiedad anterior se puede expresar por medio de una fórmula, denominada fórmula de Sabine, en honor al físico norteamericano que la obtuvo a principios de este siglo. Según dicha fórmula el tiempo de reverberación T puede calcularse como:

$$T = 0,161 \cdot \frac{V}{\alpha \cdot S} \quad (3.3)$$

donde V es el volumen de la habitación en m³, S es el área de su superficie interior total en m², y α es el coeficiente de absorción sonora, ya definido como la fracción de la energía sonora incidente que es absorbida por las superficies de la habitación.

3.3 Ganancia acústica

La ganancia acústica AG es el incremento de nivel que produce el refuerzo sonoro, es decir la diferencia entre el nivel en la audiencia con el sistema encendido y con el sistema apagado.

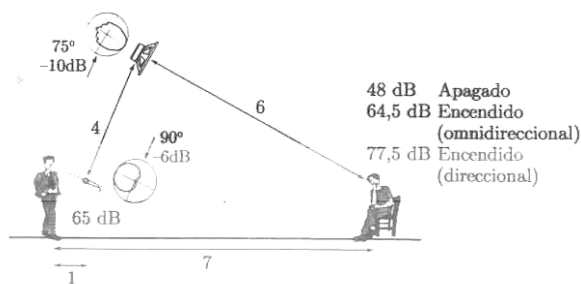
$$AG = L_{p(a)}(d_2) - L_{p(o)}(d_o), \quad (3.4)$$

Donde $L_{p(a)}$ Nivel de audiencia encendido

$L_{p(o)}$ Nivel de audiencia apagado

Donde se ha supuesto que con el sistema encendido, el nivel que percibe el oyente es contribución única del altavoz.

Figura 41. Calculo de la ganancia de dirección.



La figura 41 muestra un refuerzo sonoro típico en el que los transductores poseen cierta directividad. Para simplificar el desarrollo, se considera que tanto el altavoz como el micrófono son omnidireccionales. En ese caso, el nivel de presión en el oyente es el que produce el orador a 1 m (65 dB) más las pérdidas por la distancia de 7 m, es decir $65 - 20\log(7/1) = 48$ dB. A continuación se conecta el sistema de sonido y se va aumentando la ganancia progresivamente hasta llegar al límite de la realimentación. Esta situación se da cuando el altavoz produce un nivel en el micrófono igual al del orador, es decir, 65 dB. Si el altavoz genera 65 dB en el micrófono que está situado a 4 m, en el oyente, situado a 2 m más alejado, produciría un nivel de 65 dB más las pérdidas de esos 2 m, es decir, $65 - 20\log(6/4) = 61.5$ dB. Sin ningún margen de seguridad, la ganancia acústica del sistema es de $61.5 - 48 = 13.5$ dB.

3.4 Potencia de los altavoces

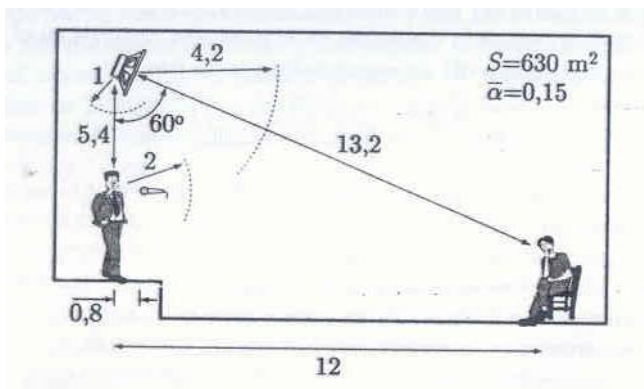
Una vez definidas las ganancias acústicas que delimitan las cotas de nivel en un refuerzo sonoro, se calcula la potencia eléctrica necesaria EPR como aquella potencia eléctrica proporcionada a los altavoces para que en la zona de la audiencia se obtenga el nivel especificado. En general, al alimentar un altavoz de sensibilidad S_a con una potencia P_E , este produce un nivel de presión en el eje a d_2 metros de

$$L_{p(a)}(d_2) = S_a + 10 \log P_E - 20 \log d_2 \quad (3.5)$$

De donde es posible despejar la potencia eléctrica P_E para obtener

$$EPR = 10^{(L_{p(a)}(d_2) - S_a + 20 \log d_2) / 10} \quad (3.6)$$

Figura 42. Cálculo de ganancia



3.5 Potencia del amplificador

La elección de una etapa de potencia no es tarea fácil. Como regla general, considere que la potencia del amplificador debe equivaler al doble de la 1ª capacidad de carga del altavoz. Un altavoz con una carga nominal de 300 W puede ser fácilmente amplificado con una etapa de potencia de 600 W.

También debe tener en cuenta la impedancia de sus altavoces para sacar el mayor provecho del amplificador. La impedancia regularmente es de 8Ω . Utilice un amplificador cuya potencia equivalga a la optima con una impedancia de 8Ω .

Antes de conectar:

1. Baje el volumen del amplificador antes de encenderlo o apagarlo.
2. Encienda su amplificador en ultimo lugar y apaguelo antes que cualquier otro aparato. De esta manera evitara daños a los altavoces debidos a ruidos y crujidos inesperados.
3. Controle las señales de audio de manera optima y evite sobrecargas al amplificador.
4. Respete los limites fisicos de su amplificador. A pesar de la gran reserva de potencia del amplificador, se puede llegar a dañar si la potencia que utiliza es exagerada y escucha señales a niveles muy altos de manera continua.
5. Utilice un limitador entre la salida de la mesa de mezclas y la etapa de potencia para controlar el nivel de salida.

Figura 43. Amplificador de potencia



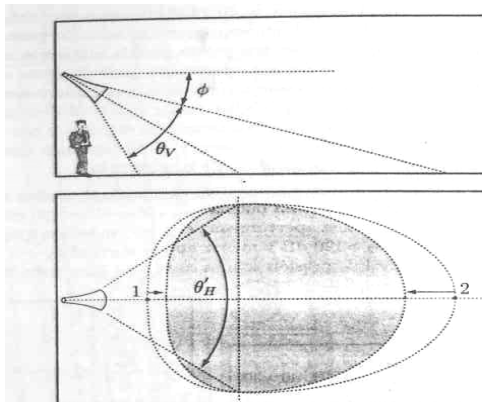
3.6 Cobertura de la sonorización

La cobertura de un recinto consiste en disponer los altavoces de tal manera que el nivel en la audiencia sea uniforme. Para ello, se considera únicamente el nivel directo puesto que el campo reverberante no hace sino aumentar por igual el campo total ya que no depende de la posición de los emisores.

3.6.1 Método centralizado

El método de cobertura centralizado consiste en colocar los altavoces agrupados en uno o dos puntos llamados *clusters*, cercanos a la zona del escenario o tras la pantalla en salas cinematográficas. El diseño consiste en disponer cada altavoz del *cluster*, en altura y ángulo, para conseguir sonorizar en campo directo el mayor area y con la mayor uniformidad posible. Para este fin, se proyecta sobre la audiencia el ángulo de cobertura -6dB y se considera que la zona cubierta por este ángulo este sonorizada con una variación máxima de 6 db.

Figura 44. Recubrimiento de un altavoz



Para el caso sencillo de un altavoz o cluster, del que se conocen sus ángulos de recubrimiento horizontal y vertical -6 dB ($\theta_H \times \theta_V$), el recubrimiento se

representa en la figura 44. Como se aprecia en la misma, el ángulo de recubrimiento vertical θ_v puede proyectarse directamente sobre la representación en alzado del recinto ya que el plano vertical del altavoz coincide con su alzado. Por el contrario, el recubrimiento horizontal no es inmediato puesto que, al estar el altavoz inclinado, su plano horizontal coincide con su planta, sino que se abre aparentemente hasta un cierto ángulo θ'_H , el cual depende de la inclinación Φ del altavoz.

$$\theta'_H = 2 \arctan \frac{\tan \frac{\theta_H}{2}}{\cos \Phi} \quad (3.7)$$

donde $\theta'_H > \theta_H$ como se observa en la figura 44 si la inclinación del altavoz es muy elevada, es decir, si Φ es pequeño, el método es impreciso ya que el nivel no es constante entre los puntos 1 y 2 de la figura 44.

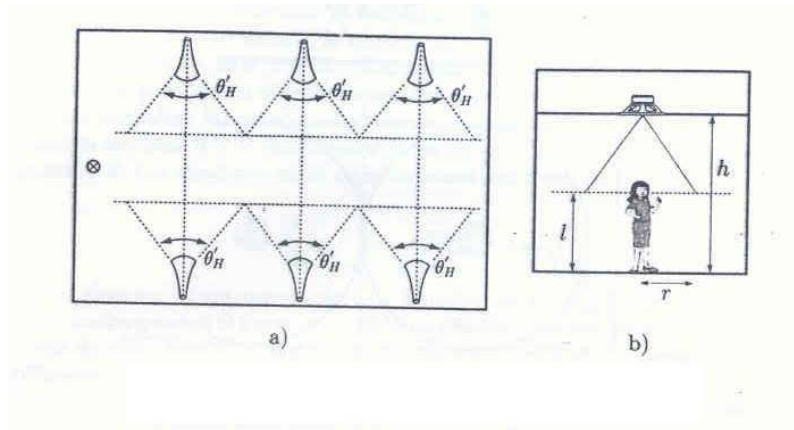
3.6.2 Método distribuido

El método distribuido los altavoces se sitúan en puntos diferentes de la sala para cubrir el área con más uniformidad. Básicamente, existen dos formas de distribuir los altavoces:

Altavoces de pared o columnas

Análogamente a las técnicas expuestas, los altavoces de pared se sitúan de tal modo que sus ángulos de recubrimiento horizontal aparente θ'_H coinciden en la audiencia, como se aprecia en la figura 45. El alcance horizontal al distribuir los altavoces es la suma de los alcances de cada uno de ellos. En ocasiones, las columnas se dirigen ligeramente hacia el final de la audiencia para que la procedencia de la señal original y la reforzada sea frontal.

Figura 45. Altavoces de pared



Altavoces de techo

En los altavoces de techo, también se sigue el criterio del ángulo de cobertura. Como se observa en la geometría de la figura 3.6 , el área cubierta por un altavoz circular tiene la misma forma que el altavoz puesto que $\Phi = 90^\circ$. El radio del recubrimiento depende de la distancia entre el altavoz y la zona de audiencia.

$$r = (h - l) \tan \frac{\theta}{2} \quad (3.8)$$

donde θ es el factor de directividad del altavoz que se supone constante en vertical y horizontal. De lo contrario el recubrimiento no tendría forma de círculo.

3.7 Análisis acústico geométrico de salas cerradas

Es la teoría que se emplea con las primeras reflexiones de la curva energía tiempo, que caracteriza a una posición determinada de la sala.

Consiste en aplicar las leyes de la Óptica Geométrica al sonido. Para ello, se modelan las ondas sonoras como rayos sonoros. Un rayo es una línea que indica la dirección y sentido de propagación del sonido, por tanto, es perpendicular a las ondas sonoras. Además, lleva un contenido energético que depende de varios factores:

- La energía total radiada.
- El número de rayos emitidos.
- La directividad de la fuente.

Así, una fuente reparte su energía entre todos los rayos que emite, según su patrón de directividad. Por ejemplo, si la fuente es omnidireccional, los rayos saldrán en todas las direcciones, llevando la misma fracción de energía.

La propagación de estos rayos sonoros en el interior de la sala, cumple las leyes básicas de la Óptica Geométrica, que son:

1ª) Propagación rectilínea. Justificada por el principio de Fermat, que establece que una onda emplea el menor tiempo posible en ir desde la fuente hasta el receptor, esto es, en línea recta.

2ª) Leyes de la Reflexión, ya comentadas.

3ª) Ley de Snell de la Refracción. Explica cómo una onda cambia de dirección cuando pasa de un medio a otro.

En nuestro caso, este fenómeno se desprecia, pues consideramos que en el interior de la habitación sólo hay un medio, cuyas características de temperatura y humedad no varían.

Las hipótesis de partida de esta teoría son:

- Tenemos un medio homogéneo e isotrópico, en el que no varían las propiedades sea cual sea la dirección en que nos movamos. Por eso podemos despreciar el fenómeno de refracción.
- La longitud de onda del sonido que se propaga en la sala es menor que el tamaño de los obstáculos o aberturas que encuentra a su paso. Por lo que no se aprecian fenómenos de difracción.
- Se considera que las superficies son lisas, por tanto, las reflexiones son totales.
- No se contemplan las diferencias de fase entre las ondas coincidentes en un punto. De este modo, siempre se suman sus intensidades. Dicho de otra manera, no se distingue el fenómeno de interferencia.

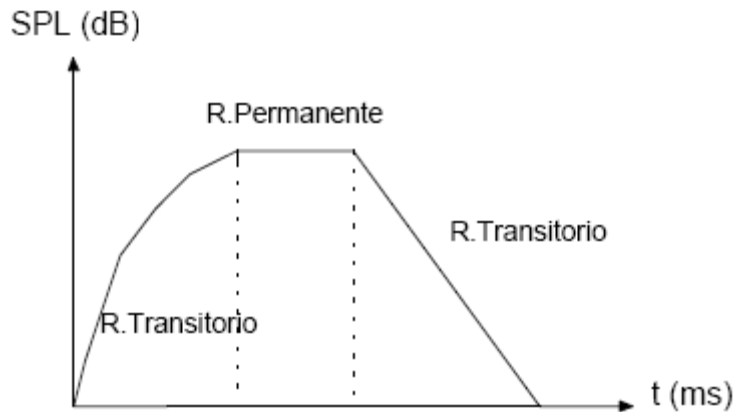
La utilización de esta teoría, implica una serie de simplificaciones que limita su validez a determinados casos, siendo muy imprecisa en bajas frecuencias. Sin embargo, facilita notablemente el modelado acústico de salas, explicando aceptablemente el origen de las primeras reflexiones de cualquier recinto.

3.8 Análisis acústico estadístico de salas cerradas

Es la teoría utilizada para analizar la reverberación de la sala. La reverberación es la permanencia del sonido, tras haber cesado la fuente que lo produjo. Y se mide por medio del tiempo de reverberación, que es el tiempo que tarda en atenuarse la energía sonora en el interior de un recinto. Para entenderlo mejor, veamos la siguiente gráfica con la variación de la energía sonora emitida por

una fuente que radia una potencia constante durante un tiempo, tras el cual cesa la emisión.

Figura 46. Gráfica de reverberación



Durante el primer transitorio, la energía sonora presente en la sala empieza a aumentar progresivamente, debido al aporte directo de la fuente y de las reflexiones.

Se alcanza el régimen permanente cuando se iguala la absorción de la sala con la energía procedente de la fuente, permaneciendo en él hasta que se apaga la fuente.

En el segundo transitorio, la energía sonora decae primero, al desaparecer el sonido directo y después, al disminuir paulatinamente el número de reflexiones.

La duración de este último transitorio es lo que determina el tiempo de reverberación (TR). Cuanto más reverberante o menos absorbente es la sala, mayor es TR.

Para calcular el tiempo de reverberación se emplean principalmente las fórmulas de Sabine, aunque hay otras, como las de Eyring, Kuttruff o Arau-Puchades.

Todas las expresiones para calcular TR se apoyan en el modelado estadístico de la respuesta sonora de una sala, mediante el que se tratan a todas las reflexiones por igual, pertenezcan a las primeras reflexiones o la cola reverberante. Suponen, además, condiciones de campo difuso. Esto es:

- Las ondas reflejadas se propagan en todas las direcciones con igual probabilidad.
- La densidad de energía sonora en un instante de tiempo dado, es la misma con independencia de la posición en la sala.
- La energía sonora en un punto se obtiene como la suma de las medias de las contribuciones de todas las reflexiones que pasan por él.

Debido a las suposiciones contempladas, los resultados de esta teoría son aproximados, aunque facilitan la comprensión y la caracterización del campo sonoro en el interior de un recinto

3.9 Análisis acústico ondulatorio de salas cerradas

Esta teoría se aplica al estudiar la respuesta en frecuencia de la sala.

Se sustenta en la naturaleza ondulatoria del sonido para caracterizar el campo sonoro en el interior de un recinto, mediante la resolución de la ecuación de onda.

Las soluciones de la ecuación de onda se denominan modos propios de la sala y ocurren a una frecuencia de resonancia, también llamada frecuencia propia. Tanto los modos propios como su frecuencia dependen de la geometría y de las dimensiones de la sala.

Sin embargo, el cálculo de la ecuación de onda es muy complicado, excepto para salas sencillas, con forma paralelepípedo, de dimensiones L_x , L_y y L_z y paredes totalmente reflectantes. En este caso se puede aplicar la fórmula de Rayleigh para obtener las frecuencias propias:

$$f_{k,m,n} \equiv 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

Donde k , m y n son números enteros (0,1,2...), que identifican al nodo correspondiente; su valor determina cuántos nulos posee la presión sonora (llamados nodos¹) en cada una de las tres direcciones posibles de propagación (x , y , z).

Por consiguiente, la respuesta de la sala puede variar de una posición a otra, desapareciendo la contribución de un modo si la fuente o el receptor se sitúan sobre uno de sus nodos.

Podemos concluir que en una sala hay infinitos modos, localizados discretamente en frecuencia y cuya densidad aumenta con la misma.

La distribución de estos modos en frecuencia es característica de cada recinto,

¹ Nodo es el punto donde se encuentra el mínimo de presión acústica a una determinada frecuencia.

pues depende de su geometría y de sus dimensiones.

Interesa que sea lo más uniforme posible, a fin de evitar la cambios del sonido.

La coloración del sonido se produce cuando hay una concentración de modos en una banda estrecha de frecuencias. Esto a causa que las componentes del sonido próximas a esta zona, sean realzadas respecto a las otras frecuencias.

Sin embargo, ya que la densidad de modos aumentan con la frecuencia, a partir de una frecuencia (f_{\max}) no será apreciable la coloración.

Para averiguar esta frecuencia se emplea la siguiente fórmula empírica:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{\text{mid}}}{V}}$$

Donde 1849 es una constante de proporcionalidad dada por experimentos empíricos y calculado atravez de métodos de correlación lineal.

$$RT_{\text{mid}} \equiv \frac{RT(500) + RT(1000)}{2} \quad (\text{seg.})$$

TR(500): es el tiempo de reverberación de la banda de octava centrada en 500 Hz.

TR(1000): es el tiempo de reverberación de la banda de octava centrada en 1 KHz.

V: es el volumen de la sala.

Así que el problema de la coloración del sonido aparece en espacios reducidos, como en un estudio de grabación.

4. ANÁLISIS ACÚSTICO EN SALONES DE INGENIERÍA USAC GUATEMALA

4.1 Encontrando el tiempo de reverberación

Cuando una fuente sonora vibra produce ondas que se propagan en el aire a una velocidad aproximada de 340 m/s. Cuando estas ondas se encuentran con un obstáculo una parte es absorbida por él, otra es transmitida a través del mismo y otra parte es reflejada.

La proporción entre ellas depende de la naturaleza del material. En un recinto cerrado la vibración del aire contenido por aquel se debe a la acción resultante de la onda progresiva y las ondas regresivas originadas a las múltiples reflexiones en las superficies límites. Las reflexiones se van produciendo entre paredes, techo, suelo y así sucesivamente, de manera que se superponen al sonido original.

Si las reflexiones son en gran número y se suceden erráticamente en el tiempo, el campo sonoro resultante se llama reverberante o difuso. A los fines de poder cuantificar este fenómeno se ha definido un parámetro que se denomina el tiempo de reverberación (TR60), y se define como el tiempo necesario para que el nivel de una señal acústica, cuya emisión se interrumpe, caiga 60 dB con respecto al nivel inicial. Desde el punto de vista del diseño de recintos destinados a la audición, el control de la reverberación de los sonidos constituye una premisa fundamental. Si una sala tiene paredes altamente reflectantes del sonido, la inteligibilidad disminuye porque los sonidos que se van emitiendo, se confunden con los anteriores que aún no se han extinguido. Lo contrario sucede si las paredes son muy absorbentes, en cuyo caso se observa una sensación de molestia causada por el hecho de que los sonidos

4.2 Calculo del tiempo de reverberación por método Sabine

En principio el tiempo de reverberación es función del volumen de la sala y del coeficiente de absorción de las superficies de ésta. Distintas fórmulas se han desarrollado para predecir dicho Tiempo de Reverberación:

Fórmula de Sabine

Esta fórmula fue postulada por Sabine partiendo del supuesto de que existe un reparto homogéneo de absorbentes con un coeficiente de absorción bajo.

Teniendo en cuenta estos supuestos el tiempo de reverberación puede calcularse mediante la fórmula:

$$T = 0,161 [V/A] \quad (4.1)$$

En donde:

T = Tiempo de reverberación [s]

V = Volumen de la sala

A = Absorción total [m²]

Obtenida a partir de:

$$A = S (\alpha)$$

Siendo α Coeficiente de absorción sonora

S Área de la superficie de la sala

4.3 Estadísticas para encontrar el tiempo de reverberación

Para encontrar el tiempo de reverberación se utilizan métodos estadísticos. Se hace una medición de todos los materiales existentes en el recinto de la siguiente manera.

Tabla IV. Materiales existentes en los salones de clase

Paredes de concreto			
Pared Ventanales			
H	L	Area	Totales
0.47	3.1	1.457	
0.9	3.1	2.79	
3.2	0.2	0.64	
		4.887	
Area parcial		3	14.661
Pared Pasillo			
0.47	3.1	1.457	
2.2	3.1	6.82	
3.2	0.2	0.64	
		8.917	
Area parcial		2	17.834
Pared pasillo puerta			
3.2	1.16	3.712	
0.3	1.7	0.51	
3.2	0.15	0.48	
Area parcial		4.702	4.702
Pared fondo y frente			
3.2	7.3	23.36	
Area parcial		2	46.72
Pared techo			
10.5	7.3	76.65	76.65
		Area total	160.567

Tabla V. Materiales existentes en los salones de clase

Ventanales			
H	L	Área	Total
1.83	3.1	5.673	
		3	17.019
Ventanales pasillo			
0.55	3.1	1.705	
		2	3.41
0.37	1.7	0.629	0.629
		Área total	21.058
Puertas			
2.05	1.7	3.485	3.485

Luego buscamos los coeficientes de absorción de los distintos materiales en las siguientes tablas.

Tabla VI. Tabla de coeficientes de absorción de materiales existentes

No	Nombre del material	125	250	500	1000	2000	4000
1	Pared de Ladrillo, sin pintar	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05
2	Pared de Ladrillo, pintada	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
3	Revoque, yeso sobre ladrillos huecos, pintado o sin pintar	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
4	Enlucido de yeso sobre pared	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
5	Revoque de cal	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07
6	Enlucido rugoso de cemento	0.02	0.02	0.06	0.08	0.04	0.05
7	Hormigón enlucido con cemento	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
8	Mármol	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
9	Hormigón, sin pintar	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03
10	Hormigón pintado	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
11	Vidrio de ventanas normal	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02
12	Vidrio de Láminas de 0,3 a 0,5 cm de espesor	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
13	Vidrio de Espejo	0.035	0.025	0.019	0.012	0.07	0.04
14	Ventana abierta	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	Rejilla de Ventilación	0.50	0.50	0.40	0.35	0.30	0.25
16	Madera Maciza y pulida de 5cm	0.10	---	0.05	---	0.04	0.04
17	Madera Barnizada	0.05	---	0.03	---	0.03	---
18	Madera, plataforma con gran espacio de aire debajo	0.40	0.30	0.20	0.17	0.15	0.10
19	Entablado de madera de 2,5cm	0.19	0.16	0.13	0.10	0.06	0.06
20	Madera de 1,5cm barnizada con 5cm de cámara	0.10	0.11	0.10	0.08	0.08	0.01

En esta tabla encontramos los coeficientes de absorción de cada material.
Con estos datos podemos analizar la acústica de los salones de clase.

Se utilizaran las frecuencias mas significativas en el rango de audición para
hacer el siguiente análisis.

Estas son

125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
-------	-------	-------	--------	--------	--------

SALON 401 FACULTAD DE INGENIERIA USAC

Coefficientes de
Absorción

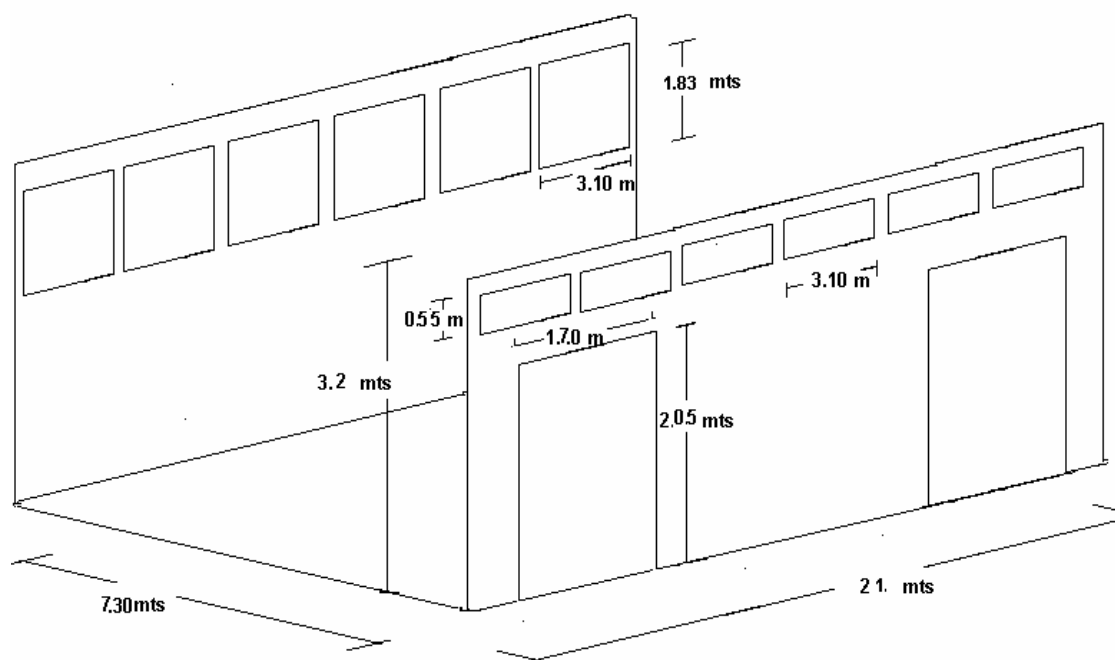
Área Efectiva de absorción

Aulas de Ingeniería	Área	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	FrX Coe	FrX Coe	FrX Coe	FrX Coe	FrX Coe	FrX Coe
Paredes de concreto	278.629	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	5.57258	5.57258	8.35887	11.14516	13.93145	13.93145
Pizarrón	11.25	0.1	0	0.05	0	0.04	0.04	1.125	0	0.5625	0	0.45	0.45
Puertas	3.485	1	1	1	1	1	1	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485
Ventanas laterales	43.192	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02	1.51172	1.72768	1.166184	1.29576	0.86384	0.86384
Caballetes de azulejo	11.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.3375	0.3375	0.3375	0.3375	0.45	0.7875
ventas abiertas	3	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
	350.806						Absorción Total	15.0318	14.12276	16.910054	19.26342	22.18029	22.51779
							Volumen	490.56	490.56	490.56	490.56	490.56	490.56
							Sabine Formula	5.25421	5.5924026	4.67060365	4.1000072	3.5608263	3.5074561
							Promedio	4.44758					

Tabla VIII. Evaluación del tiempo de reverberación salón 401

Estos datos han salido al tomar las medidas del salón 401 el cual se describe a continuación.

Figura 47 Salón de clases salón 401 Facultad de Ingeniería USAC



El mismo análisis se realiza para todos los salones de clase del cuarto nivel del edificio T3 de la facultad de ingeniería USAC Guatemala obteniéndose los siguientes tiempos de reverberación.

SALON 403 FACULTAD DE INGENIERIA

Aulas de Ingeniería	Área	Coeficientes de Absorción							Área Efectiva de absorción						
		125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe
Paredes de concreto	199.921	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	3.99842	3.99842	3.99842	7.99684	9.99605	9.99605	9.99605	9.99605
Pizarrón	11.25	0.1	0	0.05	0	0.04	0.04	1.125	0	0.5625	0	0.45	0.45	0.45	0.45
Puertas	3.485	1	1	1	1	1	1	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485
Ventanas laterales	28.436	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02	0.9526	1.13744	0.76777	0.85308	0.56872	0.56872	0.56872	0.56872
Caballote de azulejo	11.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.3375	0.3375	0.3375	0.3375	0.45	0.45	0.7875	0.7875
ventas abiertas	3	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
	257.342						Absorción Total	12.9412	11.95836	14.1504	15.67242	17.94977	18.28727		
							Volumen	327.04	327.04	327.04	327.04	327.04	327.04	327.04	327.04
							Sabine Formula	4.06867	4.403065	3.72099	3.359624	2.933377	2.87924		
							Promedio	3.56083							

Tabla VIII. Tabla de evaluación de salón 403

SALON 412 FACULTAD DE INGENIERIA

		Coeficientes de Absorción						Área Efectiva de absorción					
Aulas de Ingeniería	Área	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe	freXcoe
Paredes de concreto	121.213	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	2.42426	2.42426	3.63639	4.84852	6.06065	6.06065
Pizarrón	11.25	0.1	0	0.05	0	0.04	0.04	1.125	0	0.5625	0	0.45	0.45
Puertas	3.485	1	1	1	1	1	1	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485
Ventanas laterales	13.68	0.035	0.04	0.027	0.03	0.02	0.02	0.4788	0.5472	0.36936	0.4104	0.2736	0.2736
Caballetes de azulejo	11.25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.07	0.3375	0.3375	0.3375	0.3375	0.45	0.7875
ventas abiertas	3	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3
	163.878						Absorción Total	10.85056	9.79396	11.39075	12.0814	13.71925	14.0568
							Volumen	163.52	163.52	163.52	163.52	163.52	163.52
							Sabine Formula	2.426301	2.688057	2.311237	2.17911	1.918962	1.87289
							Promedio	2.232759					

Tabla IX. Tabla de evaluación de salón 412

Donde se observa claramente que cuando los espacios de las salas crecen su tiempo de reverberación tiende a crecer.

Por lo regular el tiempo de reverberación ideal para un espacio de clases debe ser entre 0.6 a 1.6 segundos según Sabine.

Por lo que nuestros tiempos analizados no se encuentran entre el rango aceptable, una de las técnicas posibles de mejorar la sala seria forrar las paredes de materiales porosos, el cual nos daría una mejor respuesta en tiempo, así mismo sonorizar con alto parlantes y trabajar con un ecualizador las bandas de frecuencias afectadas por el tiempo de reverberación.

El trabajo estadístico para analizar un recinto es bastante extenso pues se deben de tomar en cuenta todos los materiales que conforman el ambiente.

Si tenemos demasiados materiales y las tablas no proveen la información suficiente, no es aplicable el método, por lo tanto a continuación se sugiere un diseño electrónico para medir el tiempo de reverberación.

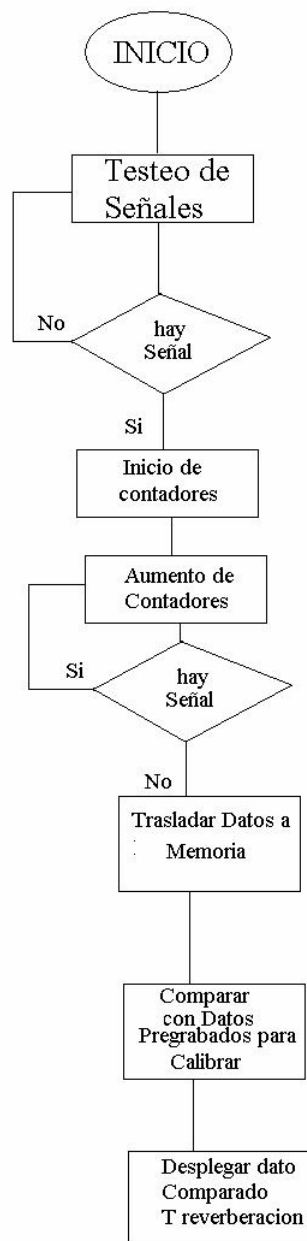
4.4 Diseño de un medidor de tiempo de reverberación.

El proceso de medir electrónicamente un tiempo de reverberación no es muy complejo. Se deberían de seguir los siguientes pasos:

1. Se inicia un sonido
2. Se toman las señales sonoras con un sensor (micrófono)
3. Se filtra la señal en las componentes deseadas es decir en el rango de de audición humana entre 20 y 20khz.
4. Se amplifica la señal a una ganancia k para un posterior tratamiento
5. Si existe esta señal en la etapa de amplificación se debe arrancar un contador de pulsos.
6. El circuito debe ser capaz de interrumpir el sonido iniciado
7. Reconocer la extinción del sonido hasta que este supere los 30db sobre una potencia de audición humana, que regularmente es 65 db.
8. Descontar el tiempo inicial en que la fuente de sonido estaba conectada, al conteo de pulsos.
9. En base a una tabla de comparación mostrar el sonido reverberante final.
10. Desplegar el tiempo reverberante.

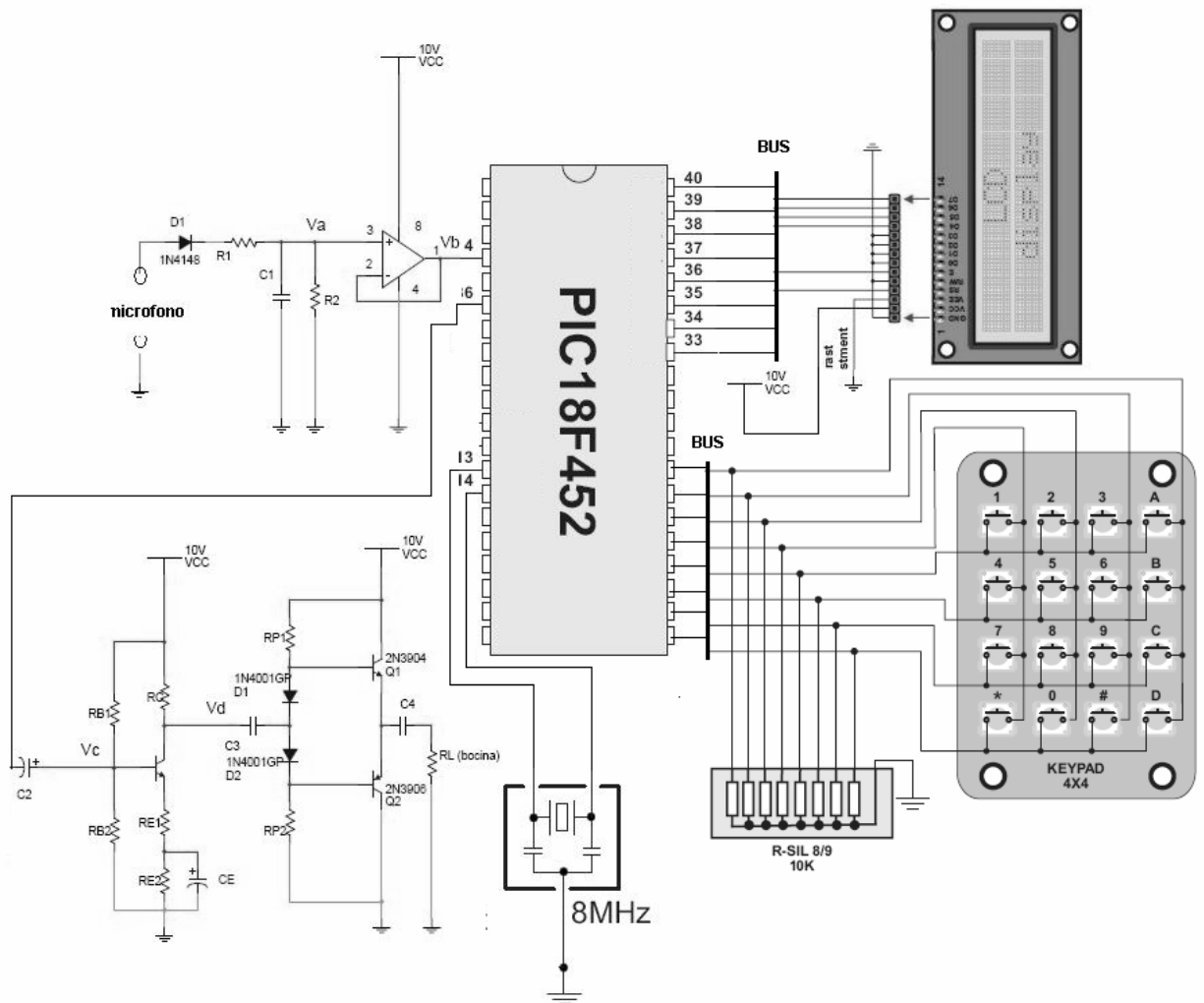
4.4.1 Algoritmo Básico para la medición del tiempo de reverberación.

Figura 48. Algoritmo de medición para tiempo reverberante



4.4.2 Implementación en un circuito del algoritmo propuesto

Figura 49. Diseño de circuito para implementar algoritmo



CONCLUSIONES

1. La teoría electroacústica forma parte fundamental en el diseño de ambientes; para que estos sean agradables al oído humano, no se necesita que haya un nivel exagerado de sonido en un ambiente sino una inteligibilidad y fidelidad adecuada.
2. Para medir un fenómeno acústico se deben tener en cuenta sus modelos circuitales y con base en su energía hacer una medición.
3. También se debe mencionar que el diseño acústico de las clases ubicadas en el cuarto nivel del T3 Facultad de Ingeniería de la USAC, tienen un diseño muy pobre desde el punto de vista acústico.
4. Se realizó la medición en los salones arriba mencionados y de allí se concluye que las demás están construidas de forma similar.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar la atención de los alumnos es necesario tener ambientes sonoros adecuados, por lo que se recomienda hacer un nuevo diseño desde el punto de vista auditivo de las aulas, el actual refleja muy bajo tiempo de reverberación y por lo tanto, tiende a que el alumno se sofoque y pierda la concentración, su oído se ve bombardeado por muchas réplicas de sonido, haciendo difícil la comprensión de las cátedras.
2. Se propone implementar un curso de teoría del sonido para los estudiantes de ingeniería eléctrica, porque en la actualidad la tecnología y el modernismo demanda ambientes agradables al oído humano. Siendo esto un complemento en la formación profesional del alumno.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beranek, Leo L.: "Acoustical Measurements". American Institute of Physics. Cambridge, USA, 1993
2. Gary Davis. The sound Reinforcement Handbook. USA: Corporation Milwuke 1990
3. Miyara Federico. Acústico y Sistemas de Sonido. Argentina: Editorial UNR 1999
4. Morse, Philip M.: "Vibration and Sound". American Institute of Physics. USA, 1981.
5. White, Paul. Creative Recording , music Maker Books. Inglaterra: Cambridgeshire 1990

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

- | | |
|---|----------|
| 6. www.electroacusticaenchile.com | 04/02/09 |
| 7. www.gb-audio.com.ar | 20/02/09 |
| 8. www.ingeacustica.com | 28/02/09 |