

**ESTUDIO DE LA ACÚSTICA EN RECINTOS CERRADOS  
(CASO DE ESTUDIO SONIDO SOBRE RUEDAS)**



**WILLIAM ENRIQUE MONTOYA SOLARTE**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2012**

**ESTUDIO DE LA ACÚSTICA EN RECINTOS CERRADOS  
(CASO DE ESTUDIO SONIDO SOBRE RUEDAS)**

**WILLIAM ENRIQUE MONTOYA SOLARTE**

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Físico**

**Director  
LUIS FERNANDO ECHEVERRI.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2012**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Director: \_\_\_\_\_  
Mag. Luis Fernando Echeverri

Jurado: \_\_\_\_\_  
Lic. Claudia Marcela Camargo

Jurado: \_\_\_\_\_  
Ing. Germán Arturo Bacca

Popayán, 30 de Marzo de 2012

*A Dios*  
Todo poderoso y fuente de inspiración

*Con Amor*  
A mi Madre Myriam Solarte R. por darme  
la vida  
A mi Padre William Montoya V. por sus  
sabios consejos  
A mis hermanos por todo su cariño y  
colaboración incondicional

**William Montoya**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi agradecimiento al: Mg. Luis Fernando Echeverri, Director del trabajo de grado, por sus valiosas orientaciones.

Al Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones, Andrés Felipe Escallón Portilla, por su valiosa colaboración y dedicación para completar con éxito este trabajo de grado.

Al Fonoaudiólogo, Esp. En acústica de recintos Miller Antonio Silva Rojas, por su pertinente asesoría en el marco referencial de este trabajo de grado.

A la empresa Montoya CarAudio, lugar en donde se adquirieron los conocimientos prácticos aplicados al desarrollo de este proyecto.

También agradezco a mi familia por su ejemplo de perseverancia en la consecución de mis ideales.

**WILLIAM ENRIQUE MONTOYA SOLARTE**  
**ING. FÍSICO**  
**UNIVERSIDAD DEL CAUCA**

## TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN	16
2. INTRODUCCION	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVOS	20
5.1 OBJETIVO GENERAL	20
5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	20
6. ANTECEDENTES	21
CAPIULO 1	
7. TEORIA DEL SONIDO	26
7.1 Psicoacústica	26
7.2 Sonido	26
7.2.1 Cualidades del sonido	26
7.2.1.1 Intensidad	26
7.2.1.2 Tono	29
7.2.1.3 Timbre	31
7.2.1.4 Duración	32
7.3 Fenómenos Físicos de las ondas de sonido	33
7.3.1 Reflexión y transmisión	33
7.3.2 Absorción	34
7.3.3 Refracción	34
7.3.4 Difracción	34
7.3.5 Interferencia	35
7.4 Sistema auditivo humano	35
7.4.1 Anatomofisiología de la Audición	35
7.4.2 Ruido	38
7.4.3 Efectos negativos del ruido en el ser humano	39
7.4.4 Factores que inciden en la adquisición de la Sordera Profesional	40
7.4.5 Normas que regulan la emisión de ruido en Colombia	40
7.5 Medición del sonido (Sonometría)	40

7.5.1	Decibel o decibelio	41
CAPITULO 2		
8.	ACÚSTICA EN RECINTOS CERRADOS	47
8.1	Nociones acústicas	47
8.2	Propagación del sonido en un recinto cerrado	48
8.2.1	Divergencia Esférica	51
8.3	Sonido reflejado	52
8.3.1	Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica	54
8.4	Balance energético sonoro	57
8.5	Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora	60
8.6	Tiempo de reverberación RT	62
8.6.1	Valores recomendados del tiempo de reverberación	63
8.6.2	Cálculo del tiempo de reverberación	64
8.6.3	Medida del tiempo de reverberación	65
8.7	Absorción del aire	66
8.8	Absorción de las superficies vibrantes	67
8.9	Materiales acústicos	68
8.10	Modos propios de una sala acústica	70
8.10.1	Clasificación de los modos propios	71
8.10.1.1	Modo axial	71
8.10.1.2	Modo Tangencial	71
8.10.1.3	Modo Oblicuo	72
8.10.2	Cálculo de Modos Propios	73
8.10.3	Densidad de modos propios	74
8.10.4	Formas de minimizar la coloración	77
CAPITULO 3		
9.	ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE VEHICULOS	79
9.1	Características y elementos básicos para instalar un buen sistema de calidad de sonido	79
9.2	Electroacústica	80
9.2.1	Transductores	80
9.2.2	Fuentes Sonoras	81
9.2.3	Localización Espacial de Fuentes	82

9.2.4	Cadena de Audio – La Cadena Electroacústica	83
9.2.5	Respuesta en frecuencia	84
9.3	Parlantes	88
9.3.1	Las características básicas que definen un parlante	90
9.3.2	Funcionamiento y tipos de parlantes	92
9.4	Electrónica Básica	94
9.4.1	Resistencia	95
9.4.2	Voltaje	96
9.4.3	Corriente	96
9.5	Circuito en Serie	96
9.6	Circuito en Paralelo	96
9.7	Circuito Mixto (Serie-Paralelo)	98
9.8	Ley de Ohm	98
9.9	Ley de Watt	99
9.10	Corriente Directa	100
9.11	Corriente Alterna	100
9.12	Cajas Acústicas	100
9.12.1	Primeros Diseños	102
9.12.2	Tipos de cajas	103
9.12.2.1	Caja Infinita	103
9.12.2.2	Caja Cerrada o Suspensión Acústica	104
9.12.2.3	Amortiguamiento (Damping)	106
9.12.2.4	Funcionamiento de un puerto	107
9.12.2.5	Puertos	108
9.12.2.6	Radiadores Pasivos	109
9.12.2.7	Construcción	112
9.13	PROCESO PARA LA INSTALACIÓN DE AUDIO EN UN VEHÍCULO	116
CAPITULO 4		
10.	CONCLUSIONES	124
11.	BIBLIOGRAFIA	125



## 1. RESUMEN

El presente trabajo es un estudio de tema presentado en modalidad de seminario a estudiantes y egresados de INGENIERIA FÍSICA, ELECTRÓNICA y CIVIL, docentes de estas áreas y empresas dedicadas al acondicionamiento acústico de recintos y vehículos automotores para competencias de sonido sobre ruedas.

En el transcurso del seminario de 60 horas se abordaron los temas de fundamentos del sonido, normas y leyes que regulan la emisión de ruido, fundamentos de acústica, acondicionamiento acústico, con énfasis en acondicionamiento de vehículos automotores para competencia de sonido sobre ruedas, concluyendo con el diseño y construcción de cajas de resonancia.

A lo largo del seminario se brindo a los participantes las herramientas teóricas y prácticas que les permitieron comprender y aplicar de manera eficaz el conocimiento adquirido sobre sonido, acústica y acondicionamiento, de una manera técnica y precisa dentro del ámbito de competencia de sonido sobre ruedas.

## 2. INTRODUCCION

Según cifras del RUNT (Registro Único Nacional de Transito), para el 1 de enero de 2010 se reportaron 2.958.474 vehículos automotores de uso particular en Colombia, de estos el 95% según datos obtenidos por los principales concesionarios de vehículos Renault, Chevrolet y Mazdacuentan con un sistema reproductor de audio básico, el principal proveedor de equipos de sonido para Colombia Pioneer calcula que un 50% de vehículos cuentan con sistemas de alta fidelidad y el 10% con sistemas de audio de alta potencia usados para competencias de sonido sobre ruedas o esparcimiento.

Según Carlos Rueda Gerente comercial de la PIONEER para Colombia el mercado del Caraudio deja unos ingresos aproximados de \$1000 millones de pesos y actualmente es un mercado en expansión debido a la gran demanda automotriz que cursa en nuestro país. La cual es cubierta por 210 empresas especializadas en el tema debidamente registradas como Audio Galaxi (Bogotá D.C), Eduardo Tascon y Audio Contol (Cali), y cerca de otras 1100 de carácter informal y práctica empírica que constituyen el 80% del total de establecimientos dedicados a este fin.

En nuestro contexto local de la ciudad de Popayán departamento del Cauca existen registradas en la cámara de comercio ocho establecimientos dedicados a este fin pero pocos han ganado tanto reconocimiento por sus resultados en competencia, cuyos logros obtenidos son el resultado de la aplicación teórica de los principios de la física del sonido dentro de una práctica técnica de acondicionamiento de vehículos de alta eficiencia acústica.

Por lo anterior fué la intención de este trabajo de grado, estudiar y analizar todas aquellas variables relacionadas con el sonido, sus fenómenos físicos, la acústica, la electrónica, el acondicionamiento de vehículos, SPL y la eficiencia con el fin de que los participantes pudieran desarrollar su propio criterio ante el más apropiado acondicionamiento acústico, además se promovió la creación de empresa basados en la explotación de elementos científicos ya estudiados para la mayor eficiencia de los recursos utilizables para este fin.

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad es cada vez más notorio el incremento en el número de los usuarios de automóviles que desean instalar equipos de sonido y disfrutar de ellos mostrándose al público para su diversión y competencia a diferentes niveles: regional, nacional e internacional. También es importante mencionar que en el contexto colombiano el crecimiento del número de usuarios de equipos de sonido en sus vehículos ha ido en aumento.

Es necesario presentar un proyecto como este en Popayán debido a que la comunidad de Popayán resultará beneficiada con respecto al conocimiento que va a adquirir en todo lo relacionado con la acústica en recintos cerrados (caso de estudio sonido sobre ruedas).

En el panorama actual existen varios estudios en relación con el sonido sobre ruedas donde se manifiestan algunos métodos para realizar una evaluación del desempeño de equipos de sonido en general, pero en Colombia, no se han enfatizado tales estudios en equipos de sonido de los automóviles; desde este aspecto es importante presentar la teoría del sonido en recintos aplicada a los equipos de sonido sobre ruedas donde se diagnostiquen las principales características de comportamiento de los parámetros que afectan la calidad de la señal acústica, como potencia, SPL (*Sound Pressure Level*, Nivel de Presión Sonora), distorsión, ESNR (*Electrical Signal to Noise Ratio*, Relación Señal a Ruido Eléctrica).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente proyecto de grado es un paso grande en la consolidación del conocimiento en el área de la Acústica.

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Existen organizaciones internacionales llamadas como DB DRAG e IASCA (*International Auto Sound Challenge Association*, Asociación Internacional de Campeonatos de Sonido de Autos) que sanciona los campeonatos de sonido sobre ruedas donde se otorgan puntos a carros que suenan bien y muestran una instalación creativa y/o limpia, cuya sucursal en Colombia -DB DRAG Colombia - IASCA Colombia –respectivamente, se han encargado de promover un evento dedicado al sonido para automóviles que se llaman Copa Team Competition y Campeonato Nacional de Sonido Sobre Ruedas respectivamente, y al cual asisten miles de competidores durante todo el año y muchos miles de espectadores en todas las ciudades de Colombia en donde se hace el evento, evidenciando que el mercado por este tipo de productos se ha ido incrementando con los años [1, 2].

Además, en Colombia y en otros países del mundo existe un campeonato conocido como dB Drag Racing, en el cual la competencia de los participantes *decar audio* con sus vehículos compiten entre ellos de dos en dos para determinar quién es capaz de conseguir una buena instalación como un nivel de presión sonora (SPL) mayor [3].

Se busca generar investigación y desarrollo en el área de la acústica, campo en el cual, el país ha ido modernizándose, debido a la demanda alta de usuarios; sin embargo no se evidencian proyectos enfocados en estas temáticas.

Por otro lado establece un avance al estudiar la generación, propagación (en diferentes medios) y percepción del sonido en recintos cerrados, analizando el impacto de los parámetros que afectan a la señal acústica, con el fin de brindar a los estudiantes, docentes y empresas de sonido, una referencia para su estudio y análisis adecuados.

Con este proyecto se logró obtener un amplio conocimiento en todo lo relacionado con el sonido buscando una alta proyección en la INGENIERÍA DE SONIDO y los resultados obtenidos aportarán al programa de INGENIERÍA FÍSICA y a su vez, este estudio será útil para posteriores proyectos que deseen aplicar estas temáticas en nuevas soluciones en el campo acústico, y servirá de referencia para temas tratados en algunas asignaturas del Programa de INGENIERÍA FÍSICA de la Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación (FACENED) que traten con temáticas relacionadas.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio de los aspectos más relevantes en la acústica de recintos cerrados enfocado en el sonido sobre ruedas.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Exponer los fundamentos físicos de la acústica, generación, propagación y percepción del sonido en recintos cerrados, tiempo de reverberación, enfoque espacial, temporal y ondulatorio.
- Dar a conocer los parámetros de sonido más relevantes como potencia, SPL y determinar su comportamiento y desempeño en recintos cerrados.

## 6. ANTECEDENTES

En el año 1999 inicié mis estudios en ing. Física en la Universidad del Cauca. Para el año 2002 ya había adquirido las bases en electrónica y principios físicos suficientes para constituir mi propia empresa de acondicionamiento acústico de vehículos; bajo el ejercicio de ensayo y error fui adquiriendo la experiencia empírica para obtener resultados apenas satisfactorios, lo que luego me llevaría a reconocer la necesidad formativa en el campo de la acústica, con el fin de mejorar los procesos de producción y la eficiencia de los resultados, decisión que más adelante se vería reflejada en el reconocimiento local y nacional de mi labor.

Es lamentable que la acústica y yo nunca hayamos llegado a entendernos, debido a sus intrincados conceptos y carente avance investigativo. Me produce un gran dolor no dominar esta extraña ciencia, pero después de una labor de 10 años, apenas he progresado en relación al primer día, he leído libros, he hablado con expertos, he estudiado su contenido; y aun así en ninguna parte he encontrado una luz que me guíe de manera definitiva; al contrario, únicamente me he acercado a afirmaciones contrapuestas.

El campo de la acústica, como muchos otros campos de la ciencia, es extremadamente amplio. No en vano engloba disciplinas tan diversas como la acústica ambiental, la acústica musical, la psicoacústica y la acústica arquitectónica, entre otras. Este trabajo se centró exclusivamente en la acústica arquitectónica y, más concretamente, en el diseño y/o acondicionamiento acústico de recintos cerrados, aplicados al Car Audio. Dicho de una manera simple, el acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con el objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.

A menudo, el acondicionamiento acústico se confunde con el aislamiento acústico. Estadística, si bien complementaria a la anterior, es conceptualmente distinta, ya que se refiere al conjunto de acciones encaminadas a la obtención de una correcta atenuación en la transmisión de ruido y vibraciones entre los diferentes espacios que integran un recinto, por tanto no se detallo su aplicación para este fin.

El objetivo básico de este trabajo consistió en proporcionar unos criterios para el diseño acústico de un amplio conjunto de espacios tipo (cajas acústicas), a fin de cubrir la inmensa mayoría de casos prácticos que se puedan presentar, este está exento de formulación matemática compleja, ya que, desde mi punto de vista, no se trata de convertir a los participantes en expertos en la materia, sino más bien de proporcionarles unos conocimientos que les permitan dialogar con los especialistas usando una terminología común. En el caso de los Ingenieros, es mi

deseo que, a partir de dichos conocimientos, sean capaces de calibrar en cada momento y en su justa medida las repercusiones a nivel acústico que se puedan derivar de sus planteamientos en la fase de diseño.

La acústica es una de las ciencias clásicas más jóvenes. La primera referencia escrita donde se conjugan criterios acústicos y arquitectónicos corresponde al romano Vitruvio en el siglo I antes de Jesucristo. En su opinión, la geometría de los teatros griegos (en forma de abanico) y de los romanos (la clásica "arena") estaba basada en una definición previa de la acústica más adecuada en cada caso.

Sin embargo, hasta finales del siglo XIX, la acústica era considerada una ciencia inexacta y, en consecuencia, no resulta extraño que continuamente aparecieran explicaciones esotéricas a través de las cuales se pretendían aclarar los "misterios" de esta materia.

Sirva como ejemplo la vieja creencia, totalmente errónea, de que la acústica de una sala de conciertos mejora con el tiempo, como si se tratase de un buen vino.

En todas las épocas se han construido salas con mejor o peor acústica, y lo cierto es que, en la mayoría de casos, sólo aquellas consideradas como excelentes han resistido el transcurso de los años. Tal vez se podría afirmar que es la reputación de la sala la que puede ir en aumento con el tiempo, en función del prestigio y calidad de los artistas que en ella intervienen.

En cualquier caso, conviene tener presente que los éxitos en el diseño, desde un punto de vista acústico, eran fruto de una combinación de intuición y experiencia, si bien el principal ingrediente era la suerte: suerte en la definición de las formas y suerte en la elección de los materiales constructivos.

A pesar del desconocimiento reinante, es bien cierto que ya los primeros compositores escribían su música pensando en el recinto donde había de ser interpretada, e incluso la adecuaban para que el resultado final fuese óptimo. Es el caso, por ejemplo, de la Pasión según San Mateo, de J.S. Bach, escrita especialmente para la Thomaskirche, de Leipzig, donde él había sido cantor. Así las cosas, cabría preguntarse hasta qué punto también los arquitectos diseñaban conscientemente sus edificios de acuerdo con las necesidades específicas acústico-musicales, con objeto de lograr una perfecta conjunción entre forma y función. La evolución de la arquitectura de las iglesias protestantes constituye un buen ejemplo del efecto de las exigencias acústicas sobre el volumen de la sala. Cuando el sermón se convirtió en un elemento primordial del servicio, el volumen de las iglesias de nueva construcción fue reducido, obteniéndose así una mejor comprensión de la palabra como consecuencia de la disminución de la reverberación.

A finales del siglo XIX, y concretamente en 1.877, el físico inglés lord Rayleigh publicó un tratado con el título de Theory of Sound, que contenía los fundamentos teóricos de esta ciencia y que aún hoy en día sirve de referencia. Con todo, las explicaciones allí vertidas sobre acústica de salas se limitaban a generalidades del siguiente tipo:

“En relación con la acústica de edificios públicos, hay varios puntos que permanecieron oscuros. ... A fin de evitar la reverberación, a menudo se hace necesario colocar moquetas o cortinas para absorber el sonido. En algunos casos, la presencia de la audiencia es ya suficiente para conseguir el efecto deseado.” No es, pues, de extrañar que los arquitectos de la época se mostrasen abiertamente quejosos por la falta de criterios claros a los que recurrir a la hora de definir las formas de una sala para obtener una acústica óptima. Éste es el caso de Charles Garnier, arquitecto de la Ópera de París, que en 1.880 hacía las siguientes manifestaciones:

“Es lamentable que la acústica y yo nunca hayamos llegado a entendernos. Me produce gran dolor no dominar esta extraña ciencia, pero después de una labor de quince años, apenas he progresado en relación al primer día. ... He leído libros y he hablado con expertos; en ninguna parte he encontrado una luz que me guíe; al contrario, únicamente afirmaciones contrapuestas.”

No deja de ser curioso que en una época caracterizada por descubrimientos revolucionarios en campos como el de la física atómica, el progreso de la acústica, que pretende explicar un fenómeno tan cotidiano como es el comportamiento del sonido en un recinto, fuese tan lento. Con toda seguridad, el motivo principal de tal paradójica situación no era otro que la falta de equipamiento electrónico con el que poder hacer mediciones objetivas. En efecto, el único sistema del que se disponía era el oído humano, pero su rápida adaptación a cualquier tipo de recinto con independencia de su comportamiento acústico imposibilitaba su empleo como instrumento de medida.

Los ruegos de Garnier y otros prestigiosos arquitectos fueron atendidos al otro lado del Atlántico cuando, en 1.895, Wallace Clement Sabine empezó su trabajo pionero encaminado a la aplicación de la acústica en la arquitectura.

W.C. Sabine, profesor asociado del departamento de Física de la Universidad de Harvard, se había dedicado inicialmente a los campos de la óptica y la electricidad. A pesar de la precariedad de medios de que disponía, fue capaz de encontrarla con extrema diligencia; la consecuencia fue inmediata: recibió el encargo de realizar el estudio acústico del nuevo Boston Music Hall. En un principio Sabine dudó, pero acabó aceptando. Ante todo se dedicó a revisar los datos experimentales que había recopilado en su anterior experiencia. La noche del 29 de octubre de 1.898, y de forma repentina, encontró una justificación analítica a los resultados recopilados, gritando a su madre, la única persona que se encontraba en su casa:

“¡Mamá, es una hipérbola!”. Acababa de descubrir que la reverberación de un recinto era inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo. Había nacido la célebre ecuación de reverberación de Sabine, utilizada universalmente hasta nuestros días como parámetro primordial para la caracterización acústica de una sala.

La acústica se consolidó como una nueva ciencia a partir de los años 30, con posterioridad a la prematura muerte de Sabine, en 1.919, fundamentalmente por el desarrollo de la tecnología de micrófonos, amplificadores a válvulas y altavoces, y



su utilización como herramienta habitual en trabajos de campo. Posteriormente, con la evolución de los equipos electrónicos de medición, ha sido posible relacionar una serie de parámetros subjetivos tales como: inteligibilidad de la palabra, claridad musical, reverberación, envolvente espacial del sonido o intimidad acústica con otros parámetros objetivos obtenidos directamente a partir de mediciones efectuadas "in situ".

En las últimas décadas, y en el campo de la simulación acústica, se han venido utilizando mayoritariamente dos sistemas completamente diferentes, aunque complementarios: las maquetas y los programas informáticos.

Las maquetas son modelos del recinto construidos a escala que permiten estudiar el comportamiento de las ondas sonoras en su interior. A partir de una serie de medidas efectuadas sobre las mismas, y siguiendo un proceso de extrapolación, es posible obtener unos resultados orientativos en cuanto al comportamiento acústico del local. Con objeto de optimizar la simulación, los factores de escala más comúnmente utilizados han sido 1:8 y 1:10. Sin embargo, el espacio requerido para su ubicación, el coste y el tiempo de construcción, y en especial la aparición de paquetes de software específicamente diseñados para aplicaciones en los campos de la acústica y la sonorización, han hecho que su utilización actual quede prácticamente circunscrita a proyectos de gran prestigio y envergadura.

El advenimiento de los programas de simulación acústica, al inicio de la década de los 80, supuso un salto cualitativo importante en la mejora de las previsiones efectuadas en relación con los resultados finales, con el recinto construido. Dichas previsiones consistían en un cálculo estimativo de los parámetros acústicos más representativos del recinto, y supusieron un notable avance en cuanto a tiempo y dinero respecto al empleo exclusivo de maquetas.

Como complemento a ambos sistemas aparecen, ya en la década de los 90, los denominados sistemas de creación de sonido virtual, que permiten llevar a cabo lo que se ha convenido en llamar "auralización". La "auralización" es el proceso a través del cual es posible realizar una escucha, en cualquier punto de un recinto, de un mensaje oral o un pasaje musical, con la particularidad de que ello se lleva a cabo de forma virtual (antes de que dicho recinto se haya construido o remodelado). La mencionada escucha se puede efectuar mediante altavoces o, preferentemente, por medio de auriculares.

En la actualidad, la existencia de programas de simulación más potentes y perfeccionados y de sistemas de creación de sonido virtual más evolucionados ha representado un avance significativo en la modelización acústica de recintos, tanto en la fase de diseño como en la fase de análisis.

En la fase de diseño, constituyen una herramienta extremadamente útil, al facilitar la toma de decisiones en cuanto a formas y revestimientos interiores óptimos del recinto.

En la fase de análisis, permiten predecir con un elevado grado de fiabilidad cuál será el comportamiento acústico de una sala, a partir del conocimiento de las formas y de los materiales propuestos como acabados interiores de la misma.

Del diseño acústico de un conjunto representativo de espacios tipo, así como del estado actual de los programas de simulación acústica y de los sistemas de creación de sonido virtual, se trata a lo largo de los cuatro capítulos de que consta este trabajo.

Es de resaltar el carente desarrollo investigativo en el área de acústica en general pero mas sentido el la acústica aplicada al acondicionamiento de vehículos. No existen antecedentes internacionales ni nacionales que referencien estudios similares realizados al respecto.

## **CAPITULO 1**

## **7. TEORIA DEL SONIDO**

### **7.1 Psicoacustica**

La Psicoacustica estudia las impresiones subjetivas dadas por numerosos fenómenos sonoros los cuales son el producto de la estimulación física y del estado psicológico del individuo que capta el sonido. (Gallego G.1992 )

Existen modos de percepción sonora compartidos por todos y que reflejan los mecanismos psicofisiológicos de base a partir de los cuales los estímulos auditivos son percibidos.

Lo esencial de la Psicoacustica es estudiar la correspondencia entre las diversas características físicas de un sonido y las sensaciones que generan en un individuo.

### **7.2 Sonido**

Al tratar de definir el sonido con relación a un individuo se debe tener en cuenta que existe una función psicosensores, es decir, la sensación-percepción de la vibración acústica. A continuación se enuncia una definición en la que se pretende abarcar los diferentes fenómenos enunciados: "el sonido es un movimiento vibratorio de carácter longitudinal que tiene lugar al ponerse en movimiento cuerpos elásticos y, que se transmite por cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos, impresionando el órgano de Corti, las vías y centros auditivos, tomando el individuo conciencia de él." (Sánchez M. 1992)

#### **7.2.1 Cualidades del sonido**

En el análisis de un sonido, se tienen en cuenta diferentes cualidades de las cuales se mencionan la intensidad, el tono, el timbre y la duración.

##### **7.2.1.1 Intensidad**

Equivale a la fuerza del movimiento, cualidad que nos permite oírlo a mayor o menor distancia y clasificarlo subjetivamente como débil o suave, fuerte o duro (figura 1).

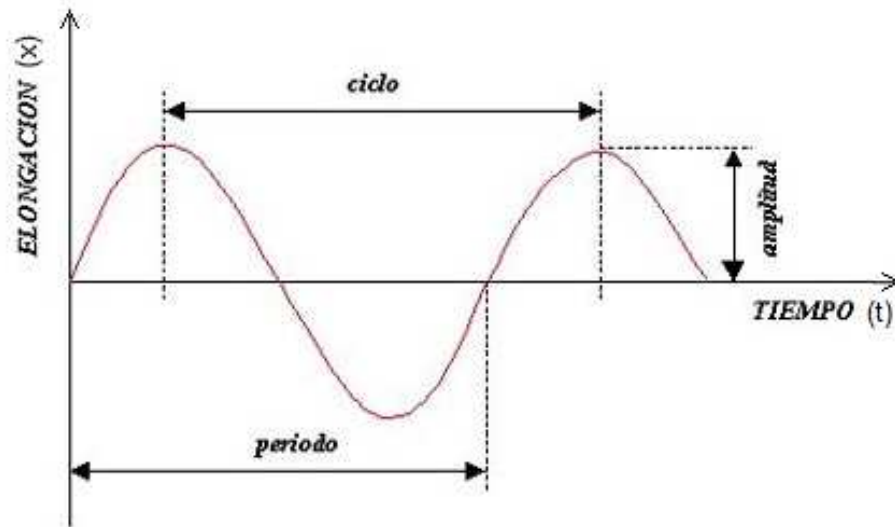


Figura1. Representación del sonido

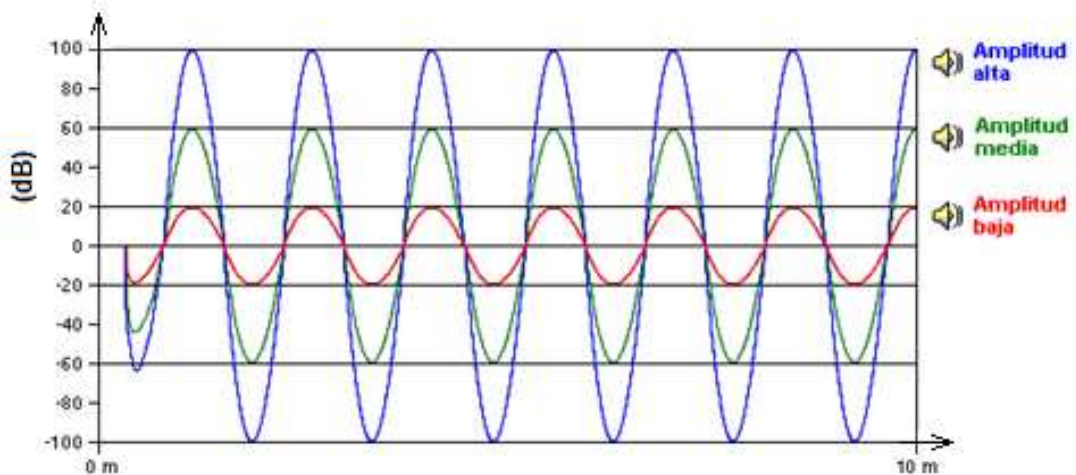


Figura 2. Representación de sonidos de diferente intensidad, la onda A (azul) por ser de mayor amplitud presenta mayor intensidad que las ondas B (verde) y C (roja)

La intensidad depende de tres factores: la magnitud de la masa vibrante (su peso), la amplitud de las vibraciones y la distancia a la cual se ubique el escucha.

**La medición cualitativa de la Intensidad del Sonido:**

Mientras que la frecuencia hacía referencia exclusivamente al fenómeno vibratorio, y por tanto físico, el concepto de intensidad hace referencia a la sensación psicológica de energía del sonido. La acústica ha estudiado más y resuelto la medida de la amplitud de las vibraciones sonoras que la medida de su frecuencia, al introducir en la medición de la energía sonora la pérdida progresiva de finura del sistema sensorial humano con el aumento de la energía de los estímulos.

La definición de la unidad de medida de la intensidad es bastante más compleja que la de la frecuencia.

El ser humano pierde finura en la sensibilidad de todos los sentidos a medida que aumenta físicamente la intensidad del estímulo percibido. Por ejemplo si al comparar el peso de dos paquetes pequeños de 100 g y 150 g respectivamente, poniendo uno en cada mano, el ser humano es perfectamente capaz de percibir la diferencia y decir cuál de los dos es el más pesado. Es decir, se afina a distinguir 50 g de diferencia. Pero si esta comparación se realiza con paquetes de 10050 g y 10000 g utilizando la misma técnica, el ser humano en cambio sería incapaz de notar alguna diferencia. Para percibir la misma sensación diferenciadora que se tuvo entre 100 y 150 gramos, se debería tener en una mano 10 kg y en la otra 15 kg.

Para sentir lo mismo que antes se podía percibir con 50 gramos, al aumentar la intensidad del estímulo se necesita una diferencia de peso 100 veces mayor (exactamente la misma proporción con la que ha aumentado globalmente el estímulo a comparar).

Este fenómeno fue sistematizado por la ley de Weber y Fechner, que se formula de la siguiente manera: *“La percepción es proporcional al logaritmo de la excitación”*. O equivalentemente: *“La sensación crece sólo en progresión aritmética mientras que la excitación que la provoca crece proporcionalmente en progresión geométrica”*.

La unidad clásica de intensidad sonora que es el decibel (dB). Esta magnitud intenta relacionar la percepción humana con la cuantificación física de la presión que producen las vibraciones sonoras del aire al incidir sobre el oído. Es una medida relativa que toma como referencia a la mínima presión sonora que es capaz de percibir el oído humano, y compara la presión ejercida por cualquier sonido con esa magnitud.

La curva de umbrales de audición en dB SPL tiene forma de "U", ya que el oído tiene una mayor sensibilidad para las frecuencias medias alrededor de 2.000 Hz (figura 3).

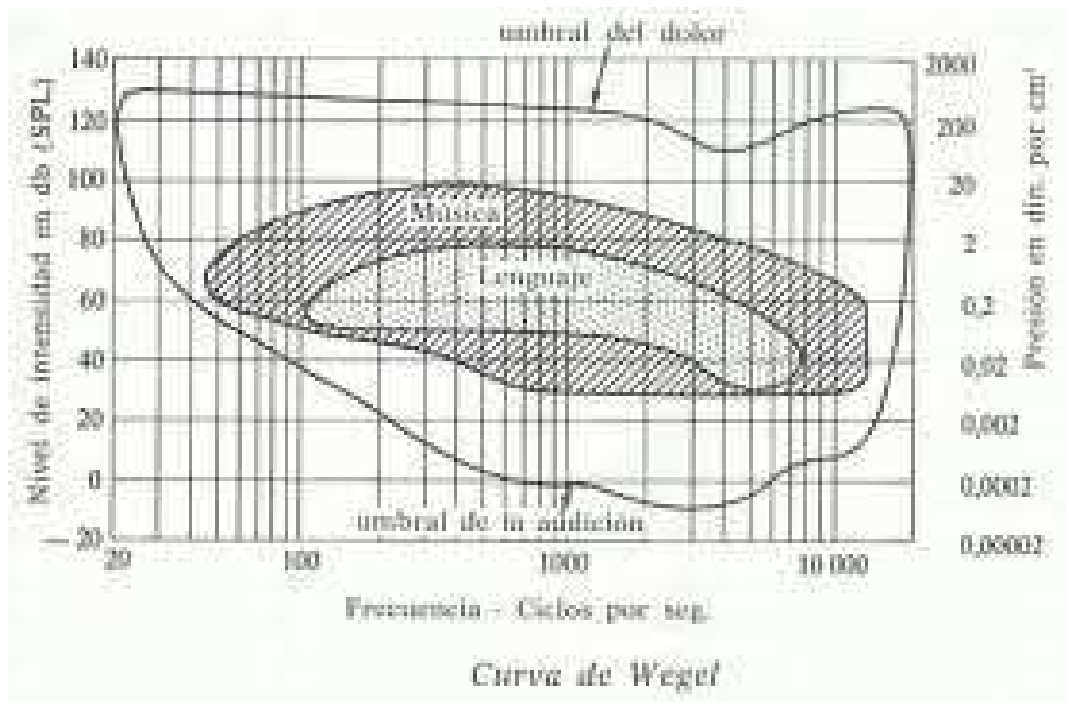
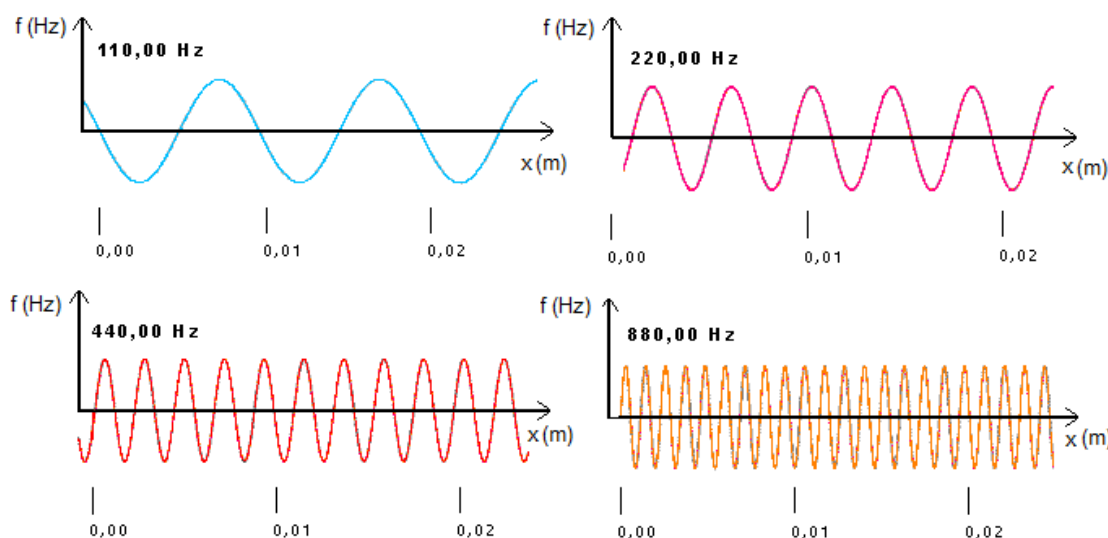


Figura 3. Representación del campo auditivo

### 7.2.1.2 Tono

El sonido puede ser analizado de diferentes maneras, por ejemplo, desde el punto de vista físico y musical; normalmente el sonido cambia rápidamente en su contenido espectral y temporal, por eso se clasifica en tonos puros y complejos, dividiendo estos últimos en periódicos y aperiódico. Un tono puro es una forma de onda sinusoidal permanente que consiste en media onda positiva (+) seguida de media onda negativa (-) con relación a la presión atmosférica en el lapso de un segundo, es estable y no contiene sino una sola frecuencia; esta cualidad permite clasificarlo como alto-bajo, grave-agudo (figura 4).



**Figura 4. Representación de sonidos de diferente tono; la onda A (azul) es de menor frecuencia que la onda B (roja) ya que tiene un menor número de ciclos por segundo.**

El tono complejo contiene frecuencias periódicas o aperiódicas, los tonos periódicos se presentan cuando la onda se repite de manera idéntica, como en el caso de los sonidos musicales; en los tonos aperiódicos la forma de la onda no se repite, varía sin cesar, creando así el ruido, del cual se hablará posteriormente.

Cuando se pasan frecuencias de 1 a 20 Hz se tienen sensaciones táctiles; a medida que se aumenta la frecuencia de 20 a 50 Hz se mezcla esta sensación con audición; por el contrario al aumentar la frecuencia de 8.000 a 50.000 Hz se pasa de sensación sonora a ausencia de la audición. En sujetos jóvenes el límite superior audible es 20.000 Hz, con la edad esta sensibilidad a altas frecuencias se deteriora volviéndose inaudibles los tonos muy agudos.

Los sonidos ubicados por debajo de los 20 Hz se denominan infrasonidos y los superiores a 20.000 Hz ultrasonidos. Un individuo puede analizar un sonido de acuerdo con la variación del tono. En la audición relativa de frecuencia se hace un reconocimiento auditivo de la altura de los sonidos, esto es, la identificación de intervalos de frecuencias, función que se efectúa con precisión a intensidades de más de 40 dB. En frecuencias graves hasta 1.000 Hz se pueden determinar variaciones cuando se aumentan 3 dB, mientras que para las superiores es necesario aumentar 30 dB para percibir el cambio.

La audición absoluta, es determinar la altura de sonidos aislados, cualquiera que sea la fuente de producción. La discriminación auditiva, es la percepción del más pequeño intervalo dado por dos sonidos.

### 7.2.1.3 Timbre

Es la cualidad del sonido que permite distinguir la fuente que lo emite; el timbre está dado por sonidos más agudos, los sobretonos que son de mayor frecuencia y los armónicos que son múltiplos del tono fundamental (figura 5). Por ejemplo, 128x1, 128x2, 128x3.

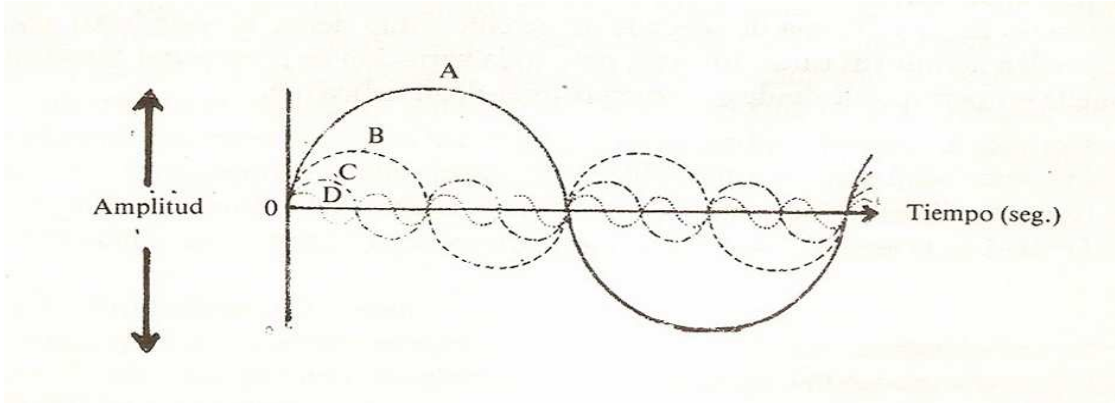


Figura 5. Representación de un sonido fundamental A y sus armónicos B,C,D. Tomado del libro Introducción a la Audiometría de J .B. de Quiros y N. D'Elia.

Entre más agudo sea un sonido más fácilmente se ubica su origen, los tonos medios no son de gran ayuda, los graves intervienen pero al estar enmascarados por el medio es difícil determinar la fuente. De acuerdo con la distancia, un sonido se percibe más agudo si está cerca a la fuente sonora y más grave entre mayor sea la distancia, este fenómeno es explicado por el efecto Doppler.

Las frecuencias unidas permiten comprender el mensaje, siendo los agudos los que más brindan inteligibilidad, a pesar de su baja potencia; a su vez los graves tienen mayor potencia, permiten controlar la voz pero brindan menos inteligibilidad.

Zona de Frecuencia Hz)	Intensidad de la palabra en Porcentaje (%)	Inteligibilidad de la palabra porcentaje (%)
62-125	5	1
125-250	13	1
250-500	42	3
500-1000	35	35
1000-2000	3	35
2000-4000	1	13
4000-8000	1	12
	60	60
	95	95

Tabla 1. Porcentaje de intensidad e inteligibilidad de la palabra con relación a la frecuencia. Tomado y modificado del libro Introducción a la Audiometría de J, B. de Quiron y N .D'Elia



### 7.2.1.4 Duración

Cualidad sonora psicofisiológica que determina la permanencia en el tiempo de una onda sonora.

Un estímulo de una décima de segundo se percibe como débil, si es de 0.001 s, no se pueden definir sus características, pero toda variación de presión por breve que sea puede ser perceptible desde que tenga la intensidad suficiente.

Denominación psicofisiológica. (mundo interior)	Denominación Física (mundo exterior)	Expresión Subjetiva	Medida Física	Audición Humana
Tono Altura	Frecuencia	Agudo-Alto Grave-Bajo	Ciclos/seg. Hertz (Hz)	16-20.000 Hz
Sonoridad Sensación de intensidad Sonía.	Amplitud Intensidad	Fuerte-Intenso Suave-Débil	Decibeles (dB)	Min:-10 a 10dB Máx: 120 a 130 dB
Cualidad	Timbre	Agradable Desagradable. Cualidad sonora de identificación.	Combinación de ciclos/seg (Hz)	16 a 20.000 Hz
Duración		Largo-corto	Tiempo en segundos.	

**Tabla 2. Cualidades del sonido, sus diferentes medidas y denominaciones. Tomado y modificado del libro Introducción a la Audiometría de J. B. de Quiron y N .D'Elia**

El Análisis binaural del sonido en cuanto a intensidad, tono, timbre y duración, se efectuó con respecto a un oído, pero se debe tener en cuenta que el sistema auditivo funciona con los dos oídos, esto hace ganar sensibilidad en 3 dB cuando el sonido es débil y 6 dB cuando es más fuerte; además permite una mejor localización sonora gracias a la comparación de ondas recibidas en cada uno de los oídos, debido a la diferencia de intensidad y tiempo de llegada del sonido. Por ejemplo, cuando una fuente sonora es ubicada a la derecha, el estímulo llega primero al oído de éste lado y con cierto retardo al oído izquierdo debido a que la onda debe recorrer un espacio mayor, siendo difractada, además parte de la energía se disminuye por el efecto de pantalla del cráneo, lo que afecta principalmente la frecuencia de 2.000 Hz.

## 7.3 Fenómenos Físicos de las ondas de sonido

### 7.3.1 Reflexión y transmisión

Cuando una onda acústica incide sobre una superficie plana se separan dos medios, se producen dos ondas, una de reflexión y la otra de transmisión. Cuando la inclinación de la onda incidente es superior al ángulo dado (ángulo crítico), solo se produce onda reflejada.

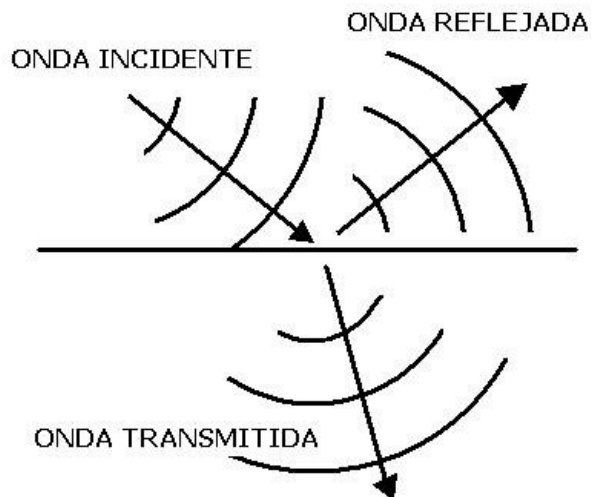


Figura 6. Ondas generadas al pasar de un medio a otro.

¿Cuánta energía pasa a formar parte de la onda reflejada y cuanta pasa a ser parte de la onda transmitida? Es función de la relación de impedancias acústicas entre el primero y el segundo medio.

La impedancia es la oposición que hace el medio al avance de la onda, algo así como la “dureza” o “resistencia” del medio.

Cuando se pasa del medio aéreo al acuático, casi toda la energía se refleja, debido a que las impedancias son muy dispares. En cambio, entre una capa de aire frío y la otra caliente, casi toda la energía de la onda acústica pasa a formar la onda transmitida, ya que la impedancia acústica es parecida.

### 7.3.2 Absorción

Una onda acústica implica el movimiento de partículas, las cuales rozan entre sí. Este roce consume parte de la energía, que se convierte en calor, disminuyendo la energía acústica total. La pérdida de energía, o absorción, depende de cada frecuencia, siendo generalmente mayor a altas frecuencias que a bajas frecuencias.

En medios fluidos como el aire o el agua se pueden dar los datos de absorción en función del camino recorrido por la onda acústica.

La tabla 3, muestra la absorción del aire a 20<sup>o</sup>C y humedad del 70% para distintas frecuencias, en dB/km.

Frecuencia (Hz)	31	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K	16K
Absorción (dB/Km)	0.2	0.3	0.7	1.3	2.6	5.3	11.0	22.0	53.0	160.0

**Tabla 3. Absorción (dB/km) del aire a 20 °C y humedad del 70% para distintas frecuencias.**

Como se puede observar en la tabla 3, la absorción es mucho mayor en las altas frecuencias.

Por ejemplo, una onda acústica de frecuencia 500 Hz que recorre 2 kilómetros sufre una pérdida por absorción del aire de 5.2 dB. Para calcular el nivel real, habrá que tener en cuenta las pérdidas por divergencia esférica.

### 7.3.3 Refracción

Se produce cuando una onda acústica propagándose cambia de un medio a otro (por ejemplo, del aire al agua y viceversa). Cada medio está caracterizado por un índice de refracción ( $n$ ). El ángulo refractado  $\beta$  no es igual al ángulo incidente  $\Phi$ .

### 7.3.4 Difracción

Es la forma como la onda sonora es afectada al encontrar un obstáculo (capacidad de bordear obstáculos). Es cualquier desviación de la propagación en línea recta debido a la presencia de algún obstáculo en el medio homogéneo. Un ejemplo sería un muro que separa una zona residencial y una carretera, ya que no se

interrumpe el medio de propagación, el aire. De forma parecida a como se actúa la luz cuando se encuentra con un obstáculo, actúan las ondas acústicas. También se puede hablar de sombra acústica creada por un obstáculo. La sombra creada es distinta según frecuencia de la que se trate.

Así las altas frecuencias “proyectan” una sombra más definida que las bajas frecuencias. Es decir, si entre el oyente y una fuente sonora que están en campo abierto, se sitúa un obstáculo, por ejemplo se levanta una pared de dos metros, el oyente percibirá una reducción de la intensidad del sonido total.

Por tanto se podrá decir que las bajas frecuencias sufren más difracción que las altas, en otras palabras, su trayectoria se curva más rodeando el obstáculo. Los efectos de difracción pueden tener importancia para micrófonos, altavoces, para la audición humana (difracción sobre la cabeza, que hace de obstáculo), para el diseño acústico de recintos, tales como el automóvil. Las sombras acústicas creadas por obstáculos son muy usadas en la lucha contra el ruido y deben ser tenidas en cuenta para la ubicación de los parlantes.

### **7.3.5 Interferencia**

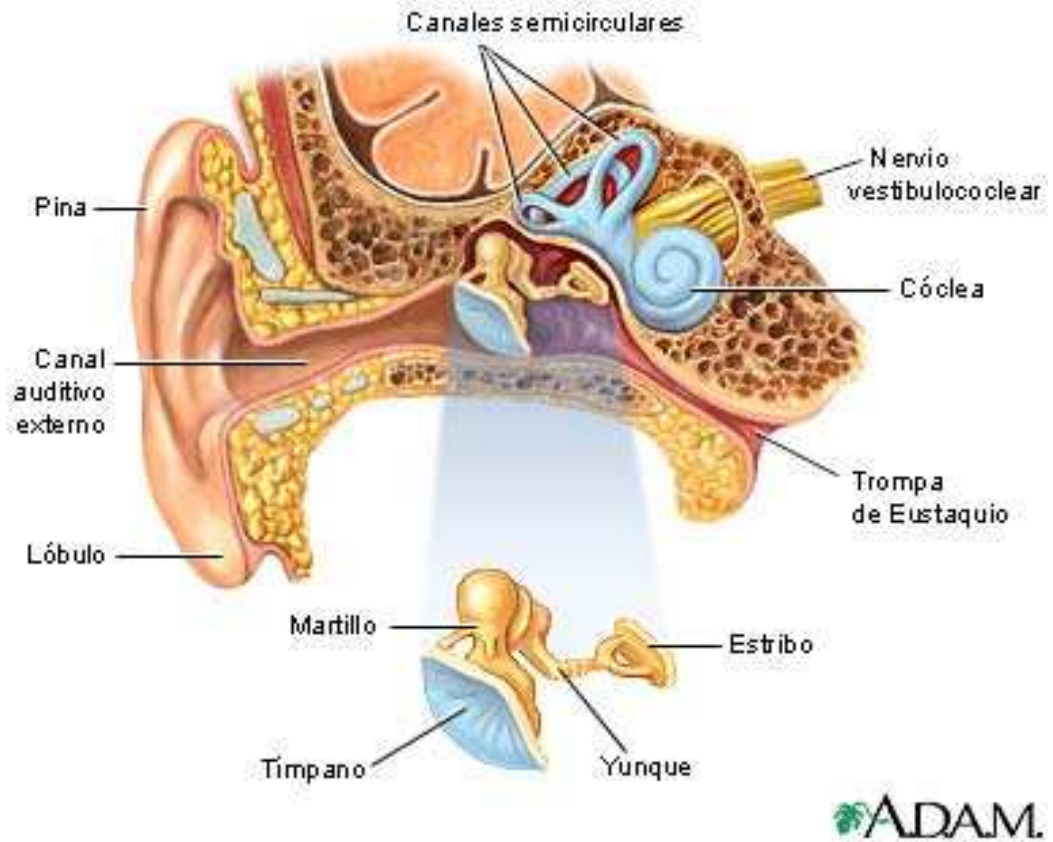
Esto ocurre cuando dos o más ondas coinciden en el espacio y en el tiempo ó cuando dos o más fuentes sonoras convergen a un solo oyente.

## **7.4 Sistema auditivo humano**

El oído posee dos funciones básicas relacionadas entre sí; la audición que nos permite escuchar los sonidos y comunicarnos con los demás y el equilibrio. Este sistema se divide en dos partes, la primera de ellas es denominada órgano receptor periférico, el cual está compuesto por oído externo, medio, interno y VIII par; la segunda parte, la vía auditiva, parte de los núcleos cocleares hasta corteza cerebral.

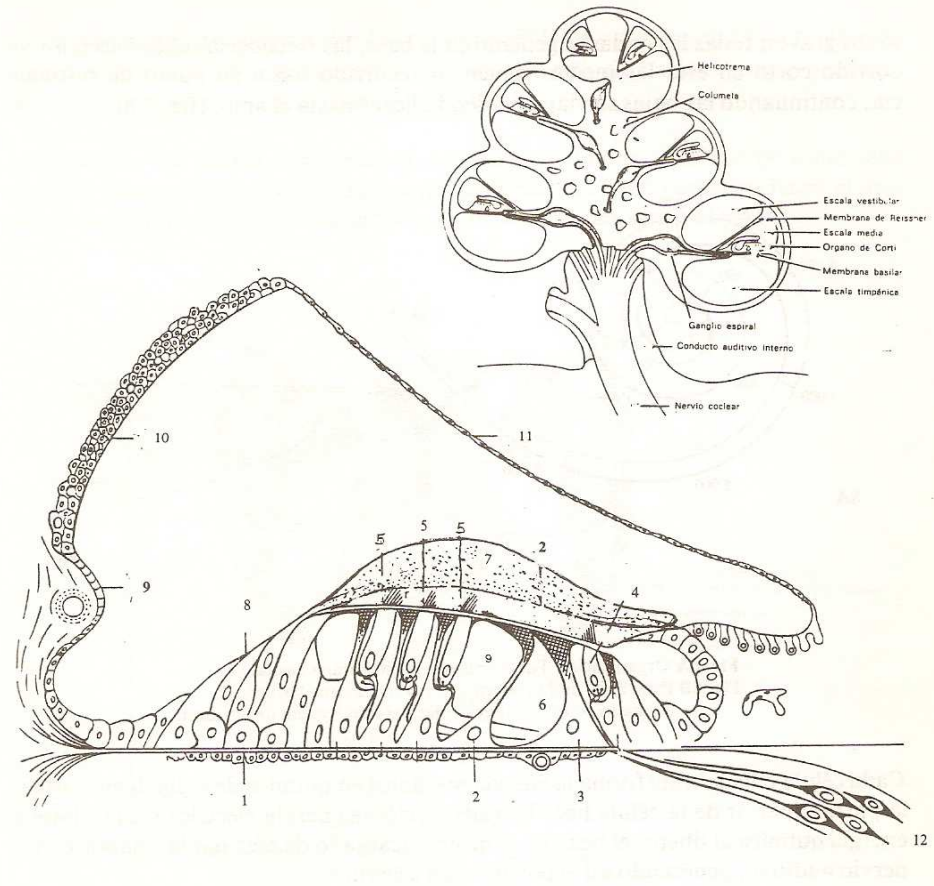
### **7.4.1 Anatomofisiología de la Audición**

El órgano receptor periférico (figura 7) posee las siguientes funciones: captación, transmisión, transducción y codificación del sonido.



**Figura 7. Esquema del órgano receptor periférico del sonido**

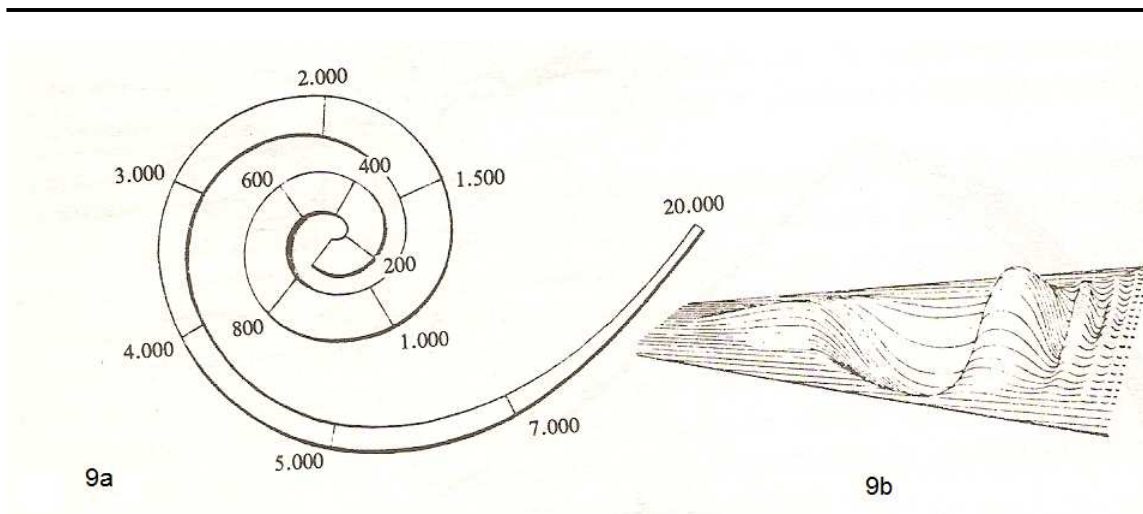
El oído externo se compone del pabellón auricular y del Conducto Auditivo Externo (C.A.E.) los cuales captan y hacen converger la onda sonora hacia la membrana timpánica. La posición del pabellón permite localizar la fuente sonora y su concha incrementa la intensidad del sonido en unos cuantos decibeles.



**Figura 8. Conformación del órgano de Corti**

- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Membrana Basilar          | 7. Membrana Tectoria    |
| 2. Pilar Externo             | 8. Células de Hensen    |
| 3. Pilar Interno             | 9. Prominencia Espiral  |
| 4. Células Ciliadas Internas | 10. Estría Vascular     |
| 5. Células Ciliadas externas | 11. Membrana Vestibular |
| 6. Túnel de Corti            | 12. Ganglio Espiral     |

El oído interno transforma la energía mecánica proveniente del oído medio en energía eléctrica, por medio de sus células ciliadas, las cuales se encuentran en un número de 21.500, 3.500 corresponden a las internas, las cuales responden a intensidades superiores a 70 dB Y las externas, 18.000, estimuladas por todo tipo de intensidad, Estas células se encuentran distribuidas de manera tonal sobre la membrana basilar, quedando en la base las que responden a frecuencias agudas y en el ápice a tonos graves; todas las ondas se generan en la base, las frecuencias altas hacen un recorrido corto en ésta las medias siguen su recorrido hasta su punto de resonancia, continuando las bajas su viaje, pudiendo llegar hasta el ápice.



**Figura. 9 a) Organización Tonotópica de la membrana basilar.  
b) Paso de la onda viajera sobre la membrana basilar.  
Tomado de Physiology of the Nervous System de Ottoson.**

Cada célula ciliada transforma la energía mecánica en química de la siguiente forma, la parte superior de la célula hace la transducción a energía eléctrica y en su base a energía química al liberar el neurotransmisor encargado de efectuar la sinapsis con el nervio auditivo, generando así el potencial de acción.

#### 7.4.2 Ruido

En Psicoacústica se considera ruido a los sonidos aperiódicos que no se repiten; también se define como los sonidos que ponen en peligro o alteran la salud, es por ello que las operaciones industriales de una intensidad superior a 85 dB se denominan ruidosas.

La Organización Mundial de la Salud O.M.S. y la Organización Internacional del Trabajo O.T.I. Lo definen como todo sonido indeseable, para la Asociación Francesa de Normas A.F.O.N. Es un fenómeno acústico que produce una sensación auditiva considerada como desagradable o molesta.

La determinación del ruido o sonido depende de condiciones personales, individuales y del estado de receptividad particular en que se encuentre el individuo: irritación, depresión, fatiga, euforia, alegría, etc. La mayoría de personas encuentran desagradable cualquier ruido intenso caracterizado por frecuencias e intensidades irregulares y con falta de periodicidad perceptible.

El medio ambiente actual es ruidoso y en él empleamos elementos que afectan la audición; en la calle, el tráfico produce intensidades superiores a 70 dB Y los pitos de los automotores entre 90 y 100 dB, a esto se unen otros ruidos como gritos,

silbidos y altoparlantes; en los aeropuertos, en las fábricas, en las discotecas y salones de clase se perciben intensidades fuertes; en el hogar los ruidos producidos por electrodomésticos, timbres, llaves en mal estado, equipos de sonido, etc. Además se presentan intensidades traumáticas producidas por bombas explosivas o armas detonantes.

### 7.4.3 Efectos negativos del ruido en el ser humano

A nivel auditivo la exposición a una intensidad superior a 85 dB, es decir la sobreestimulación del órgano de Corti, produce cambios intracelulares en las células ciliadas y edema en las terminaciones del nervio auditivo; otros fenómenos se refieren a cambios vasculares, fatiga en el metabolismo y alteraciones químicas en las células ciliadas, disminución de la natural rigidez de los estereocilios pudiendo rebajar el acoplamiento de la energía del sonido a las células ciliadas. Cuando las células nerviosas son destruidas no se restituyen; las regiones lesionadas pueden mostrar cicatrices que disminuyen la elasticidad del movimiento entre la endolinfa y la perilinfa; en algunos casos puede presentarse degeneración del VIII par.

Lo anterior produce una alteración en la transmisión del sonido denominada hipoacusia neurosensorial por trauma acústico, en la cual se presenta reclutamiento y tinitus frecuentemente. En este proceso se encuentran dos fases, la primera es la variación temporal del umbral (V. T. U.) con recuperación de la audición luego de un reposo auditivo y segundo es el abatimiento permanente de la audición (A.P .A.), en el cual no se vuelve al nivel auditivo previo.

Cuando el ruido es súbito y violento, tal como el causado por una explosión, la persona que se encuentre cerca, podrá tener una hipoacusia acompañada de una perforación timpánica y luxación de los huesecillos; la lesión de oído medio, es susceptible de tratamiento médico pero la sordera neurosensorial es irreversible en gran porcentaje.

Entre los efectos **Fisiológicos** no auditivos se observan las siguientes reacciones que aumentan en forma paralela al estímulo, la vasoconstricción, disminución del aporte de oxígeno a la nutrición de determinados tejidos, originándose trastornos del sistema nervioso autónomo por ejemplo una úlcera gástrica; alteraciones del sistema simpático lo que provoca aumento de grasa; las ondas cerebrales pueden encontrarse deformadas; aumento de la presión sanguínea y contracción muscular, lo que resulta de una fatiga excesiva; además se altera la calidad del sueño.

A nivel **Psicológico**, se observa incomodidad; stress, fatiga, disminución de la atención, dificultad para comunicarse con los demás, descenso en el rendimiento y descuido en la realización de actividades laborales.



#### 7.4.4 Factores que inciden en la adquisición de la Sordera Profesional

Se deben tener en cuenta los siguientes elementos:

**El tiempo** de exposición diurna ya través de los meses y años.

**La intensidad** o presión sonora; la exposición prolongada a un ruido de intensidad mayor puede deteriorar la audición y provocar un traumatismo sonoro; los ruidos continuos producen efectos menos dañinos que los discontinuos o intermitentes, los cuales son infrecuentes en la industria y generalmente repercuten sobre las paredes, lo que origina una resonancia vibratoria, afectando además del oído, al sistema nervioso. En las oficinas donde se realiza trabajo intelectual los niveles sonoros no podrán ser mayores a 70 dB .

**La frecuencia** del ruido, los sonidos agudos son más nocivos y en la industria los ruidos son complejos ya que abarcan frecuencias agudas y graves. Frecuencias inferiores a 500 Hz no deben exceder 85 dB, Y en frecuencias superiores se debe eliminar el ruido; si no es posible, el trabajador debe usar protectores.

#### 7.4.5 Normas que regulan la emisión de ruido en Colombia

Con el objeto de reglamentar lo establecido en el Decreto Ley 2811 y la ley 09 de 1979, el Ministerio de Salud emite la Resolución 8321 del 4 de Agosto de 1983, por la cual se dictan normas sobre Protección y Conservación de la Audición, de la Salud y el bienestar de las personas, por causa de la producción y emisión de ruidos.

En 1993 se sanciona la Ley 99 por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente; hoy Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el cual estableció en 1995 la norma marco para el componente aire a través del Decreto 948, el cual contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, en donde se consagran las normas y principios generales para la protección atmosférica, los mecanismos de prevención y control, las competencias para la fijación de normas y los instrumentos y los medios de control y vigilancia.

#### 7.5 Medición del sonido (Sonometría)

Las perturbaciones creadas por las vibraciones sobre el estado de reposo inicial de las partículas de aire, se traducen en variaciones muy pequeñas de presión. Las partículas de aire se acercan y dejan con las vibraciones que comprimen y descomprimen. Esta variación de presión es lo que se mide. La unidad de medida es el Pascal (Pa). Sin embargo esto obligaría a tratar con unidades muy

pequeñas, por eso se usa otra medida relativa llamada SPL, que se mide en Decibeles (dB).

La presión de referencia es la mínima que puede detectar el oído humano medio. Si se tiene un nivel de presión sonora (SPL) = 0 dB, se dice que hay silencio.

Los valores promedio de dB son los ilustrados en la tabla 4, así como la atenuación del SPL en función de la frecuencia, de acuerdo a la tabla 5.

25 dB	SPL en un dormitorio urbano
57 dB	SPL en conversación normal
64 dB	SPL en conversación en tono elevado
85 dB	SPL durante un grito
115 dB	SPL en una discoteca
130 dB	SPL de umbral de dolor

**Tabla 4. Niveles de presión sonora en diferentes ambientes a una frecuencia de 1 KHz.**

Frecuencia versus atenuación del SPL
250 Hz – 14 dB
500 Hz – 17 dB
1000 Hz – 20 dB
2000 Hz – 23 dB

**Tabla 5. Relación entre la Frecuencia y la atenuación del SPL.**

### 7.5.1 Decibel o decibelio

Esta unidad trabaja desde el sistema cegesimal (centímetros, gramos, segundos) y toma como referencia una frecuencia pura de 1000 Hz. La razón por la que se toma una referencia de 1000 Hz es que la percepción de la intensidad no solamente varía con la amplitud de la vibración, sino que varía, también, en función de la frecuencia. Escuchando una frecuencia de 1000 Hz estamos en la zona frecuencial para la que el oído humano tiene una respuesta sensible más regular a la amplitud de las vibraciones sonoras.

El punto de partida es el fenómeno físico, concretamente, la presión que ejercen las moléculas de aire, que han sido estimuladas por una fuente sonora, al vibrar sobre el tímpano humano. Aproximadamente, la presión mínima que puede percibir el oído es de  $0,0002 \text{ dinas/cm}^2$ .

Esta cantidad se tomó como magnitud de referencia ( $P_0$ ) con la que se compararía cualquier otra presión acústica ( $P_1$ ) sobre el oído. La presión auditiva sería:

$$\text{Presión Auditiva} = P_1 / P_0$$

Es necesario encontrar la máxima presión sonora perceptible, y construir una escala entre estos dos límites de la sensibilidad humana a la intensidad.

La máxima presión humana que el oído podía aguantar antes de llegar al umbral del dolor era de 1 billón de veces la presión mínima. Es decir  $10^{12} \times 0,0002 \text{ dinas/cm}^2$ . Con lo que desde el umbral mínimo hasta el umbral máximo aparecía una escala de un billón de grados, que resultaba absolutamente inmanejable. Sin embargo, trabajando matemáticamente con potencias de 10 se podía diseñar una escala solo de 12 grados desde la sensibilidad mínima hasta la máxima. O sea:

Si  $1000000000000 = 10^{12}$ , los grados podían ser:  $10^1, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, \dots, 10^{12}$ .

Además, se había observado ya que la sensación que percibe el ser humano es siempre proporcional al logaritmo de la cantidad de excitación; por lo tanto el cálculo de la sensación de sonoridad de potencia sonora, debería ajustarse también a esta ley. Así en realidad, la sensación de intensidad se ajusta al logaritmo del cociente entre la presión sonora que incide sobre el tímpano ( $P_1$ ), dividida por la presión sonora mínima que puede percibir el oído ( $P_0$ ). Es decir:

$$\text{Intensidad} = \text{Log} (\text{Presión Auditiva}) = \text{Log} (P_1 / P_0)$$

Dando al umbral mínimo de presión auditiva ( $P_0$ ) el valor de unidad: 1, y hacer este cálculo tomando como  $P_1$  la máxima de presión audible, se obtuvo la cifra: 12, como valor que expresaba la máxima intensidad audible; así:

$$\text{Intensidad} = \text{Log} (10^{12} / 1) = 12.$$

Quedaba, pues, definido así el máximo de una escala relativa de 12 grados que se aproximaba a la sensación de intensidad. A la unidad de esta escala se la

denominó **Bel (B)**. La máxima intensidad que soporta el oído es, pues de 12 bels. Pero, el Bel no era adecuado como unidad para medir las pequeñas variaciones de intensidad. En realidad el Bel resultaba una unidad demasiado grande, demasiado gruesa para la sensibilidad auditiva humana. Se decidió entonces dividir el Bel en 10 unidades más pequeñas, con lo que se obtenía definitivamente el **decibel (dB)**. De esta manera, se tendría que:

1 Bel = 10 decibeles.

Lógicamente, para calcular la sensación de intensidad en decibeles (dB), será necesario multiplicar por 10 el número en bels. El umbral del dolor, por ejemplo, es de 12 bels x 10 = 120 decibeles o decibelios. Ahora, la sensación de intensidad que produce un sonido se podía predecir de forma bastante aproximada calculando el número de decibelios que tiene el sonido en cuestión, mediante la siguiente ecuación:

Intensidad (en dB) =  $10 \text{ Log } (P_1 / P_0)$

Siendo  $P_0$  la magnitud o unidad de referencia (en este caso  $0,0002 \text{ dinas/cm}^2$ ) y  $P_1$  la presión que ejerce el sonido en cuestión, expresada en las mismas unidades de referencia.

Finalmente, cuando la impedancia acústica es constante, o dicho de otro modo, cuando la capacidad de penetración del sonido en el aire es constante, tal como ocurre en las investigaciones acústicas, las potencias acústicas resultan proporcionales al cuadrado de las presiones acústicas. Aplicando esto, el cálculo de la intensidad en dB queda del siguiente modo:

Intensidad (en dB) =  $10 \text{ Log } P_1^2 / P_0^2 = 20 \text{ Log } (P_1 / P_0)$

El decibelio ha sido homologado internacionalmente como unidad de medida, dándole un valor concreto de presión, exactamente el de  $0,000204 \text{ dinas/cm}^2$ . Este es el valor medio de la mínima presión audible, determinado a 1000 cps.

Al estudiar el dB, se ha visto que está hecho tomando como referencia una vibración simple de 1000 cps. Lógicamente, eso supone, también, que aunque se obtenga, por ejemplo, dos medidas idénticas de 50 dB de presión sonora en sendos sonidos de 100 Hz y de 1000 Hz, no se tiene ninguna garantía de que estos sonidos vayan a transmitir la misma sensación psicológica de intensidad. En realidad, esto es justamente lo que ocurre.

La sensibilidad humana a la presión auditiva es menor cuando el sonido que escuchamos es de frecuencia más baja y va aumentando a medida que aumenta la frecuencia del sonido.

Esto ocurre hasta aproximadamente los 3000 Hz. A partir de esa frecuencia, la sensibilidad del oído a la presión sonora vuelve a disminuir progresivamente, hasta que desaparece en torno a los 15000 a 20000 Hz.

Sucede entonces que un sonido que tenga una frecuencia de 100 Hz y una presión sonora de 20 dB, no puede ser percibido por el oído humano, mientras que si esta misma presión sonora de 20 dB llega a nuestro oído asociada a una frecuencia de 1000 Hz, que será perfectamente audible. Esto puede explicarse en la figura 10 mediante las curvas de igual sonoridad propuestas por Fletcher-Munson.

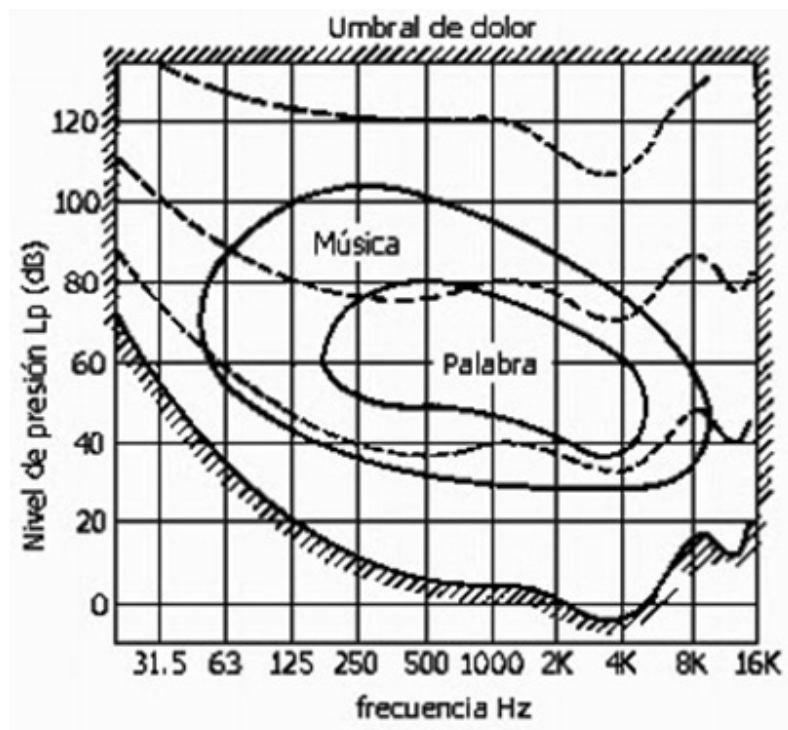


Figura 10. Curvas de igual sonoridad.

Las líneas discontinuas marcan los niveles de presión necesarios a cada frecuencia, para que el oído detecte (subjetivamente) la misma sonoridad en todas. Esto quiere decir que si reproduce un tono de 31.5 Hz a 100 dB (SPL), luego otro de 63 Hz a 90 dB y otro de 125 Hz a 80 dB, el oyente dirá que todos sonaban al mismo volumen.

En 2 kHz el umbral de audición se fija en 0 dB y a 4 kHz es incluso menor de 0 dB, ya que a 3600 Hz se encuentra la frecuencia de resonancia del oído humano. Por

debajo de 2000 Hz y según se va bajando en frecuencia, el oído se vuelve menos sensible. Los umbrales de audición para frecuencias menores de 2 KHz son: 5 dB a 1 KHz, 7 dB a 500 Hz, 11 dB a 250 Hz, 21 dB a 125 Hz, 35 dB a 63 Hz, 55 dB a 31 Hz.

Es importante recordar que estos dB son de nivel de presión sonora (NPS o SPL). Por encima de los 4 KHz, el oído es menos sensible, pero no tanto como en bajas frecuencias. Sin embargo, se producen fluctuaciones a frecuencias cercanas, debido a las perturbaciones que produce la cabeza del oyente en el campo sonoro. Los umbrales de audición son: 15 dB a 8 KHz y 20 dB a 16 KHz.

Todos los receptores de sonido, tienen un comportamiento que varía con la frecuencia.

En el caso del oído humano, sucede lo mismo, ya que se trata el receptor más complicado y (aunque parezca extraño) más eficiente que existe. El umbral de audición define la mínima presión requerida para excitar el oído. El límite del nivel de presión sonora se sitúa generalmente alrededor de 130 dB, coincidiendo con el umbral del dolor (molestias en el oído). La pérdida de audición de manera súbita, por daños mecánicos (en el oído medio) se produce a niveles mucho mayores. La exposición suficientemente prolongada a niveles superiores a 130 dB produce pérdida de audición permanente y otros daños graves.

En muy pertinente decir que en acústica, las frecuencias siempre se tratan de manera logarítmica (representaciones, gráficas, entre otros). El motivo principal es que el oído humano interpreta las frecuencias de manera casi logarítmica. En el eje de frecuencias de cualquier gráfica, las marcas pasan de una frecuencia (p. ej. 1000 Hz) al doble (2000 Hz). La apreciación subjetiva de un oyente será que hay la misma distancia entre un tono de 200 Hz y otro de 400, que entre uno de 1000 Hz y otro de 2000 Hz. Sin embargo la "distancia" en frecuencia en el primer caso es de 200 Hz y en el segundo de 1000 Hz.

Debido a la complejidad del funcionamiento del oído humano, hasta el momento actual no ha sido posible diseñar un aparato de medida objetiva del sonido que sea capaz de dar unos resultados del todo equivalentes, para cualquier tipo de sonido a las valoraciones subjetivas asociadas al mismo. Sin embargo, resulta evidente la necesidad de disponer de un instrumento electrónico que permita medir sonidos bajo unas condiciones rigurosamente prefijadas, de manera que los resultados obtenidos sean siempre objetivos y repetitivos, dentro de unos márgenes de tolerancia conocidos. Dicho aparato recibe el nombre de sonómetro.

El sonómetro mide exclusivamente niveles de presión sonora. Su unidad de procesado permite realizar medidas globales, o bien por bandas de frecuencias

con diferentes respuestas temporales (respuestas “fast”, “slow”, “impulse” o “peak”).

Por otro lado, con el fin de reducir al máximo las posibles diferencias entre las mediciones efectuadas con sonómetros de distintas marcas y modelos, existen unas normas internacionales a las que debe ceñirse los fabricantes de tales instrumentos.



**Figura 11. Sonómetro Digital Modelo: MSL-1325** Instrumento digital portátil, con LCD de 4 dígitos, de acuerdo con la norma IEC651 Tipo II, con registro de máximo y mínimo, respuesta rápida (FAST) y lenta (SLOW), micrófono de electreto de 1/2", rango dinámico de 50dB, precisión de  $\pm 1.5\text{dB}$  (94dB/1kHz), ponderación A y C en frecuencia y rango de medida de 32dB a 130dB en tres rangos (Lo, Med y Hi). Utilizado en mi practica laboral.

## CAPÍTULO 2.

### 8. ACÚSTICA EN RECINTOS CERRADOS

#### 8.1 Nociones acústicas

En el campo de la acústica como en muchos otros campos de la ciencia es extremadamente amplio. No en vano engloba disciplinas tan diversas como la acústica ambiental, la acústica musical, la Psicoacústica y la acústica arquitectónica entre otras. El desarrollo de este capítulo se centra particularmente en desarrollo de concepto aplicados a la acústica arquitectónica y de recintos cerrados. Dicho de una manera simple, el acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de un recinto con el objeto de conseguir las condiciones acústicas más adecuadas para el tipo de actividad a la que se haya previsto destinarlo.

A menudo el acondicionamiento acústico se confunde con el aislamiento acústico. Esta temática si bien es complementaria a la anterior, es conceptualmente distinta, ya que se refiere al conjunto de acciones encaminadas a la obtención de una correcta atenuación en la transmisión de ruido y vibraciones entre los diferentes espacios en que se integra un recinto.

A partir de 1968, se han desarrollado métodos informáticos de trazado de rayos sonoros (figura 12) con la idea de seguir todas las reflexiones que se producen y de esta forma calcular el tiempo de reverberación. Tampoco estas técnicas recientes han dado resultados mucho mejores que las de Sabine. La fórmula de Sabine sólo ha sido mejorada al introducir un factor de absorción ( $\alpha$ ) del aire para una determinada temperatura y humedad. Factor que tiene gran importancia si se trata de grandes recintos.”

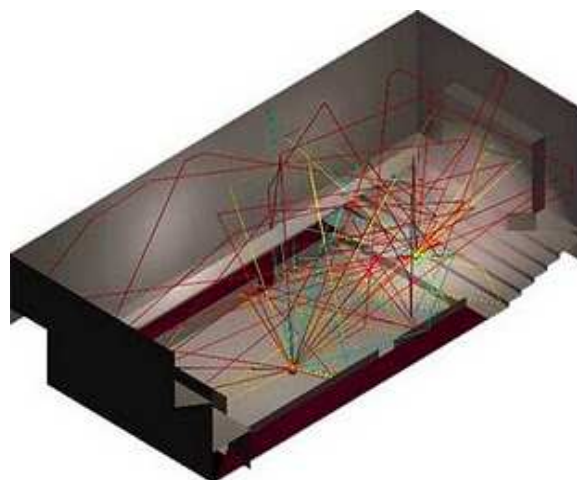


Figura 12. Trazado de Rayos Sonoros [8].



## 8.2 Propagación del sonido en un recinto cerrado

El sonido es una vibración como tal, se puede y se tiene que dar en cualquier medio material, sólido, líquido o gaseoso como el aire. En cada medio, se propaga a una velocidad diferente, principalmente en función de la densidad. Cuanto más denso sea el medio, mayor será la velocidad de propagación del sonido. En el vacío, el sonido no sepropaga, al no existir partículas que puedan vibrar.

Un cuerpo en oscilación pone en movimiento a las moléculas de aire (del medio) que lo rodean. Éstas, a su vez, transmiten ese movimiento a las moléculas vecinas y así sucesivamente. Cada molécula de aire entra en oscilación en torno a su punto de reposo. Es decir, el desplazamiento que sufre cada molécula es pequeño. Pero el movimiento se propaga a través del medio.

Entre la fuente sonora (el cuerpo en oscilación) y el receptor (el ser humano) se tiene entonces una transmisión de energía pero no un traslado de materia. No son las moléculas de aire que rodean al cuerpo en oscilación las que hacen entrar en movimiento al tímpano, sino las que están junto al mismo, que fueron puestas en movimiento a medida que la onda se fue propagando en el medio.

El desplazamiento que sufren las distintas moléculas de aire genera zonas en las que hay una mayor concentración de moléculas (mayor densidad), zonas de condensación, y zonas en las que hay una menor concentración de moléculas (menor densidad), zonas de rarefacción. Esas zonas de mayor o menor densidad generan una variación alterna en la presión estática del aire (la presión del aire en ausencia de sonido). Es lo que se conoce como presión sonora. Las regiones densas en las que gran número de moléculas se agrupan acercándose mucho entre sí se llaman **compresiones**. Una compresión corresponde a una región de alta presión. Las regiones que tienen relativamente pocas moléculas se conocen como **rarefacciones** y corresponden a zonas de baja presión, como se puede ver en la figura 13 las compresiones y rarefacciones se alternan a través del medio en la misma forma que las partículas de aire individuales oscilan de un lado a otro en la dirección de la propagación de la onda.

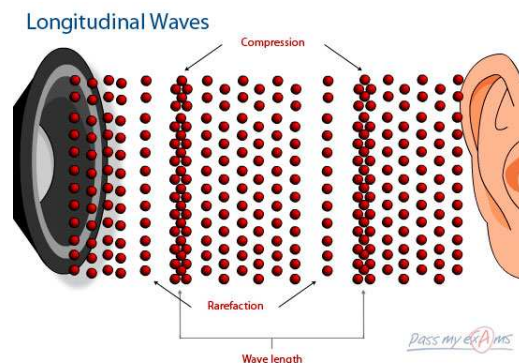


Figura13. Momentos de Compresión y rarefacción de las moléculas al desplazarse la onda Sonora

Si el cuerpo que genera la oscilación realiza un movimiento armónico simple, las variaciones de la presión en el aire pueden representarse por medio de una onda sinusoidal. Por el contrario, si el cuerpo realiza un movimiento complejo, las variaciones de presión sonora deberán representarse por medio de una forma de onda igual a la resultante de la proyección en el tiempo del movimiento del cuerpo.

En el aire el sonido se propaga esféricamente, es decir en todas direcciones. Podemos imaginarnos al sonido propagándose como una esfera cuyo centro es la fuente sonora y que se va haciendo cada vez más grande, o que va aumentando cada vez su radio. Por razones de comodidad, para estudiar el sonido se podrá hacerlo desde uno de esos dos puntos de vista, a veces como una esfera creciendo, o como un radio (eventualmente todos los radios) de la misma (rayos).

Entonces se puede imaginar una cadena de partículas (moléculas) entre la fuente sonora y el receptor (un rayo). Entre el instante en que la fuente sonora pone en movimiento a la partícula más cercana y el instante en que la primera partícula transmite su movimiento a la segunda transcurre un tiempo determinado. Es decir, cuando la primera partícula entra en movimiento, la tercera -por ejemplo- aún está en su posición de reposo. Además, es importante recordar que las partículas de aire sólo oscilan en torno a su posición de reposo.

Se podría decir entonces que cada partícula se encontrará en una situación distinta del movimiento oscilatorio. Es decir, cada partícula tendrá una situación de fase (ángulo de fase) distinta. En algún lugar de la cadena se encontrará una partícula cuya situación de fase coincide con la de la primera, aunque la primera partícula estará comenzando su segundo ciclo oscilatorio, mientras que la otra recién estará comenzando su primer ciclo.

Las ondas sonoras tienen longitudes de onda de entre 2 cm y 20 m.

Es importante recalcar que no se debe confundir la velocidad de propagación de la onda con la velocidad de desplazamiento de las partículas. Éstas realizan un movimiento oscilatorio muy rápido, cuya velocidad es distinta a la velocidad de propagación de la onda.

La velocidad de propagación de la onda sonora (velocidad del sonido) depende de las características del medio en el que se realiza dicha propagación y no de las características de la onda o de la fuerza que la genera. En el caso de un gas (como el aire) es directamente proporcional a su temperatura específica y a su presión estática e inversamente proporcional a su densidad. Dado que si varía la presión, varía también la densidad del gas, la velocidad de propagación permanece constante ante los cambios de presión o densidad del medio.

Teniendo en cuenta que la velocidad del sonido es el espacio recorrido por la onda acústica en la unidad de tiempo (duración).

$$v = \lambda \cdot f = \lambda / T$$

Donde:

$V$  = es la velocidad del sonido (344 m/s a 20°C en el aire).

$\lambda$  = es la longitud de onda.

$f$  = es la frecuencia.

Además, la velocidad también depende de la elasticidad del medio en que se propague así:

$$v^2 = E / \rho$$

Donde:

$E$  = es la constante de elasticidad.

$\rho$  = es la densidad del medio (densidad = masa / volumen).

Pero la velocidad del sonido sí varía ante los cambios de temperatura del aire (medio). Cuanto mayor es la temperatura del aire mayor es la velocidad de propagación. La velocidad del sonido en el aire aumenta 0,6 m/s por cada 1° C de aumento en la temperatura.

La velocidad del sonido en el aire es de aproximadamente 344 m/s a 20° C de temperatura, lo que equivale aproximadamente a 1200 km/h. Es decir que necesita de unos 3 segundos para recorrer 1 kilómetro.

El sonido se propaga a diferentes velocidades en medios de distinta densidad. En general, se propaga a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases (como el aire). La velocidad de propagación del sonido es, por ejemplo, de aproximadamente de 1440 m/s en el agua y de 5000 m/s en el acero.

Se puede definir a un medio como un conjunto de osciladores capaces de entrar en vibración por la acción de una fuerza. Al hablar de un medio y a no ser que se indique específicamente otra cosa, se está refiriendo al aire. Esto se debe nuevamente a razones prácticas, en la medida en que el aire es el medio más usual en el que se realiza la propagación del sonido en los actos comunicativos por medio de sistemas acústicos entre seres humanos, ya sea mediante el habla o la música.

Al pasar la onda sonora de un medio a otro, se produce una reflexión de casi la totalidad de la energía sonora inicial; al pasar del aire al agua, pierde un 99.9 % de la energía. A nivel del oído, el sistema tímpano-oscicular se convierte en un verdadero adaptador de impedancia que permite a la energía sonora pasar de un medio aéreo a un medio líquido en el oído interno, reduciendo al máximo la dispersión de energía, la cual es medida en decibeles.

El aire posee además otras características relevantes para la propagación del sonido:

- la propagación es **lineal**, que quiere decir que diferentes ondas sonoras (sonidos) pueden propagarse por el mismo espacio al mismo tiempo sin afectarse mutuamente.
- es un medio **no dispersivo**, por lo que las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.
- es también un medio **homogéneo**, de manera que el sonido se propaga esféricamente, es decir, en todas las direcciones, generando lo que se denomina un campo sonoro.

### 8.2.1 Divergencia Esférica

El nivel de presión disminuye conforme el sonido se propaga. Cuando el frente de onda es esférico, en la mayoría de los casos, el nivel de presión cae a 6 dB por cada vez que se duplica la distancia. Estas se llaman pérdidas por divergencia esférica. Si por ejemplo se mide el SPL que produce una excavadora a 5 metros y este es de 100 dB, podremos decir que a 10 metros el SPL será de 94 dB, y a 20 metros será 88 dB.

Cuando el frente de onda es plano, no hay pérdidas por divergencia.

En una sala en la que una fuente sonora emite un sonido se pueden producir fenómenos de resonancia que estarán relacionados con la naturaleza de la sala, su geometría, dimensiones y materiales, así como con las características del sonido en cuestión (fundamentalmente su intensidad y su frecuencia). Al igual que en un diapasón, todo objeto, incluido una sala, posee una serie de frecuencias o modos propios de vibración que son característicos del mismo. Por ejemplo si golpeamos una tubería metálica esta sonará con un sonido de frecuencia característica, que dependerá de las dimensiones y materiales de la tubería.

Las frecuencias propias de resonancia de un local vendrán dadas por la ecuación

La presión acústica, de las correspondientes ondas estacionarias es:

$$P = A \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right) \cos 2\pi ft$$

Donde:

$$A = A_1 A_2 A_3 D$$

En los puntos en que los cosenos son cero, se producirán presiones acústicas nulas. Estos puntos producirán tres conjuntos de planos equidistantes, que se llaman planos nodales, que son ortogonales entre sí.

Según se acaba de comentar, la energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

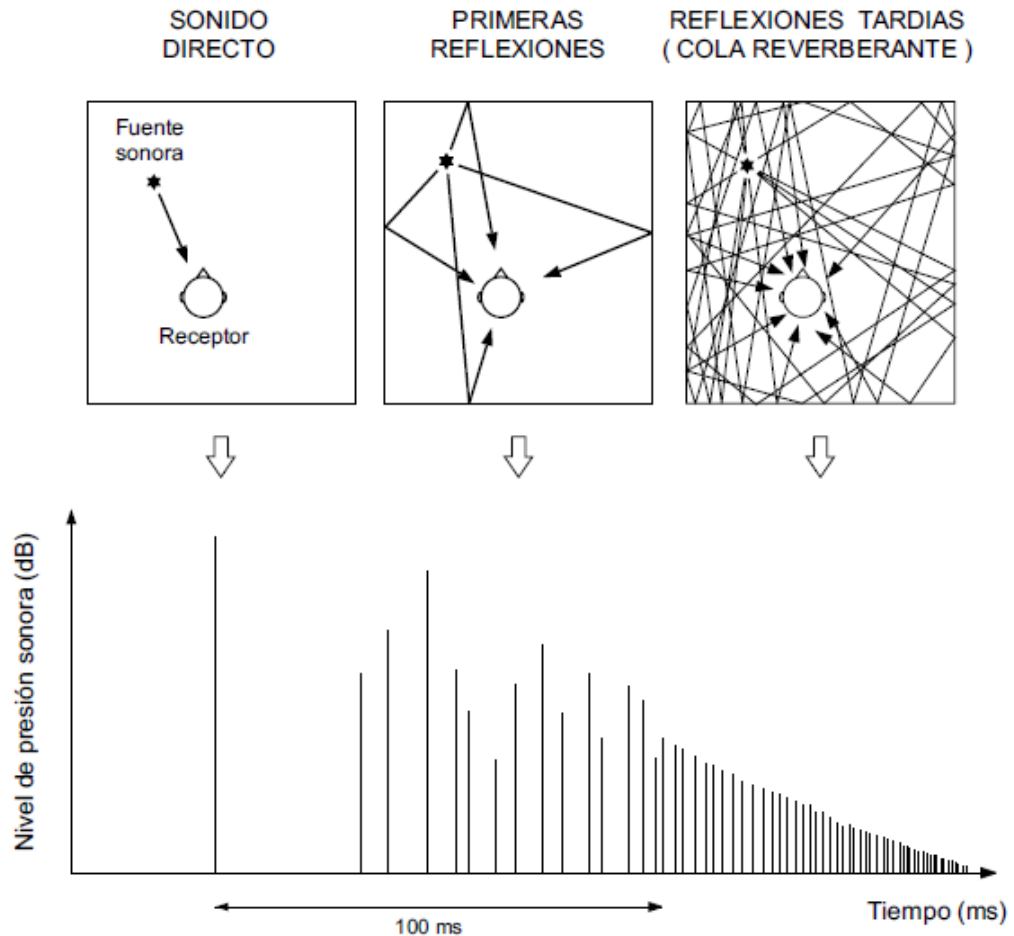
### **8.3 Sonido reflejado**

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas ("early reflections"), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden  $\leq 3$ ). Se dice que una reflexión es de orden "n" cuando el rayo sonoro asociado ha incidido "n" veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms (milisegundos) desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura 14, se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).



**Figura 14. Ecograma asociado a un receptor con indicación del sonido directo de las primeras reflexiones y la cola reverberante**

En un recinto real, la manera más elemental de obtener dicha representación gráfica es emitiendo un sonido intenso y breve como, por ejemplo, un disparo. Sin embargo, en la actualidad existen sofisticados equipos de medida basados en técnicas TDS ("Time Delay Spectrometry") o MLS ("Maximum Length Sequence") que permiten obtener en cada punto de interés la curva de decaimiento energético, denominada curva energía-tiempo ETC ("Energy- Time Curve"), de forma rápida, precisa y automatizada. A partir de la obtención de dicha curva en distintos puntos del recinto considerado es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del mismo.

En la figura 15 se muestra una curva ETC medida en un punto de un recinto. En abscisas se indica el tiempo, expresado en ms (milisegundos), mientras que en ordenadas se indica el nivel, expresado en dB.

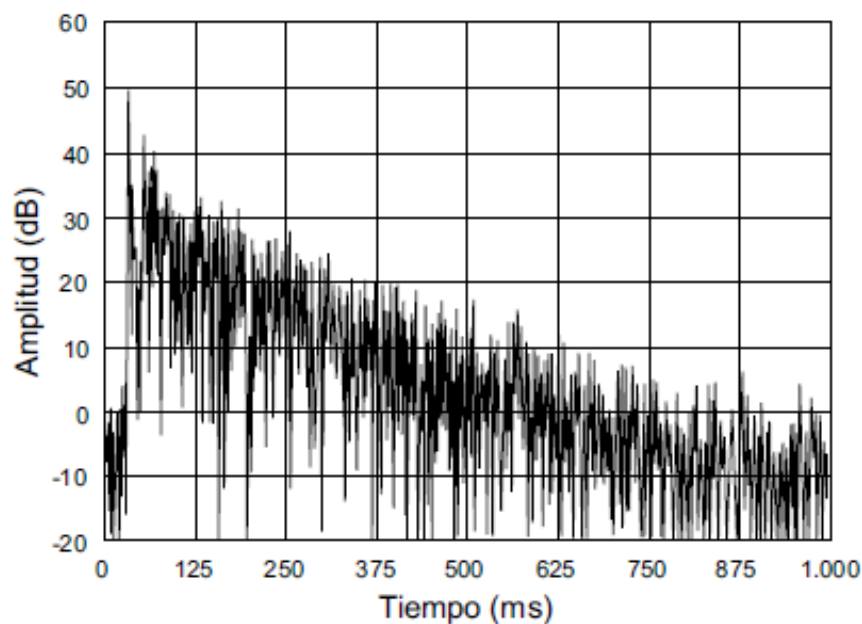
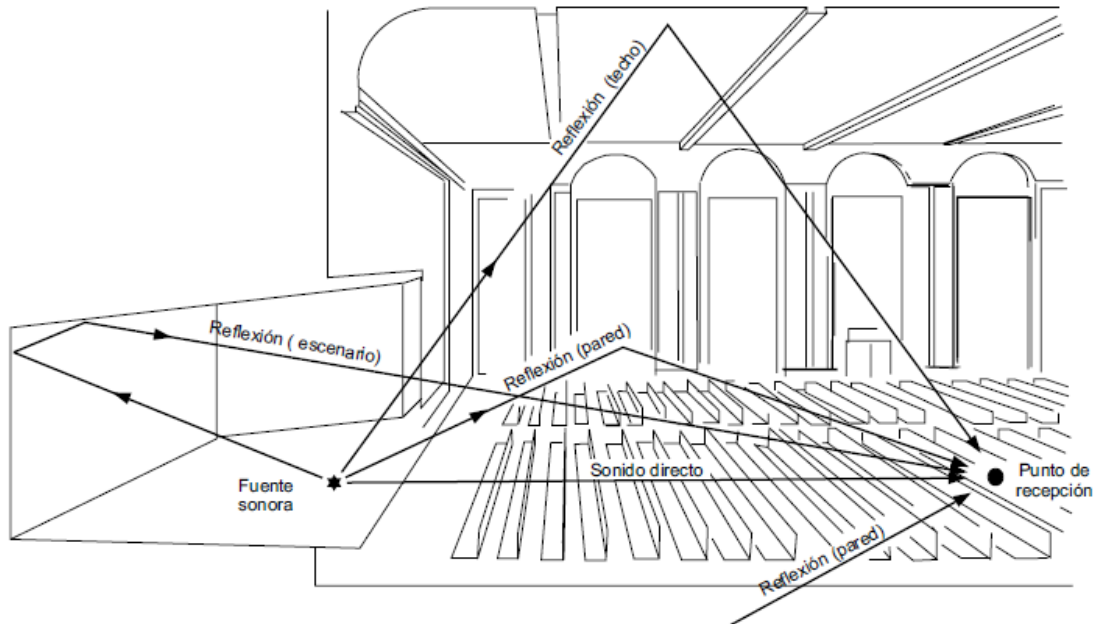


Figura 15. Cueva energía – tiempo ETC medida en un punto de un recinto

### 8.3.1 Estudio de las primeras reflexiones. Acústica geométrica

Las primeras reflexiones presentan un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de orden más bajo, además del hecho de depender de la forma geométrica de la sala, son específicas de cada punto y, por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, junto con el sonido directo.



**Figura 16. Ejemplo de llegada del sonido directo y de las primeras reflexiones a un receptor**

La hipótesis elemental de partida para calcular el ecograma asociado a un punto cualquiera consiste en tratar los rayos sonoros como si se tratase de rayos de luz, es decir, considerando que las reflexiones de los mismos sobre las distintas superficies son totalmente especulares y que, por tanto, verifican la ley de la reflexión. En la figura 17 se representa gráficamente dicha ley.

El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexiones especulares constituye la base de la denominada acústica geométrica.

Evidentemente, dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad, ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis de reflexión especular es totalmente veraz.

Para que en la práctica se produzca una reflexión marcadamente especular es necesario que se cumplan los siguientes requisitos, por lo que a la superficie de reflexión se refiere:



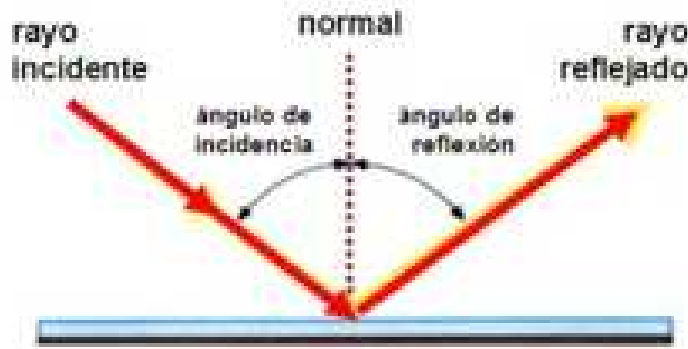


Figura 17. Reflexión especular del sonido sobre una superficie

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente)

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción

Por otra parte, si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones.

En este punto conviene destacar el hecho de que existen programas informáticos avanzados de simulación acústica que permiten el análisis teniendo en cuenta tanto el fenómeno de la difracción como el de la difusión del sonido. Obviamente, los resultados obtenidos con dichos programas se aproximan más a los obtenidos mediante mediciones reales efectuadas "in situ" que en el caso de utilizar programas de simulación más simples.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, la cola reverberante está formada por las reflexiones tardías (por regla general, se consideran las reflexiones de orden superior a 3). Debido a que la densidad temporal de reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo, existe una gran concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales con independencia del punto considerado. Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada acústica estadística, en lugar de la acústica geométrica.

A título de ejemplo, en un auditorio de tamaño medio un oyente recibe alrededor de 8.000 reflexiones en el primer segundo después de la llegada del sonido directo. De todas formas, debido a que el oído humano es incapaz de discriminar la llegada discreta de todas y cada una de las reflexiones, lo que generalmente se percibe es un sonido continuo. Sólo en determinados casos es posible percibir individualmente una o varias reflexiones. Para ello es necesario que su nivel y retardo respecto al sonido directo sean significativos.

#### **8.4 Balance energético sonoro**

Anteriormente se ha descrito la propagación de una onda sonora en un recinto cerrado partiendo de la hipótesis de que la fuente sonora emite un sonido intenso breve.

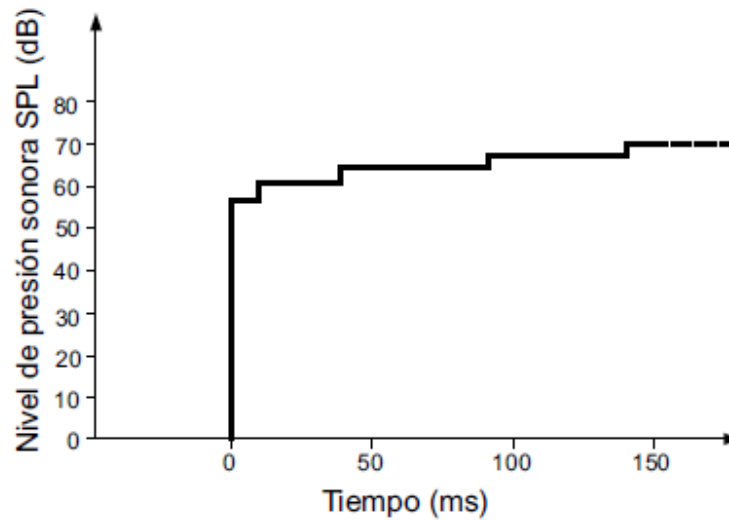
A continuación se analiza dicho comportamiento. Si bien ahora suponiendo que la fuente radia energía de forma continua. En tal caso resulta evidente que una vez transcurrido un periodo de tiempo transitorio, se alcanza un estado de equilibrio caracterizado por el hecho de que la absorción acústica producida por las superficies del recinto se iguala con el aporte energético de la fuente. Existe, en consecuencia, un balance energético sonoro.

El punto de partida consiste en poner en marcha una fuente sonora omnidireccional y en dejarla emitir de forma continua. A partir del instante inicial, la onda sonora generada se propaga en todas las direcciones y cada rayo sonoro recorre un camino distinto, reflejándose una y otra vez sobre las diferentes superficies de la sala. En cada reflexión, parte de la energía es absorbida y parte es devuelta al recinto en mayor o menor cuantía, en función del grado de absorción acústica del revestimiento correspondiente a la superficie implicada.

El aporte constante de energía por parte de la fuente sonora hace que la energía total recibida en cualquier punto de la sala, obtenida como suma de la directa y la indirecta o reflejada, vaya aumentando progresivamente hasta alcanzar el mencionado punto de equilibrio.

En la figura 18, se observa el incremento del nivel de presión sonora en un punto receptor genérico hasta llegar a un valor máximo correspondiente al régimen permanente. Cabe señalar que los incrementos discretos de nivel producidos en una serie de instantes concretos pretenden únicamente destacar la contribución tanto del sonido directo como de cada una de las reflexiones sucesivas que llegan al receptor.

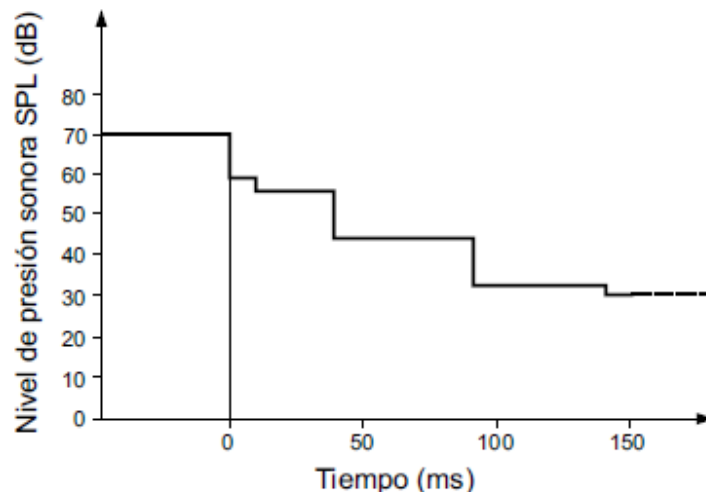
En la práctica, dichas discontinuidades no suelen observarse de manera tan evidente, ya que el número de reflexiones y la proximidad entre las mismas es mucho mayor.



**Figura 18.** Aumento del nivel de presión sonora SPL en un punto receptor por la acumulación del sonido ya que el número de reflexiones.

El proceso anteriormente descrito es totalmente reversible, de forma que cuando la fuente sonora se detiene bruscamente, el nivel de presión sonora empieza a disminuir progresivamente hasta desaparecer (estrictamente hablando, dicho nivel disminuye hasta confundirse con el nivel de ruido de fondo de la sala).

Siguiendo con el ejemplo simplificado anterior, en la figura 18, se observan los decrementos discretos de nivel, asociados en primer lugar a la desaparición del sonido directo y, posteriormente, a la desaparición de las sucesivas reflexiones.



**Figura 19.** Disminución del nivel de presión sonora SPL en un punto receptor después de que la fuente sonora se haya detenido.

La rapidez en la atenuación del sonido depende del grado de absorción de las superficies del recinto: a mayor absorción, atenuación más rápida.

El grado de permanencia del sonido una vez que la fuente sonora se ha desconectado se denomina reverberación. Por lo tanto, la reverberación de una sala es mayor cuanto más tardar el sonido en atenuarse, es decir, cuanto menos absorbente es el recinto.

La evolución teórica de la presión sonora asociada a las fases descritas anteriormente (conexión de la fuente sonora, alcance del régimen permanente y desconexión de la fuente) se representa en la figura 20, tanto en escala lineal como en escala semilogarítmica. Dichas gráficas surgen de la aplicación exclusiva de la acústica estadística y, por consiguiente, son válidas para cualquier punto de la sala objeto de estudio, con independencia de su ubicación dentro de la misma.

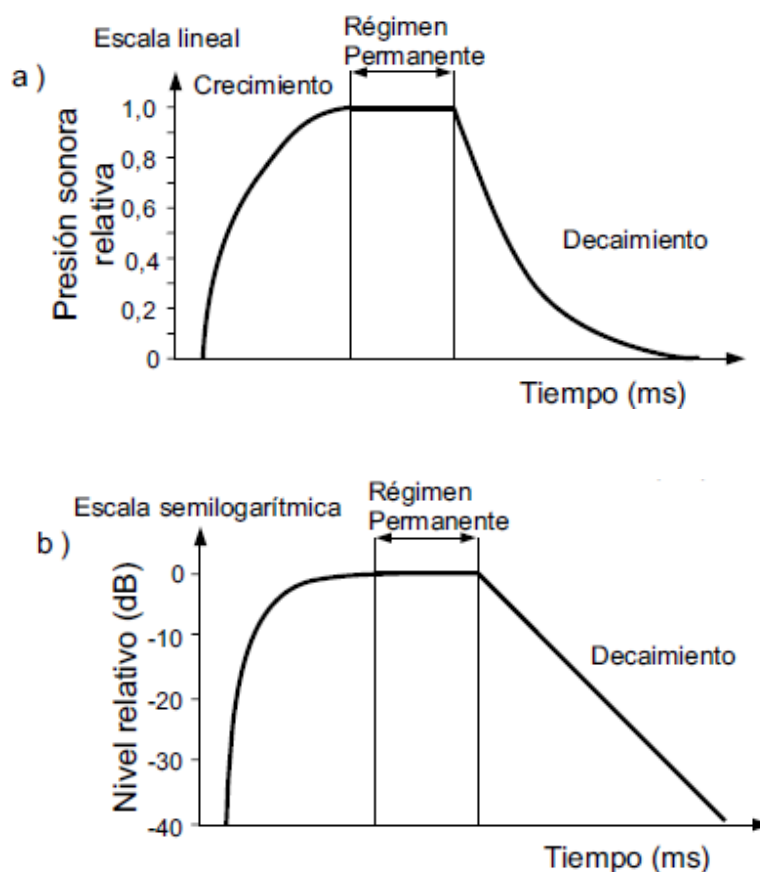


Figura 20. Evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y, posteriormente, desconectar una fuente sonora: a) escala lineal; b) escala semilogarítmica

Según se observa el decaimiento en escala lineal sigue una evolución exponencial, lo cual se traduce en una línea recta en escala semilogarítmica. Ello resulta de gran utilidad para la determinación teórica del tiempo de reverberación.

En la práctica nunca se obtiene una curva tan regular y, además, a cada punto de medida le corresponde una curva diferente del resto. Ello es especialmente evidente durante, aproximadamente, los primeros 100 ms desde la llegada del sonido directo debido a la existencia de primeras reflexiones específicas asociadas al punto considerado (como ya se dijo con anterioridad, el estudio de las primeras reflexiones se realiza por medio de la acústica geométrica).

### **8.5 Campo directo y campo reverberante. Nivel total de presión sonora**

Siguiendo con la hipótesis de régimen permanente y aplicando exclusivamente la teoría de la acústica estadística, resulta que la energía sonora total presente en cualquier punto de una sala se obtiene como suma de una energía de valor variable, que depende de la ubicación del punto, y otra de valor constante. Se supone que se parte de una fuente sonora de directividad conocida que radia una potencia Constante.

La energía de valor variable corresponde al sonido directo, y disminuye a medida que el receptor se aleja de la fuente, mientras que la energía de valor constante va asociada al sonido indirecto o reflejado. El hecho de que dicha energía no dependa del punto en consideración proviene de aplicar la teoría estadística a todo el sonido reflejado y, en consecuencia, de tratar por igual todas las reflexiones, sean primeras o tardías (cola reverberante). Esta hipótesis teórica conduce a resultados evidentemente aproximados, si bien presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo de la energía total.

Habitualmente no se trabaja en términos de energía, sino de nivel de presión sonora SPL, lo cual es totalmente equivalente. Ello se debe a que, en la práctica, el nivel SPL es fácilmente medible (ver descripción del sonómetro en el apartado 1.5). Por lo tanto, según lo que se acaba de exponer, la presión sonora total en un punto cualquiera de un recinto se obtiene a partir de la contribución de las presiones del sonido directo (disminuye con la distancia a la fuente) y del sonido reflejado (se mantiene constante).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo LD, disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente: Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante (es por ello que a dicho sonido también se le denomina sonido reverberante). A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En

esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante  $L_R$  se mantiene constante.

La distancia para la cual  $L_D = L_R$  se denomina distancia crítica  $D_c$ . Se puede demostrar que:

$$D_c = 0.14 \sqrt{QR}$$

$Q$  = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada

$R$  = constante de la sala

$$R = S_t \alpha / 1 - \alpha \text{ (en m}^2\text{)}$$

$S_t$  = superficie total de la sala (en m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = coeficiente medio de absorción de la sala

En la figura 21. Se muestra la evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente, normalizada con respecto a la distancia crítica  $D_c$ .

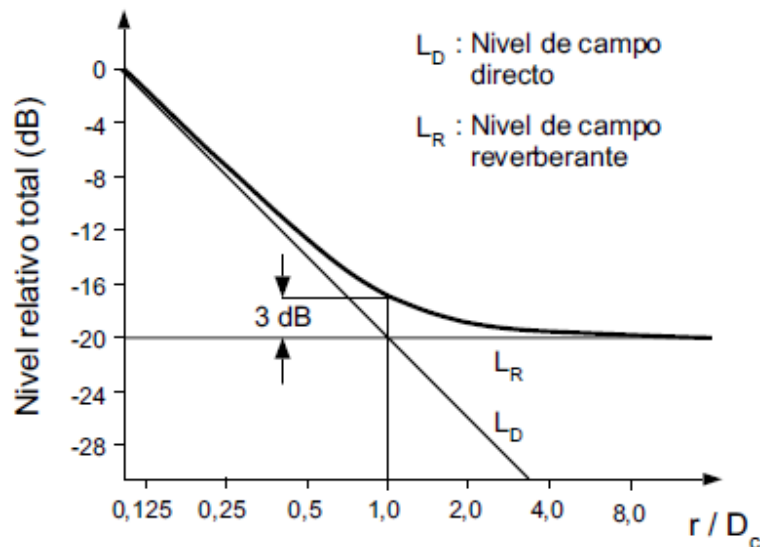


Figura 21. Evolución del nivel relativo total de presión sonora en función de la distancia a la fuente sonora normalizada con respecto a la distancia crítica  $D_c$ .

Se puede comprobar que, para puntos próximos a la fuente sonora

( $r/D_c \ll 1$ ):

$$L_p \approx L_D$$

Mientras que para puntos alejados:

$(r / D_c \gg 1)$ :

$$L_p \approx L_R$$

Por otra parte, se puede demostrar que cuanto mayor sea el grado de absorción de un recinto a una determinada frecuencia, mayor será el valor de la constante de la sala R (aumento de la distancia crítica  $D_c$ ) y menor el nivel de presión sonora de campo reverberante  $L_R$ .

A título de ejemplo, en la figura 22, se representan tres gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala "viva" (poco absorbente), a una sala intermedia y a una sala "apagada" (muy absorbente), en función de la distancia a la fuente sonora.

Se puede observar que, efectivamente:  $L_{R1} > L_{R2} > L_{R3}$

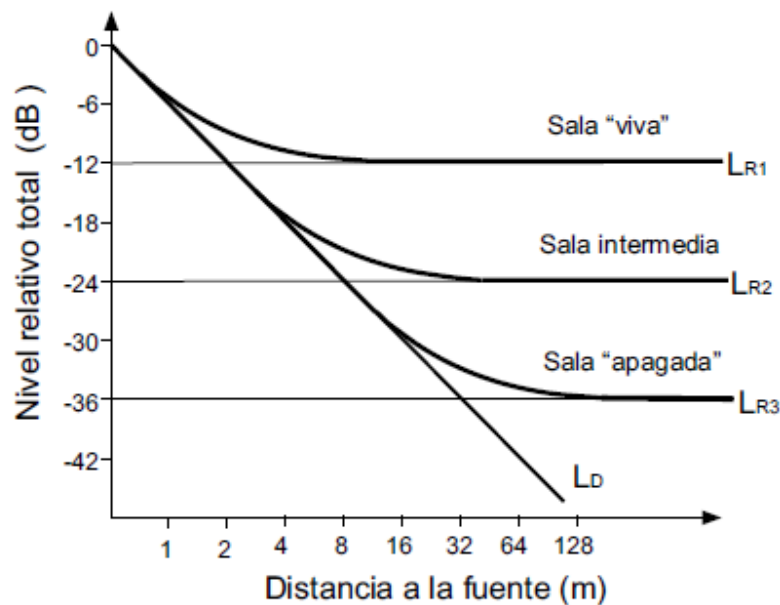


Figura 22. Gráficas de niveles relativos totales de presión sonora correspondientes a una sala "viva", a una sala intermedia y a una sala "apagada"

## 8.6 Tiempo de reverberación RT

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

Un recinto con un RT grande se denomina "vivo" (nave industrial, iglesia, etc.), mientras que si el RT es pequeño recibe el nombre de recinto "apagado" o "sordo" (locutorio, estudio de grabación, etc.). Ambas denominaciones coinciden con las del apartado anterior, lo cual es lógico habida cuenta de que el nivel de campo reverberante aumenta con el tiempo de reverberación.

Por lo general, el RT varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

### 8.6.1 Valores recomendados del tiempo de reverberación

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de RT para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz. Se representa por  $RT_{mid}$ .

En general, el valor más adecuado de  $RT_{mid}$  depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de RT sean bajos, con objeto de conseguir una buena inteligibilidad, mientras que en el caso desalas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

En la tabla 6. Se dan los márgenes de valores recomendados de  $RT_{mid}$  para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

TIPO DE SALA	RT mid s SALA OCUPADA (EN S)
Sala de conferencias	0,7 - 1,0
Cine	1,0- 1,2
Sala polivalente	1,2 - 1,5
Teatro de ópera	1,2 - 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 - 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 - 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 - 3,0
Locutorio de radio	0,2 - 0,4

**Tabla 6. Márgenes de valores recomendados de  $RT_{mid}$  en función del tipo de sala (recintos ocupados)**



### 8.6.2 Cálculo del tiempo de reverberación

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del RT, la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$RT = 0.161 (V / A_{tot}); \text{ (en s)}$$

Donde:

V = volumen del recinto (en m<sup>3</sup>)

A<sub>tot</sub> = absorción total del recinto (definida seguidamente)

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado coeficiente de absorción  $\alpha$ . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \text{Energía absorbida} / \text{Energía incidente}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las propiedades físicas del material y varía con la frecuencia.

En cuanto a la denominada absorción A de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie S. La unidad de absorción es el sabin (1 sabin corresponde a la absorción de 1 m<sup>2</sup> de ventana abierta).

Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total A<sub>tot</sub> como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

A partir de A<sub>tot</sub> es posible calcular el coeficiente medio de absorción  $\alpha$  dividiendo la absorción total A<sub>tot</sub> por la superficie total del recinto S<sub>t</sub>:

$$A = A_{tot} / S_t$$

Donde:

$$S_t = S_1 + S_2 + \dots + S_n = \text{superficie total del recinto (paredes + techo + suelo)}$$

Con todo lo anterior, el tiempo de reverberación se puede expresar como sigue:

$$RT = (0.161 V / \alpha S_1)$$

Según se observa, el RT calculado a cada frecuencia de interés mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge exclusivamente de la aplicación de la acústica estadística.

Por otra parte es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones)
- Geometría regular de la sala
- Coeficiente medio de absorción  $\alpha$  inferior a, aproximadamente, 0,4

El RT resulta ser un parámetro fundamental en el diseño acústico de recintos. Ahora bien, en la práctica se utilizan una serie de parámetros complementarios que, por estar fundamentados en la acústica geométrica, dependen de la situación del receptor. La optimización de todos ellos en la fase de diseño permite garantizar con un elevado grado de fiabilidad la obtención de una acústica adecuada, una vez construido el recinto.

### **8.6.3 Medida del tiempo de reverberación**

El RT se calcula a partir de la curva de decaimiento energético, medida en un punto cualquiera de una sala.

Según lo comentado en el apartado 2.3 dicha curva se puede obtener como respuesta a la emisión de un sonido intenso y breve, o bien más modernamente, mediante técnicas TOS o MLS, en cuyo caso se denomina ETC.

La obtención del RT a cada frecuencia de interés, a partir de la correspondiente curva ETC, no se lleva a cabo directamente por simple observación del tiempo que transcurre hasta que el nivel disminuye 60 dB. Ello es debido a que dicha curva presenta irregularidades, a pesar de que su decaimiento asintótico es efectivamente en forma de línea recta. El motivo de la aparición de dichas irregularidades es que en ningún recinto real existe un campo sonoro

perfectamente difuso. Teóricamente, sería necesario repetir la medida de la curva ETC un número infinito de veces para, posteriormente, obtener una curva promedio exenta ya de irregularidades.

En la práctica: la determinación del RT se realiza aplicando el método de Schroeder.

Dicho investigador demostró matemáticamente que la curva promedio anterior se puede obtener de forma totalmente equivalente a base de integrar (sumar) todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva ETC, desde un instante de tiempo infinito (en la práctica, habitualmente entre 1 y 3 segundos) hasta el instante inicia.

En la práctica, nunca es posible observar una caída de 60 dB, por falta de margen dinámico. En consecuencia, es el usuario quien fija los instantes iniciales y finales, a partir de los cuales el sistema de medida calcula automáticamente el RT.

### **8.7 Absorción del aire**

La absorción producida por el aire es solamente significativa en recintos de grandes dimensiones, a frecuencias relativamente altas ( $\geq 2000$  Hz) y con porcentajes bajos de humedad relativa (del orden de un 10 a un 30%). Dicha absorción se representa por la denominada constante de atenuación del sonido en el aire m.

En la figura 23, se presenta una grafica la que es posible determinar el valor del producto  $4m$  en condiciones normales de presión y temperatura ( $P_0 = 10^5$  Pa y  $20^\circ\text{C}$ ), para cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire.

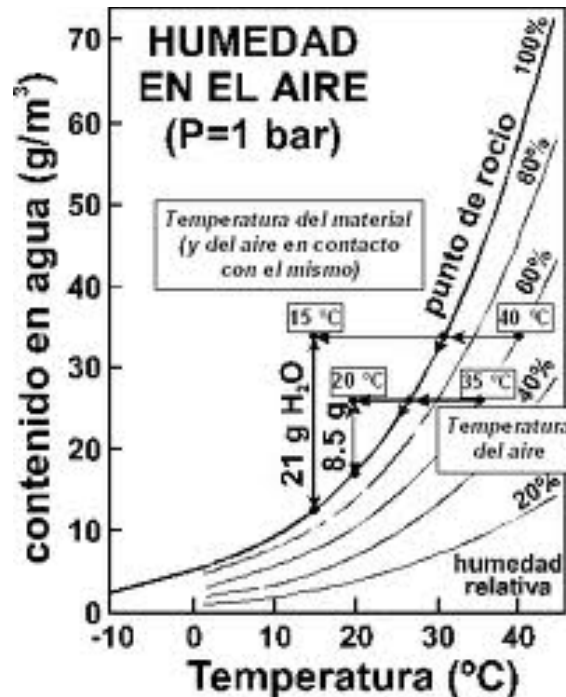


Figura 23. Gráficas para la determinación del producto 4m

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

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

siendo:

$A_{\text{tot}}$ , la absorción total del recinto (en sabins).

Por ejemplo, considerando una humedad relativa del 25% y la frecuencia de 4000 Hz, el producto 4m valdrá  $0,56 \text{ sabins}/\text{m}^3$ . Por lo tanto, para un recinto de volumen  $5.000 \text{ m}^3$ , la absorción producida por el aire a dicha frecuencia será:

$$4mV = 2.800 \text{ sabins}$$

### 8.8 Absorción de las superficies vibrantes

La presencia en una sala de superficies límite susceptibles de entrar en vibración, como por ejemplo, puertas, ventanas y paredes separadoras ligeras, también da lugar a una cierta absorción que en principio conviene tener presente.

En el caso de los materiales absorbentes, la mayor absorción se produce de una forma totalmente controlada y va asociada a un proceso de disipación de energía, es decir, de conversión de energía sonora en calor. En cambio, en el caso de una superficie vibrante, una parte de la energía vibracional es radiada hacia el exterior. Aunque en realidad la energía no es disipada, el efecto es equivalente a una verdadera absorción, ya que dicha energía es sustraída de la energía sonora incidente.

En este sentido, una ventana abierta puede considerarse como un absorbente muy efectivo, ya que actúa a modo de sumidero de toda la energía sonora incidente.

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

$$\alpha = (2\rho_0 c / \omega M)^2$$

Donde:

$\rho_0$  = densidad del aire = 1,18 Kg/m<sup>3</sup>

$\omega = 2\pi f$

$f$  = frecuencia (en Hz)

$M$  = masa por unidad de superficie (en Kg/m<sup>2</sup>)

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

Según se puede observar, la absorción sólo puede llegar a ser mínimamente significativa a bajas frecuencias, aunque los valores habituales de  $\alpha$  son siempre pequeños.

## 8.9 Materiales acústicos

La absorción que sufren las ondas sonoras cuando inciden sobre los distintos materiales absorbentes utilizados como revestimientos de las superficies límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. En consecuencia, la correcta elección de los mismos permitirá obtener, en cada caso, la absorción más adecuada en todas las bandas de frecuencias de interés.

Existen dos tipos genéricos de elementos específicamente diseñados para producir una determinada absorción: los simplemente denominados materiales absorbentes, y los llamados absorbentes selectivos o resonadores.

En ambos casos, cuando la absorción en una o más bandas de frecuencias es muy elevada, puede ocurrir que el coeficiente de absorción medido  $\alpha_{SAB}$  sea superior a 1.

Ello no debe conducir a la interpretación totalmente errónea y carente de sentido desde un punto de vista físico de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente.

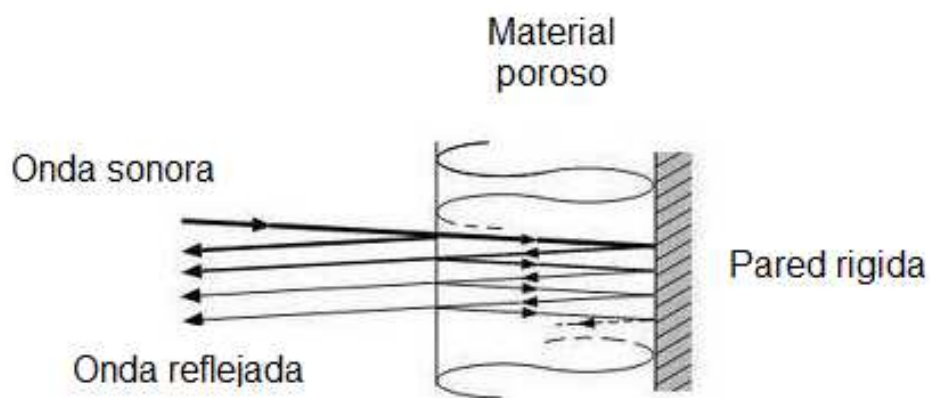
La justificación proviene de la existencia de un efecto de difracción que hace que la superficie efectiva de la muestra de material utilizada para la medida sea mayor que la superficie real.

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

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

Estos materiales presentan un gran número de canales a través de los cuales la onda sonora puede penetrar. La disipación de energía en forma de calor se produce cuando la onda entra en contacto con las paredes de dichos canales. Cuanto mayor sea el número de canales, mayor será la absorción producida. El correspondiente coeficiente de absorción  $\alpha$  es asignado a la superficie del material.

En la figura 24 se representa dicho proceso de forma gráfica y simplificada. Se parte de un material poroso y homogéneo, situado delante de una pared rígida.



**Figura 24. Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida. (Antoni Carrión Isbert. Ediciones UPC)**

La onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior a través del material. Desde un punto de vista teórico, este proceso continúa indefinidamente.

Esta explicación cualitativa sirve para demostrar que la onda sonora reflejada por el material puede imaginarse como compuesta por un número ilimitado de componentes sucesivas, cada una más débil que la precedente a causa de la considerable atenuación que tiene lugar en el interior del material.

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

Lana de vidrio  
Lana mineral  
Espuma a base de resina de melanina  
Espuma de poliuretano

### **8.10 Modos propios de una sala acústica**

Si el sonido dentro de la sala contiene frecuencias superiores a  $f$ , se excitará un número alto de modos propios y el resultado total será un campo casi difuso. Para frecuencias inferiores a  $f$ , los fenómenos de resonancia pueden afectar gravemente a las condiciones acústicas de la sala creando máximos y mínimos de presión acústica y evitando una distribución uniforme del campo sonoro. Por lo tanto, los modos de resonancia pueden ocasionar problemas acústicos sobre todo en salas pequeñas a bajas frecuencias. Estos problemas se resuelven en parte adecuando las dimensiones de la sala y evitando una distribución de paredes muy regular y de grandes superficies paralelas.

Obviamente, las ondas estacionarias van perdiendo energía a partir de que la fuente deja de emitir sonido, y se irán amortiguando debido a la atenuación del aire y a la absorción de las paredes”.

Recibe el nombre de modo propio aquella onda estacionaria generada en el interior de un determinado espacio o recinto, por ejemplo una sala o habitación, o espacio interior de un vehículo. Este tipo de interferencias, ya

sean constructivas (suma) o destructivas (cancelación), vienen dadas por la interacción entre las ondas incidentes y reflejadas dentro del recinto.

Así mismo, cada modo propio está asociado a una frecuencia (denominada frecuencia propia) y nivel de presión sonora específicos en función del punto a considerar, de forma que si la distancia entre dos paredes paralelas dentro de un recinto es igual a la longitud de onda de una determinada frecuencia, podremos decir que ésta se trata de un modo propio y que, por tanto, permanecerá estacionaria reflejándose entre las dos superficies paralelas, perdiendo paulatinamente energía acústica.

Esta clase de ondas estacionarias suponen un importante problema a tener en cuenta, especialmente en recintos destinados al uso de la palabra y del sonido en general (salones de conferencia, salas de conciertos, estudios de grabación musical, salas de cine, vehículos, etc.) donde pueden llegar a ocasionar una notable pérdida en la inteligibilidad de la palabra y en la calidad acústica del recinto.

Pese a que la existencia de modos propios es inevitable, éstos pueden ser distribuidos de manera uniforme a lo largo de todo el espectro de frecuencias audibles de manera que no supongan una deficiencia en la escucha. Para ello es necesario seleccionar una relación adecuada entre las dimensiones del recinto en cuestión a fin de evitar la concentración de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, la coloración excesiva del sonido.

Supongamos una sala cerrada, formada por superficies no absorbentes paralelas entre sí, que posee en su interior una fuente omnidireccional emisora de música (recordar que ésta se compone a base de tonos periódicos complejos). Las ondas sonoras serán reflejadas en las paredes, el suelo y el techo, de forma que toda aquella frecuencia con una longitud de onda igual a la distancia del recorrido efectuado entre una superficie y su paralela pasará a convertirse en una onda estacionaria que, al entrar en fase con las que están siendo emitidas, se sumará provocando un aumento de nivel en esa frecuencia específica y dando lugar a la coloración de la sala.

Además, cada múltiplo de dicha frecuencia (armónico) será a su vez una nueva onda estacionaria, por tanto se generará un nuevo modo propio asociado a éste.

### **8.10.1 Clasificación de los Modos propios**

Teniendo en cuenta la forma en la que las ondas estacionarias son generadas, se puede distinguir entre: Modo Axial (figura 25), Modo Tangencial (figura 26), y Modo Oblicuo.



### 8.10.1.1 Modo Axial

Aquel formado como resultado de una onda estacionaria fluctuante entre dos superficies.

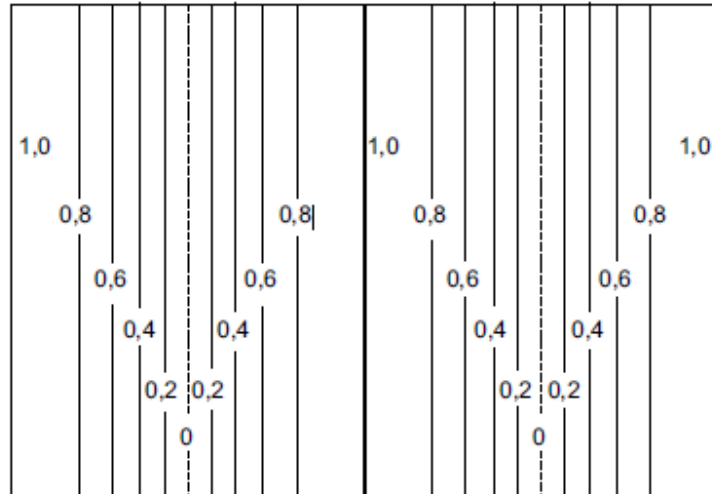


Figura 25. Distribución de niveles SPL normalizados asociados a un modo propio de una sala Modo Axial (2,0,0).

### 8.10.1.2 Modo Tangencial

Se forman por la acción de cuatro superficies de la sala (cuales quieran que sean). Cuando la distancia de separación de trazado formada por las cuatro superficies coincide con la longitud de onda de la frecuencia, se excita una onda estacionaria tangencial. Los modos tangenciales requieren dos veces la potencia de un modo axial para producir el mismo cambio de amplitud que dicho modo axial. Por tanto la variación de nivel de presión sonora es 3dB más baja que la de un modo axial.

### 8.10.1.3 Modo Oblicuo

Aquel formado como resultado de la reflexión de una onda estacionaria entre seis superficies.

Es importante recordar que la onda sonora pierde energía progresivamente a medida que es reflejada, por lo que el Modo Axial será el de mayor fuerza y consistencia, seguido por el Tangencial (con una pérdida del orden de  $-3dB$ ) y seguido a su vez por el Oblicuo (con una pérdida del orden de  $-6dB$ ).

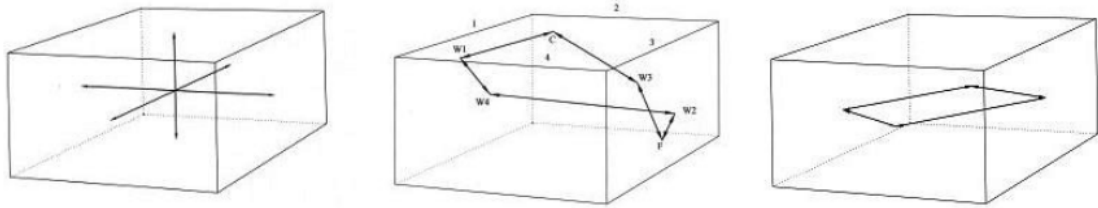


Figura 26. Tipos de modos propios: Axiales (izquierda), obliquos (centro) y tangenciales (derecha)

### 8.10.2 Cálculo de Modos Propios

Las frecuencias propias (asociadas a dichos modos) no vienen dadas de forma aleatoria si no que dependen de la geometría y las dimensiones del recinto a tratar, de forma que su determinación requiere métodos muy complejos de simulación y cálculo acústico. Sin embargo, existe un caso concreto en que el cálculo de modos propios no significa gran complicación, y es cuando se trata de un recinto paralelepípedo compuesto por superficies totalmente reflectantes. Es aquí donde podemos emplear la llamada Fórmula de Rayleigh.

Fórmula de Rayleigh:

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

Donde:

Na, NI, Nh = Valores enteros en función del modo propio (0, 1, 2, 3...)

a, l, h = Dimensiones de la sala, dadas en metros (m).

c = Velocidad del sonido.

Consecuentemente, cada posible combinación de valores Na, NI, Nh dará lugar a una frecuencia y modo propio asociados específicos.

Por ejemplo, la combinación Na = 0, NI = 2, Nh = 1 da lugar al modo propio 0, 2, 1.

Es importante tener en cuenta que la densidad de modos propios dentro de un espacio aumenta conforme lo hace la frecuencia. Y por consiguiente, a partir de una determinada frecuencia, la concentración de modos es tal que equivale a la

ausencia de los mismos, lo cual implica que desaparece la coloración acústica de la sala dado que dejan de existir cúmulos discretos de energía.

Para hallar la frecuencia límite, a partir de la cual los modos influyen de forma prácticamente nula en la calidad acústica de una sala, se recurre a la anterior ecuación.

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

Donde:

$RT_{\text{mid}}$  = Tiempo de reverberación medio (entre 500 Hz y 1 KHz), expresado en segundos (s).

$V$  = Volumen de la sala, expresado en  $m^3$ .

De la anterior ecuación se deduce que la incidencia de los modos propios en una determinada sala o recinto, es inversamente proporcional a las dimensiones del mismo. Según o anterior, para salas de menor tamaño (y por tanto menor volumen, como por ejemplo el baúl o espacio interior de un vehículo) el efecto de los modos propios será mucho mayor en relación a salas con un mayor tamaño y volumen, donde éstos apenas serán apreciables. Sin embargo, en la gran mayoría de los casos, las frecuencias propias que mayores problemas causan suelen situarse por debajo de los 300 Hz.

### 8.10.3 Densidad de modos propios

Podemos calcular los números de modos propios que existen por debajo de una determinada frecuencia mediante la siguiente ecuación:

$$\langle /p \rangle N = \frac{4\pi V}{3c_o^3} f^3 + \frac{4S}{4c_o^2} f^2 + \frac{L}{8c_o} f$$

Donde:

$f$  = es la frecuencia (Hz),

$c_o$  = es la velocidad del sonido en el aire (m/s),

$V$  = es el volumen de la sala ( $m^3$ ),

$S$  = es la superficie total de la sala ( $m^2$ ),

$L$  = es la suma de las longitudes de la sala (m),  
y teniendo en cuenta que:

$$V = l_x l_y l_z$$

$$S = 2(l_x l_y + l_x l_z + l_y l_z)$$

$$L = 4(l_x + l_y + l_z)$$

Podemos calcular aproximadamente la cantidad de modos que hay en un ancho de banda determinado con frecuencia central  $f$  podemos usar la siguiente expresión:

$$\Delta N = \left( \frac{4\pi V}{c_0^3} f^2 + \frac{\pi S}{2c_0^2} f + \frac{L}{8c_0} \right) \Delta f$$

A cierta frecuencia, la densidad modal es lo suficientemente alta como para que los modos propios no supongan una variación de la respuesta frecuencial de la sala. Esa frecuencia marcará el límite superior de la zona de bajas frecuencias de la sala. A esta frecuencia se le denomina frecuencia crítica ( $f_c$ ).

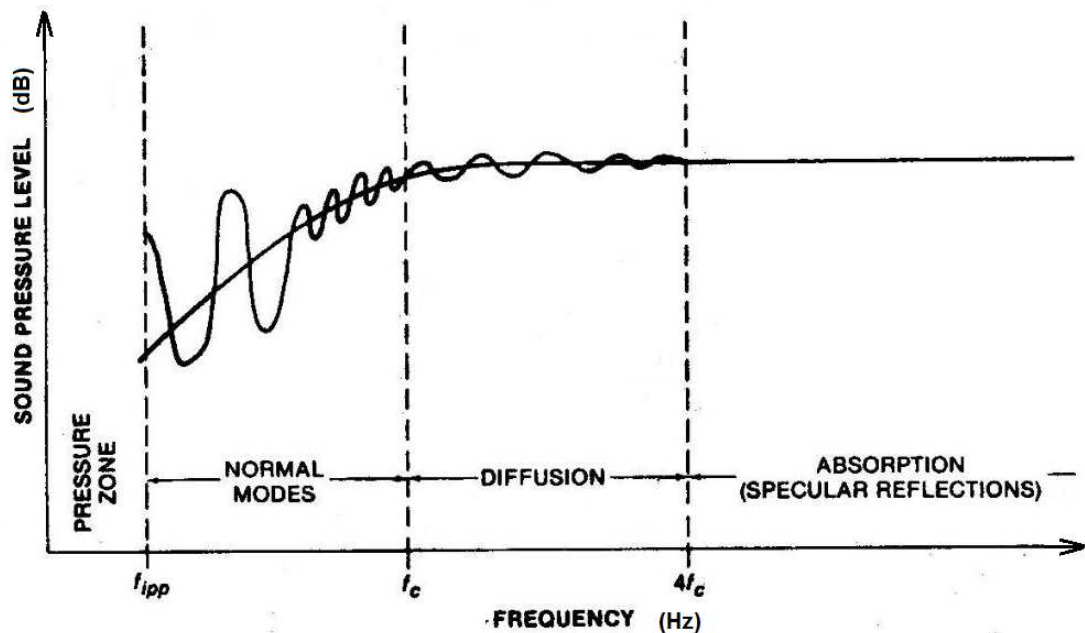


Figura 27. Representación gráfica de la frecuencia crítica por Bolt, Beranek y Newman.

R. Walker propone la siguiente ecuación para determinar la frecuencia crítica:

Esta ecuación de Walker puede aproximarse a:

$$f_c = \sqrt{\frac{T_{60}c_o^3}{2\pi V}} - \frac{Sc_o}{16V}$$

Este criterio de Walker se basa en la primera frecuencia donde existen cinco modos propios en un tercio de octava.

En 1954, Schroeder determinó la frecuencia crítica basándose en diez modos por tercio de octava. Esta frecuencia (también llamada frecuencia de Schroeder) se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$f_o = 2000\sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

En la figura 28, podemos ver la comparativa entre los distintos métodos de obtener la frecuencia crítica.

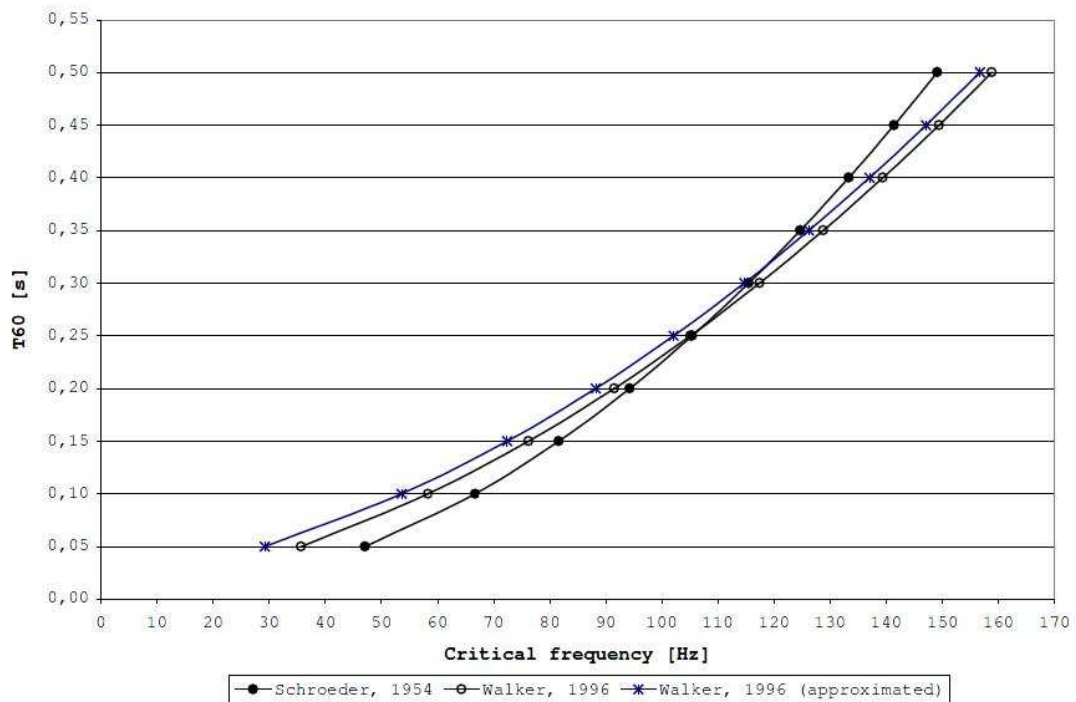


Figura 28. Comparativa de los diferentes métodos de obtención de la frecuencia crítica

#### **8.10.4 Formas de minimizar la coloración**

##### **Incrementar el factor de amortiguamiento modal**

Un método con el que contamos para reducir los efectos de los modos propios de una sala es el de aumentar el factor de amortiguamiento de todos los modos por medio de absorbentes que sean efectivos a bajas frecuencias.

Esto se suele hacer como parte del diseño general para reducir la reverberación a bajas frecuencias y evitar la pelota de graves.

Una mejor forma de controlar los problemas a bajas frecuencias es la de tratar cada frecuencia propia conflictiva de forma individual y colocar diferentes materiales absorbentes que sean efectivo en cada una de esas frecuencias.

Aumentando el factor de amortiguamiento hacemos que la amplitud máxima de la resonancia se reduzca, y que el rango de frecuencias sobre la que afecta ese modo propio se estreche.

La frecuencia que marca la frecuencia límite superior de las frecuencias a tratar viene dada por la frecuencia crítica.

Al elegir bien el ratio de la sala como veremos más adelante, existen unos ratios entre las medidas de la sala que hace que la distribución modal hace que se obtengan buenos resultados en cuanto a la coloración de la sala.

El no hacer las salas rectangulares también podemos corregir el problema de las frecuencias bajas producidas por los modos propios, en gran medida, haciendo que la sala no sea rectangular, ya que los modos propios se forman al existir reflexiones especulares a bajas frecuencias cuando la longitud de onda es comparable a la longitud de alguna superficie.

Si consideramos que las reflexiones son especulares, y tomamos una superficie límite de una sala rectangular, las fuentes imagen de esa superficie formadas por las superficies adyacentes extiende dicha superficie al infinito.

Esto hace que podamos considerar una sala rectangular como tres grupos de superficies enlazadas paralelas infinitas.

Si desviamos una de las dos superficies de uno de los tres conjuntos, haciendo así que ya no sean paralelas, por ejemplo el frontal de la sala respecto a la superficie del fondo, las fuentes imágenes propias de la superficie frontal van a variar en el ángulo, produciendo superficies imaginarias efectivas que describen una patrón en zig-zag, lo cual entorpece la formación de ondas estacionarias.

Cuando tenemos una sala no rectangular, el comportamiento modal de la sala ya no puede simplificarse a una sola ecuación o gráfica, siendo dicho análisis mucho más complicado.

La recolocación de las fuentes de sonido normalmente en los controles de grabación, los monitores de campo lejano se encuentran empotrados en la pared frontal. Teóricamente, todos los puntos pertenecientes a cualquiera de las paredes de la sala corresponde con antinodos en ondas estacionarias. El hecho de situar los monitores en esos puntos hace que se minimicen las irregularidades en la respuesta en frecuencia.

A la hora de tratar los posibles modos propios que se encuentren dentro de un recinto, se deberealizar previamente un análisis del espectro de la sala a fin de identificar la frecuencia o frecuencias exactas en las que se hallan y, de esta manera, poder actuar posteriormente sobre ellos mediante sistemas de aislamiento y acondicionamiento acústico.

Para ello se emplea lo que se conoce como un analizador de espectro. El analizador de espectro es un instrumento utilizado para convertir la onda sonora de una determinada nota musical o sonido en un diagrama visual de las frecuencias que lo constituyen. A este referente visual se le conoce como Espectrograma Acústico. Además de revelar la frecuencia fundamental de la que se compone una nota musical, el analizador de espectro también puede reflejar otra clase de parámetros como el ataque, la caída, el sostenido o la cola de dicha nota. En la actualidad se puede encontrar multitud de programas informáticos analizadores de espectro de bajo costo y fácil acceso, no solo para los profesionales de la industria, si no también para fines académicos.

## CAPITULO 3

### 9. ACONDICIONAMIENTO ACUSTICO DE VEHICULOS

Muchas personas se preguntaran:¿cómo es la calidad de sonido?, ¿a qué se refieren con calidad de sonido?, pues una breve aproximación a tal definición es cuando el automóvil es instalado, calibrado, y adecuado para que este medio se aproxime lo mas real posible a una orquesta o grupo musical, tocando en vivo dentro del vehículo, con la mejor nitidez y perfección de la reproducción.

#### 9.1 Características y elementos básicos para instalar un buen sistema de calidad de sonido.

- Parlantes tipo componente: Muchos fabricantes optan por tener una variedad de componentes de acuerdo al tamaño y diámetro de los parlantes, algunos de dos y tres vías, de 4", 5" y 6.5" acompañados de sus respectivos agudos y sus crossovers que son un tipo de ecualizadores de forma pasiva a los cuales no les conectamos ningún tipo de corriente.
- Bajos:Los bajos pueden ser de diferentes pulgadas, pero se debe tener en cuenta que el tipo de cajón acústico que debe estar diseñado de tal forma que se pueda abarcar el máximo de frecuencias bajas para ofrecer una mejor gama de sonidos graves.
- Amplificadores:Preferiblemente se puede configurar un buen sonido dividiendo los amplificadores, uno para los componentes y otro para los bajos, así se obtendrá una mejor opción de amplificación y ganancia en volumen con mejores cortes de frecuencia.
- Procesadores de señal o ecualizadores:Esta es la parte que necesita un poco más de cuidado. Al momento de elegir un equipo de control de señales o ecualizador debemos tener en cuenta el manejo de bandas de frecuencia porque este elemento tiene la característica de modificar el sonido, de acuerdo a la mejor conveniencia, y del ecualizador depende prácticamente un mejor rendimiento acústico.

En conjunto se debe usar cables de corriente y parlantes adecuados, preferiblemente un capacitor que permite acumular la energía suficiente para ayudar a mejorar el desempeño de los sonidos de bajo.

Básicamente estos son los elementos que se debe tener en cuenta para tener en el vehículo un equipo con el mejor rendimiento y sonido de calidad.



## 9.2 Electroacústica

### 9.2.1 Transductores [9, 10]

Un transductor es un dispositivo que convierte una señal de un tipo de energía en otra. La base es sencilla, se puede obtener la misma información de cualquier secuencia similar de oscilaciones, ya sean ondas sonoras (aire vibrando), vibraciones mecánicas de un sólido, corrientes y voltajes alternos en circuitos eléctricos, vibraciones de ondas electromagnéticas radiadas en el espacio en forma de ondas de radio o las marcas permanentes grabadas en un disco o una cinta magnética.

El sonido y la vibración están conectados en el sentido de que un sonido está asociado con una vibración mecánica. Muchos sonidos son causados por la vibración de sólidos o gases y el efecto de un sonido sobre un oyente es la vibración del tímpano. La onda del sonido es una forma de onda causada por una vibración. Las vibraciones mecánicas no necesitan necesariamente causar alguna onda de sonido, porque una onda de sonidos necesita un medio para vibrar, por lo que no hay transmisión del sonido en el vacío. Cuando un sonido es transmitido, los parámetros de la onda son la velocidad la longitud de onda y la frecuencia. La frecuencia y la forma de onda están determinadas por la frecuencia y la forma de onda de la vibración que causa la onda del sonido pero la velocidad y la longitud de onda son dependientes del medio que lleva la onda de sonido.

El efecto de una onda de sonido sobre un material es la vibración de ese material y de acuerdo a esta vibración cada parte del material puede ser acelerado. La aceleración esta en direcciones alternativas y no hay desplazamiento en peso del material pero una salida eléctrica puede ser obtenida desde un acelerómetro conectado al material.

Los sensores y transductores para sonido son eléctricamente de la misma forma que los sensores y transductores para aceleración y velocidad y la principal diferencia son los caminos en los cuales los sensores y transductores son usados.

El sonido en transductores de energía eléctrica es el micrófono, y los tipos de micrófonos son clasificados por el tipo de transductor que usan. Sin embargo el micrófono se usará como filtrado acústico, entradas cuyas ondas y dimensiones modifican la respuesta del sistema. Se necesitan porque cada transductor tendrá su propia respuesta que esta determinada por resonancias en los materiales. Este tipo de compensación es preferible a usar métodos eléctricos, porque los filtros acústicos pueden tener muchos efectos estafadores con menos impacto en el resto del rango de frecuencias.

Las características de un micrófono son ambas acústicas y eléctricas. Por otro lado la impedancia de un micrófono tiene una importancia considerable. Un micrófono con alta impedancia normalmente tiene una salida eléctrica bastante alta, pero la alta impedancia lo hace muy susceptible a un zumbido o

acoplamiento magnético o eléctrico. Una baja impedancia esta normalmente asociada con una salida muy baja pero el zumbido es casi despreciable.

Otro factor de importancia es si el micrófono es direccional u omnidireccional. Si el principio de operación del micrófono es por sensibilidad de presión de la onda de sonido, luego el micrófono será omnidireccional, llegando el sonido desde cualquier dirección. Si el micrófono responde a la velocidad de la onda de sonido entonces es un micrófono direccional y la sensibilidad tiene que ser medida en términos de dirección como amplitud de la onda de sonido. Los tipos de micrófono son conocidos como de presión o de velocidad, omnidireccionales o direccionales.

El tipo de transductor no necesariamente determina el principio de operación como velocidad o presión, porque la construcción acústica del micrófono es normalmente a factor más importante.

### **9.2.2 Fuentes Sonoras**

El sonido puede ser producido por distintos tipos de fuentes y procesos. Estos son:

- **Cuerpos en vibración:** Un ejemplo de este tipo de fuentes es un diapasón, el cual al ponerse en vibración genera un cierto tipo de onda sonora. Al estar la fuente vibrando, causa un desplazamiento en el aire cercano, lo que produce cambios locales en la presión de aire. Estas fluctuaciones de presión viajan en forma de una onda. Los cuerpos en vibración son las fuentes sonoras más comunes.
- **Cambios en flujos de aire:** Un ejemplo de este tipo de fuentes es lo que sucede cuando hablamos. Las cuerdas vocales se abren y cierran en forma alternada, produciendo cambios en la tasa del flujo de aire, lo que a su vez se traduce en una onda sonora. Este mismo principio se aplica a los instrumentos de viento como el clarinete u oboe. Otro ejemplo de este tipo de fuentes es una sirena, la cual produce sonido a través de una placa rotatoria bloquea en forma alternada el flujo proveniente de un compresor de aire.
- **Fuentes de calor:** Una chispa eléctrica produce un sonido, tal como lo produce un trueno. En estos casos, el sonido se produce por un brusco cambio en la temperatura, el cual produce una veloz expansión del aire circundante.
- **Flujo supersónico:** En el caso de un avión supersónico se producen ondas de choque que fuerzan al aire a viajar más rápido que la velocidad del sonido.

### 9.2.3 Localización Espacial de Fuentes

El cerebro localiza la fuente de sonido, basándose en la diferencia de nivel entre un oído y otro, y en la diferencia de tiempo (retardo) entre un oído y otro. El sonido viaja a una velocidad de 343 m/s y la separación entre oídos es de unos 20 cm, los posibles retardos llegan hasta 600  $\mu$ s. La diferencia de nivel entre los oídos, es debido principalmente a la "sombra" de la cabeza, este efecto se acusa más en altas frecuencias. Las altas frecuencias se localizan principalmente por diferencia de nivel, y las bajas por diferencia de fase (retardo). Para acabar de localizar la fuente del sonido, está el movimiento de la cabeza, que es algo instintivo y colabora de forma determinante a la ubicación de la fuente.

Si se revisa el siguiente caso de dos posibles (dos fuentes sonoras emitiendo señales coherentes), se elegiría el caso más general. Por ejemplo, los dos altavoces de un sistema estéreo emiten, en su mayor parte señal coherente, es decir, la misma señal.

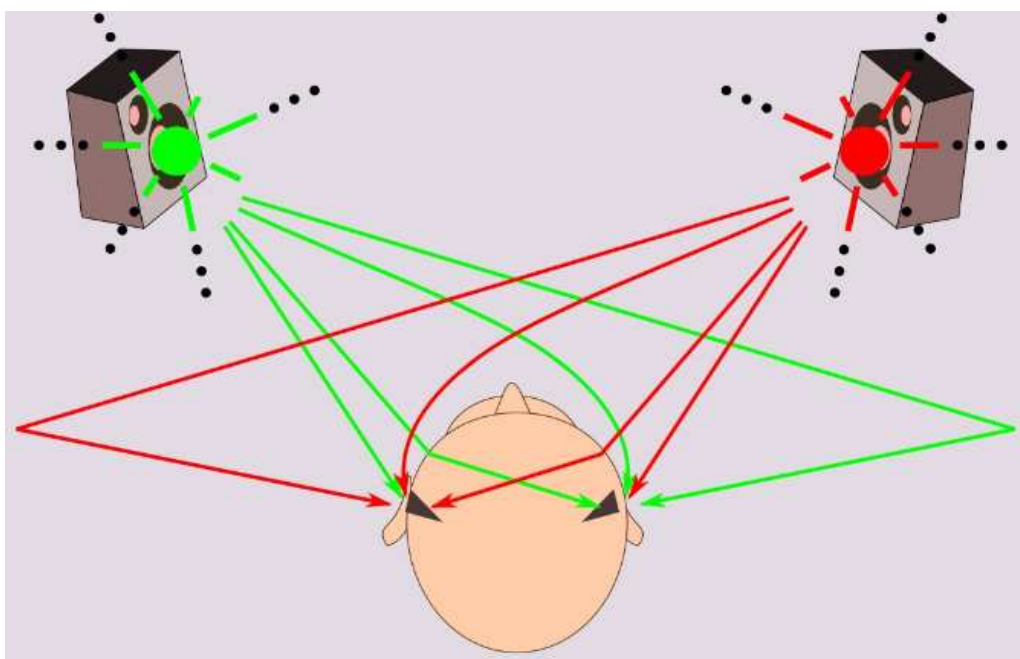


Figura 29. Sistema estéreo.

La posición estéreo por definición, es cuando los altavoces y el oyente forman un triángulo equilátero de tres metros de lado. Además se suelen elevar los altavoces unos pocos grados sobre el plano de audición.

Para simular los distintos efectos se suelen añadir retardos entre los dos altavoces, mediante la electrónica. Se puede añadir retardo a toda la señal, o sólo a unas frecuencias para crear distintos ambientes. Si el oyente se sitúa a la misma distancia de los dos altavoces, los escucharía al mismo nivel, suponiendo que la señal que entra ambos altavoces es la misma, sólo con posibles retardos. Variando solamente el retardo entre altavoces, se tendría los siguientes casos:

- a) Retardos entre 0 y 630  $\mu$ s: el oyente identifica que hay una única fuente de sonido cuya posición depende del retardo entre las dos señales. El cerebro "suma" las señales de los dos oídos para determinar la posición de la fuente. Este efecto se denomina "Localización Suma" y es la base de los efectos estereofónicos con dos altavoces.
- b) Retardos entre 1 ms y 40-50 ms: el oyente identifica una única fuente sonora que sitúa en la posición del altavoz cuya señal está llegando primero a sus oídos (el que no está retardado). Las componentes de señal que llegan a los oídos en primer lugar son tomadas en consideración y las últimas son suprimidas en el proceso de cálculo. Este es el llamado efecto del "Primer Frente de Onda", muy importante a la hora de diseñar sistemas de refuerzo sonoro mediante varios altavoces.
- c) Retardos superiores a 50 ms: el oyente identifica dos fuentes de sonido, cada una en la posición de un altavoz. La segunda fuente de sonido será denominada eco de la primera.

Los límites de los márgenes de los retardos no son invariables, ya que dependen también de las condiciones ambientales del experimento y también de la percepción subjetiva de cada individuo. Por ejemplo, para retardos entre 630  $\mu$ s y 1 ms, se tendrá "Localización Suma" o "Ley del Primer Frente de Onda" en función del sujeto y de las condiciones del experimento.

#### **9.2.4 Cadena de Audio – La Cadena Electroacústica**

Para poder registrar un sonido o tan solo escucharlo a través del recorrido de una cadena de audio, se necesita comprender cada uno de los eslabones que representan esta cadena. La construcción de esta cadena surge de la analogía de lo que sucede en la naturaleza con el sonido: es necesario en primera instancia un cuerpo vibratorio que produzca estas vibraciones dentro del rango representado por el espectro audible, un medio por donde el sonido pueda transitar y otro cuerpo que interpretara estas vibraciones.

Para lograr esta necesidad de reproducir un sonido la técnica ha aportado la siguiente solución:

En el punto inicial de la cadena como siempre se conserva el cuerpo vibratorio, sin el cuál obviamente no se podría generar sonido. Para poder captar estas vibraciones y encaminarlas dentro de la cadena de dispositivos se requiere un mecanismo que pueda transformar estas variaciones de presión en variaciones de tensión. Este mecanismo se conoce como micrófono. Sin embargo, esta transformación es insuficiente para que el oído pueda interpretar esta información por dos razones. Por una parte el oído solo es capaz de reconocer vibraciones que se representen dentro del marco que propone el espectro audible, no así corriente eléctrica. Y por otra parte esta tensión generada por el micrófono es aún muy débil como para poder estimular a otro cuerpo para poder producir vibraciones.

Esta es la razón de la existencia de otro de los componentes fundamentales de la cadena, el amplificador, que se encarga de aumentar esta tensión a un nivel necesario para poder movilizar la bobina de un parlante (otro de los elementos de la cadena) para que este vibre y mueva al aire (el medio) para poder producir nuevamente vibraciones que lleguen al oído.

En una cadena de audio ideal, estas vibraciones iniciales serían proporcionales a las vibraciones finales, donde ningún elemento que forma parte de la cadena de audio distorsiona la información inicial. Se sabe que esto no es así ya que se verifica que la relación inicial donde las variaciones de voltaje (que salen del micrófono) son proporcionales a las variaciones de presión del aire, se ven influenciadas por un índice de distorsión que surge de distintos factores. Dicho índice de distorsión se va acrecentando a medida que se interconectan dispositivos, y estas distorsiones o modificaciones en la señal son producto de un conjunto de fenómenos.

### **9.2.5 Respuesta en frecuencia**

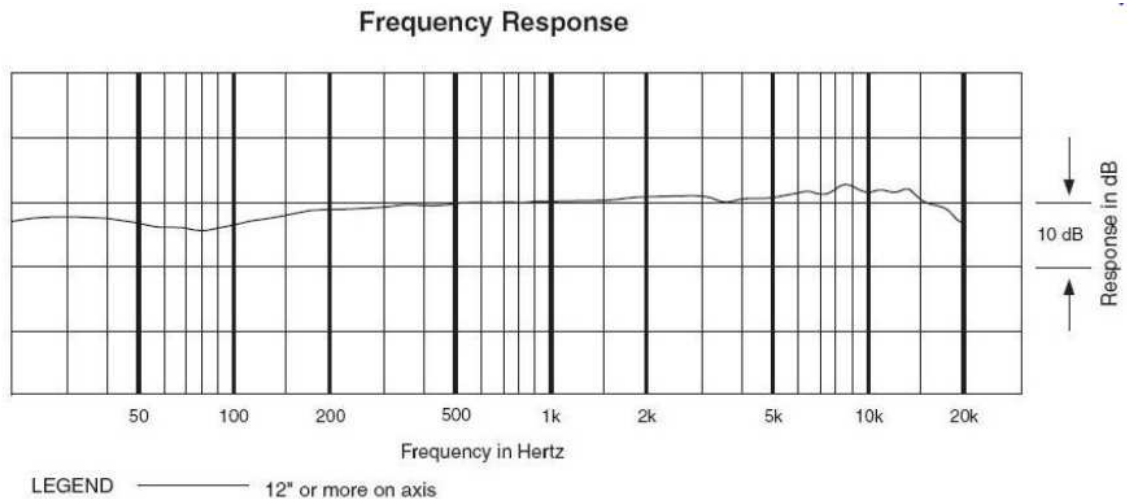
Se llama respuesta en frecuencia al comportamiento de un dispositivo de audio frente a las distintas frecuencias que componen el espectro de audio (20 a 20.000 Hz).

Todos los dispositivos de audio cumplen una función determinada, los micrófonos recogen vibraciones acústicas y las convierten en señales eléctricas (que igualmente tendrán módulo o amplitud, fase y frecuencia). Los altavoces convierten señales eléctricas en vibraciones acústicas. Todos los dispositivos manejan frecuencias de audio, pero no reaccionan igual ante todas las frecuencias.

De igual forma que el oído humano no escucha igual todas las frecuencias, los micrófonos tampoco, ni los amplificadores trabajan igual con todas igual, ni los altavoces son capaces de reproducir todas las frecuencias por igual. Esta última es la razón por la que en la mayoría de los equipos domésticos, hay por lo menos

dos altavoces distintos por caja. Uno para reproducir las frecuencias graves y otro para reproducir las frecuencias altas.

Estas variaciones de respuesta a medida que varía la frecuencia se miden en dB y se pueden representar gráficamente. La retícula sobre la que se suelen representar es la que muestra la figura 30.



**Figura 30.**Escala logarítmica en el eje horizontal (frecuencia) y lineal en el vertical (dB).

En el eje horizontal se representan las frecuencias de forma logarítmica (similar a como el oído escucha). La primera frecuencia marcada es la de 100 Hz, la marca anterior será la de 90 y la siguiente la de 200 Hz, la siguiente de 300 Hz y así hasta llegar a 1.0 kHz que son 1000 Hz. La siguiente marca será de 2000 Hz y así hasta 20.000 Hz. En este caso se representa el espectro desde 90 Hz hasta más 20.000 Hz, pero el rango de frecuencias que se tome variará según las necesidades. Si por ejemplo se representa la respuesta en frecuencia de un altavoz de graves, la gráfica deberá empezar en 20 Hz y no será necesario que se extienda a más 1.000 o 2.000 Hz.

En el eje vertical se encuentran las variaciones de nivel expresadas en dB. En esta representación cada salto es de 6 dB, pero las representaciones pueden variar según el grado de definición.

En la figura 31. Se muestra un ejemplo práctico de la respuesta en frecuencia de un altavoz genérico de frecuencias medias.

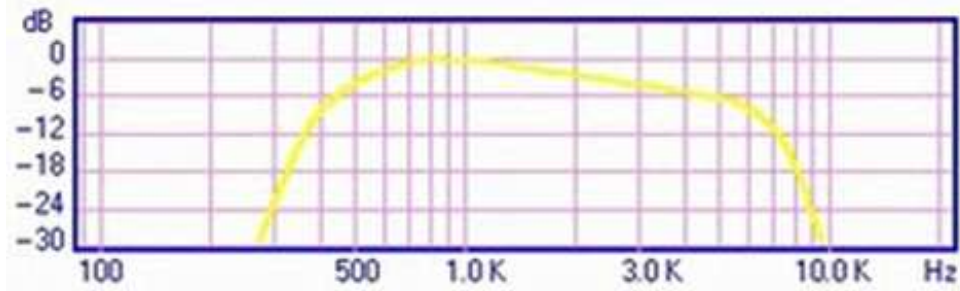


Figura 31. Gráfica de respuesta en frecuencia.

Según la figura 31, se diría que este altavoz tiene una respuesta en frecuencia de 450 Hz a 4 kHz. con una variación de  $\pm 3$ dB. Caídas de más de 10 dB en la respuesta en frecuencia equivale a decir que el aparato no trabaja en esa frecuencia. De este altavoz se conoce a través de la gráfica de respuesta en frecuencia que si se le alimenta con dos señales de igual nivel, una por ejemplo de 800 Hz y otra de 4000 Hz, la segunda tendrá un nivel de presión sonora (SPL) 6 dB menor que la señal de 800 Hz. Esto significa que reproduciendo música o cualquier otra señal, las frecuencias cercanas a 800 Hz se escucharán más que las cercanas a 3 KHz.

El caso más favorable (e imposible) de respuesta en frecuencia sería una línea recta que cubra todo el espectro. En este caso hablaríamos de respuesta en frecuencia plana. Como esto es imposible, se suele hablar de la "zona de respuesta plana", aunque realmente se trata de una aproximación. En el caso anterior, se diría que la zona de respuesta plana es la definida entre 800 y 3000 Hz, ya que en esta zona es donde es útil el altavoz.

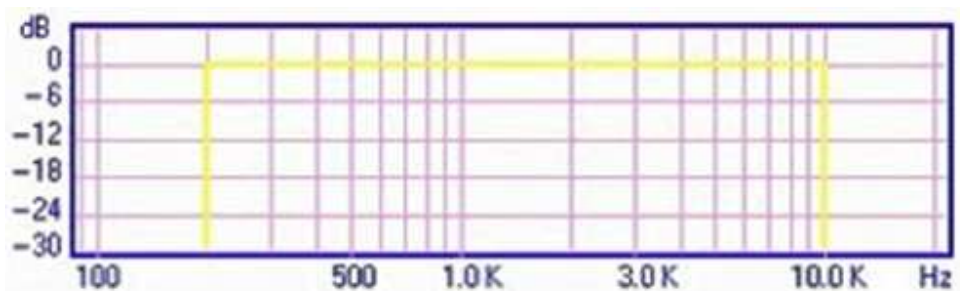


Figura 32. Zona de respuesta idealmente plana entre 200 Hz y 10 kHz.

El oído humano tiene dificultad para detectar variaciones de nivel de presión de menos de 0.3 dB. Esto significa que si se expone a una persona a un ruido (sonido continuo) y vamos variando el nivel de presión sonora (dando más volumen o menos al ruido), el sujeto notará variación cuando la diferencia de SPL antes y después se aproxime a los 0.3 dB. Esto da una idea, de cuanta variación de respuesta en frecuencia es aceptable, por ejemplo en unos altavoces.

Se ha usado hasta ahora como ejemplo un altavoz; no obstante, todos los aparatos de audio tienen su respuesta en frecuencia característica. En una cadena de sonido, donde la señal pasa por varios equipos uno tras de otro, las respuestas en frecuencia de cada aparato se van sumando para conformar la respuesta en frecuencia total del equipo completo.

A manera de ejemplo, se puede suponer que se tiene un reproductor de CD cuya señal cubre casi todo el espectro de audio (rojo). La señal de este entra en un amplificador con una respuesta en frecuencia definida (verde). La señal que sale del amplificador ataca a un sistema de altavoces con otra respuesta definida (morado), según muestra la figura 33.



Figura 33. Respuesta en frecuencia de tres sistemas. Representación superpuesta.

La respuesta en frecuencia del conjunto de aparatos será la suma en dB de todas (azul). El amplificador del ejemplo provoca una caída en la respuesta de 6 dB a 6600 Hz y el sistema de altavoces provoca 6 dB de caída a esa misma frecuencia, la respuesta total tendrá una caída de 12 dB en esa frecuencia.

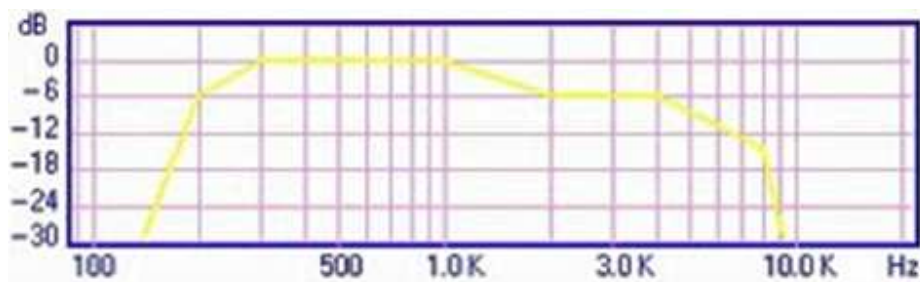


Figura 34. Respuesta en frecuencia total de los tres sistemas en cadena.



Todos los elementos por los que pasa la señal de sonido en una cadena de audio (o una cadena de música) van dejando su huella en el espectro de la señal, recortándola y limitándola. Es por esto que es importante que todos los equipos por los que atraviesa la señal de audio tengan la máxima calidad posible. En cualquier caso todos han de ser de calidad similar, ya que el elemento de peor calidad será el que pondrá el límite a la calidad del conjunto.

Hoy en día, gracias al desarrollo de la electrónica, los equipos electrónicos suelen tener una respuesta en frecuencia bastante buena. El punto crítico suele estar en los altavoces, que son elementos mecánicos que no han evolucionado tanto como la electrónica por lo que sigue siendo muy costoso fabricar buenos altavoces. Suelen ser los altavoces los que más limitan la respuesta en frecuencia del conjunto y por lo tanto la calidad del conjunto. Por este motivo en las cadenas domésticas, un parámetro de calidad a tener en cuenta son los altavoces, ya que la electrónica es muy similar en todos los casos.

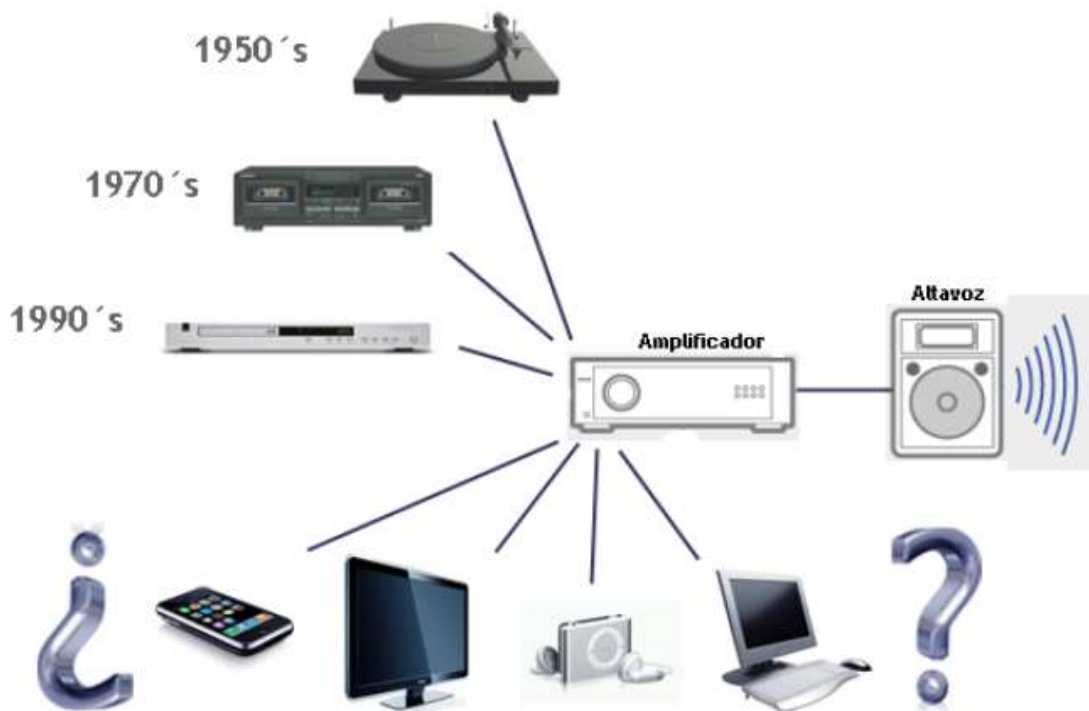
### **9.3 Parlantes**

Los parlantes se encargan de transformar la energía eléctrica proveniente del amplificador en energía acústica radiada al aire, esto es en variaciones de presión. Se dice que son transductores electro-mecánico-acústicos porque transforman la energía eléctrica en mecánica y la mecánica en acústica.

Se pueden clasificar de diversas maneras:

- Atendiendo al tipo de transductor electromecánico: magnéticos, electrodinámicos, electrostáticos, piezoeléctricos, de cinta, magneto-restrictivos, neumáticos, iónicos.
- Atendiendo al tipo de transductor mecánico-acústico: conos (radiación directa) o bocinas (radiación indirecta).
- Atendiendo al margen de frecuencias que cubren: woofers y sub-woofers (bajas frecuencias), mid range (medias frecuencias), tweeters (alta frecuencia) o banda ancha (full range).

La figura 35, se ilustra la cadena de sonido completa incluyendo la fuente, el amplificador y los parlantes.

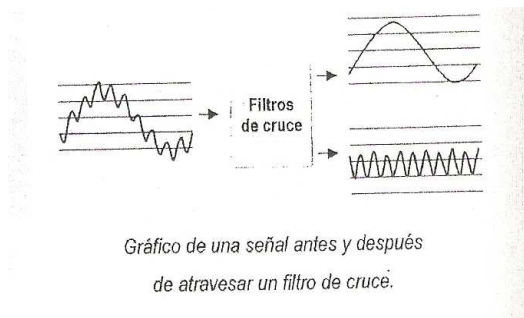


**Figura 35. Cadena de Sonido Completa: fuentes, amplificador, parlantes**

Cuando se trata de parlantes para consumo masivo en automóviles se suelen emplear configuraciones de varias vías (normalmente dos y hasta 4 vías) y de distintos tamaños según su posible ubicación en el vehículo. Esto significa que en una misma unidad se encuentran dos transductores, uno de baja y media frecuencia y otro de alta frecuencia. Entre los dos han de cubrir todas las frecuencias, con mayor o menor éxito.

Mediante unos componentes electrónicos incluidos dentro del cuerpo del parlante, denominados filtros de cruce (crossover pasivos) de primer orden, la señal procedente del amplificador se separa en dos: la señal portadora de bajas frecuencias y la portadora de las altas frecuencias. De este modo se reparte a cada transductor la señal que tiene que reproducir.

La figura 36. Se muestra como trabajar unos filtros de cruce de dos vías. Se distinguen dos formas de onda, una de baja frecuencia y otra de frecuencia mayor. Lo que se hace es filtrar la señal entrante, obteniendo a la salida de cada filtro (dos salidas) dos nuevas señales, una con las componentes de baja frecuencia y otra con las de alta frecuencia.



**Figura 36. Señal Acústica Antes y Después de atravesar un Filtro de Cruce.**

### 9.3.1 Características básicas que definen un parlante

- **Potencia.** Se entiende la potencia máxima que pueden manejar (procedente del amplificador) sin sufrir daños. Se puede indicar en potencia nominal o musical, más conocida como PMPO.
- **Impedancia nominal ( $Z$ ).** Un dato importante en cualquier parlante es el de su impedancia nominal  $Z$ . Para la mayoría de parlantes, en audio automotriz, es de  $4\Omega$ , aun cuando al medirlas con un multímetro se puede encontrar un valor de unos  $3.4\Omega$ . Esta impedancia nominal es solo un valor de referencia generalmente usado para calcular la carga presentada al amplificador. Mas, por tratarse de una bobina sometida a corriente alterna, esta impedancia es compleja, pudiendo ser capacitiva, resistiva pura o inductiva, y oscilando en magnitud entre los  $3\Omega$  y en ocasiones hasta los  $60\Omega$  y mas (dependiendo del diseño del parlante y el lugar donde se lo instale), con respecto a la frecuencia de que se trate.

A continuación en la figura 37, se presenta una curva de impedancia típica de un parlante al aire libre donde se encuentra que el valor de impedancia máximo corresponde al de la frecuencia de resonancia.

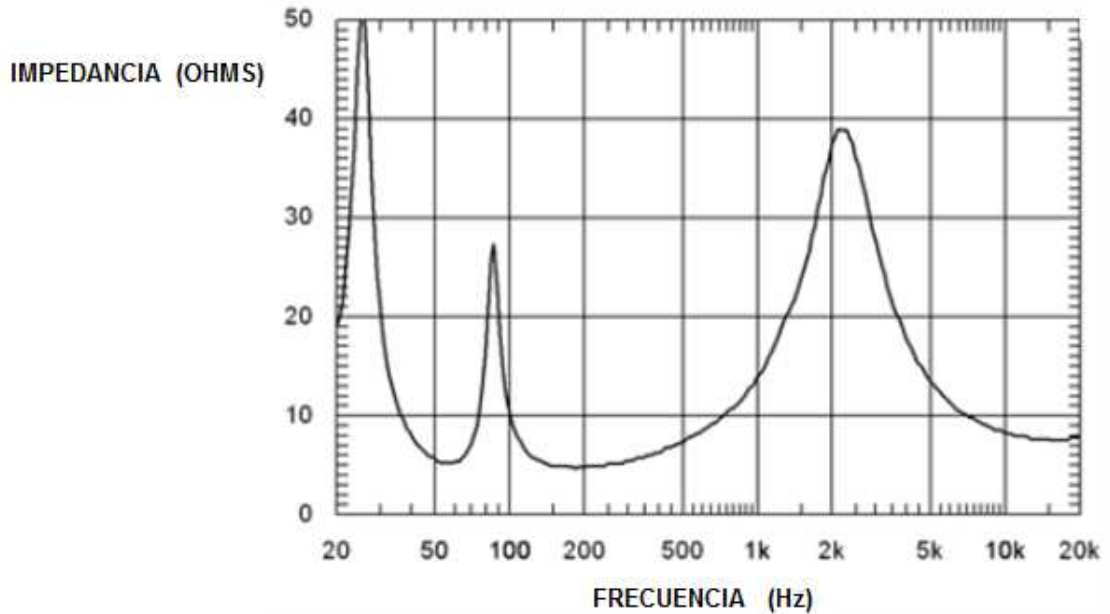


Figura 37. Curva de impedancia típica de un parlante al "aire libre".

- Ancho de Banda. Se refiere al margen de frecuencias que reproducen. El rango varía de 20 Hz a 20 KHz para obtener un sistema de tres vías.
- Sensibilidad. Es otra medida de calidad de los parlantes, es el nivel de presión sonora radiado (expresado en dB) en la dirección del eje, medido a un metro, cuando la excitación es de un vatio en las frecuencias de trabajo (se tiene que especificar). La tabla 7 califica los parlantes en función de su sensibilidad.

85 – 90 bB	90 – 95 dB	95 – 100 dB	>100 dB
Pocas prestaciones	Medias prestaciones	Altas prestaciones	Prestaciones específicas

Tabla 7. Calidad de los Parlantes respecto a Sensibilidad.

Para el ancho de banda especificado, la distorsión armónica THD suele moverse entre el 5 y el 10% en baja frecuencia y a baja potencia. A mayor potencia, mayor distorsión armónica. A frecuencias altas, distorsión armónica se reduce.

### 9.3.2 Funcionamiento y tipos de parlantes

Existen muchos tipos de parlantes en cuanto a su principio de funcionamiento. Los hay piezo-eléctricos, electrostáticos, ribbon o de listón, de plasma magnético, etc. Pero los más comúnmente usados y los que se consideran en este trabajo de grado son los electrodinámicos.

Por ejemplo, a la salida del amplificador se tiene una señal sinusoidal variando entre positivo, cero y negativo 40 veces por segundo. Al aplicarla a la bobina generará un campo magnético en esta, el cual será atraído o repelido por el imán permanente, dependiendo de la polaridad del voltaje de entrada en cada momento, logrando con esto mover el aire en la velocidad del cono, produciéndose así un sonido de 40 Hz.

A mayores magnitudes de voltaje de entrada, mayor la fuerza de atracción y repulsión en el parlante provocando mayores excursiones del cono, y por ende intensidades acústicas superiores.

La gran mayoría de los parlantes en uso en la actualidad funcionan bajo el principio electrodinámico. Lo curioso es que este principio de funcionamiento fue patentado en 1898 por Oliver Lodge y más tarde desarrollado por Rice y Kellogg, patentándolo en 1925.

En la figura 38 se muestran las partes de un parlante.

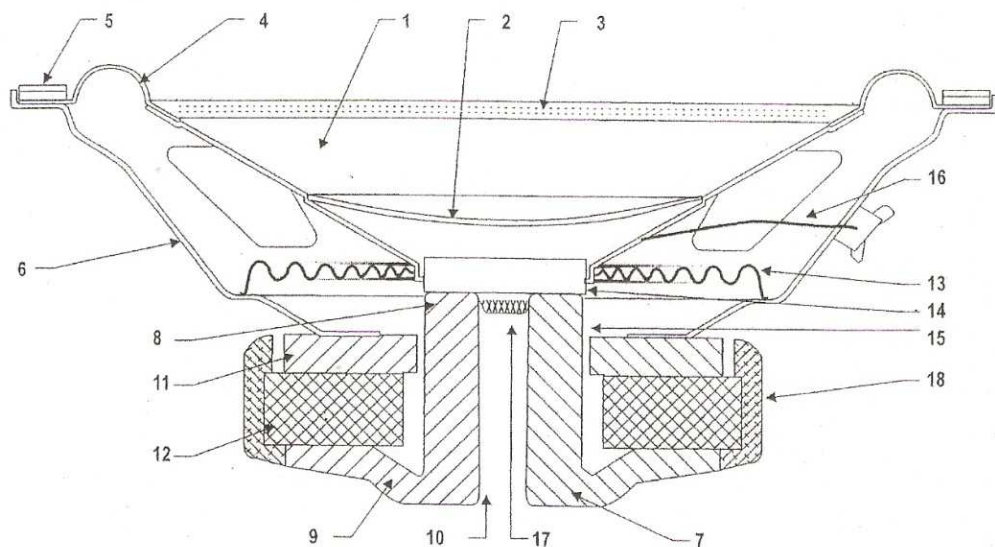


Figura 38. Partes de un Parlante.

De acuerdo a la figura 38, el cono (1) típicamente está construido de cartón, aun cuando en audio automotriz se encuentra diferentes materiales, entre otras razones, para resistir las condiciones extremas de temperatura, radiación solar, humedad, etc. La suspensión (4) le permite al cono moverse de atrás hacia adelante, mientras lo sujeta firmemente y le impide desviarse hacia los lados. Una segunda función de la suspensión es absorber y amortiguar ondas que se generan al centro y que pueden generar coloraciones indeseables. El cubre polvo (2) evita la entrada de partículas extrañas al motor del parlante que comprende a la bobina (15), formada de alambre enrollado para así formar un campo magnético al flujo de la corriente eléctrica. La araña (13) provee al cono con la fuerza de restablecimiento para llevarlo a su posición original, además de centrar la excursión de la bobina y evitar la entrada de partículas extrañas. El circuito magnético está formado por el imán permanente (12), ayudado por los platos frontal (11) y traseros (7) y (9), para llevar las líneas de fuerza a los lugares requeridos. La estructura (6) deberá ser lo suficientemente rígida para evitar deformaciones que sacarían de su alineación al sistema. Es por eso que algunos fabricantes las construyen de aluminio fundido, en su afán de hacerlas más confiables.

Los parámetros de un parlante, mejor conocidos como parámetros Thiele - Small (en honor a Neville Thiele y a Richard Small quienes trabajaron en el análisis matemático para el diseño de cajas acústicas) son los que permiten definir cuantitativamente las características propias de un parlante.

Son indispensables para el correcto cálculo de cajas acústicas, por lo que en general se encuentran en la hoja de especificaciones de cada fabricante o podrán ser solicitados directamente al mismo. Sin embargo, cuando se desea construir un sistema verdaderamente especial, la mejor opción a seguir es la de medirlos directamente en unidades propias ya que los datos de frecuencia a la que se requiera el mínimo de potencia para obtener el máximo de respuesta, por lo que la impedancia en este punto es máxima. Por supuesto, su unidad serán los Hertz.

La complianza es la cantidad de volumen de aire, que tendría la misma resistencia a ser comprimido que el cono del parlante. Su unidad, por lo tanto es de volumen, utilizándose comúnmente los pies cúbicos ( $\text{ft}^3$ ). Mientras más grande sea su valor, más suave será la suspensión del parlante puesto que es más fácil comprimir una enorme bolsa de plástico con  $10 \text{ ft}^3$  en su interior que una pequeña, con medio  $\text{ft}^3$ .

El factor Q o de magnificación acústica es un factor adimensional que define el amortiguamiento (damping) de los elementos tanto mecánicos como electromagnéticos que conforman al parlante, con la finalidad de controlar su movimiento en su frecuencia de resonancia.

Es decir, cuando cualquier objeto o construcción entra en su frecuencia de

resonancia, tiende a vibrar con una gran facilidad, tanto así, que es suficiente muy poca energía para llevarlo a su autodestrucción. Es así como en un parlante se debe controlar la vibración en la frecuencia de resonancia mediante el imán, la bobina, el entrehierro, platos polares, etc. que se encargan de controlar el movimiento del parlante.

$Q_m$  es el factor Q mecánico, conformado por todos los elementos físicos que le proveen amortiguamiento al parlante como la suspensión, la araña, etc.

La combinación de los factores Q eléctrico y Q magnético dan lugar al factor total, o  $Q_t$ , de la siguiente forma mediante la ecuación:

$$Q_t = \frac{Q_e * Q_m}{Q_e + Q_m}$$

Máximo Desplazamiento ( $X_{max}$ ): Es el desplazamiento pico lineal del cono de un parlante, tomado en cuenta desde su punto de reposo hasta su máxima excursión en un solo sentido. Normalmente se mide en milímetros.

#### **9.4 Electrónica Básica**

En el transcurso de elaboración de una instalación profesional de cualquier sistema de audio automotriz, los instaladores deben utilizar varios "perfiles" como ingenieros de diseño, carpinteros, ingenieros electrónicos, ingenieros físicos, entre otros roles. Cada una de estas profesiones requieren conocimientos específicos en áreas que son únicas por si mismas.

Para hacer una buena instalación, se debe adquirir estos conocimientos y aplicarlos en los montajes.

Algunos de los conocimientos mas importantes y necesarios sin olvidar que se está hablando de la reproducción del sonido por medio de sistemas eléctricos, son aquellos relacionados con esta ciencia y que con familiaridad podemos hablar de ohmios, voltios, amperios, capacitancias, vatios, y toda una serie de términos misteriosos para algunos pero comunes en la electrónica.

Al poder entenderlos y aplicarlos día a día en la instalación de sistemas de audio se evita demoras innecesarias e incluso mucho de los problemas existentes.

Si se observa determinadamente en cualquier libro de física o química de aquellos que se usaban a diario en las escuelas, se recordaría la conformación del

Alrededor el cual se reduce a su mínima expresión y dentro de ella se llega al átomo.

Pero si se adentra en él, se encuentran tres clases de partículas que conviven e interactúan mutuamente con un mundo aparte, ellas son:

- Protones
- Neutrones
- Electrones

Y si se recuerda aquellas películas en las que se describen los átomos como pequeños sistemas solares, se recuerda que los protones y neutrones conforman el núcleo del átomo y los electrones giran sin cesar alrededor en completa armonía.

Es así como un alambre de cobre se compone de millones de millones de átomos de cobre y algunos millones de otras sustancias, llamadas impurezas. Como consecuencia de esta interacción atómica, no es raro encontrar que algunos electrones cambian de posición entre los átomos ante algún tipo de estímulo externo. Se dice entonces que hay corriente eléctrica cuando ante un estímulo externo, se produce un movimiento de estos electrones en un sentido definido a través de un conductor material.

Y de ahí se ha derivado la electricidad y su consecuente estudio y análisis, y se llega a la electrónica que es una ciencia que estudia la aplicación de la energía eléctrica en función del bienestar del ser humano.

Sin detenerse en todo un desarrollo científico que ha traído hasta la aplicación de la electricidad y la mejora de la calidad de vida, considerando que solo ha sido utilizada poco más que cien años, se puede establecer que las tres propiedades fundamentales de la electricidad son:

- Resistencia
- Voltaje
- Corriente

Es muy importante entenderlas y diferenciarlas correctamente ya que en estas tres propiedades se basa todo lo relacionado con la electricidad y la electrónica.

#### **9.4.1 Resistencia**

Se denota como “R” y su unidad de medida es el Ohmio ( $\Omega$ ).



La resistencia en pocas palabras es la oposición al flujo de electrones o a la corriente eléctrica. La resistencia es un elemento pasivo y el más comúnmente utilizado en circuitos eléctricos.

Un circuito eléctrico es, básicamente, toda configuración de componentes debidamente interconectados a través de los cuales hay un flujo de corriente eléctrica con un fin determinado.

Ante esta situación hay varias formas de analizar un circuito eléctrico determinado y entre ellas se hace un análisis pasivo y un análisis activo, diferenciándose entre ellos porque en el primero se hace un análisis del comportamiento esperado del sistema o circuito en cuestión en condiciones de ausencia de corriente eléctrica y en el segundo se trata del mismo pero ya con flujo de corriente a través de él. Dicho de otra forma en el primero no se conecta el sistema.

De lo anterior, los circuitos compuestos por elementos tales como Resistencias, Condensadores o Capacitores y Bobinas o Inductores, se tratan con un análisis pasivo y previo, dependiendo de su interconexión.

Con el fin de dar un apoyo didáctico más comprensible para este trabajo de grado, en primera instancia se hace un análisis de circuitos resistivos puros.

#### **9.4.2 Voltaje**

Se denota como “V” y su unidad de medida es el Voltio(V). Se llama también diferencia de potencial que existe entre dos puntos. En términos fijos es la fuerza que se le imprime a los electrones para que haya un sentido de flujo.

#### **9.4.3 Corriente.**

Se denota como “I” por ser Intensidad de Corriente y su unidad de medida es el Amperio (A). La corriente esta dada por una cantidad específica de electrones que fluyen a través de un circuito o conductor. Por convención, la corriente eléctrica fluye desde el terminal positivo a negativo.

#### **9.5 Circuito en Serie**

Cuando dos elementos comparten entre si solo uno de sus terminales, se dice que se han conectado en serie.

En este caso las resistencias comparten solo uno de sus terminales de conexión. Si ahora se tuviese que conectarlas a un elemento externo, otra resistencia por ejemplo, esta configuración en conjunto se “convierte” en nueva resistencia R equivalente ( $R_{eq}$ ), la cual es la suma de los valores de cada una de las resistencias.

Esto es, si:

$R_1=2\Omega$ ,  $R_2=3\Omega$  y  $R_3=4\Omega$ , entonces

$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 = (2 + 3 + 4) \Omega = 9 \Omega$ .

Al conectar dos o tres resistencias (bombillos, parlantes, etc.) en serie, la forma de conectarlos sería:

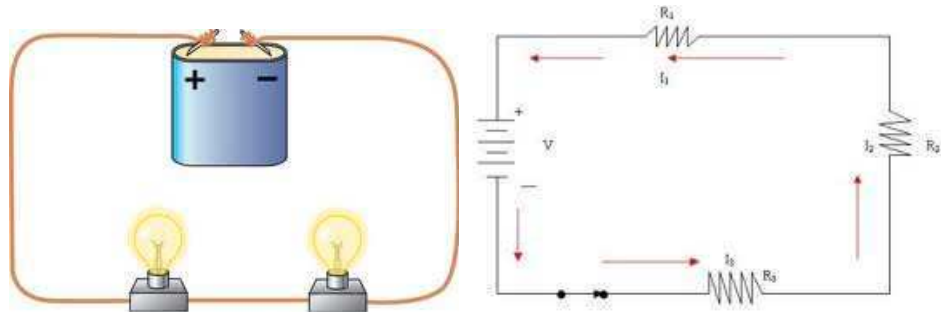


Figura 39. Circuitos en Serie.

### 9.6 Circuito en Paralelo

Cuando dos o más elementos comparten entre sí sus dos terminales, se dice que se han conectado en paralelo.

En este caso las tres resistencias comparten sus terminales de conexión.

Si ahora se tuviese que conectar a un elemento externo (otra  $R$ ), esta configuración en conjunto se “convierte” en una nueva resistencia  $R$  equivalente ( $R_{eq}$ ), la cual corresponde a la expresión matemática que se muestra en el siguiente ejemplo:

Si:  $R_1=2\Omega$ ,  $R_2=3\Omega$  y  $R_3=4\Omega$

Entonces,

$$1/R_{eq} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 = (1/2 + 1/3 + 1/4) \Omega = 13/12 \Omega.$$

Lo que implica que:

$$R_{eq} = 12/13 \Omega = 0.923 \Omega.$$

Al conectar dos o tres resistencias (bombillos, parlantes, etc.) en paralelo, la forma de conectarlos sería:

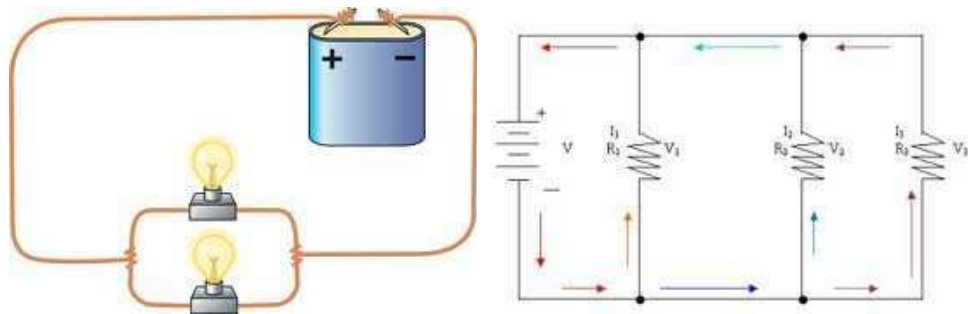


Figura 40. Circuitos en Paralelo.

### 9.7 Circuito Mixto (Serie-Paralelo)

En la figura 1.3 se muestra el caso cuando dos o más elementos se conectan en forma mixta (serie-paralelo).

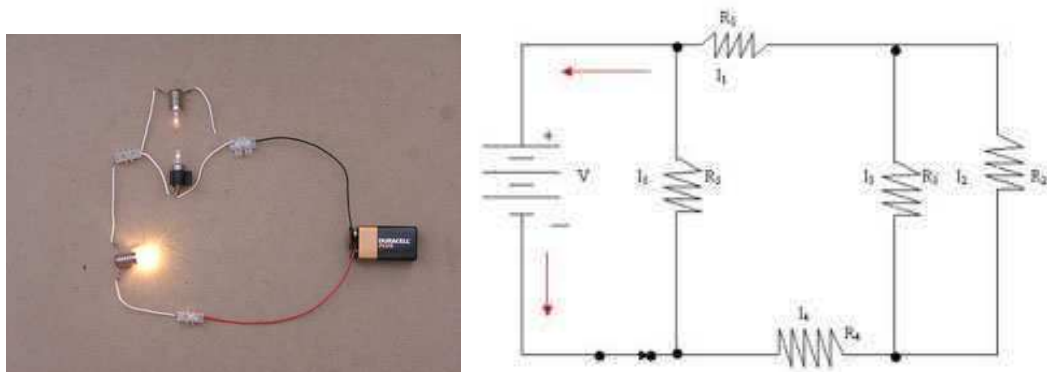


Figura 41. Circuitos Mixtos (Serie-Paralelo).

### 9.8 Ley de Ohm

Las tres propiedades básicas de la electricidad mencionadas ( $R$ ,  $V$ ,  $I$ ) se encuentran ligadas entre sí, a través de la Ley de Ohm (en honor a George Ohm 1787 - 1854) por medio de la siguiente expresión:

$$R = V / I$$

### 9.9 Ley de Watt

La Ley de James Watt o ley de potencia relaciona la Potencia (P) en Vatios (W) disipada en una Resistencia (R):

$$P = V I = V^2 / R = I^2 R$$

A continuación se muestran dos ejemplos prácticos de las leyes de Ohm y Watt:

- Según la figura 42, si en las terminales de entrada de un amplificador se mide un voltaje de 11.5 V y con un amperímetro se lee una corriente de 6.7 A, ¿cuál será la potencia que estará exigiendo dicho amplificador a la batería?, ¿cuál es la Resistencia?

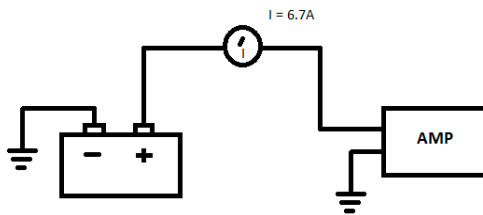


Figura 42. Potencia y Resistencia de un Amplificador.

Aplicando la Ley de Watt, de la ecuación se obtiene la potencia:

$$P = VI$$

$$P = (11.5 \text{ V})(6.7 \text{ A})$$

$$P = 77.05 \text{ W}$$

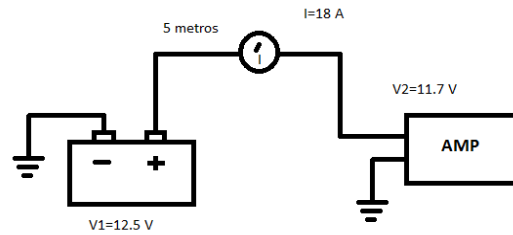
Aplicando la Ley de Ohm, de la ecuación se obtiene la Resistencia:

$$R = V / I$$

$$R = (11.5 \text{ V}) / (6.7 \text{ A})$$

$$R = 1.716 \Omega$$

- Según la figura 43 se tiene un amplificador de potencia en el baúl de un automóvil, conectado a un cable de corriente de 5 m de longitud. El voltaje en los terminales de la batería es de 12.5 V, mientras que en los terminales del amplificador es de 11.7 V. Si fluye una corriente de 18 A, ¿cuál será la resistenciapor metro del cable utilizado?



**Figura 43. Resistencia de un Cable conectado a un Amplificador.**

La diferencia de potencial entre los terminales de la batería y los del amplificador es:

$$V_{\text{batería}} - V_{\text{amp}} = 12.5 \text{ V} - 11.7 \text{ V} = 0.8 \text{ V}$$

Se calcula la Resistencia aplicando la ley de Ohm:

$$R = V / I$$

$$R = (0.8 \text{ V}) / (18 \text{ A})$$

$$R = 0.044 \Omega$$

En consecuencia la Resistencia por metro =  $0.044 \Omega / 5 \text{ m}$

$$R = 0.0089 \Omega/\text{m} \text{ (Aprox. CALIBRE 14 AWG)}$$

### 9.10 Corriente Directa

La corriente directa es aquella que no varía en el tiempo. Es la que se obtiene de la batería de un automóvil: el borne positivo, siempre será positivo y mantendrá su voltaje de 12 V aproximadamente respecto al negativo, todo el tiempo.

Es el caso de los adaptadores o rectificadores del alternador.

### 9.11 Corriente Alterna

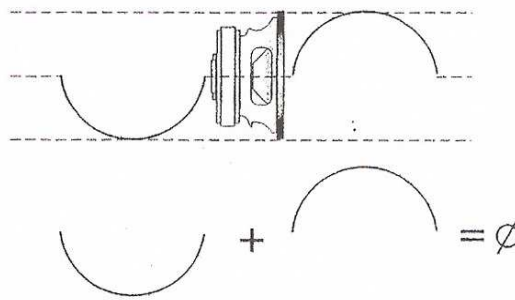
La corriente alterna es la que varía con el tiempo y con cruce por el nivel de cero. Generalmente es una señal sinusoidal y por lo tanto en ella podemos distinguir las siguientes características:

### 9.12 Cajas Acústicas

Prácticamente siempre que se observa cualquier sistema de parlantes, se encuentra que se encuentran contenidos en una caja. Esta caja, además de sostener físicamente a los parlantes, desempeña un importante papel en cuanto a la calidad de reproducción del sistema.

Suponiendo que se tiene un woofer suspendido en el aire, reproduciendo una frecuencia de 40 Hz, para este fin el cono del woofer se hallará moviéndose de adelante hacia atrás, completando ciclos completos a razón de 40 veces por segundo. Al momento de encontrarse empujando un volumen de aire justamente delante de él, simultáneamente estará generando un vacío por su parte posterior. Es así como todo el incremento de presión acústica que se está generando frente al woofer (sonido), está siendo absorbida por el vacío provocado por su parte posterior, dando como resultado un incremento total de presión: cero.

Otra forma de comprender el fenómeno anterior es como se muestra en la figura 44.



**Figura 44. Explicación del Fenómeno.**

La onda generada por el frente del woofer en un momento dado, es positiva, como se aprecia en la figura 44, mientras que por su parte posterior se genera simultáneamente otra onda idéntica, solo que desfasada 180 grados. Al poner en contacto a ambas ondas, una anula a la otra, dando como resultado la aniquilación del sonido.

Este fenómeno es cierto para frecuencias bajas, disminuyendo al incrementarse la frecuencia en cuestión, a medida que la longitud de onda se acorta y no es capaz de combinarse con la onda generada por detrás, para una barrera acústica de dimensiones determinadas.

Es así como se entenderá que de no aislar a las ondas delantera y trasera mediante una caja acústica o cualquier otro método, simplemente no será posible la reproducción de bajas frecuencias.

### 9.12.1 Primeros Diseños

Se observó que si se instalaba el woofer en una tabla lo suficientemente grande como para evitar el contacto de las ondas (por supuesto, hasta una cierta longitud de onda), se lograría una decente reproducción de bajas frecuencias.

El tamaño de dicha tabla determinaría la frecuencia mas baja reproducible.

Otro intento fue el de crear un paralelepípedo rectángulo (caja acústica común), pero destapado por su parte posterior, con lo que se lograba un mejor alcance de bajas frecuencias, utilizando las mismas dimensiones frontales.

Cabe mencionar que este tipo de caja acústica es utilizada aun en la actualidad, tanto para la reproducción de guitarras eléctricas en grupos musicales como por diseñadores de sistemas de parlantes profesionales, por su especial característica de no presentar coloraciones provocados por reflexiones dentro de la caja acústica, y de esta forma lograr un sonido sumamente limpio, al precio de no poder generar bajos muy profundos.

De hecho, algo en lo que la mayoría de los especialistas de sistemas de audio están de acuerdo, es que es en la caja acústica donde aun existe un gran terreno por donde mejorar el desempeño de un sistema, ya que el sonido que produce esta caja por si misma (coloración) es prácticamente imposible de eliminar. Técnicas especializadas se esmeran en disminuirlo y alternarlo en frecuencia, mas no eliminarlo. La caja acústica destapada por detrás no presenta este tipo de problemas. Después de todos estos intentos se encontró que si se aislaba completamente a la onda trasera de la delantera (utilizando una caja totalmente cerrada), se lograba obtener la reproducción del espectro completo, limitado solamente por el diseño específico del mismo.

Se sabe que no todos los woofers son iguales. Pero no solamente en cuanto a la potencia que manejan, su diámetro en pulgadas, el material del que está fabricado el cono, etc., sino el tipo de caja acústica dentro de la cual funcionan de la mejor manera.

Cajas acústicas hay muchas, pero básicamente cualquiera entra en alguno de los dos casos siguientes, por la forma en que trabajan sin algún tipo de caja. De hecho, la idea de estos es la de trabajar con el baul el automóvil como su caja acústica.

Para determinar el tipo de caja que se prefiere según el modelo de woofer con el que se desea trabajar, desarrollada por Richard Small:

$$EBP = Fs/Qes$$

Donde:

EBP = Efficiency Bandwidth Product.  
Fs = Frecuencias de resonancia del parlante.  
Qes = Factor Q eléctrico del parlante.

Small dice que valores menores a 50 necesitan suspensión acústica y mayores de 100 requieren cajas ventiladas. Para valores entre 50 y 100 se puede utilizar cualquiera de las dos.

A continuación se aprenderá a calcular cajas acústicas matemáticamente, obteniendo resultados muy semejantes a los que resultan al emplear un programa de computador. La cabina del automóvil tiene el efecto de incrementar importantemente la respuesta del sistema en las bajas frecuencias.

Este fenómeno comienza alrededor de la menor frecuencia donde existe un modo axial, que generalmente se encuentra entre los 60 y los 80 Hz, incrementando la energía en bajas frecuencias, aproximadamente a razón de 12 dB por octava, a medida que disminuye la frecuencia. Es de esta forma que refuerzos de hasta 20 dB en 20 Hz son comunes en la mayoría de los automóviles. Por lo mismo, a diferencia de un sistema casero, muchas veces un solo wooferde ocho pulgadas es capaz de generar todas las frecuencias bajas audibles, con la autoridad necesaria. Es por esta peculiaridad que los resultados obtenidos con los cálculos a continuación, no representarán sino una aproximación de lo que realmente sucederá dentro del vehículo.

## 9.12.2 Tipos de cajas

### 9.12.2.1 Caja Infinita

En la figura 45. Se ilustra lo que es una caja Infinita.

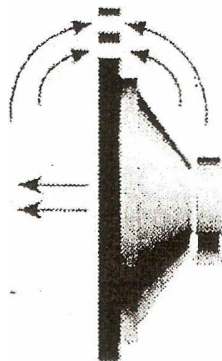


Figura 45. Caja Infinita



La caja infinita fue de lo primero que se empezó a utilizar, hasta aproximadamente principios de 1950. Al encontrarse 100% cerrada, la onda trasera se pierde en el interior de esta, mientras que la delantera se utiliza para la reproducción musical.

La característica básica que distingue a este tipo de cajas es el hecho de que el volumen de aire en el interior de esta  $V_b$ , es mayor que  $V_{as}/3$ .

Al ser este volumen tan grande en relación con la complianza del parlante, prácticamente no ejerce ningún efecto sobre el mismo.

Se comporta como un filtro pasa-altas de segundo orden (12 dB / octava), controlado básicamente por la frecuencias del sistema woofer - caja.

Este tipo de caja es la que representa el baúl de un automóvil, pero para que realmente funcione deberá sellarse completamente el interior del vehículo, lo cual resulta sumamente difícil y costoso. Mas no obstante aun lográndolo, las paredes de la caja, en lugar de ser rígidas y pesadas como recomendable en toda caja acústica, serán las blandas láminas de la carrocería del automóvil.

#### 9.12.2.2 Caja Cerrada o Suspensión Acústica

En la figura 46, se muestra la ilustración de una Caja Cerrada o Suspensión Acústica.

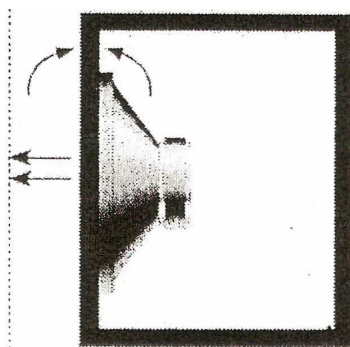


Figura 46. Caja Cerrada o Suspensión Acústica.

Este tipo de caja acústica, físicamente igual a la anterior se distingue en que el volumen de aire contenido dentro de la caja  $V_b$ , es menor que  $V_{as} / 3$ . Esto provoca que dicho volumen ejerza una gran influencia en el movimiento del cono.

La combinación de un woofer con suspensión suave y una pequeña caja acústica controlándolo, fue patentada en 1949 por Harry Oison y J, Presión. Más tarde, alrededor de 1954, Edgar Vilchur y Henry Kloss co-fundadores de Acoustic Research, crearon un sistema de parlantes basado en la suspensión acústica, conocido como el AR-3, el cual provocó un cambio mundial en la forma de diseñar sistemas de parlantes, marcando así el paso hacia la Alta Fidelidad.

Este tipo de caja acústica es el más simple de los existentes, tanto para diseñarlos como a la hora de construirlo, mas sin embargo, es empleado en muchos de los sistemas de parlantes mas finos y caros del mundo, tanto por su excelente respuesta transitoria como por su gran extensión en bajas frecuencias, entre otras características.

En este tipo de caja, el woofer se encuentra fuertemente controlado por el volumen de aire atrapado en su interior, el cual actúa como si se tratase de un resorte. El woofer literalmente expandirá el aire junto a él, en su excursión hacia afuera, provocando así un vacío en el interior de la caja. Así mismo, en su movimiento hacia adentro, comprimirá dicho aire.

Debido a que el volumen de aire en su interior siempre buscará igualar la presión barométrica de la atmósfera, este actuará como una fuerza significativamente más alta que una caja ventilada.

En el caso de una caja suspensión acústica grande (con respecto a los parámetros del woofer en cuestión), el resorte de aire limitará en menor grado el movimiento del cono, permitiéndole así la reproducción de bajos más profundos y una respuesta en frecuencia más plana (mediante valores bajos del Qtc), al costo de disminuir su manejo de potencia.

Por el contrario, una caja de menor tamaño limitará más su movimiento, sobre todo en las bajas frecuencias, reduciéndose así su capacidad de generar notas profundas, pero incrementando significativamente su manejo de potencia, con una respuesta en frecuencia cada vez menos plana.

En general, se podrá definir su desempeño promedio, en una escala del 1 al 5 (1 la calificación máxima y 5 la mínima), de la siguiente forma:

- Respuesta transitoria: 1
- Eficiencia en el rango de los 40 a los 80 Hertz: 4
- Transición a medios- graves: 1
- Distorsión a bajo volumen: 2
- Distorsión a alto volumen: 4
- Distorsión por debajo de 35 Hz a bajo volumen: 1
- Distorsión por debajo de 35 Hz a alto volumen: 2

### 9.12.2.3 Amortiguamiento (Damping)

El material a emplearse puede ser fibra de vidrio, watta, dacron u otros. La fibra de vidrio es comúnmente empleada en cajas de uso casero o profesional, mas no es tan recomendable en uso automotriz, ya que pudiera despedir pequeñas partículas (en el caso de una caja porteadada) que en ocasiones llegan a afectar a los ocupantes del vehículo.

La principal finalidad de este material es la de absorber onda estacionarias que se crean dentro de la caja acústica, evitando así coloraciones. Además, para el caso específico de una caja cerrada, un segundo objetivo es el de hacer creer al woofer que se encuentra dentro de un ambiente hasta en un 25% mayor en tamaño. Para cajas de suspensión acústica, la forma correcta de instalarlo suele ser ocupando el total del volumen interno, en forma firme pero sin comprimirse, teniendo cuidado de que no entre en contacto de ninguna manera con el movimiento del woofer. La cantidad necesaria a emplearse es un tema un poco controvertido. Se recomienda comenzar con unos 700 gr de material por cada  $\text{ft}^3$  de volumen interno y de ahí en adelante incrementando o disminuirlo a oído.

En las figuras 47 y 48 se ilustra la salida de audio a través de uno y dos puertos, respectivamente.

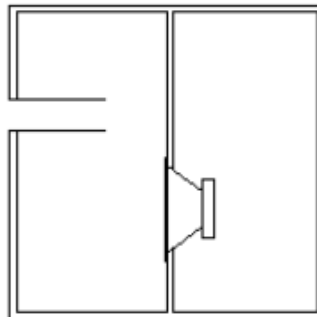


Figura 47. Salida de audio a través de un puerto.

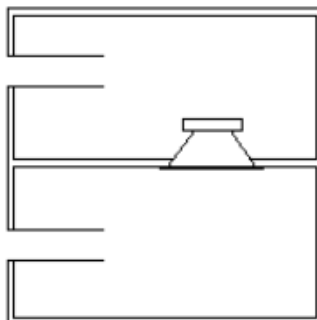


Figura 48. Salida de audio a través de dos puertos.

La incorporación del bass-reflex es identificada por la existencia de una abertura al exterior (con o sin tubo) normalmente en la parte frontal del parlante. Esta abertura o puerto de dimensiones especialmente calculadas de salida al caudal de aire en el interior de la caja, aumentando la radiación en baja frecuencia. Su denominación en español es "sistema de refuerzo de graves". Gracias al refuerzo de graves, se amplificaría hacia la zona de bajas frecuencias la respuesta en frecuencia del sistema de parlantes.

La caja ventilada o bass-reflex, se basó en una caja completamente cerrada, a excepción de un tubo de desfogue o puerto, que comunica al aire del interior con el exterior de la misma. Es también conocida como un dispositivo atrasador de ondas, en el cual se desfasa la onda trasera del woofer en tiempo 180 grados con respecto a la delantera, por lo que al combinarse ambas en el exterior, se encuentran en fase, provocando una interacción constructiva. Es por este hecho que comúnmente se les distingue por contar con una eficiencia mayor en 3 dB que su equivalente en suspensión acústica. Su comportamiento es el de un filtro pasa - altas de cuarto orden o de 24 dB por octava, por lo que su respuesta en bajos disminuye rápidamente por debajo de su punto de corte o F3.

La patente original se le atribuye a A.C. Thuras en 1932. Durante los 50's, varios autores, entre ellos Locanthi, Beranek, Novak y Van Leeuwen desarrollaron modelos matemáticos análogos a filtros pasa - altas de cuarto orden con gran detalle, hasta llegar al año de 1961, en que Neville Thiele, trabajando con un modelo simplificado de Novak, realiza el más detallado y comprensible modelo de estudio de este tipo de caja acústica, aun cuando no toma en cuenta las pérdidas inherentes a la caja.

En 1969 Nomura, en "*An Analysis of Design Conditions of a Bass Reflex Loudspeaker Enclosure for Flat Frequency Response*", describe con detalle el efecto de las diferentes pérdidas, con respecto a la respuesta de la caja. En 1973 Richard Small publica una serie de artículos relacionados con este tipo de diseños.

#### **9.12.2.4 Funcionamiento de un puerto**

El puerto en una caja de este tipo funciona bajo el principio del resonador tipo Helmholtz, en el cual, dependiendo de las dimensiones del mismo, el volumen de aire en su interior entra en resonancia a una cierta frecuencia. Su comportamiento puede asemejarse al de un resorte, de la siguiente forma.

Se puede suponer que el cono de un woofer se halla desplazándose hacia la parte interna de una caja acústica, razón por la cual el aire en su interior tiende a salir de la caja a través del puerto. En esos momentos, el cono ya irá hacia afuera también, creando de esta forma un doble vacío en el interior del cajón acústico. Para cuando el aire se desplace hacia adentro, también lo hará el cono, creando

ahora un doble incremento de presión. Es por esto que este tipo de cajas ejercen el doble de presión y control sobre el cono de un woofer que una caja cerrada.

Este efecto es máximo en la frecuencia de resonancia del puerto, punto en el cual casi la totalidad del sonido que se escucha proviene del mismo. Por lo tanto, la excursión del cono es mínima, incrementando substancialmente el manejo de potencia y disminuyendo la distorsión. Por esta razón este tipo de caja presenta muy buen manejo de potencia.

Paradójicamente, por debajo de la frecuencia de entonación, el puerto se dice que se encarga, dejando de comportarse como se describió, y dejando al woofer casi totalmente descontrolado, como si se encontrase al aire libre y por consiguiente en grave riesgo de sobreexcursión y destrucción, de ahí que debajo de esta frecuencia, su amplitud decaiga a razón de 24 dB por octava. También así mismo, deberá cuidarse de no entonar demasiado alto al puerto, ya que de ser así la probabilidad de destruirlo se incrementa notablemente. Se recomienda entonaciones siempre muy por debajo de los 50 Hz. En términos generales, mientras más grande se diseñe la caja, se obtendrán bajos más profundos con amplitudes o intensidades sonoras menores, y mientras más arriba se entone el puerto, mas se disminuye el alcance en bajas frecuencias, incrementando la amplitud. Se puede decir en forma general que su desempeño en una escala del 1 al 5, siendo 1 la máxima calificación, es de la siguiente manera:

- Respuesta transitoria: 2
- Suavidad de su respuesta en frecuencia: 1
- Eficiencia en el rango de los 40 a los 80 Hertz: 2
- Transición a medios - graves: 1
- Distorsión a bajo volumen: 1
- Distorsión a alto volumen: 2
- Distorsión por debajo de 35 Hertz a bajo volumen: 3
- Distorsión por debajo de 35 Hertz a alto volumen: 4

En el Diseño Las variables que se usan son:

$V_b$  = Volumen interno del cajón acústico, descontando el volumen ocupado tanto por el woofer como el puerto y refuerzos internos, expresando en  $ft^3$ .

$F_b$  = Frecuencia de entonación

$R$  = Radio del puerto expresado en pulgadas.

$L$  = Longitud del puerto, expresado en pulgadas, para un diámetro dado.

Las formulas utilizadas se muestran a continuación y estas arrojarán el volumen y frecuencia de entonación para la respuesta en frecuencia más plana posible, equivalente a un filtro Butterworth de cuarto orden. Generalmente esto significará un volumen demasiado grande para ser realizable en el baúl de un automóvil, por lo que, en los ejemplos, se verá cómo recalcular para situaciones más reales.

### 9.12.2.5 Puertos

El diámetro a utilizar es muy importante, ya que de ser muy pequeño, la velocidad del aire a la salida podría ser demasiado alta y provocar chiflidos y turbulencias. Un buen punto de partida para este, es que sea de por lo menos un tercio del diámetro del woofer utilizado. Además es muy recomendable que el puerto se encuentre redondeado, de preferencia en ambos extremos, para así crear una transición más suave a la atmosfera y disminuir aun más la presencia de turbulencias.

No esta por demás mencionar que cuando se refiere al diámetro del puerto, se está hablando de su diámetro interno.

Cada vez que se incremente el diámetro, también lo hará la longitud necesaria, para un cierto volumen y frecuencia de entonación escogidos. Es por esto que en ocasiones resulta más práctico instalar varios puertos de diámetro pequeño en lugar de uno solo grande.

En estos casos, se debe proceder de la manera siguiente:

- Se usará como el valor del radio, en la formula normal para el cálculo de la longitud, el nuevo radio equivalente. Este se obtiene de las formulas a continuación, dependiendo del número de puertos de que se trate.

$$R \text{ Total} = R_f + R_{tt}$$

$$R_{\text{Total}} = (R_1^2 + R_t + R_3^2)^{0.5}$$

$$R \text{ Total} = (R_1^2 + R_t + R_3^2 + R_4^2)^{0.5}$$

- La longitud final que se obtenga (generalmente muy larga) se dividirá entre el número de puertos utilizados, correspondiendo este dato a la longitud de cada uno de ellos.

En el caso de que se requieran construir puertos cuadrados o de cualquier otra forma, simplemente se deberá obtener su área final y sustituirse en la fórmula del área de un circuito, como se muestra a continuación:

$$A = P_i R^2$$

y despejando ....

$$R = (A / P_i)^{0.5}$$

Como ya se mencionó, tanto el woofer como el puerto contribuyen al sonido final del sistema, por lo que no deberán obstruirse de ninguna manera. Sin embargo, por tratarse de frecuencias bajas, estas son adimensionales, por lo que no necesariamente tendrán que estar dirigidas directamente hacia las personas. De hecho, el puerto podrá instalarse en cualquier cara del cajón acústico, inclusive en la opuesta al woofer.

### **Ejemplo**

Diseñar una caja acústica, bass - réflex, para un woofer de diez pulgadas de diámetro, y de  $4\Omega$ .

Para el modelo se usará un puerto de 3 pulgadas de diámetro:

#### **Parametros Thiele - Small :**

$$F_s = 26.8 \text{ Hz}$$

$$V_{as} = 2.86 \text{ ft}$$

$$Q_{ts} = 0.36$$

$$Q_{es} = 0.38$$

El factor EBP resultante es:

$$EBP = 26.8 \text{ Hz} \cdot 0.38$$

$$EBP = 10.184$$

Por lo que debe trabajar correctamente en una caja ventilada.

Resolviendo, se tiene que:

$$Vb = (15) (2.86) (0.36)^{2.87}$$

$$Vb = 2.28\text{ft}^3$$

$$Fb = (0.42)(26.8)/0.36^{0.9}$$

$$Fb = 28.23\text{Hz}$$

$$F3 = (26.8) \left[ \sqrt{\left(\frac{2.86}{2.28}\right)} \right]$$

Lo que se debería construir es una caja acústica cuyo volumen interno, después de descontar al woofer, puerto y refuerzos internos, sea de  $2.28 \text{ ft}^3$ , entonado (el puerto) a  $28.23 \text{ Hz}$ , obteniéndose un punto F3 de  $30 \text{ Hz}$  (excelente), con prácticamente nada de Ripple (tan solo  $0.01 \text{ dB}$ ), y requiriéndose un puerto de 3 pulgadas de diámetro por 8.3 de largo.

Como se había mencionado, este diseño corresponde a una caja acústica cuya respuesta en frecuencia es lo mas plana y profunda posible. Aun cuando es muy bueno, probablemente sea poco práctico. Así que el paso siguiente consiste en rediseñar para otros valores más favorables (en cuanto a tamaño, por ejemplo), escogiendo otra frecuencia de entonación, que probablemente se acomode más al gusto del cliente (mientras más se la eleve, sin llegar a extremos, más apoyo se tendrá alrededor de dicha frecuencia).

Así que, por ejemplo, si se escoje un volumen interno de  $1.2 \text{ ft}^3$ , entonado a  $40 \text{ Hz}$ , con el mismo puerto de 3 pulgadas de diámetro, se tendría:

$$F3 = (26.8) \left[ \sqrt{\frac{2.86}{1.2}} \right]$$

$$F3 = 41.4 \text{ Hz}$$

$$\text{Ripple} = 20 \log \left[ (2.6)(0.36) \left( \left[ \frac{2.86^{0.35}}{1.2} \right] \right) \right]$$

$$\text{Ripple: } 20 \log (1.2685)$$

$$\text{Ripple} = 2.06 \text{ Db}$$

$$L = \left( \frac{(8466.435)(1.5)}{(1.2)(Fb40^2)} \right)$$

$$L = 7.7'' \text{ (Pulgadas)}$$



Así se obtendrá que con esta pequeña nueva caja de apenas  $1.2 \text{ ft}^3$  de volumen interno y una frecuencia de entonación de 40 Hz, el punto F3 sube a 41.4 Hz, aun excelente. El Ripple se incrementa a 2 dB, totalmente dentro del rango razonable incluso para audífonos. En este caso el puerto de entonación tendrá que ostentar una longitud de 7.7 pulgadas, conservando su diámetro interno de 3 pulgadas.

#### 9.12.2.6 Radiadores Pasivos

En alguna ocasión quizá se han encontrado sistemas de parlantes utilizando los llamados radiadores pasivos. Estos son un tipo de woofer con la característica de no estar conectados al sistema. De hecho, no cuentan con imán, bobina o cualquier otra cosa. Simplemente un cono nada más. Estos diseños no son otra cosa que una variación de un sistema ventilado, en los cuales, dicho radiador pasivo realiza las funciones del puerto. En lugar de llevar un diámetro y longitud determinados, se entonan con un área y peso específicos.

#### 9.12.2.7 Construcción

En la figura 49 se muestra la construcción de los Radiadores Pasivos.

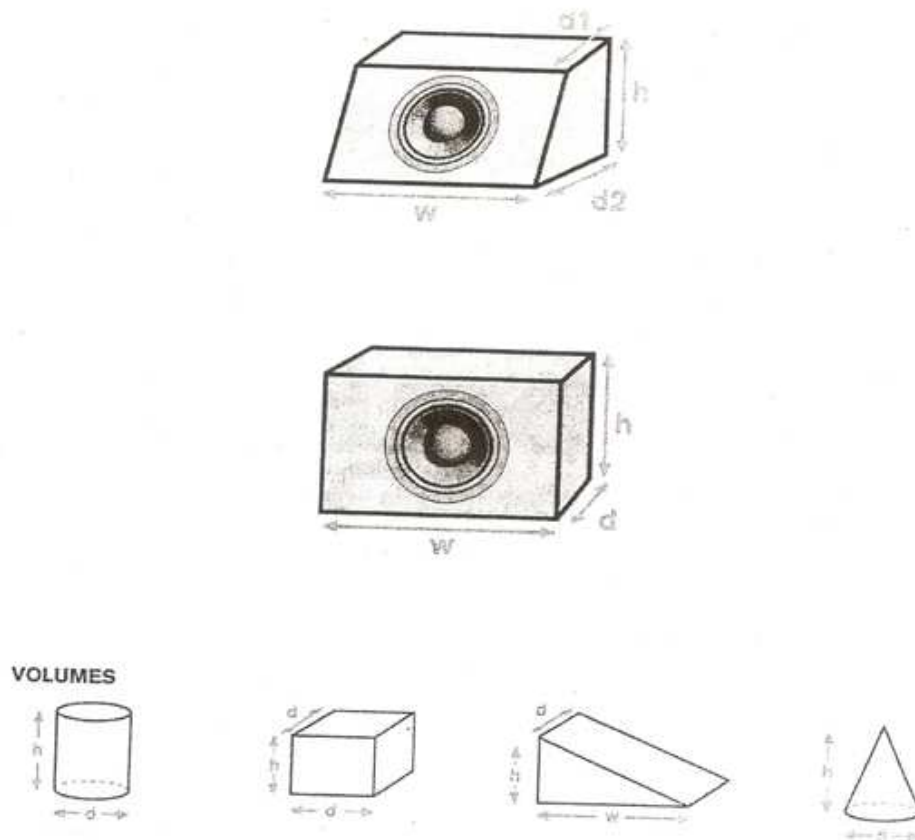


Figura 49. Construcción de Radiadores Pasivos.

En la figura 50, se muestra la última tecnología en cajones empíricos para woofers de diferente diámetro utilizados en caraudio a nivel nacional e internacional para categorías de Open Show como en la IASCA y SPL (Batalla eléctrica) en DB DRAG.

**Figura 50. Nuevos cajones con sus medidas para woofers de diferente diámetro**

En la figura 51, se muestra la conexión al amplificador.

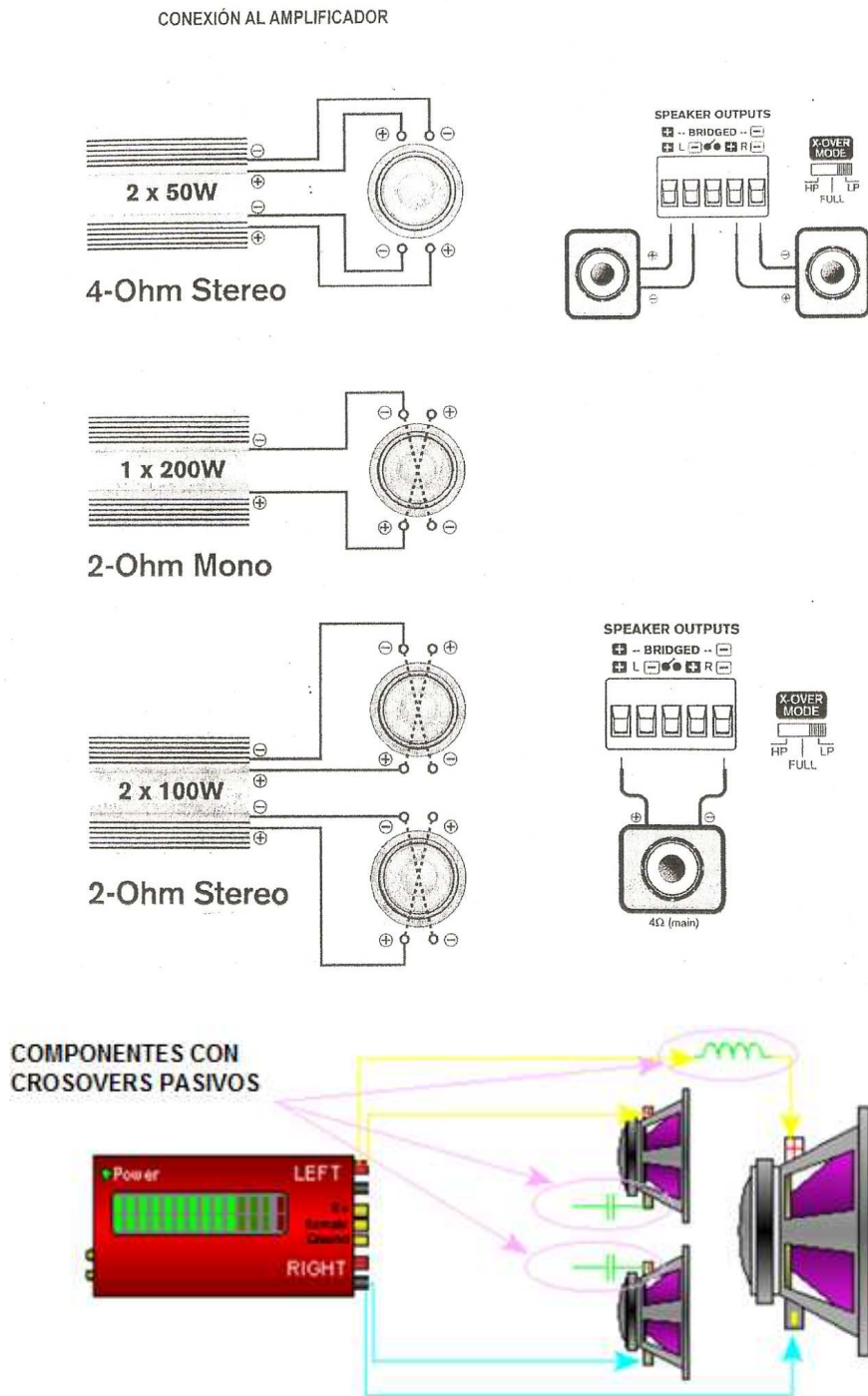


Figura 51. Conexión al Amplificador.

### 9.13 PROCESO PARA LA INSTALACIÓN DE AUDIO EN UN VEHÍCULO

- De acuerdo al tipo de vehículo se analiza y estudia como se puede adecuarlo para una buena acústica con sus respectivos elementos de audio, según la necesidad y presupuesto del cliente.
- Teniendo el vehículo a disposición, se toman las medidas pertinentes para la adecuación e instalación de los elementos de audio.



Figura 52. Posiciones del radio y parlantes como twiters y medios dentro de un vehículo.

- Teniendo las medidas de área y volumen de cada lugar en el que irán instalados los elementos de audio, se procede a estudiar las clases de equipos, parlantes, cables, protecciones, amplificadores, etc. que se instalarán en el carro.
- Con cuidado especial se procede a desensamblar partes del vehículo, como las consolas donde vienen por lo general los estéreos, siguiendo con las carteras de las puertas, pastas laterales, cojines y alfombra.
- Se toman de nuevo medidas para realizar los empotres y la lubricación de cajones que va a llevar, haciendo bosquejos, maquetas y negativos a medidas reales para así proceder a la fabricación de los mismos.
- En la fabricación de los empotres y cajas acústicas, los materiales a emplear son: materiales del futuro (MDF), tornillería, pegantes, materiales, sintéticos, pinturas, resinas, fibra de vidrio, telas, grapas, thinner, silicona, empaques, catalizadores, brochas, destornilladores, taladros, caladora, lijadora, ruteadora, secadora, etc.

- Para el diseño de estos empotes y cajas acústicas, se procede a estudiar las frecuencias acordes agradables dentro de rango de espectro acústico del oído humano para que de esta forma se deleite los sentidos de los oyentes como especialistas en audio ofreciéndoles potencia y calidad para hacer realidad el entorno acústico óptimo en el vehículo.
- Procediendo así se tiene en cuenta factores de seguridad del vehículo, desconectando así el borne negativo de la batería.
- Teniendo bien diferenciados los cables, se sabe cuales son los utilizados para la corriente, (positivo), y masa (negativo).
- Teniendo bien diferenciados los cables, sabemos cuales son los utilizados para la corriente, (positivo), masa (negativo).
- En el radio se tiene una serie de cables (llamada “pacha”), en la cual se encuentran: las entradas y las salidas de corriente, la masa, el remoto y las potencias.
- La serie de cables o pacha se encuentra codificado de la siguiente manera, como se muestra en la tabla 8.

• Amarillo	• Corriente (+)
• Rojo	• Corriente (+)
• Negro	• Tierra, masa o negativo (-)
• Azul blanco	• Automático o remoto
• Naranja blanco	• Iluminación (+)
• Blanco (+)	• Parlantes
• Blanco negro (-)	• Parlantes
• Gris (+)	• Parlantes
• Gris negro (-)	• Parlantes
• Verde (+)	• Parlantes
• Verde negro (-)	• Parlantes
• Violeta (+)	• Parlantes
• Violeta negro (-)	• Parlantes

**Tabla 8. Código de colores usado en los cables del conector de los radios.**

- También se encuentran salidas de audio sin amplificar como:

Frontal izquierdo y derecho (Front L – R).

Trasero izquierdo y derecho (Rear L – R)

Subwoofer.



**Figura 53. Radio con sus conectores.**

- En general como los equipos de sonido en un vehículo, para la instalación de más sonido proporcionan amplificación interna de entre 15W x 4 hasta 60W x 4.
- Por lo anterior, debido a que lo que interesa especialmente es utilizar amplificadores de mayor potencia, lo que viene por defecto en el vehículo no se utiliza.
- Se procede a sondear el cableado y los dispositivos de seguridad que van a utilizarse en los amplificadores.
- Posteriormente, el sondeo del cableado va desde el borne positivo de la batería haciendo un corte de máximo 45 cm del mismo, para de esta manera colocar una portafusiblera con su determinado fusible, siguiendo con el cable hasta llegar al terminal positivo del amplificador principal o planta (encargada de elevar uniformemente la potencia sin distorsión de todos los dispositivos de audio conectados a ella).

- El terminal negativo de la planta debe ir con el mismo calibre del cable que se ha puesto en el terminal positivo a la lamina del carro sujetándolo con un tornillo adecuado en una zona libre de oxido y pintura de la carrocería (ya que se sabe que la lamina del vehículo corresponde al terminal negativo de la batería).
- Teniendo en cuenta que ya se había mencionado sobre los cables que posee el equipo de sonido del vehículo, se procede a seleccionar el cable azul blanco (remoto) y seguidamente se sondea dicho cable hasta el amplificador. Ese cable es el remoto que envía la señal de encendido del equipo de sonido con el fin de que la planta o amplificador también se encienda.
- En la parte trasera del equipo se encuentran las salidas de audio sin amplificar. Por lo tanto, usando cable con terminales RCA, igualmente se envían las señales a la planta con el fin de que sean amplificadas.
- Una vez se tengan los empotres y las cajas acústicas, se procede a instalarlas en el vehículo.
- Desde la planta se tienen las salidas ya amplificadas para proceder a conectarlas a los respectivos terminales de audio (altavoces) tras previo estudio del cableado a utilizar.
- Después de conectar los altavoces a la planta, se procede a calibrar la planta teniendo en cuenta los manuales del fabricante en cuestión de acoples de impedancia, potencia y frecuencia a utilizar. La experiencia y el conocimiento técnico es muy importante en este proceso.
- Luego de hacer una inspección de seguridad, se debe conectar el borne negativo de la batería.
- Se debe empezar a calibrar el equipo de sonido del vehículo.
- El equipo de sonido del vehículo posee un ecualizador interno con cortes de frecuencia para cada señal (bajas, medias, altas). La calibración se puede realizar a gusto del cliente según las frecuencias que desee acentuar.
- Al escuchar el sonido del equipo, se procede manualmente con la calibración final del mismo, ajustando los parámetros al gusto del cliente.
- Tras haber realizado responsablemente los pasos anteriores, se ha dado por terminado la instalación de sonido al vehículo.

En la figura 54, 55 y 56 se muestran distintos Montajes de Sonido en un Vehículo realizados en Montoya CarAudio y participaciones en eventos nacionales.



Figura 53. Montoya CarAudio.



Figura 54. Montaje de Sonido en un Vehículo.





Figura 55. Participación en un evento nacional de CarAudio.



Figura 56. Modificaciones en un vehículo de Car Audio.





Figura 57. Modificaciones en un vehículo de Car Audio.



Figura 58 Probando el desempeño del sonido sobre ruedas.

## CAPITULO 4

### 9. CONCLUSIONES

En el desarrollo de la práctica del acondicionamiento acústico de vehículos para competencias de sonidos sobre ruedas se identifica la necesidad de estudios que a profundidad analicen los efectos de la distribución de cada componente que constituye un todo en cada diseño ejecutado, esto es la conciliación entre un concepto de fundamento científico que es la Ingeniería física y una practica empírica. Propuesta que se desarrolló a lo largo de este trabajo y que determina la relevancia de la puesta en ejercicio de los fundamentos acústicos y las herramientas apropiadas para alcanzar la mayor eficiencia y los mejores resultados en una competencia de alto nivel.

Como lo demuestra el capítulo de antecedentes de este trabajo, existe una severa carencia de estudios relacionados con acústica en el país aun mas de estudios que relacionen la acústica con el acondicionamientos de vehículos, en contraste opuesto a la demanda y oferta del servicio que también fue demostrado, esto puede deberse a la falta de instituciones y programas dedicados a la formación en el área de acústica, por lo que se propone como recomendación promover el desarrollo de políticas educativas que favorezcan la integración de oficios y la profesionalización de estos a través de formación técnica, tecnológica o profesional en el área de ingeniería acústica.

La difusión del conocimiento a la comunidad de Popayán que resultará beneficiada con respecto al conocimiento que va a adquirir en todo lo relacionado con la acústica en recintos cerrados (caso de estudio sonido sobre ruedas), y que además opcionalmente podrá seguir los lineamientos en cuanto a la instalación, arreglo, mantenimiento, configuración y puesta en funcionamiento de los equipos de sonido sobre ruedas.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “*Creación de una empresa dedicada a la venta e instalación de sonido y accesorios para automóviles*”. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 2009. Documento PDF disponible en:  
<http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/economia/tesis100.pdf>
- [2] “Glosario de Car Audio”. Documento PDF disponible en:  
<http://www.beezarautz.com/Foticos/manuales/capitulo40.pdf>
- [3] “dB Drag Racing *Modelo Lineal Secuencial*”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://www.dbdragcolombia.com/>
- [4] “*Manual Básico de Identidad Visual Corporativa Suning Car-Audio*”. Universidad Autónoma de Occidente. Cali. 2007. Documento PDF disponible en:  
<http://bdigital.uao.edu.co:8080/bitstream/10614/514/3/T0003305.pdf>
- [5] “Propagación del sonido”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/prp.html>
- [6] “Compresión y Rarefacción”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://www.angelfire.com/empire/seigfrid/Compresionesyrarefacciones.html>
- [7] “Acústica de Recintos”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-i>
- [8] “Música y Física II: La Acústica de Salas”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://musicacanedo.blogspot.com/2010/04/musica-y-fisica-ii-la-acustica-de-salas.html>
- [9] “Transductores”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://www.ehu.es/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html>
- [10] “Transductores de sonido”, 2011. Página Web disponible en:  
<http://www.ehu.es/acustica/espanol/electricidad/transes/transes.html>

**AN ANALYSIS OF DESING CONDITIONS OF A BASS REFLEX LOUDSPEAKER ENCLOUSER FOR FLAT FREQUENCY RESPONSE**

[\[HTTP://FBASONIDO1.BLOGSPOT.COM/2011/06/UNLP-FBA-DAA-SONIDO-I-APUNTES-DE.HTML\]](http://fbasonido1.blogspot.com/2011/06/unlp-fba-daa-sonido-i-apuntes-de.html)

