UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas

FIE
Facultad de
Ingeniería Eléctrica

Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica

TRABAJO DE DIPLOMA

Actualización de actividades de la asignatura Sistemas de Audio

Autor: Denis Gonzáles La Rosa

Tutores: Dr. C. Miguel Mendoza Reyes

Ing. Jaime Pérez Brooks

Santa Clara, junio 2020

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual

Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas como parte de la culminación de los estudios de la especialidad de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la autorización de la Universidad.

_____

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

_____ _____

Firma del Tutor. Firma del Jefe de Departamento.

_____

Firma del Responsable de

Información Científica-Técnica.

PENSAMIENTO

Bienaventurado el hombre que halla la sabiduría, y que obtiene la inteligencia.

Salomón.

DEDICATORIA

A Jesús, por ser mi Padre por excelencia, el mejor amigo, confidente y la roca fuerte cuando no tenía esperanza, mi razón de vivir, por enseñarme que no es de los fuertes la carrera ni de los que corren sino de su bondad y amor para conmigo.

AGRADECIMIENTOS

A Jesús, por conocerle y enseñarme la grandeza de la humildad, me dio vida abundante cuando no tenía ninguna. Aprendí que, mayor precio tiene su sabiduría que mi inteligencia.

A mis pastores Osvaldo y Tania, a los cuales admiro, gracias porque nunca voy a olvidar lo que hicieron por mí.

A mis padres, hermano, abuelas y mi tía Mirian porque de una forma u otra me apoyaron y sé que se alegran grandemente con esta victoria que también es de ellos.

A mis amigos Carlos Manuel y Yaniel, quienes me apoyaron incondicionalmente y estuvieron conmigo en todo momento, tienen un lugar especial en mi corazón.

A todos los profesores incluyendo a mi tutor por compartir sus conocimientos conmigo en virtud de formarme profesionalmente.

A mi "bonita" esa persona que Dios me regaló para compartir mi vida, gracias por ser ese regalo inmerecido que hoy puedo disfrutar, te amo mucho.

RESUMEN

Este trabajo se realizó motivado por la necesidad de realizar la actualización de los contenidos que se imparten en la asignatura optativa Sistemas de Audio que se imparte en tercer año de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica. Se acopió gran cantidad de información diversa para elaborar ejercicios que aportan al cumplimiento de los objetivos planteados en el plan de estudio de la asignatura. Se presenta como resultado un conjunto de ejercicios para ser resueltos en clases prácticas, laboratorios simulados y reales que sirven de apoyo al desarrollo de varios de los temas de la asignatura.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO i

DEDICATORIA ii

AGRADECIMIENTOS iii

RESUMEN iv

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1. Caracterización y análisis del sonido 3

1.1 Introducción al Sonido. 4

1.1.1 Variables físicas del sonido. 5

1.1.2 Características objetivas y subjetivas del sonido. 9

1.1.3 Medida del sonido 13

1.1.4 Filtros para análisis frecuencial 14

1.1.5 El sonómetro integrador 14

1.2 Percepción del sonido en función de la frecuencia 15

1.2.1 Relaciones entre niveles de presión sonora (SPL) y frecuencia (f) 15

1.2.2 Enmascaramiento del sonido 17

1.3 Generación y propagación de sonidos 19

1.3.1 Velocidad 20

1.3.2 Presión 21

1.3.3 Intensidad 22

1.3.4 Potencia 23

1.3.5 Propagación del sonido en el espacio libre 24

1.3.6 Propagación del sonido en un recinto cerrado 26

1.3.7 Sonido reflejado 26

1.4 Parámetros Acústicos 27

1.4.1 Ponderación frecuencial 27
1.4.2 Ponderación temporal 28
1.5 Parámetros espectrales 29
1.6 Parámetros psicoacústicos 29
1.6.1 Escalas de frecuencia 30
1.6.2 Pitch 32
1.7 Loudness o sonoridad 33
1.7.1 Fundamentos del Loudness de Zwicker 35
1.7.2 Cálculo del *Loudness* de Zwicker (ISO 532-B). 36
1.7.3 Loudness Level 38
1.8 *Sharpness* 38
CAPÍTULO 2. APLICACIONES DEL AUDIO. 41
2.1 Audición binaural u holofónico 41
2.2 Determinación de posición de una fuente de sonido 42
2.2.1 Diferencia de Tiempo Interaural (ITD) y Diferencia de Nivel Interaural (ILD) 43
2.2.2 Función de Transferencia HRTF 44
2.2.3 Efecto Hass 45
2.3 Efecto Franssen 46
2.4 Acondicionamiento acústico 46
2.4.1 Materiales absorbentes 50
2.4.2 Resonadores 54
2.4.3 Reflectores 59
2.4.4 Difusores 64
2.5 Amplificación de audio 68
2.5.1 Características funcionales más importantes de los amplificadores 68

2.5.2 Estructura completa de un amplificador 69
2.5.3 Amplificación Clase A 72
2.5.4 Amplificación Clase B 76
2.5.5 Amplificación Clase AB 77
2.5.6 Amplificación Clase C 78
2.5.7 Amplificación Clase D 79
2.5.8 Distorsión en amplificadores de audio 81
2.5.9 Realimentación negativa 82
CAPÍTULO 3. Actividades de ejercitación. 84
3.1 Características de las guías didácticas de ejercicios 84
3.2 Características de la guía de ejercitación propuesta. 86
3.3 Actividades de ejercitación. 87
3.3.1 Actividades de ejercitación del tema I. 88
3.3.2 Actividades de ejercitación del tema II. 89
3.3.3 Actividades de ejercitación del tema III. 92
3.3.4 Actividades de ejercitación del tema IV. 92
3.3.5 Actividades de ejercitación del tema IV. 93
3.4 Conclusiones del capítulo 93
CONCLUSIONES 94
RECOMENDACIONES 95
BIBLIOGRAFIA 96
Anexo 1. Actividades de ejercitación del Tema I. 100
Anexo 2. Actividades de Ejercitación del Tema II. 102
Anexo 3: Actividades de ejercitación del Tema III. 105
Anexo 4: Actividades de ejercitación del Tema IV. 106

Anexo 5: Guía de estudio de ejercicios. 108

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las habilidades teórico-prácticas para asimilar los contenidos de las asignaturas de cualquier plan de estudio es un objetivo fundamental. Estas se pueden adquirir mediante la realización de ejercicios teóricos y prácticos de los diferentes contenidos de cada temática, que deben ser ordenados por temas de menor a mayor complejidad.

Las guías de ejercicios se caracterizan por estar en concordancia con los objetivos de la asignatura de la cual ella forma parte, abordando todos los temas de la misma desde lo teórico a lo práctico, de lo simple a lo complejo, con énfasis en los aspectos fundamentales que el estudiante debe dominar. Las guías de ejercicios pretenden de forma subjetiva ir sembrando los conocimientos en los estudiantes de una forma amena, práctica, con un orden lógico coherente, haciendo los contenidos difíciles de comprender en contenidos fáciles de asimilar buscando mejores alternativas.

En la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y Electrónica de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas se imparten varias asignaturas optativas. Una de ellas es la asignatura "Sistemas de Audio" en la cual se ha venido trabajando en la utilización de los recursos tecnológicos disponibles para apoyar la ejercitación de los contenidos teóricos tratados. Los resultados de la incorporación de nuevos recursos tecnológicos a la asignatura requieren actualización y organización coherente, así como de una facilitación del acceso a los mismos y a su documentación, de manera que se facilite la interacción con ellos por parte de los estudiantes.

Las razones anteriormente expuestas permiten definir como **situación problémica** de este proyecto: la necesidad de la actualización y facilitación del acceso de los estudiantes a los contenidos de la asignatura Sistemas de Audio. Esta situación problémica conduce a la siguiente **interrogante científica**: ¿Cómo pueden ser utilizados los recursos tecnológicos disponibles para facilitar a los estudiantes la ejercitación de los contenidos teóricos y el acceso a los materiales de la asignatura de forma interactiva?

Como objetivo general de esta investigación, se planteó el siguiente:

- ✓ Actualizar las actividades de ejercitación de la asignatura optativa Sistemas de Audio.

Para alcanzar el objetivo general propuesto se declaran los siguientes objetivos específicos:

- ✓ Realizar una búsqueda detallada sobre los temas tratados en el programa analítico de la asignatura Sistemas de Audio.
- ✓ Revisar y organizar la información existente de la asignatura Sistemas de Audio.
- ✓ Actualizar las actividades de clases prácticas de la asignatura Sistemas de Audio.

Los resultados propuestos comprenden la actualización de las guías de laboratorios de los temas tratados en la asignatura.

El trabajo queda estructurado en: introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

En el primer capítulo se abordan temas teóricos que comprenden la caracterización objetiva y subjetiva del sonido, principales variables físicas utilizadas, la percepción, generación y propagación del sonido. Se realiza un análisis de los parámetros acústicos, espectrales y psicoacústicos. Por último, se realiza un análisis de la sonoridad.

El segundo capítulo está dedicado a las aplicaciones de los sistemas audio. Se tiene en cuenta el análisis de la audición humana, el acondicionamiento acústico y los parámetros que determinan la propagación del sonido en un recinto cerrado. También se realiza un análisis de las características funcionales más importantes de los amplificadores, su estructura, las clases de amplificación existente y una breve reseña del fenómeno de la distorsión en amplificadores de audio.

El tercer capítulo está dedicado a la descripción de los resultados de la actualización de las actividades de ejercitación de la asignatura Sistemas de Audio.

CAPÍTULO 1. Caracterización y análisis del sonido

Hace más de un siglo la acústica, como ciencia que estudia el sonido, ha venido desarrollándose. Primeramente, los ingenieros utilizaban en este campo especialmente sus oídos, las únicas fuentes de ruido controladas eran los silbatos, gongs y sirenas. Los micrófonos consistían en un diafragma articulado con una punta metálica que delineaba la forma de onda sobre la superficie de un tambor rotativo cuya altura variaba de acuerdo con la presión acústica. Por esta etapa aparecieron grandes contribuciones técnicas de personalidades como Rayleigh, Stokes, Thomson, Lamb, Hemholtz, König, Tyndall, Kundt y otros; incursionaron en la acústica física, las cuales fueron seguidas por la publicación en dos volúmenes de Lord Rayleigh, "*Theory of Sound*" (1877-1878). La acústica no tuvo más progresos hasta que W. C. Sabine, en una serie de artículos (1900-1915) llevó la acústica arquitectónica a la categoría de una ciencia. El mayor logro en este campo surgió tras la invención del tríodo de alto vacío (1907) y al advenimiento de la radiodifusión (1920). Con los amplificadores de válvulas ya disponibles, podían producirse sonidos de la frecuencia deseada con la intensidad conveniente y, a la vez, podían medirse los sonidos más débiles. La válvula permitió construir instrumentos de medición compactos, robustos, e insensibles a las corrientes de aire (1).

El progreso de la acústica de las comunicaciones fue adelantado por el esfuerzo de los *Bell Telephone Laboratories* (desde 1920 en adelante) y el desarrollo del sistema telefónico en los Estados Unidos de Norteamérica. La acústica arquitectónica recibió un gran impulso por los aportes teóricos y experimentales de la Universidad de Harvard, el Instituto Tecnológico de Massachusetts, y la Universidad de California en Los Ángeles (1930-1940), y varios centros de investigación en Europa, especialmente Inglaterra y Alemania. La acústica a través de los ultrasonidos penetró en el campo de la medicina y la química. Se ensayó la diatermia ultrasónica y la aceleración de las reacciones químicas por medio de los ultrasonidos.

Finalmente, llegó la segunda guerra mundial con su demanda de dispositivos para la detección de submarinos sumergidos y de medios o de comunicación confiables en ambientes muy ruidosos, por ejemplo, en los carros de asalto y en las aeronaves. Instalándose grandes laboratorios en Inglaterra, Alemania, Francia y, en los Estados Unidos

de Norteamérica, en las universidades de Harvard, Columbia y California, para ocuparse de estos problemas. Las investigaciones acústicas alcanzaron proporciones no soñadas hasta el momento y se han mantenido desde entonces en el mismo nivel (2).

Hoy en día, la acústica está transformándose de una herramienta de la industria telefónica, de unos pocos arquitectos de avanzada y de los militares, en una cuestión de interés en la vida cotidiana.

1.1 Introducción al Sonido.

El sonido puede definirse como una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso, capaz de producir una sensación auditiva. A diferencia de la luz el sonido no se propaga a través del vacío (3).

El elemento generador de dicha vibración mecánica se denomina *fuente sonora* (tambor, cuerda de un violín, cuerdas vocales) y tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración, la cual es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que a su vez la transmiten a nuevas partículas contiguas (4).

Con la perturbación las partículas no se desplazan, simplemente oscilan a través de su posición de equilibrio propagando ondas sonoras que es su modo de traslación. La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la propagación de la onda. En este caso se habla de ondas sonoras longitudinales. Ejemplo de fuente sonora es un golpe sobre la membrana de un tambor lo cual provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión, mientras que en el caso contrario dichas partículas se separan, lo cual da lugar a una zona de enrarecimiento o dilatación como se muestra en la figura 1.1.

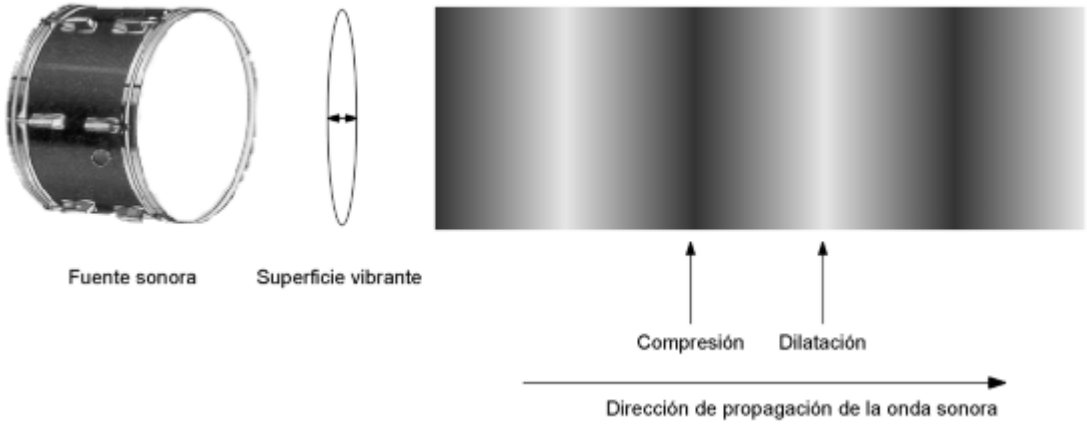


Figura 1.1: Zona de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora.

La magnitud de un campo sonoro se puede cuantificar mediante la presión sonora o fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. Dicha presión es la sumatoria de la presión atmosférica estática y la presión asociada a la onda sonora en un punto determinado situado a una distancia cualquiera de la fuente sonora (5).

El sonido puede ser periódico o aperiódico, y si es periódico puede ser senoidal o compuesto. En cualquier caso, se puede descomponer en una combinación de tonos puros (mediante Fourier) y como la alteración que provoca un tono no altera significativamente las propiedades del medio se puede aplicar el principio de superposición (2).

1.1.1 Variables físicas del sonido.

Nivel de presión sonora (SPL) o amplitud del sonido, es el rango de nivel de sonido, medido en *Pascal*, de percepción auditiva por el oído humano, a mayor amplitud mayor sensación auditiva. La presión sonora es la manera más habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro (6).

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

Ahora bien, la utilización de dicho valor eficaz da lugar a una serie de problemas cuyo origen se halla en el comportamiento del oído humano y que a continuación se exponen (7):

- La gama de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor, es extraordinariamente amplia. En concreto, la presión eficaz sonora más débil que puede ser detectada por una persona, a la frecuencia de 1 kHz, es de 2 x 10-5 Pa, mientras que el umbral de dolor tiene lugar para una presión eficaz del orden de 100 Pa (milésima parte de la presión atmosférica estática P0 ≈ 105 Pa, equivalente a 1 atmósfera). En consecuencia, la escala de presiones audibles cubre una gama dinámica de, aproximadamente, 1 a 5.000.000. Es obvio, pues, que la aplicación directa de una escala lineal conduciría al uso de números inmanejables.
- Nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos que recibe, sino que más bien lo hace de forma logarítmica. Por ejemplo, si la presión de un tono puro de 1 kHz se dobla, la sonoridad *(loudness*), o sensación subjetiva producida por el mismo, no llegará a ser el doble. De hecho, para obtener una sonoridad doble, es necesario multiplicar la presión sonora por un factor de 3,16.

Por los dos motivos expuestos, resulta razonable y conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Dicha escala se expresa en valores relativos a un valor de referencia. Se trata de la presión eficaz correspondiente al umbral de audición, a 1 kHz (2 x 10-5 Pa). En tal caso, se habla de nivel de presión sonora SPL o Lp. La unidad utilizada es el decibelio (dB).

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos.

El uso de dB reduce la dinámica de presiones sonoras de 1:5 x 106 a niveles de presión sonora de 0 a 135 dB, donde 0 dB representa una presión igual al umbral de audición (no significa, por tanto, ausencia de sonido) y 135 dB el umbral aproximado de dolor (8). De esta manera, las cifras manejadas son mucho más simples y, además, se dan las siguientes relaciones entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo:

- 1 dB: mínimo cambio de nivel sonoro perceptible
- 5 dB: cambio de nivel claramente percibido
- 10 dB: incremento asociado a una sonoridad doble

Existe un nivel umbral mínimo de percepción auditiva por debajo del cual no es posible percibir ningún sonido. También existe un nivel máximo que no se puede superar sin correr el riesgo de perder de forma permanente la capacidad auditiva, ambos umbrales se han obtenido de forma estadística, por lo que son valores aproximados.

Las variaciones de los parámetros físicos, como presión y velocidad, son cíclicas, periódicas. El tiempo entre dos instantes consecutivos en que se repiten los parámetros físicos se denomina período y se denota con la letra *T*. El número de vibraciones o de variaciones de la presión acústica por segundo dando la sensación de tonalidad se le llama frecuencia, se denota con la letra f y se mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

$$f = \frac{1}{T} \qquad (1.1)$$

La frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado. Un sonido de baja frecuencia es de tonalidad grave y uno de alta frecuencia es de tonalidad aguda. Los sonidos que comúnmente se perciben tienen muchas frecuencias mezcladas, formando los llamados sonidos complejos con un mayor contenido de baja frecuencia porque estos son más fáciles de producir y tienen una capacidad de propagación superior. El margen de frecuencias que se considera en audiofrecuencia va de 20 Hz a 20000 Hz, que coincide aproximadamente con la sensibilidad en frecuencia del oído (4).

La gran mayoría de los sonidos que percibimos no constan únicamente de una sola frecuencia, sino que están constituidos por múltiples frecuencias superpuestas. Incluso cada uno de los sonidos generados por un instrumento musical están formados por más de una frecuencia.

Se puede conocer qué frecuencias componen un sonido observando el denominado espectro frecuencial del mismo, entendiendo por tal la representación gráfica de las frecuencias que lo integran junto con su correspondiente nivel de presión sonora.

La velocidad del sonido, *c*, es la velocidad a la que se propaga la perturbación. Por ejemplo, en el aire a 0 ˚C y 50% de humedad relativa, la velocidad es *c = 331,6 m/s* a temperatura de 20 ˚C la velocidad es *c = 343 m/s*.

La longitud de onda λ es la distancia en metros (m) que una onda acústica ocupa en el medio por donde se propaga. Esta distancia depende de la velocidad del sonido en el medio de propagación y de la frecuencia. Coincide con la distancia recorrida por la onda en un período (9).

$$\lambda = cT = \frac{c}{f} \qquad (1.2)$$

Un sonido con una frecuencia de 100 Hz que se propaga por el aire a una temperatura de 22˚C, tiene una longitud de onda de 3.45 m, mientras que una onda de 1.000 Hz tiene una longitud de onda de 0.345 m. Nótese que la baja frecuencia presenta una mayor longitud de onda, propiedad que le permite al sonido penetrar estructuras con mayor facilidad. Las estructuras con grosores muy pequeños comparados con la longitud de onda presentan una atenuación a la onda acústica de baja frecuencia, muy moderada.

Las ondas sonoras en el aire son longitudinales; esto es, la dirección del movimiento vibratorio de las partículas de aire es la misma en que se propaga la onda. Las ondas de luz, calor y radio son transversales, es decir, las vibraciones de los campos magnéticos y eléctricos son perpendiculares a la dirección de propagación. Sin embargo, las ondas en la superficie del agua son circulares, el movimiento vibratorio de las moléculas de agua se realiza en un pequeño círculo o elipse, pero la onda se propaga horizontalmente (10).

Antes de que se inicie una onda sonora en un medio, pueden hacerse modificaciones en dicho medio, como, por ejemplo, en un gas sus partículas como promedio se mantienen en reposo, describen un movimiento fortuito, pero no hay movimiento neto del gas en ninguna dirección, el desplazamiento de las partículas es cero, por consecuencia, la *velocidad de las partículas* es también cero. Además, no habiendo perturbación alguna del medio, la *presión* es constante en toda su extensión e igual a la *presión ambiente*, de modo que la *presión incremental* es cero. La *densidad*, otra magnitud del medio, se define como la masa por unidad de volumen, la cual cuando no hay perturbación en el medio es igual a la *densidad ambiente* (11).

Cuando se propaga una onda sonora por un medio las partículas de este son aceleradas y desplazadas con respecto a su posición de reposo. Las partículas tienen una velocidad distinta de cero en cada punto, excepto en ciertos instantes de cada alteración. La

temperatura en cada punto fluctúa por arriba y por debajo del valor ambiente, de igual modo varía la presión respecto a la presión ambiente. Esta variación incremental de la presión es lo que se llama *presión sonora* o *presión de exceso*, esta a su vez causa una variación de la densidad llamada *densidad incremental*. Un aumento de la presión sonora en un punto, causa un aumento de la densidad en el mismo punto (2).

1.1.2 Características objetivas y subjetivas del sonido.

Las características del sonido según su sensación fisiológica pueden clasificarse en objetivas y subjetivas.

Entre las características objetivas de los sonidos se encuentran (1):

- Refracción: en un medio homogéneo el sonido tiende alejarse de la fuente de forma esférica a una superficie plana, a este se le llama *onda plana*.

  Si la densidad del medio no es la misma en todas las direcciones por ejemplo por diferencia de temperatura, el frente de onda puede desviarse y cambia la dirección de propagación, fenómeno conocido como *refracción* ya que las líneas de propagación del sonido se flexionan.
- Difracción: es la distorsión de un campo de sonido causada por la presencia de un obstáculo.

  Cuando un disturbio vibratorio (onda sonora) incide en la abertura de una pared, parte de su energía pasa a través de la abertura, a su vez si esta es pequeña comparada con la longitud de onda, el disturbio sufrirá una acentuada dispersión en la región posterior a la pared. En tal caso la abertura actúa en cierto aspecto como una fuente de energía para la región posterior. Tal situación se muestra de forma aproximada en la figura 1.2.

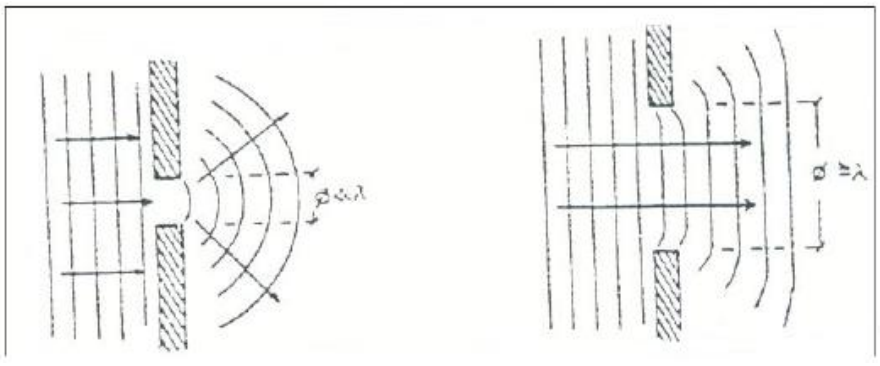


Figura 1.2: Fenómeno de la disfracción (12).

El mismo fenómeno se produce en los bordes de cualquier barrera que impida la propagación libre del sonido. El sonido tiende a rodear el obstáculo a bajas frecuencias (13).

- Reflexión: Es una especie de rebote de la onda que incide sobre la superficie límite de dos medios de forma que la onda reflejada o rebotada es de igual característica que la onda incidente y formando ahora un ángulo simétrico con la perpendicular a la superficie.

  Hay dos tipos de reflexiones: *difusa* y *regular* en dependencia de las características de la superficie. Si las irregularidades de la superficie son comparables en dimensiones con la longitud de onda involucrada, tendrá lugar la *reflexión difusa*, en este caso el frente de onda experimentará un reflejo no uniforme con distintas direcciones. Si la superficie es relativamente uniforme ocurrirá una *reflexión regular*.
- Absorción y atenuación: Algunas veces es deseable reducir la reflexión de un recinto, para lograr esto el plafón o los muros pueden ser cubiertos con un material de naturaleza y construcción tal que absorba un gran porcentaje de la energía incidente. La efectividad de un material para absorber el sonido se denomina *coeficiente de absorción* y en general varía con la frecuencia, representa la fracción de la energía absorbida comparada con la energía total incidente.

  Otro fenómeno que también origina pérdida de energía de las ondas es la absorción en el propio medio de la propagación que origina una atenuación progresiva de la onda. En un medio con fluido tales pérdidas se originan por viscosidad, conducción de calor e intercambio de energía.
- Ecos: La reflexión del sonido da lugar al fenómeno del eco cuando la superficie reflectante se encuentra perpendicular a la dirección del sonido. Este efecto es muy útil en estudios geofísicos o de petróleo, donde unos transductores reconocen e interpretan los ecos producidos por los distintos estratos terrestres tras una explosión, calculando de esta forma la profundidad de las formaciones (14).
- Resonancia: Es uno de los fenómenos más importantes en el estudio del sonido y consiste en aumentar la intensidad de los débiles sonidos emitidos por determinados

cuerpos al vibrar libremente en el aire. Cualquier cuerpo capaz de oscilar libremente puede también oscilar bajo la acción de una fuerza que puede tener una frecuencia igual o distinta a su frecuencia natural. Si los impulsos de excitación se sincronizan, incrementos de energía extremadamente pequeños harán que el cuerpo describa oscilaciones de relativamente gran amplitud. Este será mayor si se alcanza la frecuencia de resonancia que es propia de cada cuerpo oscilante. Hay casos en que las ondas libres actúan como fuentes de energía estableciendo efectos de resonancia. Ejemplo de ello es cuando se canta una nota cerca de un instrumento de cuerda, se percibirá que una o más cuerdas vibrarán según su frecuencia de resonancia.

La resonancia ocurre a una frecuencia específica. Cuando la diferencia de la frecuencia natural del cuerpo y la de la fuente es muy pequeña, existe una fuerte reacción del cuerpo, muy semejante a la resonancia perfecta. Los pianos y los violines son un ejemplo de instrumentos con una curva ancha de resonancia.

Seguidamente se describirán las características subjetivas del sonido (15):

- Intensidad: Al vibrar un foco sonoro producirá ondas de determinada amplitud, siendo la intensidad proporcional al cuadrado de la misma, teniendo así sonidos fuertes o débiles. EL atributo subjetivo de la intensidad tiene relación con la magnitud de la presión de una onda de sonido. De acuerdo con esta magnitud los sonidos pueden ser fuertes o intensos en un extremo y débiles en el otro. Actualmente se ha podido establecer una escala numérica para indicar los valores aparentes de esta propiedad en función de la presión y la frecuencia de los sonidos. Podría confundirse esta característica con la intensidad, digamos objetiva, que se define como el flujo neto de energía que pasa a través de una unidad de área en una dirección determinada. Para distinguirlas llamaremos a la primera intensidad subjetiva y sólo intensidad a esta última variable (16).
- Tono: permite distinguir los sonidos agudos de los graves, siendo los agudos los producidos por focos que vibran a frecuencias elevadas y los graves los que vibran a frecuencias bajas. El tono representa la posición del sonido en la escala musical y es en función de la frecuencia.

Como la mayoría de los sonidos son complejos, surge la cuestión del tono en estos sonidos. En general, el tono de un sonido complejo es el de su onda fundamental, sin embargo, si el sonido está formado por un grupo de componentes que difieren en un número igual de Hercios (Hz), el tono aparente puede ser precisamente el de esa diferencia de frecuencia (11).

La frecuencia más prominente producida por un cuerpo vibrante se denomina frecuencia fundamental, la cual producirá un tono determinado. Cualquier frecuencia que produzca una sensación de tono dos veces mayor que la fundamental, se denomina un octavo u octava por encima de esta. Una banda de octava es el espacio de frecuencias comprendidas entre dos octavas consecutivas (17). Una progresión de octavas típicas puede ser 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, ...Hz.

Otro aspecto en la percepción del tono es el tiempo mínimo necesario para identificar un tono determinado. Aparentemente el tiempo de percepción de un tono es más o menos independiente de la frecuencia y es del orden de la vigésima parte de un segundo.

- Timbre: esta cualidad nos permite distinguir dos sonidos de igual intensidad y tono producidos por dos focos diferentes. Dos violines, por ejemplo, de diferente fabricación producen diferente timbre aún tocando la misma nota. El timbre se relaciona con el hecho de que un sonido casi nunca es puro, o sea, casi nunca corresponde a una onda sonora dada la expresión “y = A sen wt”, sino que suele haber una frecuencia fundamental a la que pertenece la mayor parte de energía de ese sonido y otras frecuencias que llevan su cantidad de energía y responden a otra expresión similar “y = A´sen w´t”. Estos se llaman armónicos y se superponen a la onda correspondiente a la frecuencia fundamental. En las expresiones anteriores “A” es la máxima amplitud, “sen” es la función trigonométrica seno, “w” es la pulsación y es igual al producto “2π x f”, “t” es el tiempo en segundo e “y” es la posición de un punto en el medio de propagación para un tiempo determinado (18).

1.1.3 Medida del sonido

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*") (19) (20).

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 deben ceñirse los fabricantes de tales instrumentos.

En Europa, las más representativas son las normas CEI (Comisión Electrotécnica Internacional) y, en concreto, las CEI 60651 y CEI 60804. Las normas equivalentes en España son, respectivamente, la UNE-EN 60651 y la UNE-EN 60804.

La medida del nivel de presión sonora SPL o Lp utilizando la *escala lineal* significa que no se aplica ningún tipo de acentuación ni atenuación a ninguna de las frecuencias integrantes del sonido objeto de análisis (21).

Debido a la diferente sensibilidad del oído a las distintas frecuencias, los valores obtenidos haciendo uso de la escala lineal no guardan una relación directa con la sonoridad del sonido en cuestión. Con objeto de que la medida realizada sea más representativa de la sonoridad asociada a un sonido cualquiera, los sonómetros incorporan la llamada red de ponderación A (22).

Obsérvese que la frecuencia de 1 kHz queda inalterada y, por tanto, se puede considerar de referencia, y que para frecuencias inferiores existe una importante atenuación de nivel.

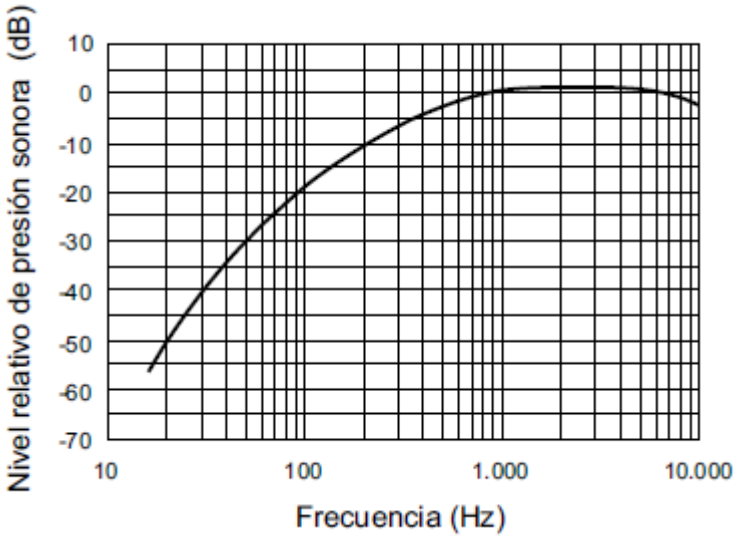


Figura. 1.3 Red de Ponderación A.

1.1.4 Filtros para análisis frecuencial

En la mayoría de casos no es suficiente conocer el nivel de presión sonora total Lp y el nivel ponderado LA, sino que es necesario disponer de una información más detallada de su espectro, es decir, de su contenido energético a distintas frecuencias. Es lo que se ha convenido en llamar análisis frecuencial de la señal (23).

Con este fin, existen sonómetros que incorporan un conjunto de filtros eléctricos, cada uno de los cuales sólo deja pasar aquellas frecuencias que están dentro de una banda de frecuencias determinada (habitualmente se trabaja con bandas de 1 octava). La banda de 1 octava incluye todas las frecuencias comprendidas entre una frecuencia dada y la frecuencia doble.

Por otra parte, las 6 bandas de octava cuyas frecuencias centrales están comprendidas entre 125 Hz y 4.000 Hz son las que generalmente se consideran tanto en la fase de diseño acústico como en la de diagnosis acústica de recintos.

1.1.5 El sonómetro integrador

El sonómetro integrador realiza medidas del nivel de presión sonora obtenido como resultado de promediar linealmente la presión sonora cuadrática instantánea a lo largo del

tiempo de medida. Dicha medida se denomina nivel continuo equivalente de presión sonora y se designa por Leq (1).

Este tipo de sonómetro representa la alternativa actual al sonómetro convencional, ya que permite disponer de tiempos de promediado más largos, pudiendo llegar a muchos minutos o, incluso, horas.

Habitualmente, las medidas se realizan utilizando la red de ponderación A, en cuyo caso la designación correcta sería LAeq. Ahora bien, como la ponderación A está totalmente generalizada, la representación mediante las letras Leq supone implícitamente el uso de la ponderación A, a menos que se indique expresamente lo contrario (6).

El nivel Leq se utiliza como criterio de valoración del ruido ocupacional, de acuerdo con la norma ISO 1999.

1.2 Percepción del sonido en función de la frecuencia

1.2.1 Relaciones entre niveles de presión sonora (SPL) y frecuencia (f)

La banda de frecuencias audibles para una persona joven con una audición normal, va desde 20 Hz (sonidos más graves) hasta 20.000 Hz ó 20 kHz (sonidos más agudos). El oído humano no tiene la misma sensibilidad para todo este margen de frecuencias. En la figura 1.3 se observa la variación de los umbrales de audición y de dolor en función de la frecuencia (23).

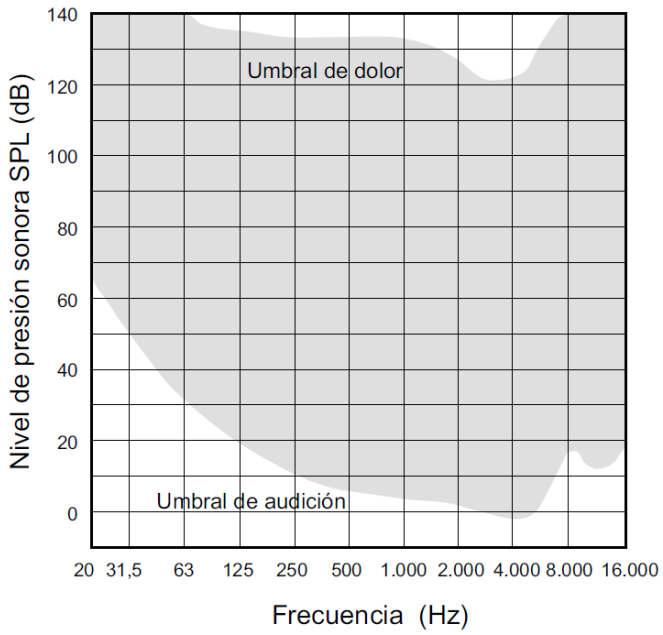


Figura 1.4: Niveles audibles en función de la frecuencia.

Para niveles bajos de presión sonora, el oído es muy insensible a bajas frecuencias, es decir, el nivel de presión sonora de un sonido grave tiene que ser mucho más elevado que el correspondiente a un sonido de frecuencias medias para que ambos produzcan la misma sonoridad. Por ejemplo, un nivel SPL = 70 dB, a 20 Hz, produce la misma sonoridad que un nivel SPL = 5 dB, a 1 kHz (sonoridad = sensación subjetiva de nivel sonoro). Para dichos niveles bajos, el oído también presenta una cierta atenuación a altas frecuencias (24).

A medida que los niveles aumentan, el oído tiende a responder de forma más homogénea en toda la banda de frecuencias audibles, hasta el punto de que cuando son muy elevados, la sonoridad asociada a tonos puros de diferente frecuencia es muy parecida. Este cambio de comportamiento del oído en función del nivel de señal explica el hecho de que al subir el volumen del amplificador de un equipo de música, se percibe un mayor contenido de graves y agudos del pasaje musical reproducido. Igualmente pone de manifiesto la confusión que puede surgir al seleccionar unas cajas acústicas de parecida calidad: las de mayor rendimiento, y que por tanto radian más potencia sonora para la misma potencia eléctrica aplicada, pueden producir la sensación de que suenan mejor, exclusivamente debido a que la percepción de graves y agudos es mayor (25).

Ahora es conveniente establecer una comparación entre el comportamiento del oído humano desde el punto de vista de la percepción de niveles en función de la frecuencia y

las zonas representativas de generación sonora asociada a la voz humana y a los instrumentos musicales convencionales, el resultado se muestra en la figura 1.4 (2).

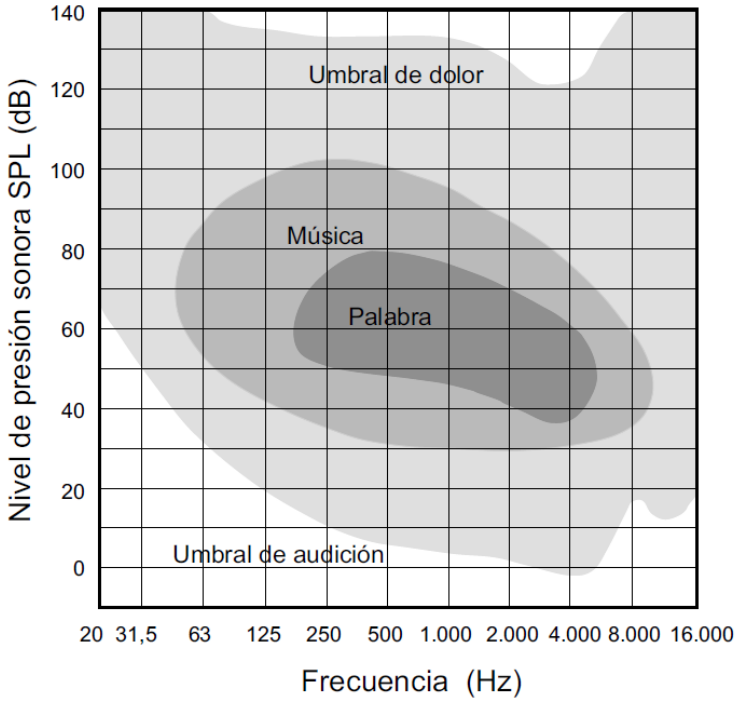


Figura 1.4: Niveles audibles en función de la frecuencia junto con las zonas correspondientes a la música y a la palabra.

A modo de conclusión se puede apreciar la capacidad de la persona como receptora del sonido es mucho mayor que como emisora.

1.2.2 Enmascaramiento del sonido

Cuando el oído está expuesto a dos o más tonos puros de frecuencias diferentes, existe la posibilidad de que uno de ellos enmascare los demás y, por tanto, evite su percepción de forma parcial o total. Del mismo modo, es evidente la dificultad que entraña entender una conversación en presencia de ruido.

El fenómeno del enmascaramiento se explica de una manera simplificada considerando la forma en que la denominada membrana basilar es excitada por tonos puros de diferente frecuencia. La membrana basilar se extiende a lo largo de la cóclea (conducto en forma de caracol de sección prácticamente circular alojado en el interior del oído interno), desde la

llamada ventana oval (zona de separación entre el oído medio y el oído interno) hasta el extremo superior de aquella (8).

En la figura 1.5 se muestra la amplitud relativa del desplazamiento de la membrana basilar en función de la distancia a la ventana oval, para cuatro tonos de frecuencia diferente.

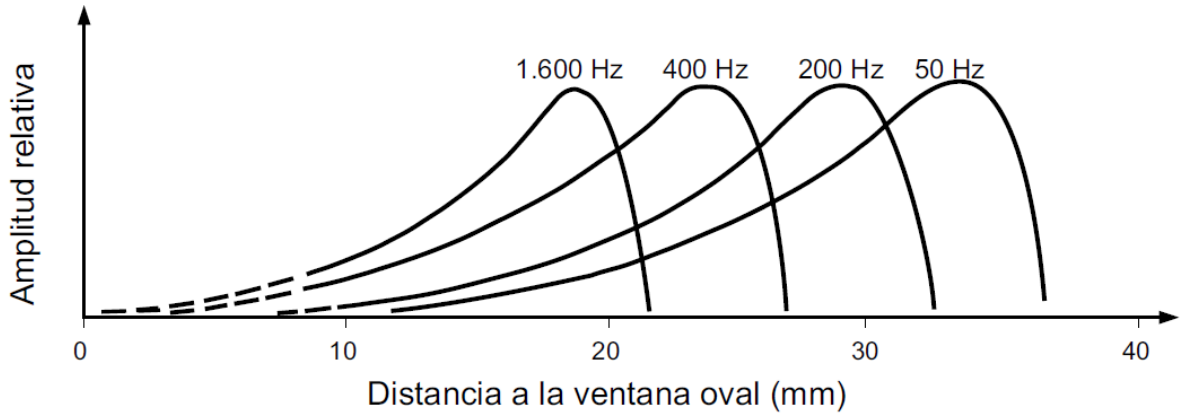


Figura. 1.5 Amplitud relativa del desplazamiento de la membrana basilar para diferentes tonos puros.

Se observa que los tonos de alta frecuencia producen un desplazamiento máximo en la zona próxima a la ventana oval y que, a medida que la frecuencia disminuye, dicho máximo se va desplazando hacia puntos más alejados de la misma. Por otra parte, la excitación es asimétrica puesto que presenta una cola que se extiende hacia la ventana oval (zona de frecuencias altas), mientras que por el lado contrario (frecuencias bajas) sufre una brusca atenuación.

La consecuencia de tal asimetría es que un tono de baja frecuencia puede enmascarar otro de frecuencia más elevada, tanto más, cuanto mayor sea su nivel de presión sonora. Ello es debido a que la zona de frecuencias cubierta por su cola será más extensa. En cambio, al considerar la situación inversa, el grado de enmascaramiento es claramente inferior (26).

La figura 1.6 muestra el efecto de enmascaramiento entre dos tonos puros A y B en cuatro situaciones distintas, por lo que a frecuencias y niveles asociados se refiere (8).

a) La frecuencia del tono A es mayor que la del tono B y los niveles son semejantes, enmascaramiento inapreciable.

b) La frecuencia del tono A es ligeramente mayor que la del tono B y los niveles son semejantes, el tono B enmascara parcialmente el A.

c) La frecuencia del tono A es mayor que la del tono B, mientras que su nivel es bastante inferior, se produce un enmascaramiento prácticamente total.

d) La frecuencia y el nivel del tono A son superiores a las del tono B, el enmascaramiento producido es mínimo.

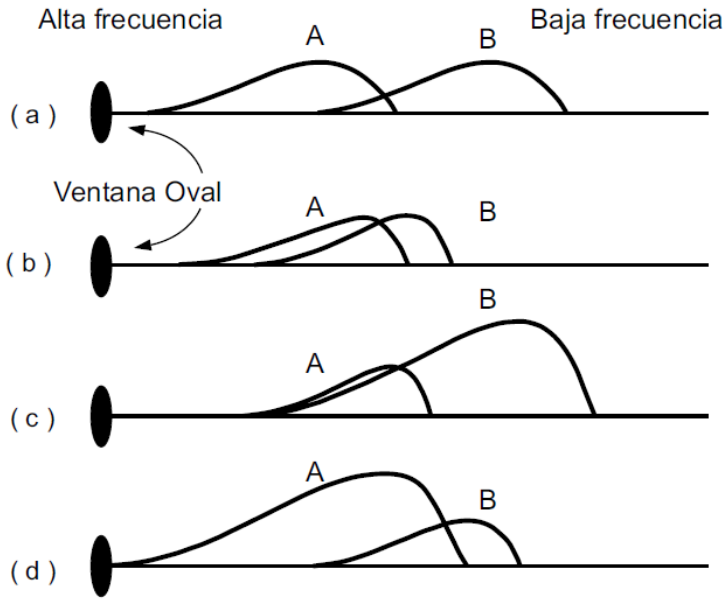


Figura 1.6: Respuesta de la membrana basilar a diferentes combinaciones de tonos puros.

1.3 Generación y propagación de sonidos

La Acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción del sonido tanto en el intervalo de la audición humana como en las frecuencias ultrasónicas e infrasónicas.

Para que exista un sonido en un determinado punto es necesario que exista una variación de la presión en ese punto. Pero, las variaciones de presión en un punto de un medio hacen que se produzcan también variaciones de presión en sus proximidades dando lugar a lo que se conoce como ondas de presión (27).

1.3.1 Velocidad

De acuerdo con las leyes de la física, debe existir una relación entre la presión y la velocidad de una partícula dentro de un gas para que se conserve el momentum (8).

$$\mathrm{grad(p)} = -\rho_0 \frac{\partial \mathrm{v}}{\partial t} \qquad (1.3)$$

Donde:

p = Presión sonora.

v = Vector de velocidad de partícula.

t = Tiempo.

ρ = Densidad estática del gas.

Cuando en un gas ideal las variaciones de presión y densidad son pequeñas comparadas con los valores estáticos y las velocidades de las partículas son mucho menores que la velocidad del sonido, la ecuación anterior se transforma en una ecuación de onda (1):

(1.4)

$$c^2 \Delta p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

Donde la velocidad de propagación de la presión (c) se puede expresar como:

(1.5)

$$c = \sqrt{\frac{\gamma R T}{m}}$$

Donde:

R: es la constante de los gases,

m: es el peso molecular promedio del aire (R/m = 287 J/kgK),

γ: es la razón de los calores específicos γ = cp/cv, siendo igual a 1,4 para el aire, y

T: es la temperatura absoluta en grados kelvin.

En una atmósfera estándar se considera que T es 293,15 K, dando un valor de 343 m/s ´o 1.235 km/hora. Esta fórmula supone que la transmisión del sonido se realiza sin pérdidas de energía en el medio, aproximación muy cercana a la realidad.

Una velocidad aproximada (en m/s) puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$c = (331{,}5 + 0{,}6\ \mathrm{t}) \qquad (1.6)$$

donde t es la temperatura en grados Celsius:

$$\mathrm{t} = \mathrm{T} - 273\ \mathrm{K} \qquad (1.7)$$

1.3.2 Presión

El valor normal de la presión atmosférica en un punto es de 1 atm. (101325 Pascales); pero cuando en ese punto existe un sonido se producen ligeras variaciones de la presión en torno a este valor. El valor cuadrático medio de dichas variaciones de presión prms es lo que se conoce como presión sonora. Lo habitual es trabajar con este valor expresado en decibelios, que es lo que se conoce como Nivel de Presión Sonora (*Sound Pressure Level* o SPL) (6).

Al expresar el Nivel de Presión Sonora (en decibelios) se toma como referencia el valor de 20 μPa (valor próximo a las presiones mínimas que el oído es capaz de detectar). Y como la potencia del sonido es proporcional al cuadrado de la presión sonora, la expresión del Nivel de Presión Sonora es:

$$SPL(dB) = 20log\frac{p_{rms}}{20\mu Pa} \qquad (1.8)$$

1.3.3 Intensidad

Otra medida física aplicada a los sonidos es la Intensidad Sonora que también se suele utilizar en su versión logarítmica (Nivel de Intensidad Sonora) (26).

La intensidad sonora existente en un punto i es la potencia que atraviesa una unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la onda y sus unidades son $^{w}/_{m^2}$. Al expresar esta magnitud en decibelios para obtener el nivel de intensidad sonora se normaliza respecto a un valor de referencia de $10^{-12}\ ^{w}/_{m^2}$ quedando:

$$IL(dB) = 10log\frac{i}{10^{-12}\ ^{w}/_{m^2}} \quad (1.9)$$

En campo libre, tanto para ondas planas como esféricas, la magnitud de la intensidad en la dirección de propagación de las ondas acústicas está relacionada con la presión acústica por:

$$i = \frac{p^2}{\rho_0 c} \quad (1.10)$$

donde:

ρ_0 es la densidad del aire y

c la velocidad del ruido en el aire.

A la cantidad $\rho_0 c$ se le llama resistencia característica del medio a través del cual viaja la onda, que en el caso del aire, para una presión barométrica de 1 atm (101.325 Pa) y a una temperatura de $20{\cdot}^0C$ tiene un valor de 415 N.s/m3. Por lo que:

$$\begin{aligned} IL(dB) = 10log\frac{i}{10^{-12}\ ^{w}/_{m^2}} &= 10log\frac{\frac{p^2}{\rho_0 c}}{10^{-12}\ ^{w}/_{m^2}} \\ &= 20log\frac{p_{rms}}{20\mu Pa} + 10log\frac{(20\mu Pa)^2/\rho_0 c}{10^{-12}\ ^{w}/_{m^2}} \end{aligned} \quad (1.11)$$

$$IL(dB) = \text{SPL(dB)} - 0{,}16 \quad (1.12)$$

Es decir, que el nivel de intensidad acústica y el nivel de presión sonora son prácticamente idénticos, lo que puede llevar a confusión puesto que esta identidad sólo es aplicable en campo libre para ondas planas o esféricas, no siendo válida para posiciones muy cercanas a la fuente. En campos acústicos más complicados, no se puede aplicar la ecuación anterior.

1.3.4 Potencia.

Se define como potencia acústica a la cantidad de energía emitida por una fuente por unidad de tiempo, expresándose en vatios (W) o en picovatios (10^{-12} W). Frecuentemente, es conveniente expresar la potencia acústica de una fuente en una escala logarítmica, empleando entonces el "nivel de potencia sonora" Lw en dB, dado por (15):

$$LW(dB) = 10log\frac{W}{10^{-12}vatios} \quad (1.13)$$

Donde

W es la potencia de la fuente en vatios y $10^{-12}vatios$ (o 1 picovatio) es la potencia de referencia.

Si consideramos una fuente puntual, es decir, aquella fuente acústica cuyas dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de onda del sonido radiado, emitiendo una potencia W vatios uniformemente en todas las direcciones, la intensidad acústica producida por ésta en la dirección radial será (8):

$$I = \frac{\text{W}}{4\pi r^2} \quad (1.14)$$

donde:

W es la potencia de la fuente y

r la distancia a la que se mide la intensidad de potencia acústica.

Es decir, que:

$$\text{IL(dB)} = \text{SPL(dB)} - 0{,}16 = \text{LW(dB)} - 20\log(\text{r}) - 11 \quad (1.15)$$

1.3.5 Propagación del sonido en el espacio libre

Una fuente sonora situada en un recinto cerrado cuando es activada, genera una onda sonora que se propaga en todas las direcciones. Un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo recibe dos tipos de sonido: el denominado sonido directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia, y el sonido indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al incidir sobre las superficies límite del recinto.

En primer lugar, se considera una fuente sonora omnidireccional, es decir, una fuente que radia energía de manera uniforme en todas las direcciones (factor de directividad Q=1). El hecho de que la radiación sea uniforme implica que, a una distancia cualquiera de la fuente, el nivel de presión sonora SPL será siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación considerada. Es la llamada propagación esférica (6).

A medida que uno se aleja de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel SPL en cada punto va disminuyendo progresivamente. En concreto, la disminución del mismo es de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es la denominada ley cuadrática inversa y significa que el valor de la presión sonora se reduce a la mitad. En la figura 1.7 se muestra la mencionada disminución del nivel SPL con la distancia en el caso de que la fuente sonora sea un avión (4).

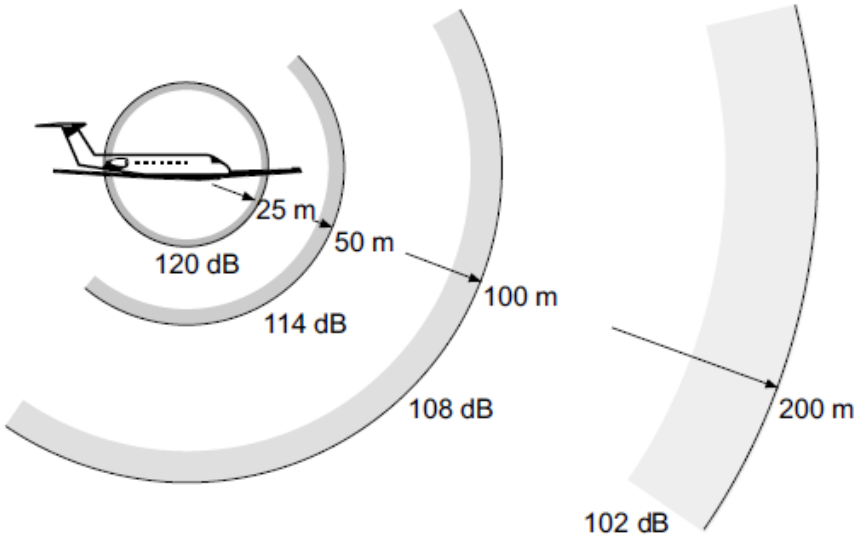


Figura 1.7: Ejemplo de propagación esférica en el espacio libre.

Para que una fuente sonora radie de forma omnidireccional es necesario que sus dimensiones sean pequeñas respecto a la longitud de onda del sonido emitido y que el receptor esté alejado de la misma.

Si bien existe toda una variedad de fuentes sonoras omnidireccionales, también es cierto que el cumplimiento simultáneo de ambos requisitos es difícil, sobre todo si la banda de frecuencias considerada es amplia.

En la figura 1.8 se representa el mapa de niveles SPL producidos por un orador situado en el espacio libre, en la banda de 2 kHz, en función de la distancia y del ángulo referido a su eje frontal. Se puede observar la disminución del nivel con la distancia, así como el efecto de directividad de la voz humana, evidenciado por la reducción del nivel a medida que aumenta dicho ángulo (28).

A través de la realización de una serie de experimentos, se ha podido averiguar que un mensaje oral emitido en una zona silenciosa (en ausencia de fenómenos atmosféricos ruidosos) puede ser oído de forma satisfactoria a una distancia máxima de 42 m en la dirección frontal del orador, de 30 m lateralmente y de 17 m en la dirección posterior. A distancias superiores, el mensaje deja de ser inteligible debido a que queda inmerso en el ruido de fondo existente, independientemente del lugar elegido para llevar a cabo la experiencia (29).

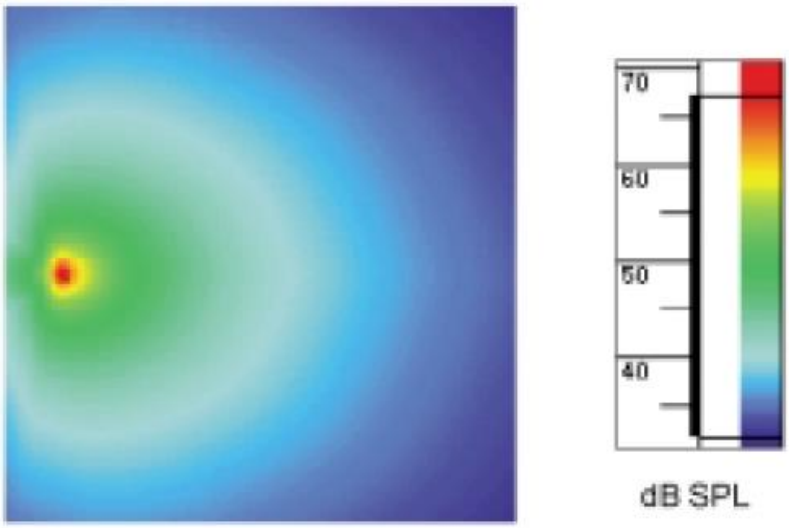


Figura 1.8: Niveles de presión sonora producidos por un orador en el espacio libre, banda de 2 kHz.

1.3.6 Propagación del sonido en un recinto cerrado

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 (24).

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.

1.3.7 Sonido reflejado

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera de un recinto, 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 (2).

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 ≤ 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 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 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 (1).

1.4 Parámetros Acústicos

Al referirnos a parámetros acústicos nos referiremos a aquellos en los que se miden características físicas de los sonidos, sin tratar de buscar interpretaciones psicológicas de éstos. La medida más habitual realizada sobre un sonido es el nivel de presión sonora (SPL) cuya unidad es el decibelio y está medido tomando como referencia la presión acústica de 20 micropascales, aunque también es habitual aplicar a estas medidas algún tipo de ponderación temporal y frecuencial.

1.4.1 Ponderación frecuencial

A pesar de que las medidas acústicas no tratan de medir las sensaciones producidas por el sonido, la palabra sonido implica frecuencias audibles por el oído humano normal, por lo que no sería lógico dar como medida de sonido en un punto el valor cuadrático medio del nivel de presión sonora en dicho punto, puesto que algunas frecuencias no son captadas por el oído y no pueden ser consideradas sonido. Del mismo modo frecuencias próximas a los límites de audición (20Hz y 20000Hz), que son muy atenuadas por el sistema auditivo, no pueden ser tratadas del mismo modo que frecuencias próximas a 1kHz, donde el oído es más sensible. Por esta razón suele ser habitual filtrar los sonidos con filtros que se asemejen

a la respuesta frecuencial del oído humano antes de medirlas. Pero como el oído se comporta de forma no lineal y presenta características diferentes según responda a niveles altos o bajos, fundamentalmente existen tres formas distintas de caracterizar el filtrado realizado por el oído: ponderación A, ponderación B y ponderación C. La ponderación A modela la curva isofónica correspondiente a 40 dB, la ponderación B la correspondiente a 70 y la ponderación C a 100. Puesto que los niveles más habituales en el entorno cotidiano están más próximos a los 40dB, la ponderación A es la más utilizada (10).

1.4.2 Ponderación temporal

Al realizar medidas sobre un sonido, este puede variar muy rápidamente por lo que a veces, las medidas instantáneas no son demasiado útiles y se procede a ponderarlas temporalmente. De esta forma el esquema habitual de la medida nivel de presión acústica realizada por un sonómetro consiste en: primero aplicar una ponderación frecuencial al sonido captado si se estima oportuno, segundo medir su potencia y tercero ponderar temporalmente la medida obtenida.

Habitualmente se emplean dos tipos distintos de ponderaciones temporales en función de la velocidad a la que varía el parámetro que se está midiendo: la ponderación rápida (*Fast*), que está indicada para aquellos sonidos que presentan pocas fluctuaciones; y la ponderación lenta *(Slow*) que está indicada para la medida de aquellos sonidos que presentan mayor variabilidad.

Los circuitos encargados de realizar las ponderaciones temporales deben ser sistemas lineales e invariantes, al igual que los ponderadores frecuenciales, pero, así como aquellos se modelaban en frecuencia mediante su respuesta frecuencial, estos se modelan en el tiempo mediante su respuesta temporal, que es (30):

$$h(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (1.16)$$

donde t es el tiempo y τ es la constante de tiempo que vale 125 milisegundos para la ponderación *Fast* y 1000 milisegundos para la ponderación *Slow*.

Además de las ponderaciones *Fast* y *Slow* muchos sonómetros disponen de la función *Impulsive*, que permite medir variaciones mucho más rápidas de los sonidos.

1.5 Parámetros espectrales

Cuando se analiza el ruido producido por el motor de un coche, el tipo de señal es muy característico, pues se puede modelar como la suma de una señal periódica y un ruido de banda ancha. La parte periódica del ruido de motor está formada por armónicos de la frecuencia de rotación del motor. En algunas ocasiones aparecen armónicos de la mitad de esta frecuencia que reciben el nombre de armónicos de medio orden. Parámetros asociados a la distribución espectral de los armónicos de motor como su contenido en armónicos de medio orden o su relación con otros parámetros están relacionados con efectos auditivos asociados a estas señales como el retumbar (*Rumble noise*) o la turbiedad (*muddiness*) (8).

Al trabajar con este tipo de señales se utilizan parámetros asociados a la distribución de armónicos como: suma de la potencia total de los armónicos de medio orden, suma de la potencia total de los armónicos de orden completo, potencia de los armónicos de orden par e impar y la relación entre ellos.

1.6 Parámetros psicoacústicos

En los apartados siguientes se presentarán los parámetros psicoacústicos más utilizados, sus definiciones, unidades y la forma de calcularlos cuando exista un modelo para su cálculo. Todos estos parámetros fueron estudiados a partir de la experimentación en multitud de test psicológicos por el profesor Eberhard Zwicker (19), quien propuso métodos para calcularlos, por lo que para cada uno se dedica un apartado al desarrollo del método de cálculo propuesto por dicho profesor. Existen otros trabajos que explican muchos de los parámetros desarrollados por Zwicker desde la perspectiva del análisis de la fisiología del oído (29).

El *Loudness* ha sido normalizado para señales estacionarias mediante normas nacionales o internacionales (31), por lo que existe una forma estándar de calcularlo (propuesto por Zwicker), mientras que el resto de los parámetros no han sido normalizados y han aparecido nuevos métodos de cálculo que tratan de mejorar las estimaciones respecto a las obtenidas por los métodos propuestos por dicho autor para obtener valores que se ajusten más a los resultados obtenidos experimentalmente. El cálculo del *Sharpness* también ha sido estandarizado mediante la norma alemana DIN 45692 (13) para establecer una futura

norma. La existencia de parámetros no normalizados todavía hace que los resultados proporcionados por los distintos fabricantes de software sean diferentes.

Todos estos parámetros psicoacústicos son ampliamente utilizados en el diseño de sonidos o en el análisis de las sensaciones que los sonidos provocan en los humanos.

1.6.1 Escalas de frecuencia

La unidad utilizada en física para la medida de la frecuencia de una señal periódica es el hercio, pero la sensación subjetiva de frecuencia no es proporcional a la frecuencia física, por lo que han aparecido nuevas escalas de frecuencias más acordes a la sensación subjetiva de frecuencia (y que no son proporcionales a las escalas de frecuencias en Hercios).

Escalas logarítmicas.

En el estudio de la música, es habitual hablar de octavas. Esta forma de medir las frecuencias deriva del cálculo del logaritmo en base 2 de la frecuencia física de un sonido. También es habitual hablar de décadas, que es una medida de frecuencias basada en logaritmos decimales. Tanto la medida de frecuencias en décadas como en octavas, supone una buena aproximación de las frecuencias subjetivas cuando se trabaja con frecuencias superiores a 500Hz. De ahí que en acústica se utilicen las bandas de octava y de tercio de octava (28).

Posición coclear.

La parte del oído interno que descompone los sonidos en distintas bandas de frecuencia es la cóclea. Al analizar este órgano, se puede observar que cada posición presenta su propia frecuencia de resonancia (la del filtro auditivo asociado a esa posición). Estudios realizados sobre el oído han permitido obtener la frecuencia de resonancia de cada punto de la cóclea:

$$\mathrm{f} = 165{,}4(10^{0{,}06*x} - 1) \qquad (1.17)$$

donde:

x es la posición de la cóclea en mm, f es la frecuencia de resonancia en Hz.

$$x = \frac{1}{0{,}06}\log_{10}\left(\frac{f - 165{,}4}{165{,}4}\right) \quad (1.18)$$

A partir de este punto se puede establecer una escala de posiciones cocleares.

Escala Bark.

Esta escala, muy utilizada en psicoacústica, se ha obtenido mediante experimentos subjetivos, donde los sujetos han respondido de forma distinta a los estímulos en función de su ancho de banda. De esta forma se ha modelado parte del oído como un banco de filtros rectangulares de ancho dependiente de la frecuencia central del filtro. La escala Bark mide sencillamente el número de filtro auditivo asociado a cada frecuencia (9).

Escala ERB

La escala Bark modela el oído como un banco de filtros rectangulares, cosa que no es del todo cierta y que no coincide con el funcionamiento físico del oído. Por otra parte, la forma de obtener experimentalmente dicha escala presenta algunos problemas, por lo que se ha desarrollado otra escala similar a la antes citada, basada en suposiciones más acordes con la fisiología de la cóclea. La respuesta en frecuencia de un filtro auditivo se puede aproximar mediante filtros *Gammatone*, (27), cuya respuesta es:

$$h(t) = t^{\gamma-1}\alpha^{\sim t} \quad (1.19)$$

Siendo γ el orden del filtro (que se toma de orden 4) y $\alpha^{\sim}$una constante compleja que permite fijar la frecuencia central y el ancho de banda del filtro (y cuyo valor depende del filtro auditivo que se desee modelar). Una versión mejorada de este modelo consiste utilizar la función *gammachirp* consistente en una modificación de la función *Gammatone* mediante el uso de la función *chirp* (32).

En este modelo, el oído se representa mediante un banco de filtros auditivos (no rectangulares) del que se ha calculado, de forma experimental, su ancho de banda rectangular equivalente (ERB).

El ERB depende de la frecuencia de los sonidos. Si partiendo de la frecuencia 0 se divide el espectro en segmentos de anchura igual al ancho de banda del filtro rectangular equivalente

asociado a cada frecuencia, se obtiene la escala ERB que está relacionado con la escala en Hz mediante la expresión:

$$x = 21{,}4\ \log_{10}(4{,}37 * f + 1) \quad (1.20)$$

donde

f es la frecuencia en kilohercios y

x es la frecuencia medida en escala ERB.

1.6.2 Pitch

Este parámetro sólo está definido para sonidos periódicos y representa la estimación subjetiva de su frecuencia fundamental (19)

A frecuencias bajas, se observa que un sonido correspondiente a una señal senoidal pura de doble frecuencia que otro, produce una sensación de frecuencia subjetiva del doble que la primera. Pero, esta relación no se conserva al aumentar la frecuencia de los sonidos, puesto que, al tratar con sonidos de frecuencias muy altas, duplicar la frecuencia de éstos supone tan sólo un pequeño incremento de la sensación subjetiva de frecuencia o Pitch (8).

El Pitch o frecuencia subjetiva de un sonido periódico tiene como unidad el *mel* y el cálculo de este parámetro es de gran interés cuando se trabaja con instrumentos musicales, ya que estos generan señales periódicas o cuasiperiódicas.

El símbolo utilizado para este parámetro es H_F y se mide en mel.

Referencia: Un tono puro de 125 Hz tiene un Pitch de 125 mel.

Pitch de Zwicker

Según Zwicker el Pitch de una señal senoidal pura se calcula mediante la expresión:

$$H_F = (f_T/Hz)(1 + v) \quad (1.21)$$

donde:

fT es la frecuencia del tono y

v es la desviación de pitch que se descompone en dos partes:

v = vL + vM

Para tonos complejos formados por varias señales senoidales puras, el pitch corresponde a la frecuencia fundamental del sonido (que coincide con la separación frecuencial existente entre las señales senoidales que lo forman) (18).

1.7 Loudness o sonoridad

El *Loudness* (o sonoridad) de una señal acústica es una característica determinante a la hora de evaluar su calidad subjetiva. La sonoridad de una señal de banda estrecha está en función de su frecuencia, siendo las frecuencias próximas a 4 kHz las que mayor sonoridad tienen para un mismo nivel de presión; y las frecuencias más altas y más bajas dentro del margen de frecuencias perceptibles las que menos. Los métodos de cálculo tienen en cuenta el modelo del oído como analizador espectral y por tanto también los enmascaramientos temporales y frecuenciales que se producen.

Los sonómetros que se encuentran en el mercado no miden *loudness* sino SPL con distintas ponderaciones. Pero la sonoridad se ha introducido como un parámetro superior al nivel de presión sonora con ponderación A porque muestra mayor correspondencia con la sensación subjetiva de volumen (33).

El modelo de este parámetro desarrollado por Zwicker ha sido trasladado a la norma ISO-532-B y ha sido objeto de mejoras propuestas por Moore (que utiliza la escala ERB en lugar de la Bark) y por Chalupper (que permite simular el funcionamiento de oídos dañados).

El símbolo utilizado para el *Loudness* es N y se mide en sones (o sonios).

Referencia: Un tono puro de 40 dB SPL y frecuencia de 1kHz tiene *Loudness* de 1 sone.

El modelo de cálculo propuesto por Zwicker representado en la **figura 1.9**, calcula el *Loudness* de una señal como la suma de este asociado a cada una de las bandas de frecuencia en que se descompone la señal. La sonoridad asociada a cada banda recibe el nombre de *Loudness* Específico, se mide en sones/bark y se representa por el símbolo N′, donde el apóstrofe significa específico (es decir particularizado en una banda).

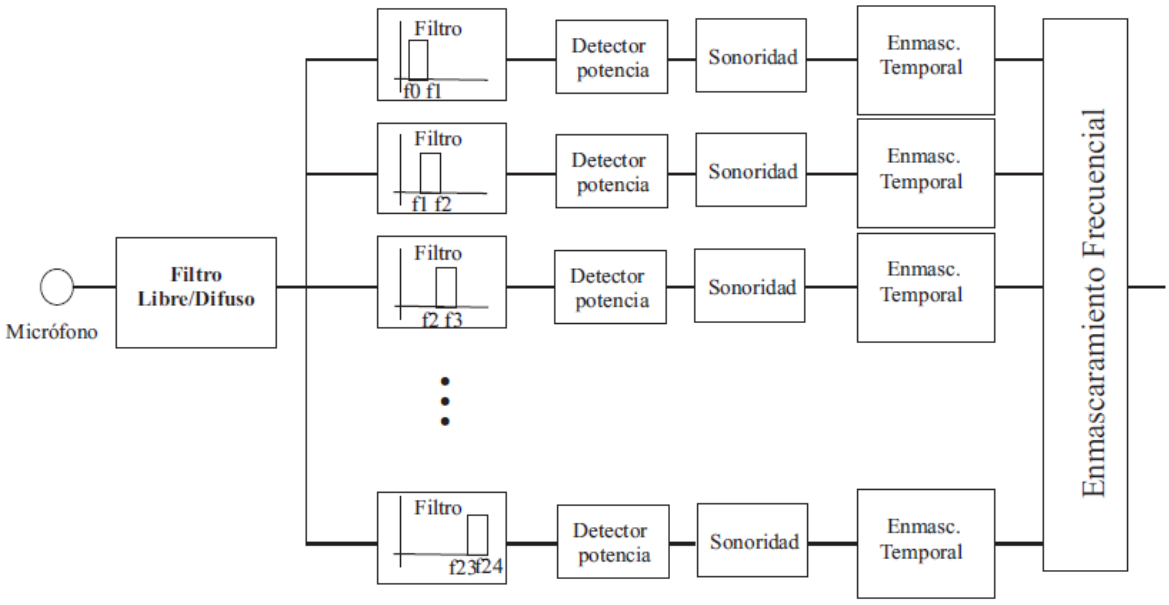


Figura 1.9: Esquema del método de cálculo de *loudness* propuesto por Zwicker.

El adjetivo *Específico* se utiliza también para otros parámetros psicoacústicos cuando se hace referencia a la distribución del parámetro entre las bandas críticas y se representa añadiendo un apóstrofe al símbolo del parámetro respectivo (22).

La figura 1.9 describe el procedimiento de cálculo del parámetro descrito mediante circuitos electrónicos o programas informáticos: Después de filtrar la señal con un filtro de campo libre o campo difuso en función de la dirección de llegada de la señal, se divide ésta en 24 bandas (Bandas críticas) de 1 Bark de anchura.

La señal obtenida a la salida de cada uno de los 24 filtros anteriores se introduce en un estimador de potencia (formado por un rectificador de señal y un filtro paso bajo). La potencia detectada en cada canal se convierte a nivel de sonoridad, mediante una función no lineal que depende de la banda de trabajo (16).

Al nivel de sonoridad de cada banda se le realiza un proceso que modela el enmascaramiento temporal. En este proceso se calcula el nivel de sonoridad de un determinado instante a partir de la salida del bloque anterior en el instante actual y en los anteriores.

Por último, se modela el enmascaramiento frecuencial mediante un bloque que calcula el nivel de sonoridad en una banda para un instante determinado, a partir de los valores de

sonoridad en ese instante, de la banda calculada y sus bandas contiguas. De esta forma se obtiene un nivel de sonoridad para cada banda en un instante de tiempo (*Loudness* específico) (34).

Si se suman, para un instante de tiempo los valores correspondientes al *Loudness* específico de todas las bandas se obtiene el instantáneo y al promediar este para un determinado intervalo de tiempo se obtiene el total en dicho intervalo.

1.7.1 Fundamentos del Loudness de Zwicker

El modelo propuesto por Zwicker ha sido adoptado por la norma ISO-532-B, que es de aplicación para señales con cualquier tipo de distribución espectral, pero con características temporales estacionarias debido a la utilización de filtros estrechos cuyo tiempo de respuesta es relativamente largo. Este estándar está basado en los siguientes hechos empíricos (19):

1. La existencia de bandas críticas que modelan mejor el análisis humano de las frecuencias que una escala en Hercios, ya que tienen en cuenta que la sensación de frecuencia percibida por el ser humano no está en relación lineal con la frecuencia física.
2. El cálculo de la sonoridad total de una señal corresponde a la suma del aportado por cada banda critica (*Loudness* específico).
3. Un sonido en una banda puede provocar excitación en las bandas adyacentes, y esto produce el fenómeno conocido como *enmascaramiento frecuencial*.
4. La sensación de sonoridad de un sonido que llegue al oído desde todas las direcciones difiere de la que se tendría si este se aproxima en dirección frontal (aunque ambos tengan el mismo nivel de presión sonora).
5. Existe una relación entre nivel sonoro y sensación de sonoridad que depende de la intensidad del sonido y de la banda crítica en la que se encuentre.
6. El cálculo del *Loudness* se realiza de forma gráfica utilizando una plantilla normalizada. El estándar dispone de distintas plantillas dependiendo del nivel máximo de la señal que se va a analizar y de si se recibe en campo libre o difuso.

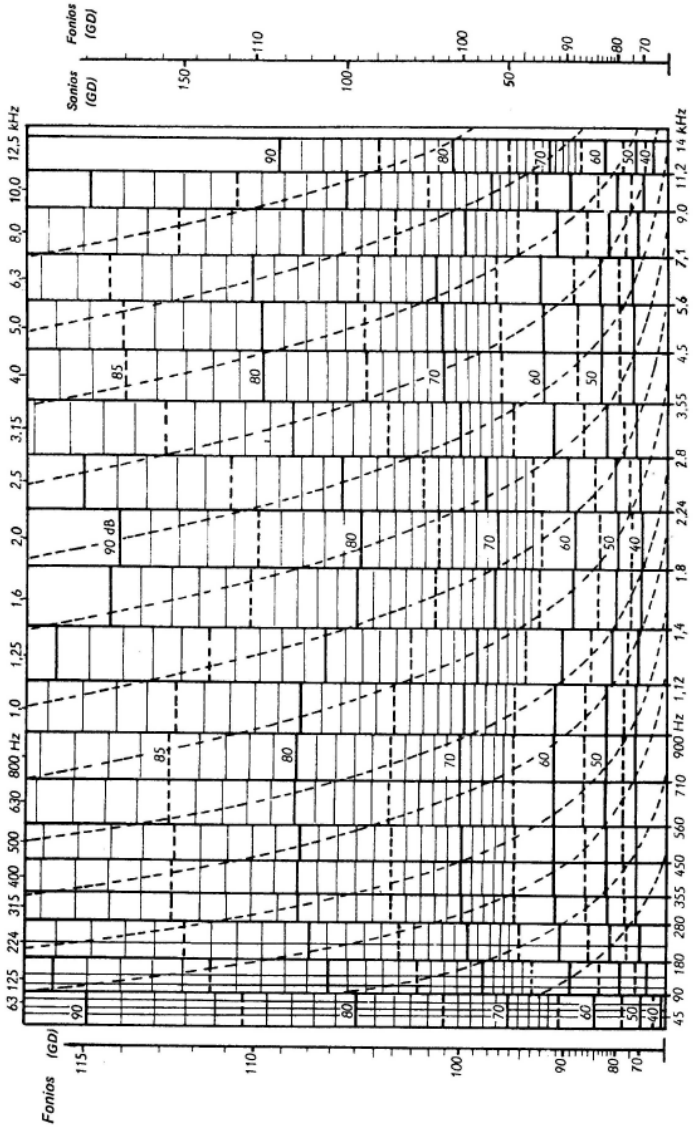


Figura 1.10: Plantilla para cálculo de Loudness según la norma ISO-532-B.

1.7.2 Cálculo del *Loudness* de Zwicker (ISO 532-B).

El punto de partida de este método es el nivel de señal contenido en cada una de las bandas de tercio de octava, por lo que se debería hacer pasar la señal a analizar a través de un banco de filtros y a continuación medir la potencia existente en la salida de cada uno de ellos. Una vez hecho esto, el procedimiento para el cálculo del *Loudness* se descompone en los siguientes pasos (19):

Paso 1:

Se empezará seleccionando la plantilla adecuada en función de la dirección de llegada del sonido y del nivel de la señal que se vaya a utilizar. A continuación, se debe obtener el valor del nivel de intensidad sonora en cada uno de los filtros de tercio de octava definidos en el estándar. Después, se deberán combinar todas las bandas por debajo de 90Hz para agruparlas en una sola medida, también se deberán agrupar en una sola medida las tres bandas comprendidas entre 90 y 180 Hz y las dos comprendidas entre 180 y 280Hz. Todos los valores así calculados se trasladarán a la plantilla mediante líneas horizontales situadas en la banda correspondiente y cuya altura indicará el nivel de éstas. La gráfica obtenida de esta forma recibe el nombre de Nivel de banda crítica.

Paso 2:

Se deben incluir las pendientes de excitación del siguiente modo: si el nivel de la banda inmediatamente superior es mayor que el de la banda analizada, la línea de transición entre las bandas corresponderá a una vertical, pero si la banda inmediatamente superior tiene menor nivel, la transición se realizará mediante una línea curva paralela a las que aparecen en la tabla. De esta forma se habría construido una línea continua que corresponde al nivel de excitación específica (si se lee en la escala de dB) o al *Loudness* específico (si se lee en la escala de sones).

Paso 3:

La última fase en la obtención del *Loudness* consiste en la integración de la gráfica del específico, que según el estándar se debe realizar de forma gráfica dibujando una recta horizontal cuya área sea la misma que la que hay bajo la línea dibujada en el paso anterior y leyendo la altura de la gráfica en la escala graduada, para obtener el valor de este.

Aunque en la actualidad existen sistemas de procesado digital que permiten implementar fácilmente cualquier tipo de filtro asociado a la escala Bark, paradójicamente cuando se quieren realizar cálculos de *Loudness* normalizados se deben de diseñar sistemas digitales que reproduzcan el funcionamiento de los antiguos sistemas analógicos y los filtros de tercio de octava, puesto que la norma se redactó teniendo en cuenta la tecnología analógica de la época (19).

1.7.3 Loudness Level

Este parámetro está estrechamente ligado al *Loudnes*s, proporcionando la misma información. Indica el nivel que debe de tener un tono puro de 1 kHz para que produzca la misma sensación de sonoridad. Su símbolo es L_N, se mide en phones (o fonios) y se relaciona con el *Loudness* del siguiente modo:

si N ≥ 1 sone:

$$L_N = 40 + 10 * \log_2 N \quad (1.22)$$

si N < 1 sone

$$L_N = 40 + (N + 0'0005)^{0'35} \quad (1.23)$$

Referencia: Un tono puro de 40 dB SPL y frecuencia de 1kHz tiene *Loudness Level* de 40 phones.

La sonoridad de una señal estacionaria permanece constante a lo largo del tiempo, mientras que la de una señal no estacionaria varía a lo largo del tiempo, por lo que es habitual realizar medidas instantáneas y estadísticas de estos valores (20).

1.8 *Sharpness*

El parámetro *Sharpness* se corresponde con la sensación subjetiva de frecuencia media del sonido. Un sonido agudo en el que predominen las frecuencias altas tendrá un *Sharpness* elevado mientras que un sonido grave en el que predominan las frecuencias bajas tendrá uno reducido (13).

Cálculo del *Sharpness*: Los métodos utilizados para el cálculo de este parámetro son principalmente dos: uno propuesto por E. Zwicker y otro propuesto por Aures posteriormente para corregir los problemas detectados en las estimaciones realizadas mediante el método anterior.

El símbolo utilizado para este es S y las unidades en que se mide son el *acum*.

Referencia: Un ruido de ancho espectral un Bark centrado en la frecuencia de 1kHz 60 dB SPL tiene, por definición, un *Sharpness* de 1 acum.

Sharpness de Zwicker

El método propuesto por Zwicker para el cálculo del *Sharpness* se corresponde con el cálculo del momento (centro de gravedad) del *loudness* especifico (en escala Bark). En los experimentos realizados por dicho profesor observó que las bandas críticas altas producen un mayor *Sharpness* que las que les corresponde en el cálculo del momento, por lo que introdujo un factor de ponderación g(z) para valores altos de la escala (20):

$$S = \frac{\int_0^{24} N'(z) * g(z) * z * dz}{\int_0^{24} N'(z) * dz} \, acum \qquad (1.24)$$

donde:

z es la frecuencia medida en escala Bark,

N'(z) es el loudness específico y

g(z) es una función ponderadora en función de la frecuencia que vale:

$$g(z) = 1, \text{ si } z \leq 16$$

$$g(z) = 0'066 * e^{0'171} \text{ si } z > 16$$

La gráfica de esta función ponderadora es la que se puede ver en la figura 1.11.

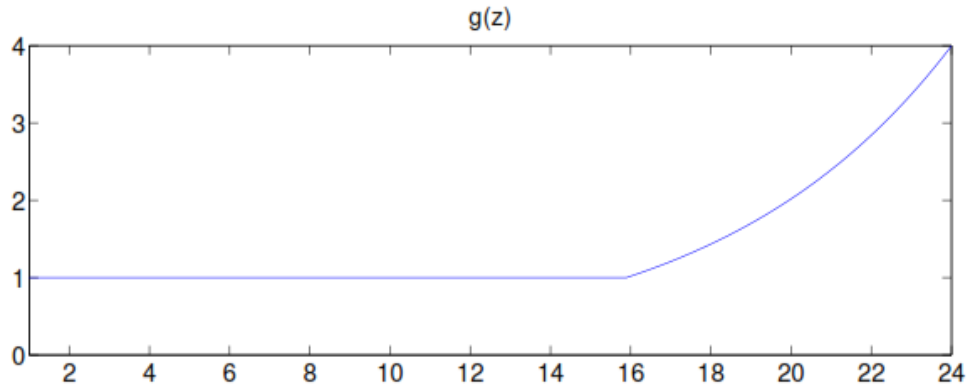


Figura 1.11: Función de ponderación del sharpness en función de la frecuencia (en escala Bark).

Sharpness de Aures.

El método propuesto por Zwicker para el cálculo del *Sharpness* es independiente del nivel sonoro de la señal que se analiza. No obstante, los experimentos realizados demuestran cierta dependencia entre este y el nivel sonoro de la señal. Por eso, Aures propone calcular este parámetro mediante un método derivado del anterior que tenga en cuenta esta dependencia:

$$S = \frac{\int_0^{24} N'(z) * g(z) * z * dz}{\ln(0'05N + 1)}\ acum \qquad (1.25)$$

siendo:

N’(z) el *loudness* específico y

N el *loudness* total de la señal.

CAPÍTULO 2. APLICACIONES DEL AUDIO.

2.1 Audición binaural u holofónico

En el ser humano, la audición se produce a través de dos canales independientes (los dos oídos). La información que el cerebro recibe de los dos oídos es diferente (salvo cuando están equidistantes de la fuente), porque ambos oídos están físicamente separados entre sí por la cabeza. Ésta diferencia en la posición de los dos oídos es la que permite al cerebro la localización de la fuente sonora (20).

Por ellos, se recibe la información independientemente que luego el cerebro procesa comparando los impulsos nerviosos que produce cada sonido interpretando finalmente las características de las ondas sonoras. Éste proceso donde los oídos con su separación física reciben la información sonora independientemente y posteriormente es descifrada es cómo escucha el ser humano, binauralmente.

En el sistema auditivo, la sensación tridimensional está relacionada con la diferencia entre intensidad y fase que recibe cada oído. Es decir, la localización de los sonidos en el espacio se consigue con el procesamiento por separado de la información que recibe cada oreja, y con la posterior comparación de intensidad y fase entre ambas señales (35).

- La diferencia de intensidad (ILD) entre las señales que llegan a los dos oídos se debe a que la cabeza produce un efecto de difracción en el sonido. Todas las ondas sonoras cuyas longitudes de onda (λ) sean menores de 35 cm. (correspondientes a frecuencias mayores de 1000 Hz.) sufrirán esta diferencia de intensidad entre los dos oídos.
- La diferencia de tiempo (ITD) es debida a los distintos instantes de tiempo en que cada oído recibe la señal. Se es capaz de detectar esto para longitudes de onda elevadas, es decir, para frecuencias bajas (según la persona) menores de un rango entre 500 y 800 Hz.

Siendo así, en el plano psicoacústico para que el cerebro pueda determinar de dónde proviene un sonido tiene que evaluar tanto el retardo de llegada a los oídos y la longitud de onda que éste posea, así como fenómenos tales como el enmascaramiento y el efecto Hass (36).

El sonido binaural u holofónico se fundamenta en grabar un sonido emulando las condiciones en que escucha el oído humano. Para ello se vale de una *Dummy Head* que tiene los canales auditivos construidos a semejanza de los del ser humano y donde se alojan los correspondientes micrófonos que llevan a cabo la grabación. Así, se intenta recrear el comportamiento de las ondas sonoras dentro de los oídos y las mismas diferencias en tiempo de llegada y nivel (fase y amplitud) entre oídos que ocurren de forma natural. De esta manera, se logra un efecto análogo al de la holografía en el campo visual donde para lograr volumen en la imagen se hacen incidir rayos laser y por su variación asimétrica con un entrono forman la imagen en tres dimensiones. He aquí el otro nombre de éste sonido.

Si bien es cierto que el producto auditivo es uno solo, éste no sería posible sin la interacción de algunos aspectos físicos del sonido. Por tanto, es preciso tratar el tema en cuanto a los aspectos que intervienen en el sonido binaural.

El sonido binaural u holofónico comprende dos parámetros físicos importantes que definen prácticamente todos los fenómenos acústicos que intervienen en él; el tiempo de llegada al oído de un sonido y su intensidad como también la dirección de llegada del sonido y los eventos acústicos producidos por la interferencia de la cabeza en el transcurso de la onda. A raíz de ésta interacción el cerebro puede procesar esa información acústica para establecer la posición, intensidad, sonoridad, si está en movimiento, como cambia con el movimiento un determinado sonido (5).

2.2 Determinación de posición de una fuente de sonido

La principal forma de localizar una fuente de sonido es de acuerdo a su posición angular, la cual involucra la diferencia relativa de la forma de onda entre los dos oídos en el plano horizontal. Es importante recalcar que, desde el punto de vista evolutivo, la posición horizontal de los oídos maximiza las diferencias de los eventos auditivos que ocurren a través del oyente, ya sea hacia arriba o hacia abajo, esto permite la audición de fuentes auditivas fuera del campo visual. “Para describir estas señales bajo experimentos psicoacústicos, se recurre al paradigma de lateralización, el cual involucra la manipulación experimental de la ITD y de la ILD para determinar la sensibilidad relativa de los mecanismos fisiológicos a éstas. Aunque la lateralización pueda ocurrir con parlantes en ambientes anecoicos, los experimentos de lateralización utilizan casi siempre los

audífonos". La palabra "lateralizada" significa un caso especial de la localización, donde la percepción espacial se escucha dentro de la cabeza sobre todo a lo largo del eje interaural entre los oídos; y los medios para producir la percepción implican la manipulación de las diferencias de tiempo o de intensidad interaural sobre los audífonos. Con el paradigma de lateralización, es posible hacer hipótesis limitadas pero demostrables sobre la fisiología del sistema auditivo y de la localización por parámetros simples controlados por algún medio. Por ejemplo, cuando sonidos idénticos (Monoaurales) son emitidos por audífonos estéreos, la "imagen especializada" aparece en una posición virtual en el centro de la cabeza. Una situación similar ocurre con los sistemas de altavoz de dos vías, donde una buena manera de encontrar el "sweet spot" para un sistema estéreo casero es ajustando la perilla del balance hasta lograr un sonido de emisión de radio monoaural, el sonido suena como una fuente virtual localizada en el punto medio entre los altavoces (3).

Para que el oído pueda establecer la localización de la fuente de sonido se ponen en juego ocho parámetros acústicos que son:, ITD (*Interaural Time Difference*), ILD (*Interaural Level Difference*), el movimiento de la cabeza y movimiento de la fuente, la respuesta del pabellón auditivo (características de ITD e ILD ambiguas, HRTF, localización con características HRTF), característica de la distancia (Intensidad, volumen, influencia de la familiaridad, características espectrales y binaurales para la distancia), reverberación y eco.

2.2.1 Diferencia de Tiempo Interaural (ITD) y Diferencia de Nivel Interaural (ILD)

Uno de los mecanismos usados por nuestro sistema auditivo para localizar una fuente de sonido es la diferencia de los tiempos de llegada del frente de onda de la señal sonora a los oídos. Éste tiempo que se le conoce como ITD (*Interaural Time Difference*) es útil hasta una frecuencia en la que la longitud de onda del sonido se aproxima al doble de la distancia entre los dos oídos, a partir del cual, no se diferencia un sonido del otro. Este tiempo de llegada del sonido, le permite al oído determinar la localización del sonido en un ángulo horizontal 90°(derecha) 270°(izquierda).

El sonido de una fuente que venga de la izquierda (por ejemplo) llegará primero al oído izquierdo, pero tendrá que viajar hasta el otro lado. En realidad, lo que ocurre, es que el sonido es difractado alrededor de la cabeza para llegar al oído derecho y por lo tanto tendrá que viajar más y gastar más energía. Éste tiempo se llama (ILD) *Interaural Level*

Difference, que abarca en cuanto a intensidad tanto el efecto pantalla de la cabeza como el debido a la distancia extra que recorre. El ILD depende fuertemente de la frecuencia. A frecuencias bajas, donde la longitud de onda del sonido es más grande que el diámetro de la cabeza, hay poca diferencia de presión sonora en las dos orejas, sin embargo, a altas frecuencias, donde la longitud de onda es pequeña, puede haber 20dB o más de diferencia (33).

Debido a las diferencias físicas que hay entre todos los seres humanos, se vuelve relativo el sentido de la escucha entre sí.

2.2.2 Función de Transferencia HRTF

La función de transferencia relativa a la cabeza, *head related transfer function* o HRTF, caracteriza la forma en que cada oído recibe una onda sonora proveniente de un punto en el espacio. Tiene en cuenta el hecho de que el sonido que llega a cada oído se comporta de manera diferente por la reflexión, difracción, etc. debido a todos los "obstáculos físicos humanos" que tendría ésta antes de llegar al sistema transductor dentro del pabellón auditivo. La función HRTF es la compilación de todos esos factores que alteran la onda acústica y que permiten determinar la posición de un sonido en específico. Ésta depende de 4 variables que se dividen en tres espaciales y una frecuencial. Sin embargo, mediciones hechas para establecer el HRTF se hacen en el campo lejano de audición que está a 1 metro aproximadamente de la posición del oyente. De esta manera, el HRTF dependerá fundamentalmente de la azimut, elevación y frecuencia del sonido.

Aunque existen estándares, resultado de mediciones de HRTF como la de Kemar, esta función es particular de cada individuo y por tanto la generalización de ella resulta un tanto arbitraria para posteriores usos en aplicaciones de audio en tres dimensiones. Por tanto, cada HRTF realizado en alguna grabación va a ser única (37).

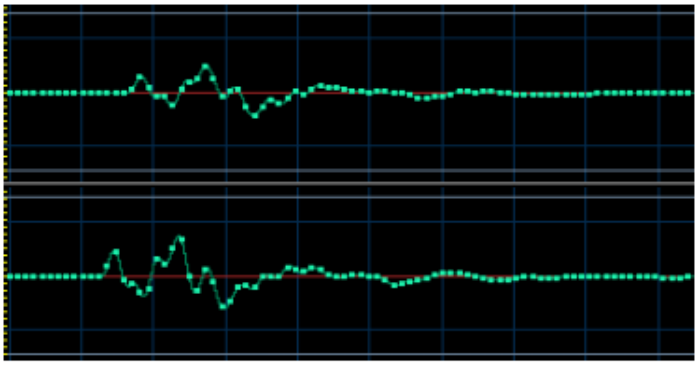


Figura 2.1: Muestras MIT.

2.2.3 Efecto Hass

En una sala con gran un volumen, el sonido directo alcanza la posición del oyente en un breve espacio de tiempo, mientras que las reflexiones producidas en paredes y techos le alcanzan tiempo después debido al camino recorrido por el sonido (22).

En cambio, si la sala es pequeña, las reflexiones alcanzan al oyente prácticamente al mismo tiempo que el sonido directo (debido a que los caminos recorridos por las reflexiones son prácticamente igual que el del sonido directo)

Esta diferencia entre los tiempos de separación del sonido directo y las primeras reflexiones es muy importante desde el punto de vista del mecanismo de la audición y su capacidad de integrar sonidos.

Cuando el sonido directo y el reflejado llegan con una separación inferior a 5 ms el oído humano los percibe como un único sonido e identificaremos su procedencia en base a la diferencia de los tiempos de llegada de cada sonido (38).

Por el contrario, si el sonido reflejado alcanza al oyente 5 ms después de la llegada del sonido directo, el oído lo percibirá como un eco. Este fenómeno es conocido como efecto Hass, también llamado efecto de precedencia.

Basándonos en el efecto Hass, podemos deducir, que es de vital importancia la correcta situación de los altavoces y posición de escucha. De este modo podremos obtener una correcta imagen estereofónica. Ya que, de otro modo, estaríamos obteniendo un

desplazamiento “virtual” de las fuentes sonoras o instrumentos y la consiguiente distorsión de la escena sonora.

2.3 Efecto Franssen

Este efecto está relacionado con la influencia de los transitorios en la determinación de la ubicación de una fuente sonora.

Este se logra a partir de la alimentación de un canal (canal izquierdo), con uno transitorio que desaparece en un tiempo t0 no mayor que 30 ms, y el otro canal (canal derecho), con un sonido que alcanza su estado estacionario al cabo de t0. A partir de t0 solo emite señal el canal derecho con el sonido estacionario. No obstante, el oyente percibe el sonido como proveniente del canal izquierdo que emitió el sonido transitorio. El retardo entre el sonido directo y las primeras reflexiones sería relevante en la percepción, dado que el efecto Franssen no se produce en condiciones de audición anceoicas (es decir, en situaciones en la que el único sonido percibido es el sonido directo y no existe campo sonoro difuso).

Los experimentos que realiza posteriormente Harmann, basados en dicho efecto, arrojan datos significativos sobre la aplicación de la hipótesis de la plausibilidad. Estos fueron realizados en una cámara anecoica y la ilusión no se produjo. La explicación de esto es que el ITD es eliminado como indicio producto que, en un cuarto normal, los ecos crean ITDs implausibles, y el juicio del auditor se basa en la precedencia marcada por el ataque. En una cámara anecoica el sonido directo no es interferido por ecos, por tanto, el ITD opera como indicio, lo que conduce al fracaso de la ilusión (39).

Esto por supuesto no significa que los ecos en un recinto normal inhiban la localización de fuentes sonoras debido a que la ilusión de Franssen falla también en recintos considerados normales, si se usan señales complejas.

2.4 Acondicionamiento acústico

El acondicionamiento acústico engloba todas aquellas técnicas destinadas a corregir y adecuar el campo sonoro en el interior de una sala, con el fin de lograr los objetivos acústicos deseados (40).

Para acondicionar acústicamente una sala se necesita previamente conocer su comportamiento sonoro. Para ello, se recurre a programas de simulación acústica, que

facilitan un análisis detallado del campo sonoro en el interior de la sala, proporcionando parámetros acústicos y auralizaciones.

Podemos distinguir dos tipos de acondicionamiento (26):

- Acondicionamiento primario: Es aquel que se aplica durante la fase de diseño, antes de la construcción de la sala. Así, mediante programas de simulación acústica es posible analizar el efecto que tiene la utilización de distintos materiales de construcción y seleccionar cuáles son los más idóneos. Y también, se puede variar la geometría y el volumen de la sala para que se adapte a los requisitos acústicos: tiempo de reverberación óptimo, eliminación de ecos, etc.
- Acondicionamiento secundario: Este acondicionamiento se aplica como corrección a un modelado incorrecto, es decir, la sala ya ha sido edificada. Y consiste en la aplicación de materiales de acondicionamiento: absorbentes, resonadores, reflectores y difusores. Las soluciones que se adopten dependerán del defecto que se trate de eliminar o, al menos, reducir. Con este acondicionamiento mejorarán las condiciones acústicas del recinto, pero los resultados no serán tan óptimos como los conseguidos con el acondicionamiento primario.

Un diseño adecuado de la geometría de la sala es esencial para un buen acondicionamiento acústico. La inclinación del techo, la forma de la planta, la disposición de los oyentes respecto a la fuente, el volumen de la sala, etc., son determinantes para conseguir unas condiciones acústicas adecuadas.

La inteligibilidad de la palabra se consigue aumentando el número de primeras reflexiones en aquellas zonas donde el sonido directo llega más débil. Éstas pueden proceder de las paredes laterales o del techo. Si la sala es estrecha las reflexiones laterales alcanzarán también a los pupitres centrales, pero sino éstos puntos deberán ser reforzados de otra manera. El techo es la otra fuente de reflexiones, aunque su efecto depende de su inclinación. Por otra parte, la distribución de los alumnos en el aula es también decisiva para tener una buena inteligibilidad de la palabra (20).

En la siguiente gráfica se muestra el modelo ideal para tener, no sólo una buena visibilidad desde cualquier posición, sino también alcanzar niveles sonoros aceptables y, por tanto, una buena inteligibilidad incluso en las últimas filas.

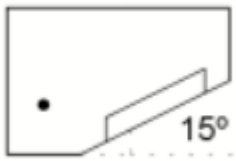


Figura 2.3: Modelo ideal para evitar el Seat-dip.

Esta inclinación del plano donde se sitúan los pupitres, permite evitar el efecto seat-dip, que se origina cuando la incidencia es rasante (ángulos de incidencia pequeños) y que es el responsable de fuertes atenuaciones en frecuencias bajas y medias. El mínimo ángulo que se recomienda es de 15º y el máximo, por razones de seguridad, es de 35º (36).

Además, tendremos que evitar:

- La colocación de paredes paralelas, lisas y altamente reflectantes para prevenir la aparición de ecos flotantes.
- Situar la pared posterior a una distancia superior a 8.5 metros de la fuente y si esto no es posible, procurar que sea lo más absorbente posible para evitar la aparición de ecos.
- La presencia de superficies cóncavas que puedan originar focalizaciones del sonido.
- Emplear superficies planas, lisas y reflectantes de grandes dimensiones para aumentar las primeras reflexiones, pues pueden causar coloraciones del sonido. Si no es posible evitar su uso, dar cierta convexidad a las superficies problemáticas.

Por último, hay que destacar que el volumen de la sala es otro factor muy importante a tener en cuenta. Y está íntimamente relacionado con el tiempo de reverberación (TR). El valor recomendado de TR para las aulas está comprendido entre 0.7 y 1 segundos. Pero según sea el volumen del recinto, necesitaremos un acondicionamiento acústico más o menos riguroso para alcanzar dichos valores. Así, a medida que aumenta el volumen tendremos que aumentar también la superficie de material absorbente para que el tiempo de reverberación no aumente proporcionalmente (13).

Para el cálculo teórico del TR existen un gran número de fórmulas, 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:

$$RT = 0{,}161 \frac{\mathrm{V}}{A_{tot}} \text{ (en segundos)} \qquad (2.1)$$

donde:

V = volumen del recinto (en m^3)

A_{tot}= absorción total del recinto (definida seguidamente)

El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado coeficiente de absorción α. Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo (17):

$$\alpha = \frac{\text{Energía } absorbida}{\text{Energía incidente}} \qquad (2.2)$$

Comprobamos que, para un valor fijo del coeficiente medio de absorción, el tiempo de reverberación permanece prácticamente constante a partir de un volumen determinado. También se advierte que, para coeficientes de absorción muy pequeños, sólo aparecen unos pocos puntos. Esto es debido a la baja absorción hace aumentar el tiempo de reverberación y sólo los volúmenes pequeños poseen valores de TR comprendidos en el margen representado.

Dependiendo de los objetivos acústicos que persigamos, tendremos que utilizar uno u otro material (10):

- Materiales absorbentes: para minimizar la reverberación de la sala.
- Resonadores: para disminuir la reverberación en determinadas frecuencias.
- Reflectores: para aumentar el número de primeras reflexiones enfocadas hacia el público.
- Difusores: para conseguir una difusión del sonido más uniforme.

2.4.1 Materiales absorbentes

Aunque todos los materiales tienen asociada una determinada capacidad de absorción, como pueden ser: los materiales básicos de las paredes, techos y suelos, las superficies vibrantes como ventanas, puertas o tabiques separadores, el público y las sillas, etc., se denominan materiales absorbentes a aquellos usados específicamente como revestimiento del interior de un recinto, para aumentar la absorción del sonido con al menos uno de los siguientes objetivos (9):

- Reducir el nivel del campo reverberante, en ambientes excesivamente ruidosos.
- Optimizar el tiempo de reverberación según la aplicación a la que se dedique el recinto.
- Eliminar o prevenir la aparición de ecos.

Además, estos materiales, al absorber la energía sonora incidente, mejoran los resultados de los materiales propiamente aislantes.

Generalmente, son materiales porosos de estructura fibrosa o granular, constituidos básicamente de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melanina o espuma de poliuretano.

El mecanismo de absorción es el siguiente: Cuando la onda sonora incide sobre estos materiales, una parte de la energía es reflejada y el resto penetra en su interior, a través de sus poros. Una vez dentro, la presión sonora pone en movimiento las partículas de aire que se encuentran en los espacios huecos del material. Este flujo de aire interno es el responsable de la disipación de la energía sonora en forma de calor, debido al rozamiento con las capas sólidas del material (41).

Cuantas más veces se haga pasar la onda sonora a través de estos materiales, mayor será la atenuación que experimente. Por eso, se suelen colocar sobre las paredes límites del recinto que se pretende acondicionar. Así, la porción de energía que atraviesa completamente el material, es reflejada hacia el mismo por la pared interior, donde nuevamente es absorbida.

La capacidad de absorción de estos materiales porosos se mide por medio del denominado coeficiente de absorción, α, que mide la relación entre la energía absorbida y la incidente. Suelen ser proporcionados por el fabricante de dichos materiales para las 6 bandas de

octava: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz. Y a veces, también para las bandas centradas en 63 y 8000 Hz.

Vemos, pues, que α depende de la frecuencia. Generalmente, en estos materiales suele aumentar con la misma. De modo que, según sean nuestras necesidades de absorción, deberemos seleccionar uno u otro material (25).

Por otra parte, las características de absorción no sólo dependen de cuál sea el valor de α, sino que hay otros factores muy influyentes, como:

- El espesor del material.
- La distancia del material a la pared.
- El grado de porosidad del material.
- La densidad del material.
- La colocación.

❖ Absorción según el espesor del material:

Si llamamos D al espesor del material absorbente, a medida que aumentamos D, la absorción aumentará, puesto que la onda sonora permanecerá más tiempo dentro del material y la disipación de energía será mayor. Sin embargo, esto es cierto para aquellas frecuencias que no cumplen la siguiente condición: $D << \lambda$ (6)'.

Esto se debe a que estos materiales absorbentes se colocan pegados a una pared rígida. De modo que la velocidad de las partículas de aire próximas a la pared es prácticamente nula, aumentando progresivamente al separarnos de la pared.

El siguiente nulo de la velocidad de las partículas ocurre a la distancia $\lambda/2$ y el máximo a $\lambda/4$. Siendo la separación entre máximos o mínimos sucesivos, de $\lambda/2$.

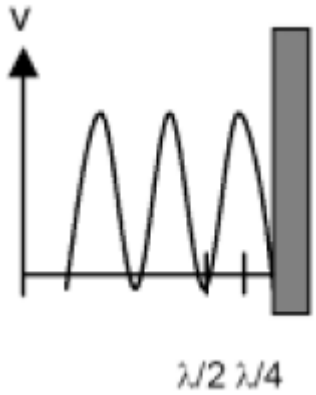


Figura 2.4: Velocidad de las partículas del aire según su distancia a la pared.

Por este motivo, cuando el espesor D es un múltiplo impar de λ/4, se produce en el interior del material absorbente, uno o más máximos de la velocidad de las partículas de aire y, en consecuencia, la absorción es mayor para esas frecuencias.

Puesto que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda, cuanto menor sea la frecuencia, mayor será el espesor necesario para que se cumpla la condición de máxima absorción. Por tanto, si queremos que la absorción sea máxima para un amplio rango de frecuencias, tendremos que elegir un espesor tal que la frecuencia mínima cumpla que (18):

$$D = k * \frac{\lambda}{4} = k * \frac{c}{4 * f}\ ,\ \ k = 1{,}3{,}5, \ldots \qquad (2.3)$$

Donde *c* es la velocidad de propagación del sonido, que vale 345 m/s en el aire.

Por otra parte, si el espesor del material es lo suficientemente pequeño, sus coeficientes de absorción presentarán una sucesión periódica de máximos y mínimos, respecto a la frecuencia.

- ❖ Absorción según la distancia entre el material y la pared:

Consiste en colocar el material absorbente a la distancia a la que la velocidad del flujo de aire es máxima, esto es, a una distancia de λ/4. De este modo, sin incrementar el grosor del material, se consigue maximizar la absorción para una frecuencia escogida y que verifica que d=c/4f (17).

Esto se suele aplicar cuando se quiere aumentar la absorción en bajas frecuencias sin aumentar excesivamente el grosor del material absorbente. Sin embargo, tiene el inconveniente de que la absorción disminuye para las frecuencias más altas.

Y si el espesor es lo suficientemente pequeño, la absorción fluctúa entre máximos y mínimos, según sea la frecuencia (38):

$$f = \frac{(2 * k + 1) * c}{4 * d}, \quad k = 0,1,2, \ldots . \Rightarrow \text{Maximo} \qquad (2.4)$$

$$f = \frac{(2 * k) * c}{2 * d}, \quad k = 0,1,2 \ldots . \Rightarrow \text{Minimo} \qquad (2.5)$$

Como esto no es deseable, se suele colocar el material absorbente en zigzag a lo largo de la pared tratada. De este modo, presenta una distancia variable que suaviza su respuesta de absorción en frecuencia. Esto es tanto más efectivo, cuanto mayor sea el fruncido que se aplique en el material.

Por último, mencionar que lo anterior es válido si la distancia del material absorbente a la pared es pequeña. Para distancias mayores se deben considerar los espacios previos y posteriores al material como si se tratasen de dos cavidades acopladas.

- Absorción según la porosidad del material:

Un aumento de la porosidad del material conlleva una mayor absorción, ya que la porción de energía sonora que penetra en el material es mayor.

Este efecto se produce para todas las frecuencias.

- Absorción según la densidad del material:

Aumentando la densidad del material absorbente, conseguimos aumentar su capacidad de absorción. Pero existe un valor máximo, a partir del cual la absorción empieza a disminuir. Este máximo se encuentra entre 40 y 70 Kg/m3, no siendo aconsejable superar los 100 Kg/m3 (31).

La explicación de esto está en que la disipación de energía sonora en forma de calor, se produce cuando el flujo de aire interno choca con las capas sólidas del material. Por tanto, aumentando la densidad, aumentamos la presencia de estas capas y por tanto, el rozamiento

es mayor y, consecuentemente, también la absorción. Sin embargo, si el número de capas se hace excesivamente grande, disminuye la porosidad del material y la energía incidente será reflejada en su mayoría. De ahí, que la absorción vuelva a disminuir.

❖ Absorción con paneles suspendidos del techo:

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento de los materiales absorbentes colocados paralelamente a la pared. Sin embargo, a veces se dispone de poca superficie tratable respecto al grado de absorción que se necesita conseguir. En estos casos, se recurre a colgar del techo paneles de material absorbente. Se aplican, generalmente, en recintos de dimensiones grandes o medias y de ambiente ruidoso: fábricas, comedores, polideportivos, etc.

Para terminar, hay que destacar que todos los materiales absorbentes se deben cubrir con materiales específicos con las siguientes finalidades (28):

- Para protegerlos de posibles daños externos.
- Para que no liberen sustancias perjudiciales para la salud.
- Por estética.

Sin embargo, siempre debe dejarse la superficie porosa accesible desde el exterior, sino su principal característica (capacidad de absorción) se perdería.

2.4.2 Resonadores

Los resonadores son absorbentes selectivos, cuyo coeficiente de absorción presenta un máximo en la denominada frecuencia de resonancia. Dicha frecuencia estará determinada por la estructura y las propiedades de los materiales que componen el resonador. Su uso permite recortar la respuesta de la sala en determinadas frecuencias para reducir su tiempo de reverberación. Aunque es habitual utilizarlos como complemento de los materiales absorbentes, con el fin de lograr un mayor aumento de la absorción en bajas frecuencias (500Hz) (25).

Podemos distinguir 4 tipos de resonadores:

- De membrana o diafragmático.
- De cavidad simple.

- De cavidad múltiple a partir de paneles perforados o ranurados.
- De cavidad múltiple a base de listones.

Resonador de membrana o diafragmático: Es una cavidad formada por un panel no poroso, pero flexible, como la madera, colocado a una distancia de una pared rígida (29).

Figura 2.5: Resonadores de membrana.

Dicha cavidad, generalmente ocupada por aire, permite que el panel vibre cuando la onda sonora incide sobre él. De este modo, la energía reflejada es menor que si incidiese directamente sobre la pared, puesto que parte de ella se disipa en forma de calor, como consecuencia de la vibración generada (2).

La frecuencia a la que la vibración es máxima, se denomina frecuencia de resonancia f0 y es específica de cada resonador.

Se ha comprobado que la variación de la absorción con la frecuencia tiene forma de campana de Gauss centrada en f_0.

Según las características del material que ocupa la cavidad ($\rho_0 c$) y la resistencia del panel al flujo de aire (rs = relación entre la diferencia de niveles a ambos lados del panel y la velocidad del flujo que lo atraviesa), tendremos una campana de Gauss más o menos estrecha:

rs<ρ0·c Curva estrecha α<1

Tabla 2.1. Forma de la campana en función de la variación de absorción.

rs < $\rho_0 c$	Curva estrecha $\alpha < 1$
rs = $\rho_0 c$	Curva optima α=0
rs > $\rho_0 c$	Curva ancha α<1

Una forma de aumentar rs es añadir a la cavidad un material absorbente. Sin embargo, su efecto diferirá según sea la relación inicial entre rs y $\rho_0 c$ (33).

- Si rs < $\rho_0 c$ entonces el material absorbente aumenta la absorción y, se consigue que el coeficiente de absorción a la frecuencia de resonancia se aproxime a 1.
- Si rs > $\rho_0 c$ entonces el material absorbente hace que la curva de absorción se ensanche, siendo menos selectiva en frecuencia y disminuyendo el coeficiente de absorción máximo, centrado en la frecuencia de resonancia.

Por último, mencionar que, dado que los materiales de absorción suelen ser recubiertos por materiales protectores, en caso de que éstos sean no porosos y flexibles, como el plástico o el papel, obtendremos un resonador de membrana (10).

Resonador de cavidad simple (Helmholtz): Es una cavidad, rellena de aire, que accede a la sala mediante una pequeña abertura.

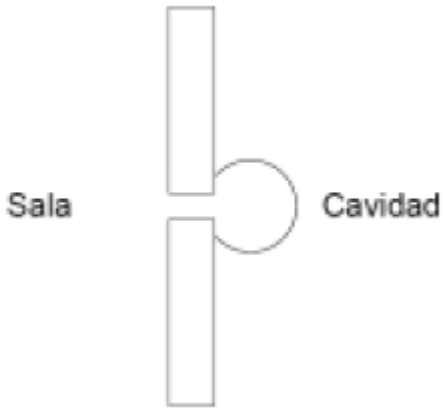


Figura 2.6: Resonador simple de cavidad.

La masa de aire que se encuentra en el hueco de la pared está sometida a un diferencial de presión, cuando la onda sonora incide sobre ella, comportándose como el panel del

resonador de membrana. Mientras que el aire contenido en la cavidad ofrece la resistencia que conduce a la disipación de energía (9).

Al igual que el resonador anterior, presenta una curva de absorción con un máximo en la frecuencia de resonancia, que generalmente se encuentra por debajo de 250 Hz.

Si la cavidad está vacía, es decir, sólo contiene aire, su absorción es muy selectiva en frecuencia. Sin embargo, si se rellena con algún material absorbente, la curva de absorción se suaviza, aumentando la absorción en un rango de frecuencias más amplio, a costa de tener una menor absorción en la frecuencia de resonancia.

Su aplicación es la misma que la del resonador de membrana: aumentar la absorción en una determinada banda de bajas frecuencias. Pero, dado que la superficie que ocupa es demasiado pequeña en comparación con el espacio que debe tratarse (paredes o techos), es habitual colocar una sucesión de resonadores simples de cavidad en serie, distribuidos sobre la superficie cuya absorción pretende aumentarse (28).

En la siguiente figura 2.7 se aprecia un ejemplo de este tipo de resonador.

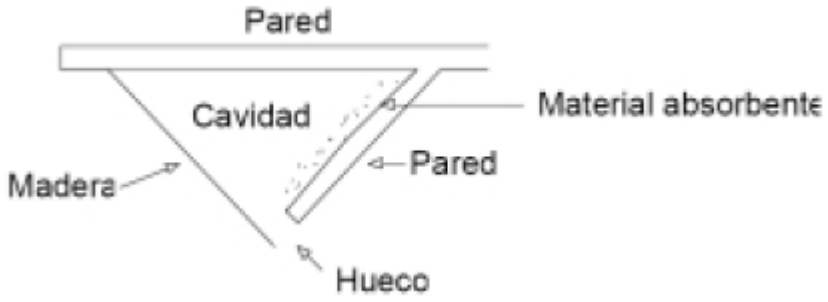


Figura 2.7: Resonador simple de cavidad, utilizado en el acondicionamiento de la filarmónica de Berlín.

Su forma permite, además de aumentar la absorción en bajas frecuencias, mejorar la difusión del sonido incrementando las reflexiones en distintas direcciones.

También, suele utilizarse para eliminar los modos propios de la sala, evitando así el efecto de la coloración del sonido (11).

Resonador de cavidad múltiple (Helmholtz) mediante paneles perforados: Se forma, al igual que el resonador de membrana, colocando un panel no poroso a una distancia d de la

pared, quedando entre ambos una cavidad rellena de aire. La diferencia radica en que el panel ahora es rígido y presenta una serie de perforaciones circulares o de ranuras (rectangulares). Se suele escoger como material para el panel: madera, cartón-yeso, chapa metálica o ladrillo.

Figura 2.8: Resonador de Helmholtz de paneles perforados.

Debido a la presencia de estas ranuras, también puede verse como una agrupación de resonadores simples de cavidad, acoplados entre sí. Así que, aunque sigue comportándose como un resonador, con máxima absorción a la frecuencia de resonancia, es menos selectivo que el resonador simple, por causa del acoplamiento entre cavidades.

Una forma de aumentar la absorción que se produce en el resonador, es introducir en la cavidad un material absorbente. Éste, hará aumentar la absorción para todas las frecuencias, pero reducirá la frecuencia de absorción.

También el lugar donde coloquemos este material absorbente va a influir en la forma de la curva de absorción del resonador. Así, si lo ponemos justo detrás del panel perforado, la curva será amplia y se irá estrechando a medida que acercamos el material absorbente a la pared rígida.

Por último, destacar que para un funcionamiento eficaz como resonador, la distancia d a la pared debe ser constante y las perforaciones o ranuras tienen que estar uniformemente distribuidas a lo largo del panel. Si d fuese variable o la distribución de los agujeros no

uniforme o el porcentaje de éstos aumentase excesivamente, su comportamiento se parecería más al de un material absorbente (25).

Resonador de cavidad múltiple (Helmholtz), formado por listones: Es una variante del resonador múltiple Helmholtz basado en paneles perforados o ranurados.

La diferencia radica en que ahora los huecos por los que penetra la onda sonora se encuentran entre listones sucesivos.

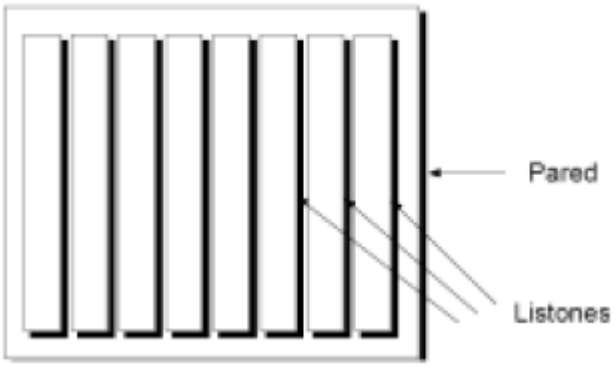


Figura 2.9: Resonador múltiple de cavidad a base de listones.

Este resonador también presenta en su curva de absorción un máximo a la frecuencia de resonancia. Y sigue el mismo comportamiento que el resonador de paneles perforados.

2.4.3 Reflectores

Aunque todos los elementos son susceptibles de sufrir reflexión, en menor o mayor grado dependiendo de su coeficiente de absorción (mayor reflexión ⇔ menor absorción), se denominan reflectores a aquellos elementos específicamente diseñados para generar reflexiones orientadas hacia las zonas del público que necesitan ser reforzadas.

Se caracterizan por ser lisos, rígidos y no porosos, de modo que su coeficiente de absorción es mínimo (idealmente $\alpha=0$). Estas características hacen que la mayor parte de la energía sonora que incide sobre ellos se refleje concentrada en la dirección especular (6).

Su objetivo fundamental es aumentar la presencia de reflexiones útiles destinadas al público. Entendemos por reflexiones útiles aquellas primeras reflexiones que llegan después del sonido directo y que son integradas con el mismo por el oído.

En el caso de salas destinadas a la palabra, sólo se consideran los primeros 50 ms y una riqueza de primeras reflexiones implicará una inteligibilidad y sonoridad altas.

Durante el diseño de un elemento reflector para acondicionar una sala, tendremos que tener presente:

- El fenómeno de difracción inherente a su tamaño limitado.
- La aparición de anomalías que perjudican la calidad acústica final de la sala: ecos, focalizaciones, coloración del sonido, etc.

La difracción es especialmente notoria en bajas frecuencias, donde el reflector corre el riesgo de tener unas dimensiones inferiores a la longitud de onda. De modo que el sonido lo bordeará como si no existiese.

Respecto a las anomalías mencionadas, pueden aparecer si el nivel del sonido reflejado es demasiado alto. Este problema se soluciona consiguiendo una buena difusión del sonido en la sala (27).

Podemos distinguir dos tipos de reflectores:

- Reflectores planos.
- Reflectores curvos.

❖ Reflectores planos: Este tipo de reflectores es el que utilizamos en la simulación de las aulas nuevas. En ellas distinguimos dos situaciones distintas:

a) Aplicando sólo un reflector de primer orden.
b) Reforzando al reflector de primer orden con uno de segundo orden.

El procedimiento seguido para su obtención es el siguiente:

Partimos de una fuente de altura hf separada un metro de la pared.

❖ Reflector de primer orden: En primer lugar, se calcula la fuente imagen de primer orden. Para ello se traza desde la fuente, una perpendicular al techo, y el punto que está del otro lado del techo, a la misma distancia del techo que la fuente (d), es la fuente imagen (38).

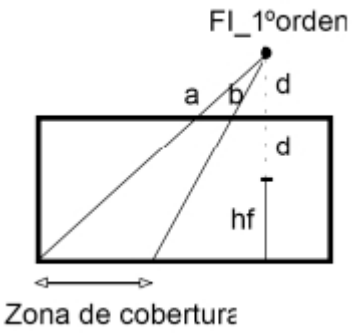


Figura 2.10: Obtención del reflector de primer orden

Ahora dibujamos dos rayos desde la fuente imagen hasta los límites de la zona del público, cuya calidad acústica queremos mejorar. Los puntos de intersección de estas dos rectas con el techo definen el reflector a−b de primer orden.

- Reflector de segundo orden: Para calcular el reflector de segundo orden, tenemos que obtener la fuente imagen de segundo orden.

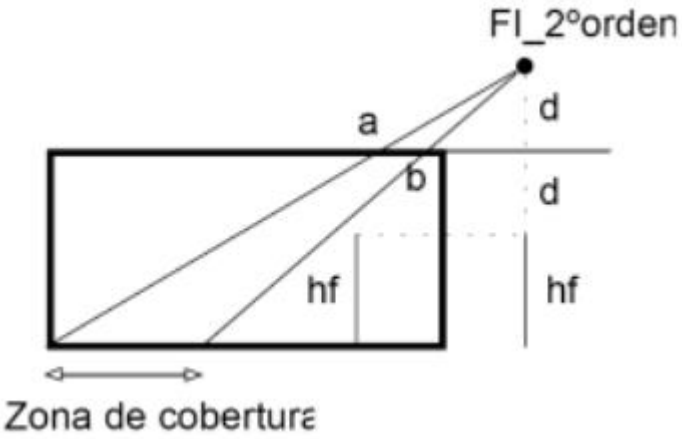


Figura 2.11: Cálculo del reflector de segundo orden.

Inicialmente, se dibuja una fuente paralela a la original, al otro lado de la pared y con su misma altura. A continuación, se prolonga desde esta fuente imaginaria, una perpendicular al techo. De nuevo, el punto equidistante (distancia d) al techo es la fuente imagen, en este caso, de segundo orden (22).

Emitiendo dos rayos desde esta fuente imagen hasta los extremos de la zona que queremos mejorar, encontramos los puntos que definen al reflector de segundo orden a−b. En ambos

casos, al diseñar el reflector se deben considerar los efectos de difracción que aparecerán debido a sus limitadas dimensiones. En consecuencia, la variación respecto a la frecuencia será la siguiente:

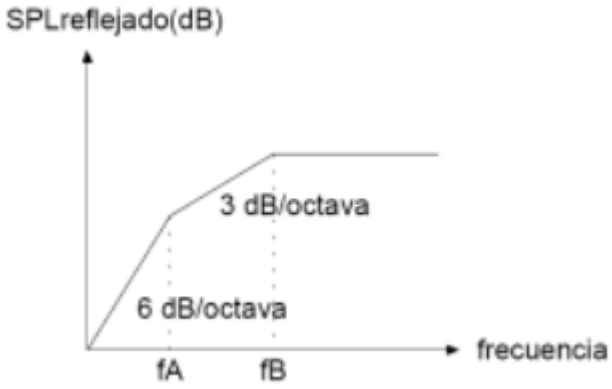


Figura 2.12: Respuesta frecuencial de un reflector plano.

Donde:

$$f_A = \frac{c}{\left[\frac{1}{s}+\frac{1}{r}\right] * B^2 * \cos^2(\theta)} \ [Hz] \qquad (2.6)$$

$$f_B = \frac{c}{\left[\frac{1}{s}+\frac{1}{r}\right] * A^2} \ [Hz] \qquad (2.7)$$

siendo:

s: distancia de la fuente al centro del reflector (m).

r: distancia del receptor al centro del reflector (m).

A: longitud del reflector (m).

B: anchura del reflector (m).

θ: ángulo de incidencia y de reflexión sobre el reflector.

C: velocidad del sonido (345 m/s a 22ºC).

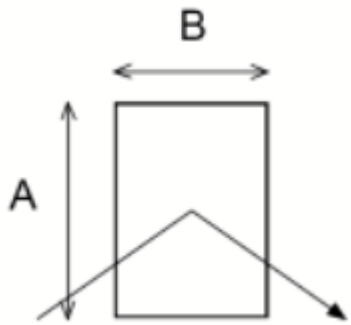


Figura 2.13: Esquema del reflector.

Por tanto, sólo para frecuencias superiores a f_B, el reflector se comporta de forma óptima.

Dado que interesa que el reflector se comporte como tal en el mayor rango de frecuencias posible, es conveniente reducir las frecuencias f_A y f_B. De la observación de sus expresiones se deduce que éstas disminuirán cuando decrece la distancia entre el reflector y los receptores o cuando el ángulo de incidencia θ es pequeño (41). También se consigue reducir f_A y f_B aumentando las dimensiones del reflector (A y B). Por tanto, interesan reflectores próximos al público, lo que ya conlleva reflectores de tamaños considerables, puesto que el público suele ocupar un área grande.

Sin embargo, reflectores de dimensiones excesivamente grandes tienen la desventaja de que pueden aparecer anomalías (coloración del sonido, ambigüedad en la localización de la fuente, etc.), como consecuencia de la aparición de reflexiones de gran nivel, incluso de nivel superior al del sonido directo.

En la práctica, un método de diseño es hacer f_B sea menor que 500 Hz, para que la respuesta del reflector sea plana en frecuencias medias y altas.

- Reflectores curvos: La cobertura del reflector curvo es bastante mayor que la del plano. En consecuencia, la difusión del sonido es mayor y el nivel de las reflexiones añadidas disminuye, evitando, por tanto, la aparición de las anomalías mencionadas para el reflector plano (38).

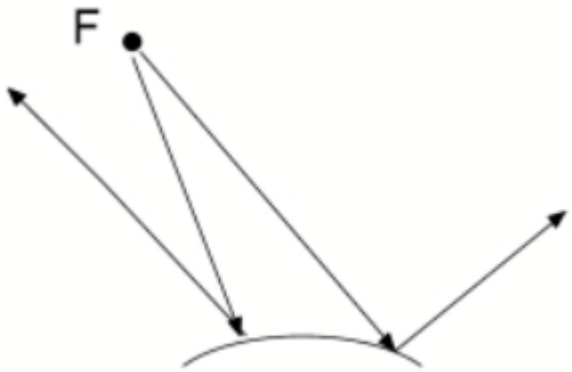


Figura 2.14: Reflector convexo

En la práctica, se consigue un óptimo funcionamiento diseñando un reflector convexo con radio de curvatura mayor que 5 m. Si el radio es menor, se comportará como difusor en vez de como reflector. La elección de la forma convexa en lugar de cóncava es porque las superficies cóncavas tienden a focalizar el sonido y en determinadas ocasiones pueden utilizarse como difusores (18).

2.4.4 Difusores

Se denominan difusores a aquellos elementos que reflejan el sonido uniformemente en todas las direcciones. Su aplicación está fundamentalmente destinada a salas de conciertos. Con ellos se consiguen elevar el grado de espacialidad del sonido, con lo que la impresión de la calidad acústica del recinto mejora considerablemente. Un uso alternativo, válido para cualquier tipo de sala, es mejorar la difusión del sonido para eliminar anomalías acústicas como: ecos, coloraciones, focalizaciones, etc.

Existen distintos elementos que funcionan como difusores del sonido (42):

- Superficies con adornos, relieves, irregularidades, huecos, rugosidades etc. Por ejemplo, techos artesonados (con paneles poligonales), estatuas, etc. Un caso particular es la zona ocupada por las sillas, con o sin espectadores, que presenta un alto grado de difusión, pero debido a su alta absorción no funciona como difusor.
- Difusores policilíndricos: conjunto de superficies lisas y convexas cuyo radio de curvatura es menor que 5 m. La zona de cobertura es mucho mayor que la de los

reflectores convexos y el nivel de las reflexiones menor, por ese motivo funcionan como difusores.

- Difusores de Schroeder: superficies con irregularidades creadas según la teoría de los números de Schroeder. También se denominan RPG *("Reflection Phase Grating").*

Todos ellos se comportan como difusores para un determinado rango de frecuencias, fijado por las dimensiones de las irregularidades. Para frecuencias bajas (longitud de onda alta), las reflexiones tienden a concentrarse en la dirección especular, porque para estas frecuencias las irregularidades son imperceptibles. Así que, según la frecuencia límite a partir de la cual queremos aumentar la difusión sonora, así deberán ser las dimensiones de las irregularidades. Cuanto más grandes sean, más baja será la frecuencia límite.

Entre los difusores Schroeder podemos distinguir tres tipos (22):

- Difusores MLS *("Maximum Length Sequence"):* Estos difusores se forman a partir de una superficie lisa, reflectora, a la que se le practican una serie de ranuras. El tamaño y distribución de las ranuras dependerá de la frecuencia de diseño.

Una vez establecida ésta:

1º) Se divide la superficie en tramos de anchura $W=\lambda/2$.

2º) Se genera una secuencia pseudoaleatoria periódica de máxima longitud.

Dicha secuencia sólo contiene +1 o –1.

3º) Se asocia a cada tramo un número de la secuencia, del siguiente modo:

+1 ⇒ Tramo inalterado.

−1 ⇒ Tramo con ranura.

4º) Se hace la ranura, en los tramos que les corresponde, con profundidad $d=\lambda/4$.

Figura 2.15: Difusor tipo MLS.

Estos difusores son poco utilizados actualmente y el rango de frecuencias donde se comportan óptimamente como tales, es la banda de octava que contiene la frecuencia de diseño.

- Difusores QRD *(Quadratic-Residue Diffusor"):* Al igual que los difusores anteriores se forman a partir de una secuencia pseudoaleatoria periódica, pero en esta ocasión aplicada a la profundidad de los huecos.

Hay dos tipos de difusores QRD (16):

- Unidimensionales: Consisten en una agrupación de ranuras rectangulares de igual anchura, pero distinta profundidad, separadas por láminas rígidas y delgadas.
  Su orientación determina la dirección de máxima difusión: la orientación horizontal (vertical) crea difusión en el plano vertical (horizontal).

Figura 2.16: Difusor tipo QRD unidimensional.

Su comportamiento como difusor está comprendido en un margen determinado de frecuencias, fuera del cual tiende a reflejar el sonido en la dirección especular. La frecuencia mínima es establecida por la profundidad, siendo menor para una mayor profundidad. La frecuencia máxima es fijada por la anchura de las ranuras, aumentando al disminuir ésta. Son los más utilizados (41).

- Bidimensionales: Consigue una difusión más uniforme en todas las direcciones al agrupar los dos tipos de difusores unidimensionales (vertical y horizontal) en uno. Básicamente consiste en una cuadrícula (la forma de los huecos puede ser distinta al cuadrado, aunque ésta es la habitual), con huecos de distinta profundidad. Son raramente utilizados.

Figura 2.17: Difusor tipo QRD bidimensional.

- Difusores PRD *("Primitive-Root Diffusor")*: Son similares a los difusores QRD unidimensionales, aunque utilizan una secuencia pseudoaleatoria distinta para generar la profundidad de las ranuras.
  Sus características también son parecidas, salvo que la energía reflejada en la dirección especular es muy débil. Esto los hace útiles para eliminar ecos molestos en una sala. En la práctica son poco utilizados (43).

2.5 Amplificación de audio

Un amplificador de audio, también llamado etapa de potencia, amplificador de potencia, etapa de ganancia o etapa de salida, es un dispositivo electrónico que se utiliza en la reproducción de sonido, su función es la de aumentar la amplitud de la señal de salida, actuando sobre la tensión de la señal de entrada. La relación que hay entre el nivel de salida y el nivel de entrada es la ganancia, de tal manera que la ganancia es la que expresa el grado de amplificación de la señal. Los diferentes modos existentes de amplificar una señal de audio conllevan a ordenar la amplificación en clases. Las clases de funcionamiento de los dispositivos de amplificación son básicamente cinco: A, B, AB, C y D. Otras clases de amplificación más sofisticadas, como pueden ser la Clase G o S, son combinaciones de las clases básicas (10).

2.5.1 Características funcionales más importantes de los amplificadores

Los amplificadores generalmente disponen de varias conexiones para distintas fuentes de sonido, como reproductores de CD, sintonizadores de radio o instrumentos musicales, que son seleccionadas mediante un “conmutador” de entrada y luego reproducidas, mediante un regulador progresivo de volumen o potenciómetro (10).

Sus características funcionales más importantes son las siguientes (44):

- **Ganancia:** es la relación de la potencia de entrada respecto a la potencia de salida amplificada.
- **Potencia de salida:** especifica la potencia eléctrica que puede proporcionar a los altavoces, sin que se produzca distorsión en la señal y el equipo sufra desperfectos.

- **Respuesta en frecuencia:** Indica la relación entre el nivel de señal de entrada y el de salida para el conjunto de frecuencias de funcionamiento del amplificador. Cuanto más plana sea la respuesta en frecuencia, mejores características tendrán los amplificadores.
- **Distorsión:** Es un parámetro que evalúa el nivel de las señales no deseadas presentes a la salida de un amplificador respecto a la señal de entrada. Hay dos tipos de distorsión:
    - **Distorsión armónica total (THD):** Se produce cuando a la salida del amplificador, además de la señal de entrada amplificada, aparecen algunos de sus armónicos que distorsionan la señal.
    - **Distorsión de intermodulación (IMD):** Aparece cuando en la entrada de un amplificador existen señales de distinta frecuencia.
- **Relación señal/ruido:** Es la diferencia entre el nivel de la señal de salida y el nivel de ruido.
- **Sensibilidad:** Indica el nivel mínimo de señal aplicada a la entrada capaz de producir la máxima potencia de salida.
- **Impedancia:** Es la resistencia que presentan internamente los equipos. Hay dos tipos de impedancia:
    - **Impedancia de entrada:** Es elevada para que se produzca una buena transmisión en tensión.
    - **Impedancia de salida:** Determinada por la carga mínima conectada al amplificador.
- **Diafonía:** Se produce en los sistemas que amplifican más de un canal de sonido.

2.5.2 Estructura completa de un amplificador

Los amplificadores comerciales constan de una o más fuentes de alimentación, previos como controles de balance, graves, agudos, volumen y otros, y después las etapas de potencia (43).

Partes fundamentales de un amplificador para que pueda funcionar:

- Fuente de alimentación.

- Control de volumen.
- Pre-amplificador (previos).
- Etapa(s) de potencia.

El esquema más normal de un amplificador es este:

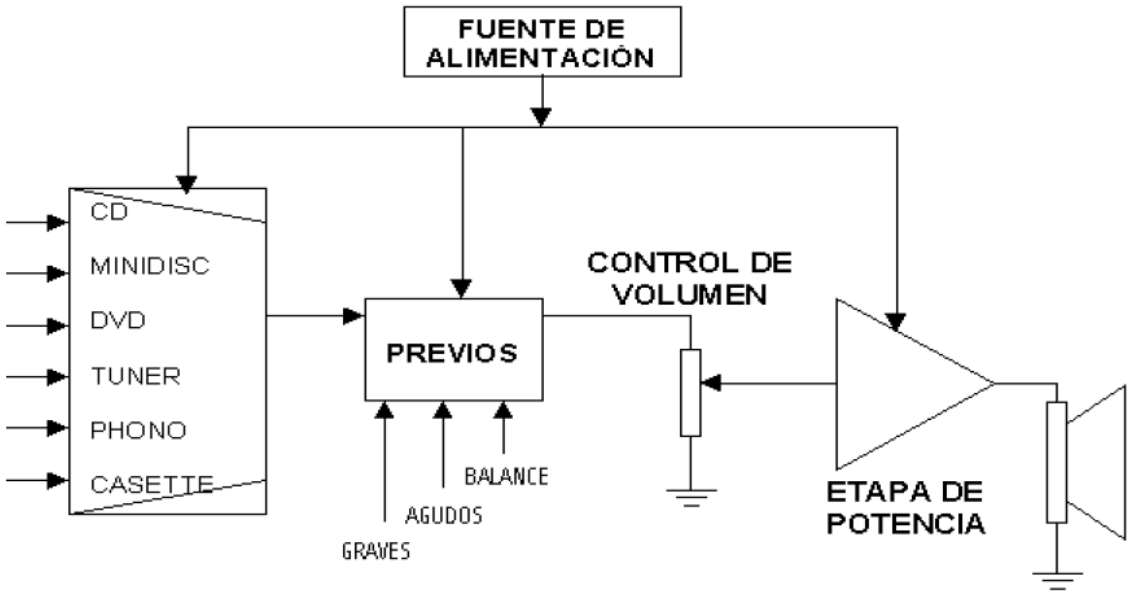


Figura 2.18: Esquema general de los amplificadores de audio

La Fuente de Alimentación es la encargada de transformar la tensión de 220V en las diferentes tensiones de trabajo que necesita el amplificador para trabajar correctamente. Existen tres partes diferenciadas dentro de la fuente de alimentación: el transformador de alimentación, el rectificador y los filtros (45).

El control de volumen y balance se suele hacer utilizando un potenciómetro. Una de las ventajas que ofrece es que no puede añadir distorsión armónica a la señal, aunque por el contrario presenta la desventaja de que si añade ruido.

La distorsión, la ecualización y efectos como la reverberación se añaden a la señal básica de nuestro instrumento en esta parte del amplificador. Debido a esto más de un 50% del carácter del sonido del amplificador depende del diseño del pre-amplificador. En la mayoría de los amplificadores de alta gama no se incluyen controles de graves y agudos, ya que se entiende que a este nivel cualquier ecualización del sonido, para evitar reverberaciones y para ajustar el sonido al gusto personal debe hacerse en los altavoces.

Hay que tener muy en cuenta, el caso de la etapa de potencia ya que es la más importante. En la inmensa mayoría de las etapas de los amplificadores comerciales de transistores se puede observar que tienen esta configuración, seguidamente se presenta un modelo simplificado (46):

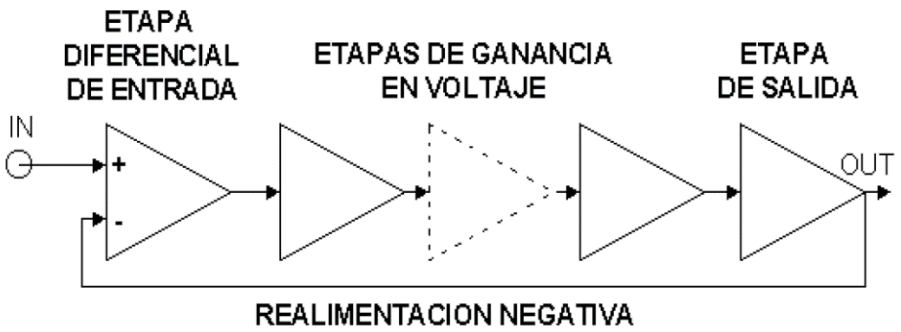


Figura 2.19: Etapa de potencia simplificada

Características fundamentales de la etapa de potencia simplificada (47):

- Etapa diferencial de entrada: Proporciona ganancia, rechazo al rizado de la fuente de alimentación y hace que la realimentación sea más eficiente.
- Etapas de ganancia en voltaje: Proporcionan una ganancia en lazo abierto mucho mayor. Esto contribuye a aumentar el ancho de banda y reducir la distorsión cuando se añade la realimentación.
- Etapa de ganancia en intensidad: Etapa cuya ganancia en voltaje es menor que uno, consistente en un seguidor de emisor, o fuente, o dos complementarios.

El motivo por el cual se produce la distorsión es por los elementos pasivos, realimentación a alta frecuencia y TIM, el diseño debe ser lo más simple posible, sin renunciar a nada necesario. El método de añadir varias etapas de ganancia para conseguir que sea desorbitada, y el factor de realimentación también, con el fin de reducir la distorsión armónica da como resultado una calidad muy pobre, por lo que la tendencia a minimizar partes se va imponiendo y él número de etapas normalmente se reduce a tres, casi el mínimo (37).

En la actualidad, existen muchos tipos de amplificadores de audio, y se suele hablar de clase A, de clase B, de clase C y un largo etcétera de clases; de acuerdo a las características de funcionamiento de las etapas de salida de los amplificadores.

2.5.3 Amplificación Clase A

Su funcionamiento se caracteriza porque el dispositivo de salida permanece en funcionamiento durante todo el ciclo de la señal de entrada. Esta clase incluye la Clase A tipo emisor acoplado con configuración complementaria, donde a plena carga, la corriente en el dispositivo varía desde dos veces el valor de la corriente en reposo, hasta casi cero. También se incluye la Clase A en modo de corriente constante con carga conectada a tierra, entre ambas existe una gama infinita de posibilidades (46).

La característica principal de estos amplificadores es que su entrada (a través de la base del transistor) tiene una fuerte polarización directa y por eso la corriente de colector toma, en ausencia de señal, un valor que está, de forma aproximada, entre el máximo y el mínimo de la corriente de salida deseada. Si las impedancias en el régimen de alterna y continua de la carga del altavoz tienen un valor similar, la tensión de colector del transistor alcanza el valor medio de la tensión de alimentación en ausencia de señal. La **figura 2.20** representa una etapa de amplificación Clase A.

El amplificador descrito es simple y produce señales de audio con poca distorsión, pero en ausencia de señal consume mucha corriente y es relativamente ineficiente. Dado que el transistor opera en la región activa durante todo el ciclo de alterna, la corriente en el colector del transistor fluye durante todo el ciclo de la señal. En el circuito de la **figura 2.21**, la resistencia R_4 actúa como carga de la etapa, y está colocada directamente entre el colector del transistor Q_2 y la fuente de alimentación. Para el caso de amplificador de audio se trataría del altavoz (48; 44).

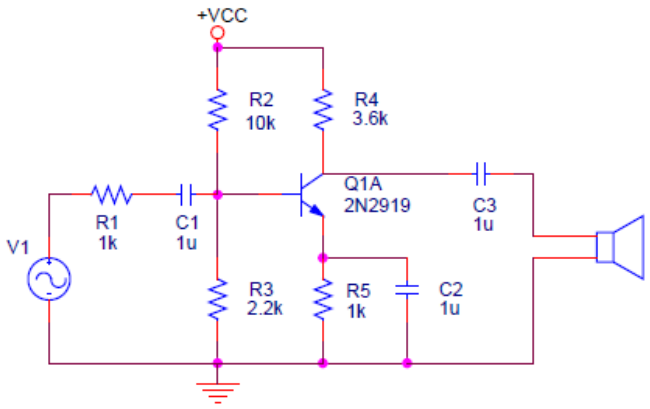


Figura 2.20: Etapa de amplificación Clase A.

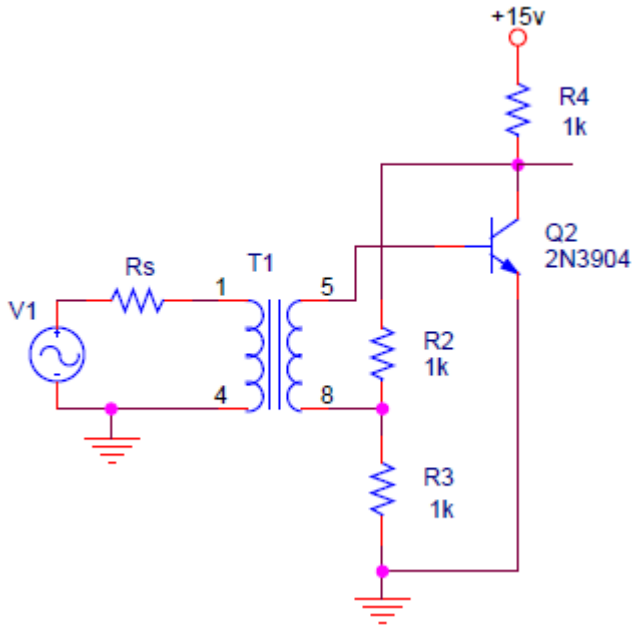


Figura 2.21: Circuito de amplificación Clase A básico (49)**.**

Una característica ampliamente deseada en los amplificadores de audio de alta fidelidad es la obtención de un modo de funcionamiento con distorsión armónica reducida. Muchos amplificadores utilizan la etapa de salida en configuración seguidor de emisor complementaria. Esta etapa presenta un comportamiento no lineal cuando la corriente que llega a la carga es transferida de la mitad superior de la etapa de salida a la mitad inferior del amplificador. La distorsión de cruce se minimiza o se elimina haciendo circular una pequeña corriente de reposo, la cual define una región de funcionamiento en la que ambas mitades de la etapa de salida comparten la corriente. De este modo se suaviza la característica de la curva de transferencia de la etapa de salida y se reduce la distorsión (43).

La corriente de polarización se controla mediante un circuito conocido como circuito de polarización (**figura 2.22 a)** el cual proporciona una tensión controlada a través de los dispositivos de salida complementarios. La fuente de corriente de polarización se activa en un punto que representa la mejor contrapartida entre linealidad y eficiencia. Corrientes de polarización más bajas dan eficiencia más alta, pero distorsión más elevada.

Generalmente se utilizan fuentes de corriente a un nivel de tensión fijo, de tal forma que el circuito se diseñe para mantener una tensión constante a través de las salidas de los

dispositivos complementarios, intentando compensar térmicamente para asegurar que las fuentes de corriente a través de la etapa de salida se mantengan en un rango de temperatura determinado.

Este es especialmente crítico trabajando con transistores bipolares, donde la tensión base-emisor decrecerá con un incremento de la temperatura, otorgando a los transistores un coeficiente de temperatura positivo (46).

La **figura 2.22 b**, muestra un primer caso de circuito de polarización.

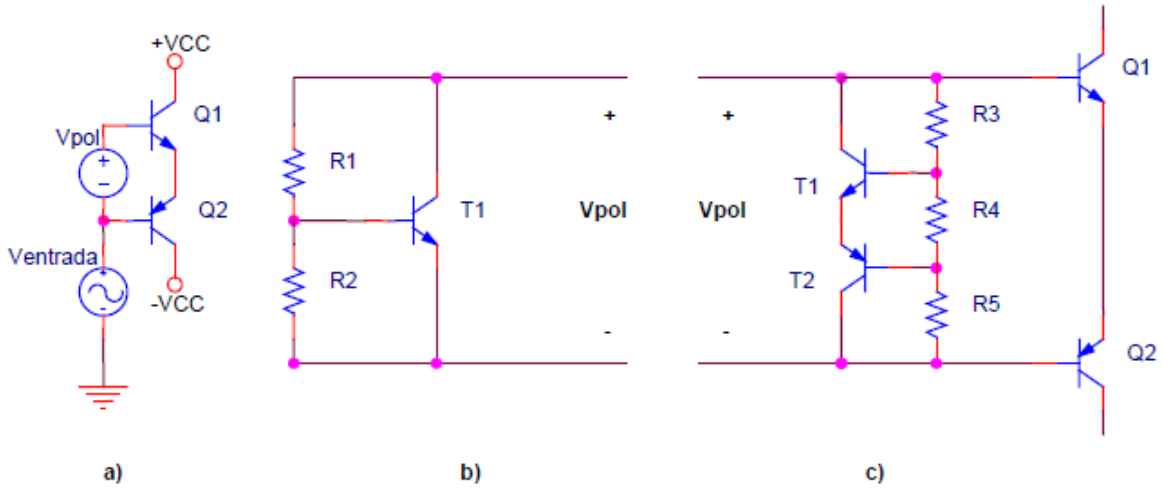


Figura 2.22: Circuitos de polarización de los dispositivos de salida complementarios. a) Esquema General, b) Circuito de polarización, y c) Circuito de polarización con multiplicador (49)**.**

La tensión de polarización toma el valor:

$$V_{pol} = (R_1 + R_2) * I = V_{BE} * \frac{R_1 + R_2}{R_2} \qquad (2.8)$$

Este circuito presenta el problema de que al acoplarlo a la etapa de salida el transistor T1 presenta la misma dependencia con la temperatura que los transistores de salida, ya que entra en contacto con ellos.

Otro circuito que desarrolla la misma técnica (**figura 2.22 c**), incorpora un multiplicador, frecuentemente montado en contacto térmico con los transistores de salida para poder compensar la temperatura. Para dicho circuito se cumple que (10):

$$V_{pol} = 2 * V_{BE} * \frac{R_3 + R_4 + R_5}{R_4} \quad (2.9)$$

Esto proporciona un control dinámico y también realimentación negativa, consiguiéndose una estabilidad añadida.

El funcionamiento en Clase A puede ser obtenido a partir de etapas que trabajan en configuraciones AB o B, y que son transformadas para que los transistores de salida no dejen de conducir. Dicha selección puede hacerse de forma manual, o de forma automática a partir de la tensión en la salida del amplificador **(Figura 2.23)**. El proceso de realimentación, que lleva información de la diferencia de tensión entre los terminales de entrada de los transistores en simetría complementaria, puede realizarse mediante un dispositivo optoelectrónico.

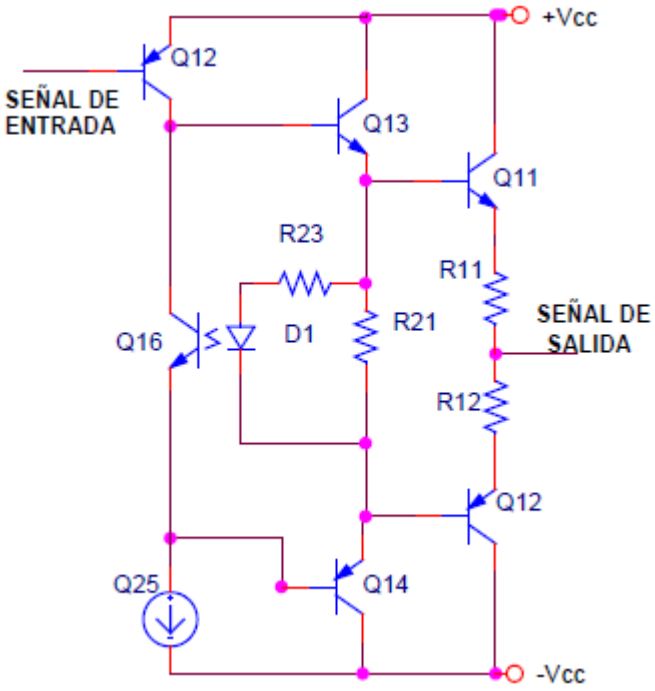


Figura 2.23: Amplificador con circuito de polarización basado en optoacoplamiento (50)**.**

Se puede partir de un circuito conectado para funcionar como Clase B y luego ajustar el punto de funcionamiento a la zona lineal de la característica intensidad frente a tensión

correspondiente a la Clase A (**figura 2.24**). De esta forma se obtiene mayor eficiencia energética en la etapa de salida, menor distorsión en la señal, y todo ello con un número de componentes reducido. En todos los casos se regula la tensión que reciben la base de los transistores en la etapa de salida.

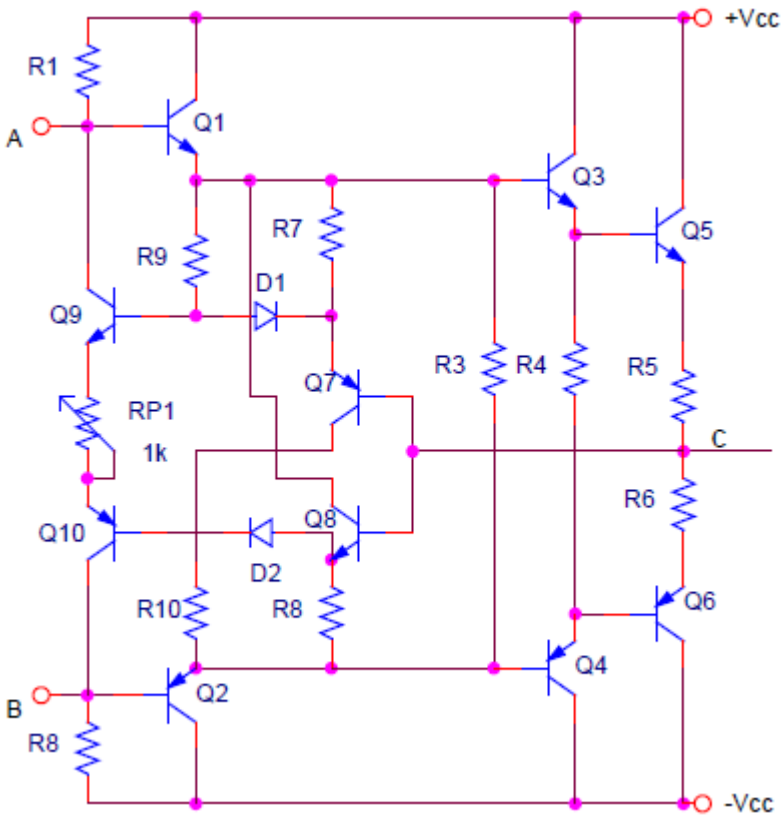


Figura 2.24: Circuito de amplificación con ajuste del punto de funcionamiento (50)**.**

2.5.4 Amplificación Clase B

Los amplificadores clase B consisten en un transistor de salida conectado de la salida al positivo de la fuente de alimentación y a otro transistor de salida conectado de la salida al terminal negativo de la fuente de alimentación. La señal fuerza a un transistor a conducir mientras que al otro lo corta, así en clase B, no se gasta energía del terminal positivo al terminal negativo. Los de clase B tienen etapas de salida con corriente de polarización cero. La mayoría de las veces, un amplificador de audio clase B tiene corriente de polarización cero en una pequeña parte del circuito de potencia, para evitar no linealidades. Tienen una importante ventaja sobre los de clase A en eficiencia debido a que casi no usan electricidad

con señales pequeñas. Los amplificadores de clase B tienen una gran desventaja, una distorsión audible con señales pequeñas. Esta distorsión puede ser tan mala que lleva a notarse con señales más grandes. Esta distorsión se llama distorsión de filtro, porque sucede en un punto que la etapa de salida se cruza entre la fuente y la corriente de amortiguación. No hay casi amplificadores de clase B hoy en día a la venta, ya que no se utilizan casi para audio por sus características.

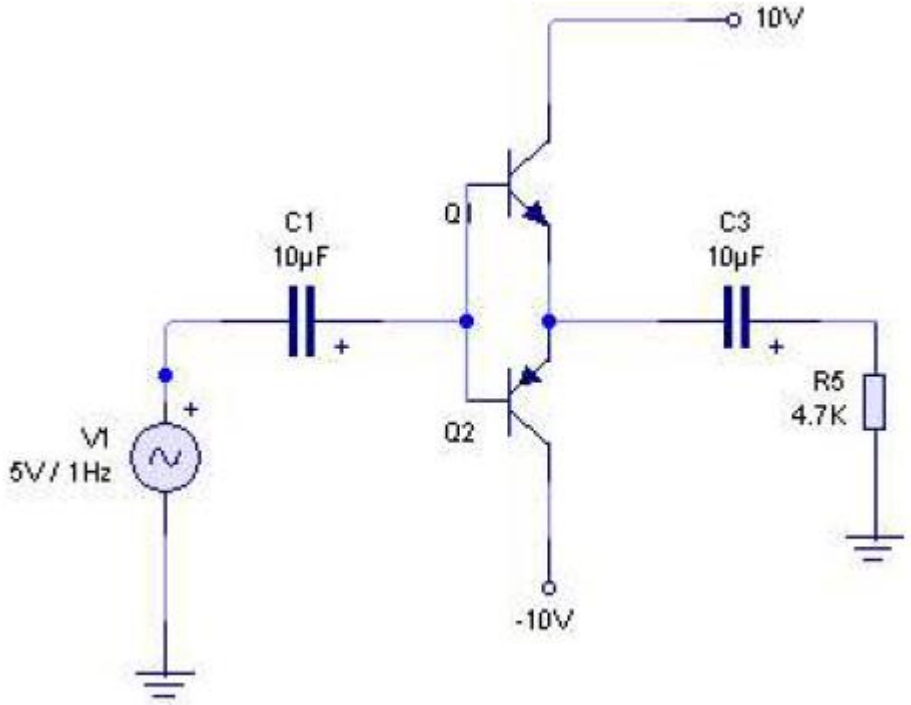


Figura 2.25: Amplificador clase B conexión push-pull (51)**.**

2.5.5 Amplificación Clase AB

Por ahora, la clase AB es la que domina el mercado y rivaliza con los mejores amplificadores de clase A en calidad de sonido. Este tipo, usa menos corriente que los de clase A y pueden ser más baratos, pequeños y ligeros.

Los amplificadores de clase AB son casi iguales a los de clase B, ya que al igual que estos tienen dos transistores de salida. Sin embargo, los amplificadores de clase AB difieren de los de clase B en que tienen una pequeña corriente libre fluyendo del terminal positivo al

negativo incluso si no hay señal de entrada. Esta corriente libre incrementa ligeramente el consumo de corriente, pero no se incremente tanto como para parecerse a los de clase A. Esta corriente de libre incluso corrige casi todas las no linealidades asociadas con la distorsión del filtro. Estos amplificadores se llaman de clase AB en vez de A porque con señales grandes, se comportan como los de clase B, pero con señales pequeñas, se comportan como los de clase A.

Figura 8. Amplificador Clase AB cuasi-complementario Figura 8. Amplificador Clase AB cuasi-complementarioA

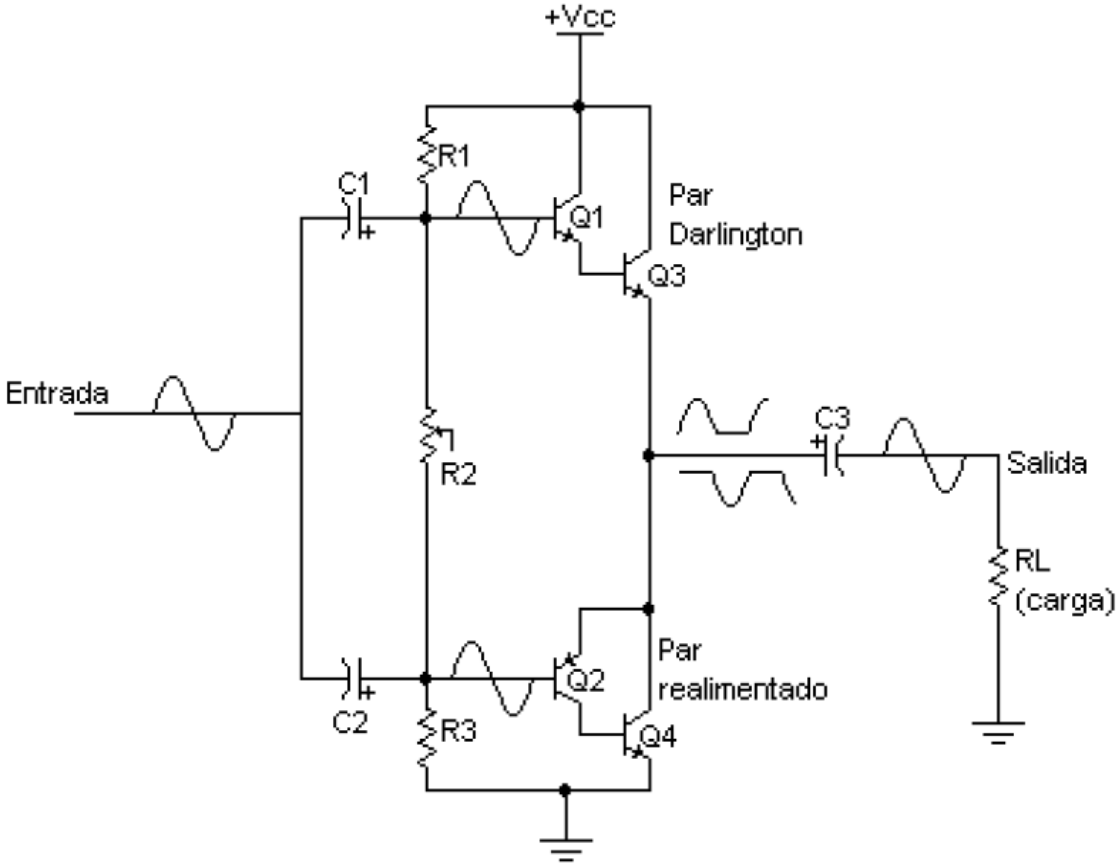


Figura 2.26: Amplificador clase AB (51)**.**

2.5.6 Amplificación Clase C

Los amplificadores de clase C son similares a los de clase B ya que en la etapa de salida tiene corriente de polarización cero. Sin embargo, los amplificadores de clase C tienen una

región de corriente libre cero que es más del 50% del suministro total de voltaje. Los amplificadores de clase C, tampoco son prácticos para audio.

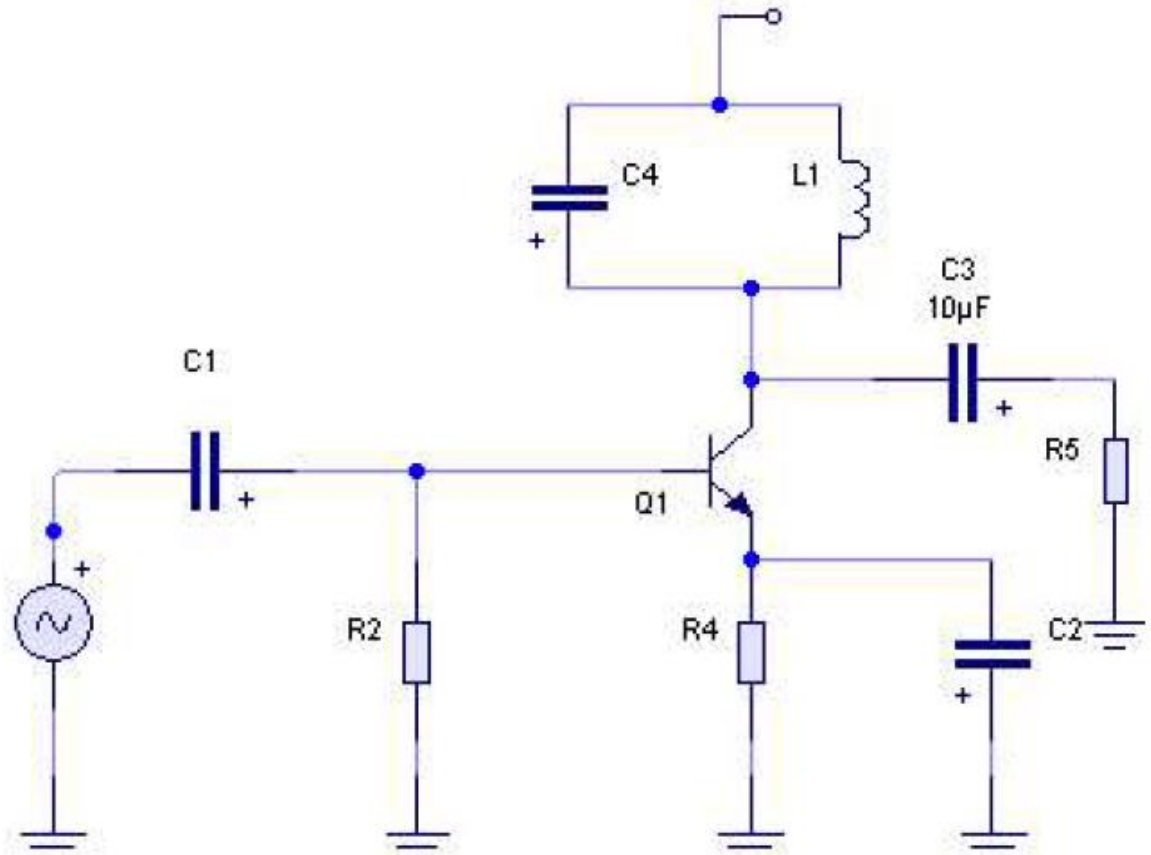


Figura 2.27: Amplificador Clase 2C (51)**.**

2.5.7 Amplificación Clase D

Aunque estos tipos de amplificadores se usan mayormente para aplicaciones especiales como amplificadores de guitarras, de bajos y de amplificadores para subwoofers, en la actualidad se están creando amplificadores de clase D, para todo tipo de aplicaciones. Con esta clase obtenemos amplificadores incluso más pequeños que los de clase AB y más eficientes, aunque están limitados para menos de 10kHz (menos del margen total de audio).

Los amplificadores de clase D usan técnicas de modulación de pulsos para obtener mayor eficiencia. Además, usan transistores que están o bien encendidos o bien apagados, y casi nunca entre-medias y así gastan la menor cantidad de corriente posible. También, son más

eficientes que los de clase A, clase AB, o clase B. Algunos tienen una eficiencia del 80% a plena potencia, pudiendo incluso tener baja distorsión, a pesar de no ser tan buena como los de clase AB o A. Los amplificadores clase D son buenos por su eficiencia.

Es esencial que un amplificador clase D vaya seguido por un filtro paso bajo para eliminar el ruido de conmutación. Este filtro añade distorsión y desplazamiento de fase, incluso limita las características del amplificador en alta frecuencia, y es raro que tengan buenos agudos, pero, por otro lado, va a quitar todo el ruido de conmutación sin causar perdida de potencia, desplazamiento de fase, o distorsión. Para hacer un muy buen amplificador para toda la banda de frecuencias, la frecuencia de conmutación tiene que estar sobre los 40kHz. Desafortunadamente, la alta frecuencia de conmutación incluso significa disipar potencia de conmutación, también significa que la posibilidad de radiar ruido es muy alta.

Existen también las clases E, G y H. El amplificador en clase E es un amplificador de pulsos (cuyo rendimiento puede ser muy elevado) cuya salida se encuentra sintonizada a una determinada frecuencia, suele ser empleado en aplicaciones de radio cuando se trabaja a una única frecuencia o bien en un margen muy estrecho de frecuencias. No es usado en aplicaciones de audio.

La clase G se refiere a amplificadores conmutados que tienen dos diferentes fuentes de alimentación. La fuente para el amplificador se conecta al voltaje menor para señales débiles y al voltaje mayor para señales fuertes, esto da más eficiencia sin requerir conmutar etapas de salida, de tal modo que pueden sonar mejor que los amplificadores clase D.

La clase H se basa en emplear un amplificador en clase D o una fuente de alimentación conmutada para alimentar a un amplificador en clase AB o A, de este modo el amplificador presenta un excelente rendimiento y tiene el sonido de un buen amplificador clase AB. La clase H es muy empleada en etapas profesionales.

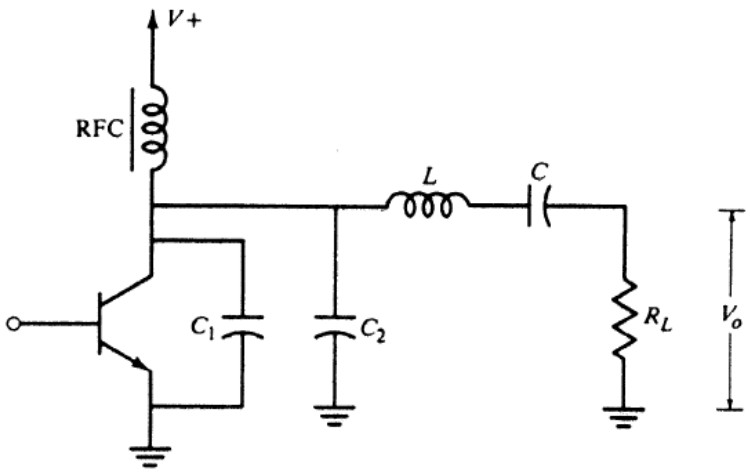


Figura 2.28: Amplificador Clase E (51)**.**

2.5.8 Distorsión en amplificadores de audio

Se considera que las variaciones de la señal de menos de 360° del ciclo de la misma presentan distorsión. Esto significa que la señal de salida ya no es sólo una versión amplificada de la señal de entrada, sino que de alguna forma es distorsionada o cambiada con respecto a la entrada. La distorsión puede provenir de muy diversos sitios en cualquier sistema de audio. La distorsión puede ocurrir debido a que las características del dispositivo son no lineales: distorsión de amplitud o no lineal. Esto puede suceder con todas las clases de operación. Además, los elementos de circuito y el dispositivo de amplificación pueden responder a la señal de modo diferente en diversos rangos de frecuencia de operación: distorsión de frecuencia.

También, se puede hablar de distorsión de fase, produciéndose esta cuando las señales de salida sufren adelantos o retrasos en fase con la señal original. Ello es debido a los componentes reactivos que lleva el amplificador (bobinas y condensadores).

Cuando ocurre distorsión, la señal de salida ya no representa exactamente la señal de entrada. Una técnica que considera este cambio en la señal de salida es el método de análisis de Fourier, el cual brinda un medio para describir una señal periódica en términos de su componente de frecuencia fundamental y de componentes de frecuencia en múltiplos enteros, componentes denominados armónicos. Por ejemplo, una señal con un valor original de 1 KHz. podría producir, después de la distorsión, una componente de frecuencia

a 1000 Hz, y componentes armónicas a 2 Khz., a 3 kHz., 4 kHz, etc. En cualquier caso, la técnica de considerar cualquier señal distorsionada como si estuviera compuesta de una componente fundamental y componentes armónicos es muy práctico y útil. Para una señal que se consigue utilizándola en la clase AB o en la clase B la distorsión puede ser principalmente de armónicos pares, de los cuales la componente del segundo armónico es la más grande. De tal modo, aunque la señal distorsionada contiene todas las componentes armónicas a partir del segundo armónico, la más importante en términos de la cantidad de distorsión para las clases de operación que consideraremos es el segundo armónico.

Visto esto, se puede decir que existe un tipo de distorsión conocida como distorsión armónica total, normalmente unida al nivel de ruido. El nivel de ruido se puede considerar como una distorsión, aunque hay que decir que este es completamente diferente a la distorsión armónica. El mayor problema es que siempre hay un cierto nivel de ruido en la línea y se amplifica, llegando a ser audible, para solucionar este problema se utiliza la amplificación diferencial.

2.5.9 Realimentación negativa

La realimentación negativa global es absolutamente necesaria por dos factores de suma importancia:

- Sin realimentación global, la ganancia dependería de parámetros de los transistores, difícilmente controlables y variables con la temperatura.
- La distorsión creada alcanzaría niveles inaceptables.

Los diseñadores de amplificadores afirman que, sin realimentación global, cuyos niveles de distorsión son ligeramente superiores al resto, se obtiene cualidades sónicas superiores a otros que usando realimentación negativa.

Hay dos hechos que prueban en parte esta afirmación:

- La distorsión de una etapa diferencial operada con una gran cantidad de voltaje en modo común y ganancias bajas tiende a crecer en altas frecuencias, a pesar del gran factor de realimentación.

- Las diferencias temporales entre la onda de entrada y la onda realimentada, y los desplazamientos de fase producen distorsiones que no son observables cuando se mide la THD con un osciloscopio cuando la señal de entrada es una onda senoidal pura, sin cambios de frecuencia o de amplitud en el tiempo.

CAPÍTULO 3. Actividades de ejercitación.

En este capítulo se presentan las guías didácticas de ejercicios, un recurso metodológico que media la interacción pedagógica entre el profesor y el alumno. Para la elaboración de la guía se presentan las características de las guías didácticas de ejercicios, tomando en consideración las más frecuentes con los recursos que implica la confección de ellas y algunos modelos que se pueden usar en diversas situaciones de aprendizaje, tanto dentro como fuera del aula. El profesor, teniendo esta base creará sus guías de acuerdo a las necesidades de sus alumnos, a su contexto y al momento educativo que vive.

3.1 Características de las guías didácticas de ejercicios

Las guías en el proceso enseñanza aprendizaje son una herramienta más para el uso del alumno que como su nombre lo indica apoyan, conducen, muestran un camino, orientan, encauzan, tutelan, entrenan, etc. Como vemos muchos sinónimos, en cada sinónimo vemos un matiz distinto. Cada palabra es parecida, pero el objetivo es diferente.

Existen diversos tipos de guías y por lo tanto responden a objetivos distintos, los cuales el docente debe tener muy claros al escoger este medio; por ejemplo existen:

- Guías de Motivación.
- Guías de Aprendizaje.
- Guías de Comprobación.
- Guías de Síntesis.
- Guías de Aplicación.
- Guías de Estudio.
- Guías de Lectura.
- Guías de Observación: de visita, del espectador, etc.
- Guías de Refuerzo.
- Guías de Nivelación.
- Guías de Anticipación.
- Guías de Remplazo, etc.

Como hay múltiples guías didácticas y todas tienen objetivos distintos es necesario conocer algunos requisitos básicos que deberíamos tener presentes al confeccionar una guía.

1 Objetivo.
2 Estructura.
3 Nivel del alumno.
4 Contextualización.
5 Duración.
6 Evaluación.

Objetivo

Se hace necesario focalizar muy bien y concretamente lo que pretendemos. Por ejemplo, si queremos conseguir mejorar el aprendizaje individual, haremos una guía de refuerzo y aplicación; si queremos ayudar a alumnos a conseguir autonomía, produciremos guías de autoaprendizaje, etc.

En la guía debe estar escrito el objetivo, para que el alumno tenga claro lo que se espera de él. Además el profesor debe verbalizar este propósito varias veces para así conducir mejor el desarrollo y fijar instrucciones en los alumnos.

Estructura

Una guía en cuanto a la forma, debe estar bien diseñada para estimular la memoria visual del alumno y la concentración. Debe tener una consecución intencionada al avance de los contenidos de menor a mayor complejidad.

Nivel del Alumno

Es importante que la guía sea acorde con las condiciones del alumno, es decir dirigida al momento en que está en su aprendizaje y adaptada a su realidad.

Contextualización

En algunas ocasiones al usar las actividades de los textos de estudio los alumnos no comprenden bien o se desmotivan. Se debe a que encuentran los ejemplos o situaciones muy alejados de su realidad.

Por eso, si las guías son confeccionadas por los profesores que conocen la realidad de sus alumnos, deberían nombrar situaciones locales o regionales o incluso particulares del curso. Esto no quiere decir, que en algunas ocasiones también es positivo que el alumno conozca otras realidades, ya que le permiten tener puntos de referencia para comparar y elementos que le ayudarán a formar su nivel crítico.

Duración

Una guía individual debe durar alrededor de 25 minutos en su lectura y ejecución; ya que la experiencia nos indica que más allá de este tiempo, el alumno se desconcentra y pierde interés. En el caso de guías grupales es distinto ya que la interacción va regulando los niveles de concentración. Incluso hay guías que pueden tener etapas de avance y desarrollarse en más de una clase.

Evaluación

Dentro del proceso enseñanza aprendizaje, evaluar es sondear la situación para seguir adelante; por lo tanto es vital que el alumno en conjunto con su profesor revise y compruebe sus logros o analice sus errores, para así reafirmar lo aprendido y además al autoevaluarse se desarrolla su autoestima.

Una guía, también puede significar una ponderación en la calificación de alguna unidad.

Otro aspecto importante de la evaluación, hace referencia con que al profesor le facilita el conocimiento de sus alumnos, ver cómo ellos aprenden a aprender, observar las interrelaciones, etc.

3.2 Características de la guía de ejercitación propuesta.

Para la generación de las actividades se parte del plan temático de la asignatura Sistemas de Audio, que tiene la estructura que se indica en la Tabla 3.1, en la que se han destacado las actividades dedicadas a la ejercitación de los contenidos. En el plan se han previsto seis actividades de laboratorio y tres clases prácticas. Aunque el alcance del presente trabajo no abarca las actividades prácticas y/o de simulación a realizarse en el laboratorio, se ha tenido en cuenta la necesaria articulación con estas últimas, favoreciendo la asimilación de los contenidos tratados en ellas.

Tabla 3.1. Temas de la asignatura Sistemas de Audio

Tema	**Contenidos**	**Actividades de ejercitación**
I	Introducción al sonido	Clase práctica 1 Laboratorio simulado 1
II	Tratamiento Acústico de Locales	Clase Práctica 2 Laboratorio 2 Laboratorio 3
III	Transductores	Clase Práctica 3 Laboratorio 4
IV	Amplificadores	Clase Práctica 4 Laboratorio 5 Laboratorio 6
V	Sistemas de audio multicanal	

Las actividades concebidas en la guía de ejercicios están dirigidas a apoyar la comprensión y asimilación de los contenidos teóricos impartidos en la asignatura Sistemas de Audio y aplicarlos en la resolución de problemas. Para facilitar lo anterior resulta conveniente al desarrollar las guías de ejercitación de la asignatura tener en cuenta la disponibilidad de recursos tecnológicos y su accesibilidad por parte de los estudiantes. En este sentido, las actividades de ejercitación se han diseñado de manera que estimulen el uso de los recursos indicados en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Recursos tecnológicos informativos considerados en la propuesta de ejercitación

Recurso	**Observación**
A. Office: Word, Excel	Edición de documentos digitales y manejo de hojas de cálculo:
B. Matlab	Herramientas de ayuda a la simulación y modelación matemática.
C. APKs	Aplicaciones para dispositivos móviles
D. Página WEB	Cálculo de parámetros para la fabricación de componentes pasivos

3.3 Actividades de ejercitación.

Los ejercicios previstos, organizados de menor a mayor complejidad, facilitan el correcto aprendizaje. Estos se agruparon de manera lógica para hacer más viable la comprensión y desarrollo de habilidades de manera progresiva y permanente. Las actividades de ejercitación comprenden 18 ejercicios y 23 incisos y abarcan los temas I al IV de la asignatura. En la Tabla 3.3 se indica la distribución de los ejercicios por las actividades de

clase práctica. Se muestran también cuáles de los recursos relacionados en la Tabla 3.2 han sido incorporados como apoyo a cada actividad.

Tabla 3.3. Distribución de los ejercicios por las actividades de clase práctica.

Tema	Clase práctica	Ejercicios/Incisos	Recursos
I	1. Introducción al Sonido. Parámetros objetivos y subjetivos	7/7	B
II	2. Propagación del sonido en locales cerrados	3/10	A, B, C
II	3. Transductores de sonido	3/5	-
IV	4. Redes de salida de amplificadores de potencia	5/1	D

Se han incorporado a la guía un grupo de ejercicios para el estudio independiente. El grupo está formado por 14 ejercicios con 20 incisos. Nueve de los ejercicios están resueltos y abarcan contenidos relacionados con las características del sonido, la propagación en el espacio libre y las aplicaciones del audio. En los próximos epígrafes se muestran aspectos de las actividades de ejercitación desarrolladas.

3.3.1 Actividades de ejercitación del tema I.

Los ejercicios comprendidos en este tema le permiten al estudiante aplicar las relaciones entre la potencia y la presión acústica, así como con sus representaciones logarítmicas. Se utilizan también parámetros perceptivos que expresan la relación entre los parámetros objetivos y subjetivos que describen las características del sonido. El estudiante además debe utilizar las curvas isofónicas y los umbrales establecidos que definen el área de audición en las mismas en función de los niveles de presión acústica y los valores de frecuencia del sonido recibido. Se ha tenido en cuenta en estos ejercicios el efecto de las condiciones ambientales en la propagación del sonido en el espacio.

Como apoyo a la ejercitación en este tema se ofrece un programa desarrollado en MATLAB que permite al estudiante obtener la relación entre el nivel de intensidad acústica recibido en un punto y la distancia a la que se encuentre la fuente puntual que produce el sonido.

La descripción detallada de los ejercicios se muestra en el Anexo 1. En el mismo anexo se adjunta el código del programa en MATLAB que sirve de apoyo a los ejercicios.

3.3.2 Actividades de ejercitación del tema II.

En el segundo tema están recogidos ejercicios relacionados con la propagación del sonido en locales cerrados. Estos ejercicios están dirigidos a reafirmar y mantener la motivación del estudiante por el tema demostrando su importancia y utilidad tecnológica y social. Se parte del análisis de los modos de propagación posibles a establecerse en locales cerrados y su dependencia con la geometría del local. Igualmente se tiene en cuenta el efecto que tienen las condiciones ambientales en este comportamiento así como las posibles soluciones a este problema.

El estudiante también debe aplicar los conocimientos teóricos sobre el tema para realizar cálculos de parámetros que determinan la inteligibilidad en los locales cerrados. En los problemas se recrean distintas situaciones que le permiten al estudiante, al analizar los resultados, consolidar sus conocimientos sobre la dependencia del comportamiento del sonido en función de la ubicación de las fuentes en el local y de las posiciones relativas de estas últimas con respecto al oyente.

Otro aspecto tratado en este tema es la corrección acústica de locales y el procedimiento para el tratamiento de sus superficies. Se parte de la caracterización acústica del local, para lo cual se utilizan parámetros como el tiempo de reverberación y su dependencia con la geometría del local y las características de los materiales que recubren sus superficies.

Como elementos de soporte a las actividades de este tema se utilizan un programa en Matlab, una hoja de cálculo Excel y dos aplicaciones para teléfonos con sistema operativo Android (APK). Los detalles se muestran a continuación.

Programa MatLAB (CP2audio.mat). Es un *script* que permite calcular los ejercicios de la clase práctica 2. Están implementadas las ecuaciones para el cálculo teórico del tiempo de reverberación y la distancia crítica. El programa ofrece flexibilidad en la modificación de los valores de entrada por lo que puede ser utilizado para la solución de problemas similares. El código utilizado se muestra en el anexo 2.b.

Hoja de Cálculo EXCEL (TratAcusticoEspC.xlsx)**.** La hoja de cálculo contiene dos páginas: Modos y Tratamiento Acústico RT60sabine. En la primera de las páginas se pueden calcular las frecuencias de los modos axiales, tangenciales y oblicuos en un local con dimensiones que se especifican por el usuario. El cálculo se hace teniendo en cuenta el

efecto de la temperatura ambiente en los resultados. Esta página da la posibilidad de determinar las relaciones apropiadas que deben tener las dimensiones de un local para reducir la posibilidad de ocurrencia de ecos y disminuir el tiempo de reverberación. El procedimiento para el trabajo con la página se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Pasos para el cálculo de los modos de un local en TratAcusticoEspC.xlsx

1	Indique la temperatura en C.
2	Coloque las dimensiones del local
3	Copie los valores de frecuencia
4	Coloque los valores de frecuencia
5	Ordene la lista de valores de frecuencia
6	Determine si existen valores que se repiten
7	Repita para los demás modos

La segunda página contiene las ecuaciones para el cálculo de los estimados del tiempo de reverberación, fórmula de Sabine, para distintas frecuencias. Se utilizan valores de coeficientes de absorción de varios materiales y los resultados se muestran numérica y gráficamente. El procedimiento para el trabajo con esta página se muestra en la Tabla 3.5

Tabla 3.5. Pasos para la determinación del tratamiento acústico de un local en TratAcusticoEspC.xlsx

1	Fijar valor de temperatura
2	Colocar dimensiones del local
3	Indicar superficies a tratar
4	Seleccionar material para tratamiento
5	Indicar α_p por frecuencias
6	Revisar resultado

Aplicaciones para Android(APK)

RT 2.0.0 de AppAcousticC (52). Se utiliza para realizar el cálculo del tiempo de reverberación en un local. Se brinda como una herramienta de ayuda al estudiante para realizar ejercicios prácticos de caracterización acústica de locales y la comprobación acústica de los mismos luego de aplicado el tratamiento. Esta aplicación permite obtener un estimado del tiempo de reverberación promedio en un local y los valores del mismo para las bandas de frecuencias, según se muestra en la Figura 3.1.

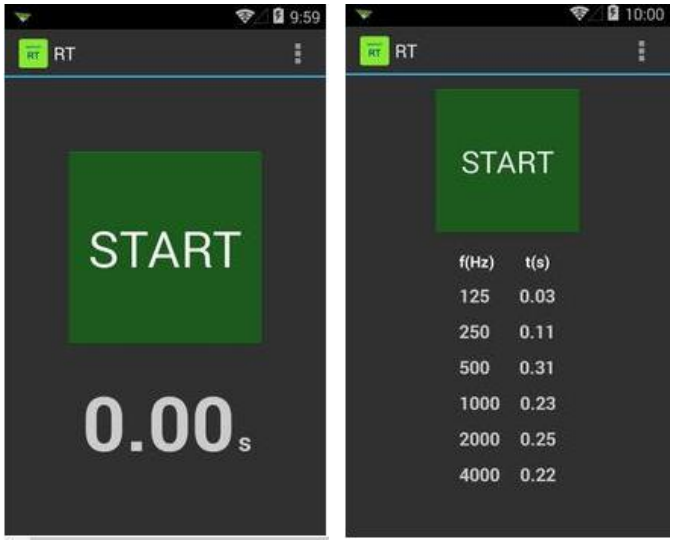


Figura 3.1.Interfaz de usuario de la APK RT 2.0.0

SabSoundFree Reverb Calculator 1.2 (53). Esta aplicación permite calcular el valor teórico del tiempo de reverberación en un local utilizando la expresión de Sabine. El usuario especifica las dimensiones de local y el tipo de material que recubre cada una de las superficies. La aplicación dispone de una biblioteca con los coeficientes de absorción de distintos materiales y le permite al usuario incorporar otros materiales con sus respectivos coeficientes de absorción. Algunas de las interfaces de usuario de muestran en la Figura 3.2

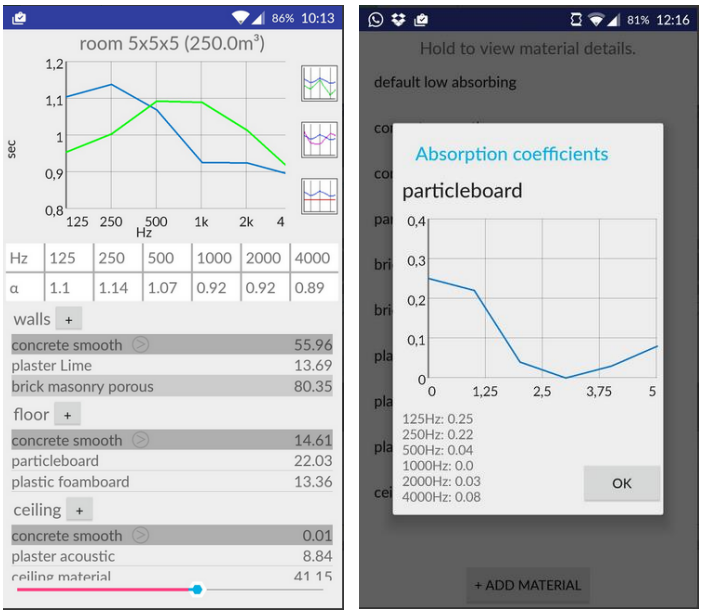


Figura 3.2. Interfaz de usuario de la APK SabSoundFree Reverb Calculator 1.2

3.3.3 Actividades de ejercitación del tema III.

Las actividades del tema III contienen ejercicios relacionados con los transductores de sonido: micrófonos y altavoces. Los problemas, descritos en el Anexo 3, permiten al estudiante ejercitarse en el uso de parámetros de los transductores tales como sensibilidad de voltaje, potencia acústica, etc. Las situaciones creadas en los problemas integran contenidos previos, vinculados con parámetros perceptivos del sonido. En este tema no se han incorporado recursos tecnológicos de ayuda a la solución de problemas.

3.3.4 Actividades de ejercitación del tema IV.

Las redes de salida de los amplificadores de potencia, contenido del tema IV, es abordado en la clase práctica 4. Los ejercicios abarcan el diseño y la comprobación de las redes de Zobel y las redes de cruce. Se utilizan las ecuaciones indicadas en las conferencias para la el cálculo de los valores de los componentes pasivos que las componen. Como ayuda complementaria se utilizan una hoja de cálculo Excel, un programa en Matlab y una página WEB. Los detalles de estos recursos se describen seguidamente.

Programa MatLAB (Zobel.mat). El script permite calcular el calor del capacitor de la red de Zobel a partir de los datos del altavoz a utilizar. Como resultados se obtienen la frecuencia de corte del altavoz, el valor del capacitor de la red de Zobel y un gráfico que representa el comportamiento de la impedancia equivalente "vista" a la salida del amplificador en función de la frecuencia. El código del programa se muestra en el anexo

Hoja de Cálculo EXCEL (ZobelAndCrossover.xlsx). La hoja de cálculo tiene dos páginas: Zobel y Crossover. La primera, dedicada al diseño de la red de Zobel, permite definir el valor de inductancia y la resistencia del altavoz que se conecta a la etapa de salida de un amplificador de potencia de audio. A partir de los datos anteriores se calculan el valor de frecuencia a partir del cual el altavoz deja de comportarse como resistivo y el valor teórico que debe tener el capacitor de la red de Zobel. La hoja permite definir el valor real del capacitor a utilizar y comprobar cómo incide la diferencia entre este valor y el teórico sobre el comportamiento con la frecuencia de la impedancia total de la combinación de la red y el altavoz. La segunda hoja permite calcular los valores de las componentes de los dos tipos de redes de cruce: convencional y mejorada. Para ello deben indicarse los valores de

las resistencias de los altavoces de altas, medias y bajas frecuencias, así como los valores de frecuencias de corte que les corresponden.

La página WEB, de libre acceso, permite el diseño de inductores de núcleo de aire de forma interactiva. La interfaz de la página y la dirección URL aparecen en el Anexo 4.

3.3.5 Actividades de ejercitación del tema IV.

Las actividades diseñadas para apoyar el estudio independiente de los estudiantes se describen en el Anexo 5. Los ejercicios están agrupados en problemas y preguntas correspondientes a los siguientes tópicos:

- Características del sonido: (tres problemas).
- Aplicaciones del audio: (seis problemas).
- Propagación del sonido en el espacio libre (cuatro problemas).

En conjunto total de actividades de ejercitación independiente está formado por 14 ejercicios con 21 incisos. En algunos de los problemas se adjunta la respuesta para dar al estudiante la posibilidad de corroborar la certeza y veracidad de los cálculos realizados por él.

3.4 Conclusiones del capítulo

- Las actividades descritas sirven para ejercitar aspectos teóricos de la asignatura. Como apoyo a lo anterior se ha previsto el uso de recursos tecnológicos disponibles y de libre acceso para los estudiantes.

CONCLUSIONES

Los resultados del trabajo investigativo presentado permiten enunciar las conclusiones siguientes:

1 Se realizó una búsqueda detallada sobre los temas tratados en la asignatura, lo cual permitió establecer el estado actual y las principales proyecciones a escala internacional.

2 La actualización de los ejercicios abordados en la asignatura aportan variantes que se apoyan en recursos tecnológicos existentes que están al alcance de gran parte de los estudiantes y pueden ser compartidos por ellos.

El diseño de las actividades de ejercitación conjuntamente con los recursos utilizados como apoyo a las mismas facilitan la realización a distancia de los ejercicios previstos y de otros de consolidación que puedan generarse.

RECOMENDACIONES

Para dar continuidad al presente trabajo se recomienda:

1 Ampliar el conjunto de ejercicios y vincularlos con la realización de las actividades prácticas de laboratorio real.

2 Aumentar la interrelación entre las actividades de ejercitación desarrolladas con actividades de laboratorio real, de manera que se consoliden aún más los conocimientos adquiridos por los estudiantes.

3 Profundizar y actualizar los ejercicios en cada uno de los temas, extendiendo el uso de recursos informáticos en función de la disponibilidad de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

1. **Barti Domingo, Robert.** *Acústica Medioambiental.* Alicante : s.n., 2013.

2. **Beranek, Leo L.** *Acústica.* [trad.] Adolfo Di Marco. Laboratorio de Acústica, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Inc., Cambridge Massachusetts : Editorial HASA, 1969. Vol. Segunda Edición, Universidad de Buenos Aires.

3. **Peña Ramón, Carlos Antonio.** *Análisis de la compresión de audio en la clasificación de sonidos biológicos.* La Habana, Cuba : s.n., 2015. Vol. Trabajo de Diploma.

4. **Gelfand, S.A.** *Hearing-An introduction to psychological and physiological acoustics.* New York, Marcel Dekker : 4th Ed., 2004.

5. **Mesa Méndez, Arian.** *Tópicos selectos de Audio. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.* Santa Clara, Villa Clara, Cuba : s.n., 2017.

6. **LLinares, Jaime.** *Acústica arquitectónica y urbanística.* s.l. : ed. 2, 2013.

7. **Catalá, J., Aguilar, J. y Senent, F.** *Física General, Valencia.* Valencia, España : s.n., 1977.

8. **Camacho García, Andrés.** *Procesado Tiempo-Frecuencia: Aplicación a la persepción humana del sonido. Tesis Doctoral.* Valencia, España : Universidad Politécnica de Valencia, 2016.

9. **Kinsler, L.** *Fundamentos de acústica.* s.l. : 1ª ed. Limusa., 1988.

10. *Methods for the assessment of pleasantness in sound quality.* **Jure R., Jiricek O. and Brothánek.** 2010, Noise Control Engineering Journal.

11. **Holman, Tomlinson.** *Surround Sound. Focal Press.* 2008.

12. **Gutiérrez Herzing, Mario.** *Sistema multicanal de captura y codificación de audio con micrófonos digitales DSPs.* Madrid, España : Universidad Autónoma de Madrid. Escuela Politécnica Superior, 2011.

13. **DIN.** *Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness.* 2009.

14. **Pohlmann, H.** *Principles of Digital audio.* s.l. : 2ª ed. Howard Sams & Co., 1992.

15. **Davis, Don, Eugene Patroins, Jr. y Brown, Pat.** *Sound System Engineering.* New York : 4th Edition, 2014.

16. **Miyara, Federico.** *Introducción a la acústica.* 2014.

17. **Fernández, Gonzalo.** Acondicionamiento Acústico. Montevideo : s.n., 2017.

18. **Labrada, Jerónimo.** *El sentido del sonido. Alba.* 2009.

19. **Zwicker, E. y Fastl., H.** *Psychoacoustics: facts and models. Springer, Berlin.* New York : s.n., 1999.

20. **Wellington, William.** *Sound design and Sciencie Fiction. University of Texas Press.* 2007.

21. **Watkinson, J.** *The Art of Digital Audio.* s.l. : 2ª ed. Focal Press., 1994.

22. **Marks, Aaron.** *The Complete Guide to Game Audio. Focal Press.* s.l. : ed. 2, 2008.

23. **Watkinson, J.** *Audio Digital.* s.l. : 1ª ed. Paraninfo., 1996.

24. **Ballou, Glen.** *Handbook for Sound Engineers.* s.l. : Fourth Edition. Focal Press. USA., 2008.

25. **Gutiérrez, Pablo.** *Relación del Sonido Multicanal y la Imagen Estereoscópica 3D.* 2010.

26. **Carrión Isbert, Antoni.** *Diseño acústico de espacios arquitectónicos.* Barcelona, España : Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 1998.

27. **Cooke, M.** *Modeling auditory processing and organisation.* New York : Cambridge University Press, 1993.

28. *A fuzzy set based approach for the estimation of loudness of environmental noise.* **Ferri, M., y otros, y otros.** 2014, Noise Control Engineering Journal.

29. **Moore, B. C. J.** *An introduction to the psychology.* San Diego (CA), Academic Press. : s.n., 2003.

30. **Borque-Palacín, A.** *Introducción a la transmisión digital de señales de audio y video.* Cypsela. : s.n., 2007.

31. **DIN.** *Procedure for calculating loudness level and loudness. Technical report.* 1991.

32. *Analysis and design of gammatone signal models.* **Strahl, S. y Mertins, A.** 2009, The Journal of the Acoustical Society of America.

33. **McNell, David A.** *Networked Audio Transport, Ing. Purdue University.* 2006.

34. **Noguera, Ángel.** *Estudio y aplicación del diseño de sonido envolvente y composición.* 2011.

35. **Tokunbo, Ogunfunmi y .** Principies of speech coding. 2010.

36. **Scharf, B.** *Loudness. In Handbook of acoustics, Engineering-Computing-and-Technology.* s.l. : New York: John Wiley & Sons., 1998.

37. **Rinzler, J.W.** *The sounds of star wars. Chronicle Books.* 2010.

38. **Matilla Solís, F.** *Instalaciones singulares en Viviendas y Edificios.* s.l. : Ed. Paraninfo Thomson Learnin, 2016.

39. **Escobar Fuentes, Rodrigo A.** *Implementación de una cabeza artificial con torso y la construcción de orejas artificiales.(Basados en la norma ANSI S3.36.1985).* Valdivia, Chile. : s.n., 2008.

40. **Rocio Igua, Yuri.** *Diseño de Aislamiento y Acondicionamiento Acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la Emisora Kennedy.* 2005.

41. **Hernán Sánchez, Javier.** *Manual de utilización de transductores y sistemas de adquisición de datos del laboratorio de Mecánica Experimental.* Medellín, Colombia : s.n., 2012.

42. **Paralta, Andrea.** *Diseño de sonido para un cortometraje: Dustland. Universidad Politécnica de Valencia.* España : s.n., 2010.

43. **Cordell, Bob.** *Audio Power Amplifiers.* s.l. : McGraw Hill, 2011.

44. **Pereira, Miguel Hernández.** *Amplificadores de audio. Electroacústica.* s.l. : Escuela Superior de Bilbao, España, 2005.

45. **Pass, N.** *Opto-isolated For Operation Push-pull Amplifiers in Class A and Class AB Modes.* 1988.

46. **Self, Douglas.** *Aidio Power Amplifier Design.* s.l. : Sixth Edition, 2013.

47. **Sonnenschein, David.** *Sound design. The expresive power of music, voice, and sound.* s.l. : Studio city, CA: Michael Wiese Productions., 2001.

48. **Quintero-Rincon, Antonio.** *Generación de espacios auditivos 3-D.* 2009.

49. **Solas, Diego Valero y Peña, Juan Domingo Aguilar.** *Amplificadores de potencia: teoría y problemas.* 1993.

50. **Vassallo, Francisco Ruiz.** *Diseño y fabricación de bafles.* 2011.

51. **De la Rosa, Juan José González.** *Circuitos Electrónicos con Amplificadores Operacionales.* 2001.

52. **AppAcoustiC.** RT 2.0.0 for Android. *ApkPure.* [En línea] 08 16, 2016. https://apkpure.com/rt/com.appacoustic.rt.

53. **Pannekeet, Niels.** SabSoundFree Reverb Calculator 1.2 . *APKPure.* [En línea] 10 2016. https://apkpure.ai/sabsoundfree-reverb-calculator.

54. **Torrealba Mahuad, Ramón Alejandro.** *Montaje y Aplicación de un Sistema de Sonido Multicanal 5.1 para Producción Musical.* Chile : Universidad Austral de Chile, 2015.

Anexo 1. Actividades de ejercitación del Tema I.

a) Ejercicios de la clase práctica.

1. Calcule la potencia acústica en W que debe tener fuente puntual colocada en un espacio abierto si se desea que a una distancia de 60m de la posición de la misma se registre un nivel de presión acústica de 80dBSPL. Asuma que no existen obstáculos y desprecie la atenuación del sonido debido a la absorción atmosférica.

   Considere: $\rho = 1{,}2\ Kg/m^3$, y $T = 30\ ^oC$.
2. Determine la variación que sufre el valor calculado en el inciso anterior si la temperatura baja hasta $0\ ^oC$.
3. Determine la distancia mínima a la que se debe colocar un espectador con respecto a la fuente del ejercicio anterior sin que exista peligro de daños en su sistema auditivo.
4. Si la fuente produce sonidos en la banda de 50Hz a 10kHz y está ajustada de manera que se perciba un volumen constante en toda la banda (*equal-loudness*) ¿Cuál es el máximo volumen en phons que debe percibir el oyente? Utilice la gráfica de la figura 1.
5. Repita el ejercicio 3 para una fuente de 300w de potencia acústica.
6. Repita el ejercicio 1 considerando la atenuación producida por la absorción atmosférica, figura 2, cuando existe una humedad relativa del 60%.

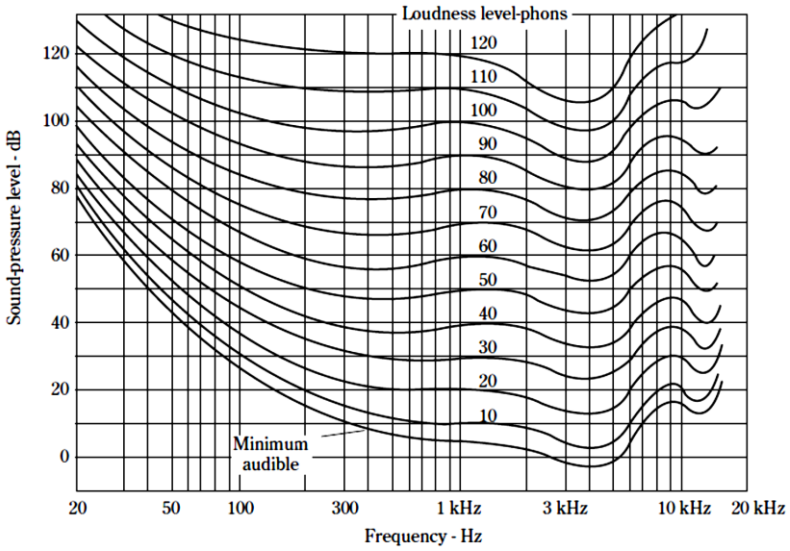


Figura 0.1

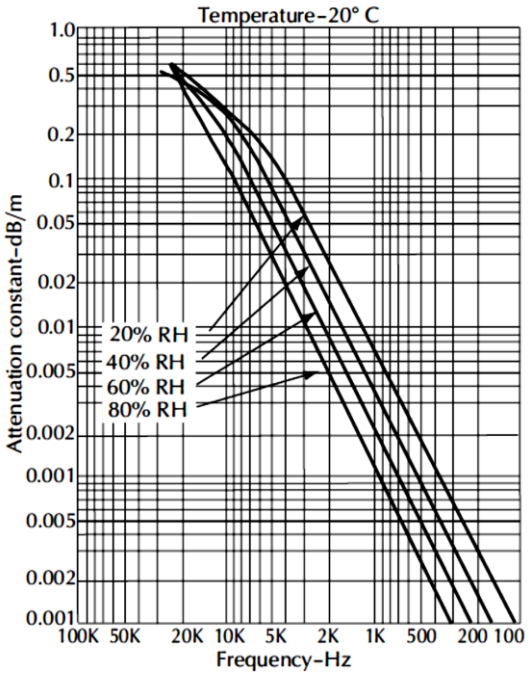


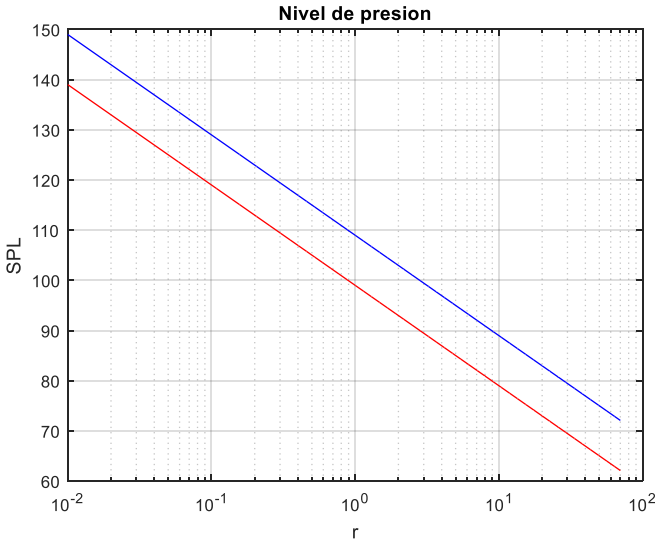
Figura 0.2

7. Repita el ejercicio 1 para dos diferentes escenarios: la ciudad de La Habana, que se encuentra al nivel del mar, la ciudad de Bogotá, Colombia, a una altitud de 2625 metros sobre el nivel del mar.

b) Código de programa en Matlab.

```
% Dependencia de nivel de intensidad acústica con la distancia a la fuente
%
clc
T=0
c = 20.06*sqrt(273 + T)
p0 = 20e-6;
%c = 344; % velocidad del aire en m/s
```

```
ro = 1.2; % densidad del aire en kg/m3
P=1;                    % potencia de la fuente puntual
r=[0.01:0.001:70];      % distancia a la fuente puntual en metros
A=4*pi*r.^2;            % Area perpendicular a la fuente
I=P./A;                 % Intensidad de la fuente
p=sqrt(I*ro*c);
LI=10*log10(I/1e-12);   %nivel de intensidad, en dB
Lp=20*log10(p/20e-6);   % nivel de presión acústica
% teniendo en cuenta la eficiencia del altavoz.
Sa=99;  % sensibilidad del altavoz
Lpe = Sa - 20*log10(r)+10*log10(P);
%plot(log10(r),Lp,'-r')
%xlabel('log(r)')
%figure
semilogx(r,Lp,'-b',r,Lpe,'-r');grid
title('Nivel de presion')
ylabel('SPL')
xlabel('r')
%figure
%semilogx(r,p,'-g'); grid
%title('presion')
%xlabel('r')
%c=344
d=60;
Lpd=80;
disp('Potencia = ')
P=4*pi*d^2*(p0*10^(Lpd/20))^2/(ro*c)
%% calculo de precision
% clc
%c = 344; % velocidad del aire en m/s
ro = 1.2; % densidad del aire en kg/m3
SPL=80;
p0=20e-6;
r=1
p=p0*10^(SPL/20)
A=4*pi*r^2
P=(A*p^2)/(ro*c)
```



Anexo 2. Actividades de Ejercitación del Tema II.

a) Ejercicios de la clase práctica.

1. **Modos normales.** Se ha diseñado una sala para realización de reuniones de 4.5m de ancho por 6metros de largo y una altura de 3m. Usted realizará la evaluación del diseño desde el punto de vista acústico
   1.1. Realice los cálculos necesarios para determinar la posibilidad de ocurrencia de ecos en la sala debido al establecimiento de los modos normales. Considere que la temperatura de la sala es de 25C. Tome en cuenta solamente los primeros 4 órdenes de los modos axiales.
   1.2. Proponga correcciones a las dimensiones de la sala mediante la variación de la altura del techo del recinto.
   1.3. Compruebe los resultados repitiendo los cálculos del inciso 1.1 para la nueva altura propuesta.
   1.4. Evalúe el efecto que tiene en las características acústicas evaluadas una disminución de la temperatura de 5C.
2. **Distancia crítica**. Se dispone de un local cerrado de 2.5m de ancho, 4.6 m de largo y una altura de 3m. El local, destinado a dictar conferencias, no tiene ventanas y tiene un tiempo de reverberación estimado de 1.5s. El estrado del conferencista está ubicado a 60cm de la pared y las filas de sillas están ubicadas con respecto al orador de manera que la más cercana está a 1m y la más alejada está a 3m.

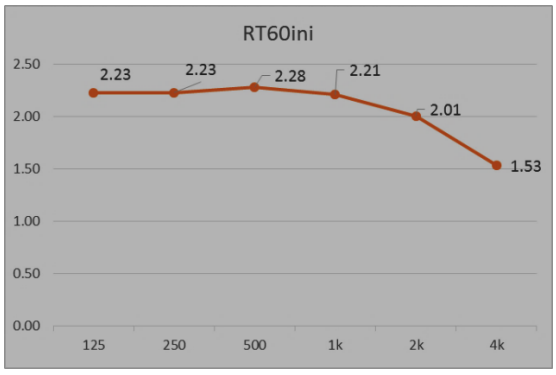
   2.1. Determine la distancia crítica con respecto al orador. ¿Pueden todos los oyentes escuchar correctamente al orador?
   2.2. Determine el valor máximo que debe tener el tiempo de reverberación en el local para que todos los oyentes puedan escuchar correctamente al locutor.
   2.3. Repita el cálculo anterior si se utiliza amplificación en el local y los altavoces se colocan:
      2.3.1. En la línea que une la pared frontal y el techo.
      2.3.2. En las esquinas superiores que forman las paredes con el techo.
   2.4. Calcule los valores máximos de potencia acústica que pueden tener las fuentes para los casos del inciso anterior.
3. **Tratamiento acústico**.

   Se desea realizar el tratamiento acústico de una sala destinada a la proyección de video con las siguientes características:

   - Local rectangular de 4m de largo, 3.5m de ancho y 3m de alto.
   - Las paredes laterales son de ladrillos sin otro tratamiento.
   - El suelo es de losas de cerámica y el techo está formado por paneles revestidos de madera.
   - El valor de tiempo de reverberación para las bandas de frecuencias se indica en la figura.

   Sólo se permite tratar acústicamente a una de las paredes paralelas. Se dispone para el tratamiento acústico de cortinas ligeras y gruesas y alfombras para el piso. Los valores de los coeficientes de absorción de los materiales se indican en la tabla 1.

   Objetivos acústicos: Lograr un RT60 menor que 1.5 s para toda la banda.



Material	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
Madera	0.15	0.11	0.10	0.07	0.06	0.07
Ladrillos	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Alfombra	0.02	0.06	0.14	0.37	0.6	0.65
cortina ligera	0.03	0.04	0.11	0.17	0.24	0.35
cortina media	0.07	0.31	0.49	0.75	0.7	0.6
cortina gruesa	0.14	0.35	0.55	0.72	0.7	0.65
piso losas	0.01	0.01	0.015	0.02	0.02	0.02

Tabla 1. Coeficientes de absorción por materiales, en sabin/m^2

   3.1. Proponga el tratamiento acústico (tipo de material, área a cubrir).
   3.2. Calcule el estimado del tiempo de reverberación para los primeros 3 valores de la banda de frecuencias.

b) Código del programa en Matlab

```
% CP2audio
% Clase práctica II. Sistemas de Audio.
%% Ejercicio 1.
% Se dispone de un local cerrado de 2.5m de ancho, 4.6 m de largo y
% una altura de 3m. El local, destinado a dictar conferencias, no tiene
% ventanas y tiene un tiempo de reverberación estimado de 1.5s. El estrado
% del conferencista está ubicado a 60cm de la pared y las filas de sillas
% están ubicadas con respecto al orador de manera que la más cercana está a
% 1m y la más alejada está a 3m
% DATOS
a =2.5;
l = 4.6;
h = 3;
RT60 = 1.5;
Q = 2;
% solucion.
clc
V = a*l*h
S = 2*(a*l+a*h+l*h)
At = 0.161*V/RT60
alfap = At/S
R = S*alfap/(1-alfap)
Dc = 0.141*sqrt(Q*R)
% RESPUESTAS
% 2.1.  Determine la distancia crítica con respecto al orador. ¿Pueden
% todos los oyentes escuchar correctamente al orador?
% V = 34.5000
% S = 65.6000
% At = 3.7030
% alfap = 0.0564
% R = 3.9245
% Dc = 0.3950
% 2.2.  Determine el valor que debe tener el tiempo de reverberación en el
% local para que todos los oyentes puedan escuchar correctamente al
% locutor.
Dc2 = 3;
R2  = ((Dc2/0.141)^2)/Q
At2 = 1/(1/R2+1/S)
RT602 = 0.161*V/At2
% R2 = 226.3468
% At2 = 50.8598
% RT602 = 0.1092

% 2.3.  Repita el cálculo anterior si se utiliza amplificación en el local
% y los altavoces se colocan:
%% 2.3.1 En la línea que une la pared frontal y el techo, Q = 4
Dc2 = 3;
Q = 4
R2  = ((Dc2/0.141)^2)/Q
At2 = 1/(1/R2+1/S)
RT602 = 0.161*V/At2
% respuesta: RT602 = 0.1338
%% 2.3.2 En las esquinas superiores que forman las paredes con el techo
Dc2 = 3;
Q = 8
```

```
R2  = ((Dc2/0.141)^2)/Q
At2 = 1/(1/R2+1/S)
RT602 = 0.161*V/At2
% respuesta: RT602 = 0.1828
%% 2.4. Calcule el valor máximo que puede tener el nivel de potencia
% acústica de la fuente

% Lp = LP + 10*log10(Q/(4*pi+r^2)) < 120 dbSPL para r = 1m
P0 = 1e-12
Q = 8
r = 1.6
LP = 120 - 10*log10(Q/(4*pi*r^2))
P = P0*10^(LP/10)
% hacer tabla de resultados:
% Q   r    LP        P
% 4   1    124.9715  3.1416
%     1.6  129.0539  8.0425
% 8   1    121.9612  1.5708
%     1.6  126.0436  4.0212
```

Anexo 3: Actividades de ejercitación del Tema III.

1. Durante el proceso de medición en un espacio abierto de los parámetros de un micrófono se ha obtenido un voltaje a su salida, en circuito abierto, de **25 mV** al colocarlo en un punto en el que el nivel de presión acústica comprobado con un sonómetro es de **80 dBSLP**.
   1.1. Determine la sensibilidad de voltaje del micrófono.
   1.2. Calcule el valor del voltaje a la salida del micrófono si la medición se realiza al doble de la distancia del inciso anterior.
2. A usted se le solicita configurar el sistema de audio para un acto al aire libre en el que se utilizarán micrófonos para captar la señal de un coro en el escenario. El equipo de pre-amplificación para micrófono permite un nivel máximo de entrada de **200 μV**. En mediciones realizadas se ha determinado que el nivel de presión acústica en la posición en que se desea colocar el micrófono es de **60 dBSPL**. Se dispone de los micrófonos indicados en la tabla 1. Escoja el o los apropiados para captar la señal y justifique su elección.

Tabla 1

Micrófono	**sensibilidad (Sv) dB**
I, carbón	-10
II, capacitivo	-40
III, dinámico	-55
IV, piezoeléctrico	-30

3. Se desea configurar un sistema de audio que se utiliza al aire libre de manera que proporcione un nivel de presión acústica de al menos **80 dBSPL** a una distancia de **15 metros** del lugar donde se ubican los altavoces. Se dispone de los modelos de altavoces indicados en la tabla 2.

Tabla 2

Altavoz	**Sensibilidad (dBSPL)**	**Potencia máxima (w)**
I	80	100
II	85	100
III	90	100
IV	80	200

   3.1. Determine cuáles de los modelos indicados cumple con los requisitos necesarios.
   3.2. Determine el máximo nivel de presión acústica que producen los altavoces seleccionados a una distancia de un metro.
   3.3. Calcule para los altavoces seleccionados la distancia mínima a la que se deben colocar los asistentes sin que se exista peligro de daño auditivo.

Anexo 4: Actividades de ejercitación del Tema IV.

a) Ejercicios de la clase práctica.

Diseño de Red de Zobel.

1. Diseñe una red de Zobel para ser utilizada en un amplificador de potencia de audio si este se utiliza para manejar una carga de 8 ohms y se desea que la carga que le ofrece la red al amplificador sea resistiva a partir de los 200 kHz.

   a. Compruebe el funcionamiento de la red para los valores de frecuencia indicados en la tabla 1. Considere que el altavoz tiene un circuito equivalente al indicado en la figura 1.

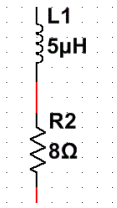


Figura 1. Circuito equivalente del altavoz

Tabla 1. Valores de frecuencias para la comprobación de la red de Zobel.

Frecuencia(kHz)	Xc	Xl	Ztotal
200			
250			
300			
350			
400			

2. Realice el diseño de una red de Zobel para un amplificador que maneja un altavoz con resistencia de 8 ohm e inductancia de 3.3 µH.

Diseño de redes de cruce.

3. Diseñe una red de cruce convencional para ser utilizada en un sistema de 3 vías con las características citadas en la tabla 2. Utilice para la realización de la red componentes de la serie del 10%.

Tabla 2

Altavoz	Rango de frecuencias (Hz)	Impedancia (Ohm)
Woofer	20 a 200	8
Medios	200 a 2000	8
tweeter	2000 a 15000	8

Serie del 5 % / 10 %
10 11 **12** 13 **15** 16 **18** 20 **22** 24 **27** 30 **33** 36 **39** 43 **47** 51 **56** 62 **68** 75 **82** 91

4. Modifique la red de cruce anterior para obtener la versión mejorada. Realice los cálculos correspondientes para determinar el valor de las componentes.
5. Repita el diseño anterior si se utilizan altavoces de 4 ohms de impedancia.

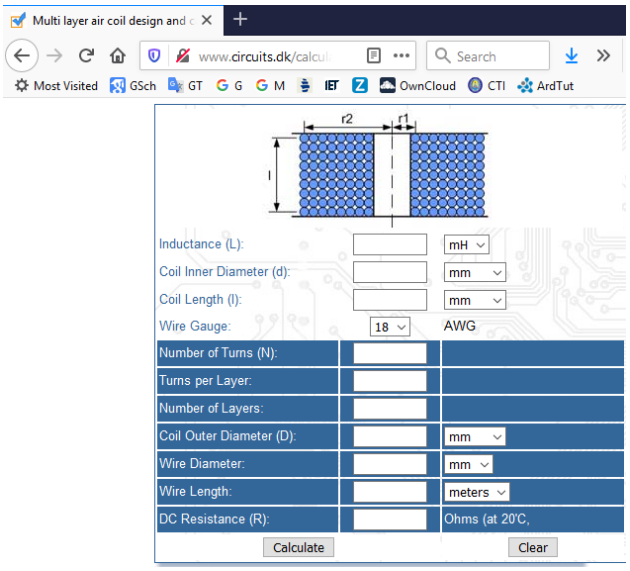
b) Código del programa en Matlab.

```
% Zobel
%%
clc;
R=8;                    % Resistencia del altavoz (Ohm)
L=5e-6;                 % Inductancia del altavoz (H)
%fc=166;                % Frecuencia lineal de corte de la red de Zobel (kHz)
Wc=R/L;                 % Frecuencia angular de corte de la red de Zobel
(rad)
fc=2*pi*Wc;
Cz = L/(R^2);
```

```
C=Cz;
Xc=1/(Wc*C);
Xl=Wc*L;
Zz=R-j*Xc;
Za=R+j*Xl;
Zeq = (Za*Zz)/(Za+Zz);
%%
abs(Zeq);
%% resultados
disp(['R=' num2str(R) ' L=' num2str(L) ' Cz=' num2str(C)])
disp('...')
disp(['f=' num2str(fc) ' kHz']);
disp(['Xc=' num2str(Xc) ' Xl=' num2str(Xl)])
disp(['Zz=' num2str(Zz) ' Za=' num2str(Za)])
disp(['... Módulos'])
disp(['|Zz|=' num2str(abs(Zz)) ' |Za|=' num2str(abs(Za))])
disp(['|Zeq|=' num2str(abs(Zeq))])
%% generación del gráfico de dependencia con la frecuencia
f=100:400;  % en kHz
W=2*pi*f*1000;
C=Cz*1.85;
Xc=1./(W*C);
Xl=W.*L;
ZZz=R-j.*Xc;
ZZa=R+j.*Xl;
ZZeq = (ZZa.*ZZz)./(ZZa+ZZz);
aZZeq = abs(ZZeq);
plot(f,aZZeq)
grid
ylim([4 10])
xlabel('Frecuencia (kHz)')
ylabel('Impedancia equivalente Zeq(Ohms)'
```

c) Herramientas de apoyo: (Online)

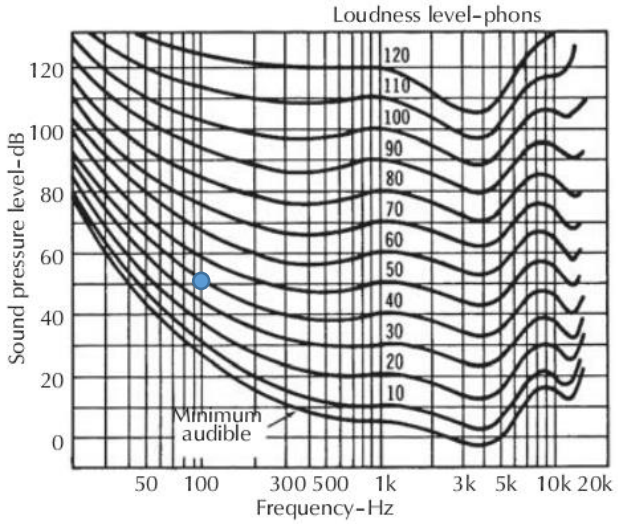
http://www.circuits.dk/calculator_multi_layer_aircore.htm



Anexo 5: Guía de estudio de ejercicios.

- **Ejercicios relacionados con las características del sonido**

1. Se produce un sonido de 40 phons de volumen a una frecuencia de 100Hz. ¿Cuántos phons de volumen tendría otro sonido con igual nivel de presión sonora y una frecuencia de 1kHz?



Respuesta:
Un sonido con igual nivel de presión sonora, tendría 50 phons a una frecuencia de 1KHz.

2. Un tono puro (simple) de 40 phons es producido con una frecuencia de 1KHz a 40dBSPL ¿A qué otra frecuencia se escucharía este tono con la misma presión dBSPL?

Respuesta:
Manteniendo la misma presión dBSPL este tono se escucharía igual a 300Hz.

3. Diga tres valores en phons de nivel de volumen que se mantengan casi constante con la misma presión dBSPL en un cierto intervalo de frecuencia. Haga una tabla con los valores de dBSPL y los rangos de frecuencias de cada uno.

a) Interprete desde el punto de vista psico-acústico qué representan estos parámetros para el oyente.

Respuesta:
Los valores son 10, 20 y 30 phons de nivel de volumen.

Nivel Loudness (Phons)	Intervalo de frecuencias	Nivel de Presión Sonora (dBSPL)
10	500Hz – 1KHz	10
20	500Hz – 1KHz	20
30	500Hz – 1KHz	30

a) Desde el punto de vista psicoacústico se aprecia que el oyente debe basarse en otros parámetros para entender el mensaje ya que en el intervalo de frecuencias de 500Hz-1kHz va a percibir la misma presión sonora con igual volumen.

- **Ejercicios relacionados con aplicaciones del audio**

4. La Figura 0.3 muestra con un punto un oyente que está dentro de una red de bocinas de audio ubicadas a distancias fijas y que reproducen todas al mismo tiempo un tono puro. Las líneas rectas que unen los bafles con el oyente tienen un número de ms que equivalen al tiempo que demora en llegar la onda sonora del dispositivo hasta el oyente. Considerando que este sistema de audio está ubicado en un terreno llano, sin ecos, al aire libre y teniendo en cuenta sus conocimientos sobre parámetros subjetivos del sonido diga:

a) ¿Cuántos bafles son detectados desde su posición por el oyente?
b) ¿Diga qué efecto se pone de manifiesto?

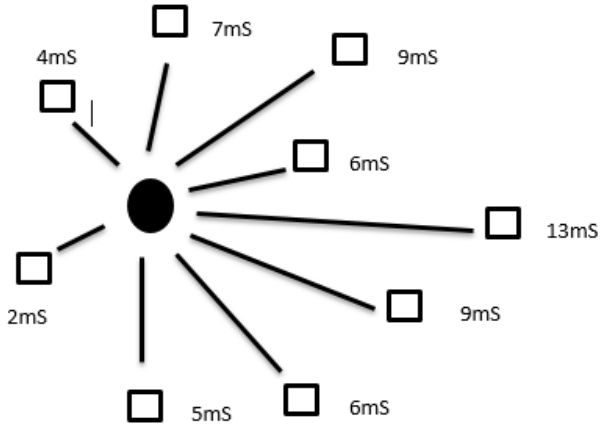
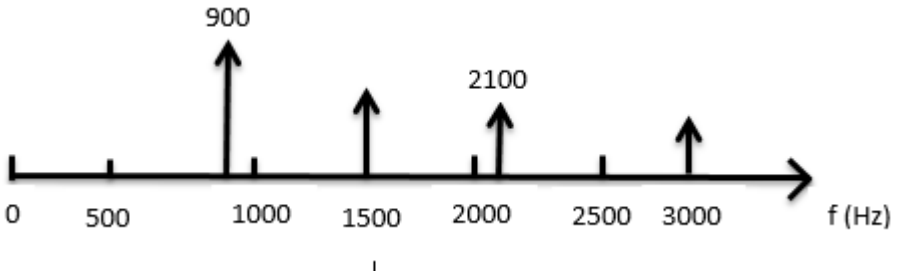


Figura 0.3

Respuesta:
a) Son detectados por el oyente tres bafles (los correspondientes a 2mS, 7mS y 13mS).
b) El efecto que se pone de manifiesto es el Efecto Hass.

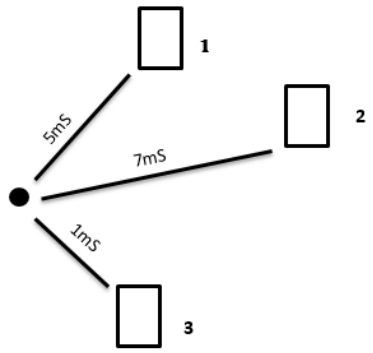
5. Diga con qué sonido periódico simple se percibiría el siguiente espectro de frecuencias de una fuente sonora.



Respuesta:
Con un sonido periódico simple de 300Hz.

6. El diagrama muestra con un punto un oyente ubicado dentro de un espacio sonoro; dicho espacio es al aire libre, sin ecos, un terreno llano y sin otras fuentes sonoras que no sean los tres bafles que se representan. Con línea recta se muestra el tiempo que demora en

llegar la onda sonora desde cada bafle hasta el oyente. Considere que después de 5 minutos de puesta en funcionamiento a la red acústica se le corta el suministro de energía al bafle 1.



a) ¿En cuales direcciones será detectado el mismo tono puro transmitido a los 5 minutos y 30 segundos después de puesta en marcha el sistema? Fundamenta su respuesta mencionando el efecto que se pone de manifiesto.
b) ¿En cuál dirección será detectado el mismo tono transmitido a los 8 minutos después de puesta en marcha el sistema?

Respuestas:

a) El mismo tono puro transmitido será detectado en las direcciones del bafle 2 y el bafle 1. Los efectos que se ponen de manifiesto son los efectos Hass y Franssen.
b) En la dirección del bafle 3 por el efecto Hass.

7. Conteste verdadero (V) o falso (F) según corresponda. Justifique los falsos.

a. ___ La vibración es el movimiento de un cuerpo en torno a su posición de equilibrio.
b. ___ Una onda transversal es la que se desplaza en forma paralela a la dirección de propagación.
c. ___ El sonido se propaga solamente a través del aire y del vacío.
d. ___ Un sonido cuya frecuencia es menor que 20 Hz se denomina ultrasonido.
e. ___ La altura de un sonido se relaciona con la frecuencia.
f. ___ El timbre de un sonido se relaciona con la rapidez de propagación.
g. ___ La amplitud de un sonido se relaciona con la intensidad de un sonido.
h. ___ Un sonido emitido con mayor intensidad se propaga más rápido que uno suave.
i. ___ La rapidez de un sonido es constante independientemente del medio en cual se propaga.

8. Una onda sonora se produce durante 0,5 s. Posee una longitud de onda de 0,7 m y una velocidad de 340 m/s.

a. ¿Cuál es la frecuencia de la onda?
b. ¿Cuántas ondas completas se emiten en tal intervalo de tiempo?
c. Luego de 0,5 s ¿a qué distancia se encuentra el frente de onda de la fuente sonora?

9. La rapidez del sonido en el agua es de 1498 m/s. Se envía una señal sonora desde un barco a un punto que se encuentra debajo de la superficie del agua, 1,8 s más tarde se detecta la señal reflejada. ¿Qué profundidad tiene el océano por debajo de donde se encuentra el barco?

10. La velocidad de las ondas transversales producidas por un terremoto es de 8,9 Km/h, mientras que la de las ondas longitudinales es de 5,1 Km/s. Un sismógrafo reporta la llegada de las ondas transversales 73 s antes que la de las longitudinales. ¿A qué distancia se produjo el terremoto?

Respuestas:

8. a) f=485,7 Hz b) No. de Ondas 242,86 ondas c) d=170 m,
9. 1348,2 m de profundidad,
10. El sismo ocurrió a una distancia de 872,1 Km.

- **Ejercicios relacionados con la propagación del sonido en espacio libre**

11. La potencia de la bocina de un automóvil, que se supone foco emisor puntual es de 0,1 W.
    a. Determine la intensidad de la onda sonora y el nivel de intensidad sonora a una distancia de 8 m del automóvil.
    b. ¿A qué distancias desde el automóvil el nivel de intensidad sonora es menor de 60dB?

    Fórmulas: $Intensidad\ sonora\ puntual = \frac{Potencia}{4\pi r^2}$

$$Nivel\ Intensidad\ Sonora\ Puntual = 10 \log \frac{Intensidad\ Sonora\ Puntual}{\text{Intensidad umbral de audicion}}$$

12. La velocidad del sonido en el agua del mar es 1531 m/s. Un buque científico envía una señal sonora que tarde 0,1 s en regresar. ¿A qué profundidad está el fondo del mar? R/ Profundidad=76,55 m.

    Fórmula: $Velocidad = \frac{\text{Espacio recorrido}}{\text{tiempo empleado en recorrer dicho espacio}}$

13. Calcula la longitud de onda en el aire de un infrasonido de 17 Hz y de un ultrasonido de 34000 Hz. R/ 20 m; 0.01 m. Fórmula: λ = c / v, (c: La velocidad de propagación de las ondas de ultrasonido en el aire es de 340 m/s, v: es la frecuencia que se mide en Hz).

14. El nivel de intensidad de un punto situado a 100 m de una fuente sonora puntual es de 60 dB. Calcular:

a. La intensidad sonora en ese punto. R/ I=0,00001 w/m2
b. Potencia de la fuente sonora.

Fórmulas: Intensidad umbral de audición $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$

$Intensidad\ sonora\ puntual = \frac{Potencia}{4\pi r^2}$,

$Nivel\ Intensidad\ Sonora\ Puntual = 10 \log \frac{Intensidad\ Sonora\ Puntual}{\text{Intensidad umbral de audicion}}$,