

GUÍA TÉCNICA PARA AISLAMIENTO ACÚSTICO Y DISEÑO Y CONFIGURACIÓN DE SISTEMAS DE REFUERZO SONORO PARA ESTABLECIMIENTOS

Tabla de contenido

1	OBJETIVOS	3
1.1	GENERAL	3
2	CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍA.....	3
2.1	NIVEL DE PRESIÓN SONORA	3
2.2	POTENCIA ACÚSTICA	4
2.3	NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA.....	4
2.4	IMPEDANCIA ACÚSTICA	4
2.5	COMPLIANCIA MECÁNICA ESPECÍFICA	4
2.6	ABSORCIÓN SONORA	4
2.7	COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA.....	4
2.8	REVERBERACIÓN	4
2.9	TIEMPO DE REVERBERACIÓN	5
2.10	AISLAMIENTO ACÚSTICO.....	5
2.11	PÉRDIDA POR TRANSMISIÓN.....	5
2.12	CAMPO SONORO DIRECTO	5
2.13	CAMPO REVERBERANTE.....	5
2.14	MATERIALES POROSOS	6
2.15	PÉRDIDA POR INSERCIÓN	6
2.16	ONDAS DE FLEXIÓN.....	6
2.17	DIRECCIONALIDAD	6
2.18	FACTOR DE DIRECTIVIDAD	6
2.19	ÍNDICE DE DIRECTIVIDAD	6
2.20	IMPEDANCIA ACÚSTICA CARACTERÍSTICA DEL MEDIO	6
3	ESTADO DEL ARTE.....	7
4	ESTRATEGIAS TÉCNICAS PARA EL AISLAMIENTO ACÚSTICO	8
4.1	AISLAMIENTO DE PAREDES	8
4.1.1	Particiones Simples:	8
4.1.1.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	11
4.1.1.2	Recomendaciones:	11
4.1.2	Particiones Dobles:	12
4.1.2.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	14
4.1.2.2	Recomendaciones:	15
4.1.3	Particiones Compuestas	15
4.1.3.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	15
4.1.3.2	Recomendaciones:	16
4.2	ELEMENTOS ALTERNOS.....	16

4.2.1	Aislamiento de Ventanas.....	16
4.2.1.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	16
4.2.1.2	Recomendaciones:	17
4.2.2	Aislamiento de Puertas.....	17
4.2.2.1	Sellamientos.....	18
4.2.2.2	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	19
4.2.2.3	Recomendaciones:	19
4.2.3	Techo Flotante	19
4.2.3.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	20
4.2.3.2	Recomendaciones:	20
4.3	 AISLAMIENTO DE RUIDO POR VÍA ESTRUCTURAL	20
4.3.1	Suelo Flotante	21
4.3.1.1	Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:.....	21
4.3.1.2	Recomendaciones:	22
4.4	 AISLAMIENTO EN INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN	22
4.4.1	Fuentes de ruido.....	22
4.4.2	Estrategias para insonorización de instalaciones de climatización	24
4.4.2.1	Recomendaciones:	28
5	 SISTEMAS DE REFUERZO SONORO.....	28
5.1	CADENA ELECTROACÚSTICA.....	29
5.1.1	Equipos.....	29
5.1.1.1	Transductores	29
5.1.1.2	Recomendaciones para uso de transductores en función de la insonorización de un recinto	37
5.1.1.3	Procesadores de señal.....	37
5.1.1.4	Ventajas y desventajas de los limitadores como medida de control de ruido	39
5.1.2	Configuración de la Cadena Electroacústica.....	40
5.2	SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA CENTRALIZADOS Y DESCENTRALIZADOS	40
5.2.1	Sistemas de potencia centralizada.....	40
5.2.1.1	Ventajas y desventajas como sistema de distribución de potencia	40
5.2.2	Sistemas de potencia descentralizada	41
5.2.2.1	Ventajas y desventajas como sistema de distribución de potencia	41
5.3	CABLEADO.....	41
5.3.1	Conexiones balanceadas	41
5.3.2	Conexiones no balanceadas	41
5.3.3	Conectores.....	41
6	 DISTRIBUCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SONIDO PARA EL CONTROL DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN LOCALES COMERCIALES CON MÚSICA AMPLIFICADA.....	43
6.1	DISTRIBUCIÓN DEL LOCAL.....	43
6.1.1	Separación física	43
6.1.2	Superficies	44
6.1.3	Concentración de la música.....	44
6.2	DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE ALTAVOCES.....	44
6.3	ACTUACIONES EN VIVO.....	46
6.4	PASOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE ALTAVOCES EN LOCALES COMERCIALES	46
6.4.1	Realizar un plano planta y de elevación del establecimiento	46

6.4.2	<i>Estimar el volumen de la sala</i>	47
6.4.3	<i>Estimar el tiempo de reverberación</i>	47
6.4.4	<i>Determinación del Nivel Máximo de Presión Sonora Continuo</i>	47
6.4.5	<i>Posición y Ángulo de Cobertura</i>	48
6.4.6	<i>Solapamiento de fuentes</i>	49
6.4.6.1	Criterios para la selección del tipo de solapamiento	50
6.4.7	<i>Cálculo de niveles de potencia para altavoces en función del nivel de presión sonora deseado</i>	51
7	DISEÑO DE SISTEMAS DE SONIDO LOCALES COMERCIALES DE DIFERENTES USOS	52
7.1	DISEÑO DE SISTEMAS DE SONIDO PARA LOCALES CON MÚSICA DE AMBIENTE.....	52
7.2	DISEÑO DE SISTEMA DE SONIDO PARA LOCALES CON MÚSICA EN PRIMER PLANO	52
7.3	CONSIDERACIONES GENERALES	53
8	MEDICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO	53
8.1	INSTRUMENTACIÓN	53
8.2	PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN	53
8.3	EXPRESIÓN DE RESULTADOS	54
8.4	CONSIDERACIONES	54
9	MEDICIÓN DE REVERBERACIÓN SEGÚN EL ESTÁNDAR ISO 3382-2	54
9.1	MÉTODOS.....	54
9.1.1	<i>Método de la señal de ruido interrumpida</i>	54
9.1.2	<i>Método de la respuesta impulsiva integrada</i>	54
9.2	INSTRUMENTACIÓN	54
9.3	PROCEDIMIENTO	55
9.3.1	<i>Método de la señal de ruido interrumpida</i>	55
9.3.2	<i>Método de la respuesta impulsiva integrada</i>	55
9.4	CONSIDERACIONES	55
10	RECOMENDACIONES Y ASPECTOS GENERALES	55
11	RECOMENDACIONES TÉCNICAS Y HUMANAS	56
12	BIBLIOGRAFÍA	57

1 OBJETIVOS

1.1 General

Elaborar una guía técnica para la implementación de sistemas de insonorización o aislamiento acústico en establecimientos comerciales en Santiago de Cali.

2 CONCEPTOS Y TERMINOLOGÍA

2.1 Nivel de Presión Sonora

El umbral de audición humana está ubicado en los 2×10^{-5} pascales, mientras que el umbral de dolor se extiende hasta los 20 pascales. Este intervalo es extraordinariamente grande, por lo que

es razonable usar una magnitud logarítmica como medida técnica a lugar de la presión sonora [1]. Se define nivel de presión sonora como:

$$L = 20 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_o} \right) = 10 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_o} \right)^2 [1] \quad (1)$$

donde $p_o = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ y p_{rms} es el valor efectivo de la presión en un intervalo de tiempo.

2.2 Potencia Acústica

Es la energía sonora total radiada por una fuente en un intervalo de tiempo [1].

2.3 Nivel de Potencia Acústica

Es la magnitud logarítmica usada para expresar la potencia acústica. Está definida como:

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} [2] \quad (2)$$

donde W es la potencia acústica y $W_{ref} = 10^{-13}$ watts.

2.4 Impedancia Acústica

Es la oposición de un medio a la propagación de ondas sonoras a través de él. Se define como la razón entre la presión sonora y la velocidad de volumen acústico [3].

2.5 Compliancia Mecánica Específica

La compliancia mecánica es definida como el recíproco de la rigidez en un material. La compliancia acústica específica, es la compliancia mecánica por unidad de área en m^3/N [4].

2.6 Absorción Sonora

Se define como la cantidad de energía acústica que absorbe un material con respecto a la energía que incide en él. Esta se cuantifica por medio del coeficiente de absorción sonora [5].

2.7 Coeficiente de Absorción Sonora

Es un valor de 0 a 1 que representa la absorción que tiene un material o una superficie, éste está en función de la frecuencia [6]. El coeficiente de absorción α está relacionado al coeficiente de reflexión de la siguiente manera:

$$\alpha = 1 - r^2 [7] \quad (3)$$

Donde r es el coeficiente de reflexión.

2.8 Reverberación

Cuando se excita un recinto con una fuente sonora, las ondas generadas por esta empezarán a impactar en las diferentes superficies de la sala, generando así múltiples y consecutivas reflexiones. Esto provoca una situación en la cual la densidad de las reflexiones se va haciendo cada vez mayor. El fenómeno donde el sonido permanece aun cuando la fuente está apagada a raíz de las distintas reflexiones es conocido como reverberación [8].

2.9 Tiempo de Reverberación

Es el tiempo en segundos necesario para que el nivel de presión sonora decaiga 60 dB luego de que la fuente es apagada [7]. Esta cantidad está relacionada al volumen de la sala y su absorción acústica total. Según Sabine, se define de la siguiente manera:

$$T = \frac{0.161V}{S\bar{\alpha}} \quad [8] \quad (4)$$

donde V es el volumen de la sala expresado en m^3 , S el área total de las superficies expresada en m^2 y $\bar{\alpha}$ el coeficiente de absorción promedio.

2.10 Aislamiento Acústico

Es definido como la reducción en el nivel de presión sonora entre dos cuartos contiguos, donde uno de los dos posee una fuente sonora [3]; esta definición también aplica para cuartos y exteriores. El ruido no solo se propaga por vía directa, por lo tanto un aislamiento integral implica tener en cuenta las vías estructurales por las que puede ser transmitido el sonido.

Los problemas asociados al ruido están asociados a diversas variables, así como las tecnologías utilizadas para controlarlo (Control de ruido), dirigiéndose en la mayoría de los casos a cumplir con las normativas nacionales. En general un aislamiento acústico puede cuantificarse por medio de la pérdida por transmisión.

2.11 Pérdida por Transmisión

Es el término usado para expresar la cantidad de energía acústica que no es transmitida por un material hacia otro [4]. Está expresado en términos del coeficiente de transmisión τ definido como la relación entre la potencia sonora incidente y la transmitida. La pérdida por transmisión está dada en decibeles y es dependiente de la frecuencia.

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad [4] \quad (5)$$

2.12 Campo Sonoro Directo

El sonido directo corresponde al sonido que llega al receptor directamente desde la fuente, El campo directo corresponde a la parte del campo acústico dominada por el sonido directo, Éste campo está situado en la zona más próxima a la fuente [9].

2.13 Campo Reverberante

El campo reverberante abarca todo el sonido reflejado (sonido proveniente de las múltiples reflexiones). Este tiene un valor energético constante para todos los puntos que lo componen, y comprende la parte del campo sonoro que está más alejado de la fuente [9].

Existe una distancia que define el límite entre el campo directo y el campo reverberante llamada *Distancia crítica*. Para distancias menores a esta predomina el campo directo y para distancias mayores, el campo reverberante [8].

2.14 Materiales Porosos

Este tipo de materiales cuentan con una red celular de poros entrelazados. Al incidir el sonido dentro de estos poros la energía acústica es convertida en energía calórica. Hay una fracción de la energía sonora que es reflejada, mientras que la que se convierte en calor es absorbida [10].

2.15 Pérdida por Inserción

Es un término utilizado para la evaluación de medidas de control de ruido. Se refiere a la disminución del nivel de presión sonora en un punto luego de la inserción de un elemento en relación a cuando no se tenía [11].

2.16 Ondas de Flexión

Son ondas que se presentan en elementos estructurales, donde los desplazamientos se dan perpendicularmente a la dirección de propagación y a la superficie del mismo. La velocidad de propagación de estas ondas depende de la frecuencia. Representan un especial interés en la acústica debido a que su desplazamiento produce radiación sonora [1].

2.17 Direccionalidad

Las fuentes no radian igual nivel de presión sonora para todos los ángulos, por eso existen términos como el índice de directividad que proporcionan información sobre las propiedades direccionales de una fuente [4].

2.18 Factor de directividad

Es la expresión matemática que cuantifica la directividad, y se define como la relación entre la intensidad sonora en un eje y distancia determinada, y la intensidad sonora en el mismo punto que produciría una fuente esférica. Está definido por la ecuación

$$Q = \frac{4\pi r^2 I}{W} [4] \quad (6)$$

Donde W es la potencia acústica de la fuente, r es la distancia desde la fuente hasta el punto y I es la intensidad sonora definida como:

$$I = \frac{(p_{rms})^2}{\rho c} [4] \quad (7)$$

Donde ρ es la densidad del aire y c es la velocidad del sonido.

2.19 Índice de directividad

Es la magnitud logarítmica usada para expresar el factor de directividad. Esta dado por la ecuación (8).

$$DI = 10 \log_{10}(Q) [4] \quad (8)$$

2.20 Impedancia acústica característica del medio

Es definida como el producto entre la densidad del medio y la velocidad del sonido en ese medio [4].

3 ESTADO DEL ARTE

El ruido producto del funcionamiento de establecimientos comerciales ha sido ampliamente tratado por países europeos, que con la intención de mitigar los efectos negativos que tiene este fenómeno sobre la población, han desarrollado leyes que se encargan de su control y regulación [12]. En estos países los entes reguladores ambientales han realizado directrices en constante actualización para que funcionarios públicos hagan cumplir las normativas nacionales referentes a la contaminación acústica [13]; este constante control ha llevado a los locales comerciales a realizar prácticas de insonorización en donde no solo se busca un aislamiento acústico óptimo con base en las leyes locales, sino también una optimización de los sistemas de refuerzo sonoro y acondicionamiento acústico propio. Por otro lado muchas empresas destinadas a la fabricación de materiales con fines acústicos han realizado guías con metodologías y recomendaciones generales y particulares para hacer una buena insonorización en todo tipo de establecimientos [14], generando una mayor conciencia en la importancia del tema.

En países como el Reino Unido y España, los establecimientos comerciales recurren a guías básicas de insonorización enfocadas a recintos nocturnos como clubes y karaokes donde la música es el principal emisor de ruido. Estas guías tratan soluciones a problemas típicos propios de estos establecimientos como lo son puertas en constante apertura y ventanas en las superficies [15], con la intención de que estén en regla con la normativa nacional. En España las leyes de regulación de ruido han hecho que en centros comerciales donde operan lugares con emisión de ruido alto, se tome conciencia de acondicionar acústicamente los recintos y aislarlos en caso de ser necesario [16]. El confort acústico es un tema que estos países han tomado en cuenta a la par con el cumplimiento de emisión que les exige la ley.

Una de las principales causas de quejas dirigidas a establecimientos comerciales por parte de vecinos, es debida a altos niveles de presión sonora provenientes de estos; este hecho sumado al amplio rango de frecuencias contenido en las interpretaciones musicales, son causantes de numerosos efectos molestos sobre las personas [17]. Para este tipo de problemáticas las alternativas de control de ruido más comunes contemplan la incorporación de elementos de absorción sonora y la intervención de superficies tales como ventanas y puertas, que pueden ser especialmente críticas para la transmisión de ruido [5]. También se opta por la incorporación de elementos que ayuden al aumento de la pérdida por transmisión entre el local y locales continuos o con el exterior [14].

Para locales comerciales destinados al entretenimiento, es usual que el campo reverberante supere el campo directo del sonido proveniente de los altavoces. Esto es debido a que en general los materiales usados, y en muchas ocasiones las grandes dimensiones de los recintos causan tiempos de reverberación altos. Para solucionar estos problemas es habitual el uso materiales absorbentes de sonido dentro de las superficies de la sala, debido a que estos ayudan a reducir el tiempo de reverberación, disminuyendo el nivel de presión sonora que posteriormente es

transmitido al exterior [18]. Estos materiales son generalmente porosos y su acción está en función de la frecuencia con dependencia de sus dimensiones y características físicas [3].

Además del acondicionamiento de los locales con materiales acústicos, suele intervenir los dispositivos electroacústicos de los establecimientos comerciales como los altavoces y amplificadores. El uso de limitadores de sonido es usado para tener un nivel de presión sonora máximo que cumpla con las normativas locales. Otra de las alternativas utilizadas son los altavoces direccionales que cubran áreas de interés específico, los cuales deben contar con aislamiento de vibraciones para evitar la transmisión de sonido por vía estructural [18].

Para evaluar la efectividad de medidas de control o el estado actual del aislamiento de determinados elementos, existen estándares internacionales que permiten obtener una cuantificación de la pérdida por transmisión tanto por vía estructural como por vía aérea. La Organización Internacional de Normalización (ISO) presenta en sus normas 717-1 y 717-2 magnitudes globales para aislamiento en edificios y elementos de construcción, así como las directrices para su determinación. Estas magnitudes han permitido tener una clasificación para el aislamiento acústico internacionalmente aceptada [19] [20].

4 ESTRATEGIAS TÉCNICAS PARA EL AISLAMIENTO ACÚSTICO

4.1 Aislamiento de Paredes

El aislamiento que proporcionará una pared ante energía sonora incidente, estará en función de la frecuencia y estará ligada a propiedades físicas del elemento. En general existen dos tipos de instalaciones con fines en aislamiento acústico, que son las particiones simples y dobles.

4.1.1 Particiones Simples:

Una partición simple es aquella donde sus dos caras posteriores están rígidamente conectadas [21]. La pérdida por transmisión que aporta un panel simple está dominada por tres regiones en frecuencia que son: Región controlada por la rigidez, la masa (Ley de Masa) y el amortiguamiento de la partición. Cada una de estas regiones tiene que ver con características propias de la partición [4]. El comportamiento de la curva de pérdida por transmisión puede observarse en la Figura 2.

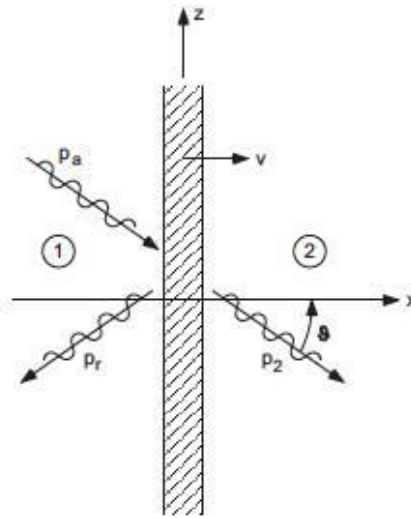


Figura 1. Comportamiento de una onda sonora ante una partición simple. Tomada de [1].

a. Región controlada por la rigidez:

A frecuencias bajas el comportamiento de la partición estará determinado por su rigidez. El control de esta región va hasta la primera frecuencia de resonancia del elemento cuya transmisión está dada por la ecuación (9).

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{K_s^2} \right) - 10 \log_{10} \left[\ln \left(1 + \left(\frac{1}{K_s^2} \right) \right) \right] [4] \quad (9)$$

donde K_s es

$$K_s = 4\pi\rho cfC_s [4] \quad (10)$$

Siendo

ρ La densidad del aire.

c La velocidad del sonido.

f La frecuencia.

C_s La compliancia mecánica por unidad de área.

La primera frecuencia de resonancia está dada por la ecuación (11).

$$f_{11} = \left(\frac{\pi}{4\sqrt{3}} \right) \cdot C_L \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \cdot h [4] \quad (11)$$

donde

a Es el ancho de la partición.

b Es el alto de la partición.

h Es el espesor de la partición.

C_L La velocidad de las ondas longitudinales en la partición.

b. Región controlada por la masa (Ley de masa):

La masa es un parámetro que afecta de manera relevante el aislamiento acústico de una partición, ya que la densidad superficial de este, tendrá un efecto significativo en la curva de pérdida por transmisión de la pared. Esta región va desde la primera frecuencia de resonancia hasta la frecuencia crítica. El aislamiento proporcionado por una partición en la región controlada por la masa a incidencia normal se presenta en la ecuación (12).

$$T_N = 10 \log \left(1 + \left(\frac{\pi f M_s}{\rho c} \right)^2 \right) [4] \quad (12)$$

donde M_s es la densidad superficial de la partición.

La pérdida por transmisión de esta zona está determinada por la ecuación (13).

$$T_L = T_N - 5dB [4] \quad (13)$$

Cuando la impedancia acústica de la partición es grande en comparación con la impedancia acústica característica del medio, la pérdida por transmisión en esta región estará determinada por la llamada “Ley de Masa”.

$$TL = 20 \log_{10}(f M_s) - 47dB [4] \quad (14)$$

En la práctica esta ley permite obtener un aumento de 6dB/Octava cada que la masa del elemento es duplicada.

c. Región controlada por el amortiguamiento:

A medida que la frecuencia de la onda incidente incrementa, su velocidad de propagación se va acercando a la velocidad de propagación de las ondas de flexión de la partición. La frecuencia en que estas dos ondas son iguales es llamada *frecuencia crítica*; en esta frecuencia empieza la región que está controlada por el amortiguamiento del elemento. La pérdida por transmisión en esta zona está dada por la ecuación (15).

$$TL = TL_N(fc) + 10 \log_{10}(\eta) + 33.22 \log_{10} \left(\frac{f}{f_c} \right) - 5.7dB [4] \quad (15)$$

donde

η Es el coeficiente de amortiguación del elemento.

f_c Es la frecuencia crítica.

$TL_N(f_c)$ Es la pérdida por transmisión a incidencia normal en la frecuencia crítica que está dada por la ecuación (16).

$$TL_N(f_c) = 10 \log_{10} \left[1 + \left(\frac{\pi M_s f_c}{\rho c} \right)^2 \right] [4] \quad (16)$$

Donde f_c es la frecuencia critica que está dada por la ecuación (17).

$$f_c = \frac{\sqrt{3}c^2}{\pi C_L h} [4] \quad (17)$$

A la frecuencia crítica hay muy poco aislamiento debido al *efecto de coincidencia* entre la onda incidente y las ondas de flexión de la partición.

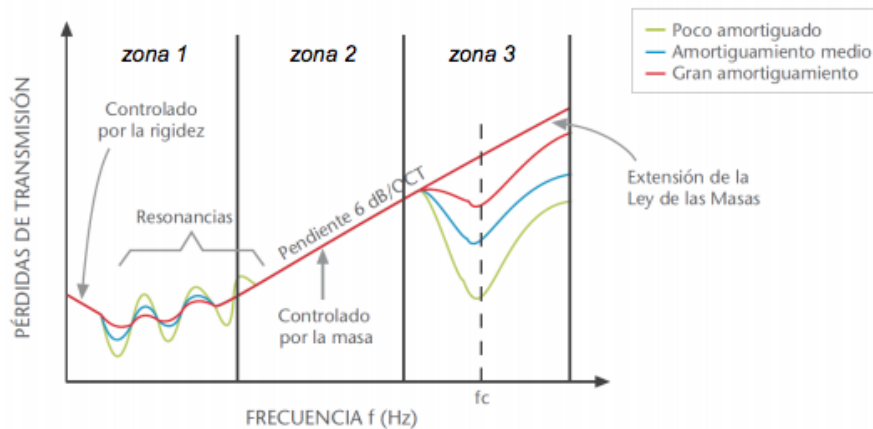


Figura 2. Pérdida por transmisión de una partición simple en función de la frecuencia. Tomada de [22].

4.1.1.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:
 - Proporciona un aislamiento alto en gran parte del rango de frecuencias cuando el material tiene una densidad superficial grande.
2. Desventajas:
 - Aumentar la masa de un elemento no siempre es viable en la práctica.
 - El aumentar el espesor de la partición disminuye la frecuencia crítica del elemento creando una zona con muy bajo aislamiento en posibles rangos de interés.

4.1.1.2 Recomendaciones:

- Tener especial cuidado con instalaciones eléctricas o similares que impliquen perforación en las particiones. Se debe procurar hacer sellamientos y si es necesario agregar material absorbente.

4.1.2 Particiones Dobles:

Es posible aumentar el aislamiento que proporciona una partición construyendo un sistema con dos tabiques y una cámara de aire entre ellos, creando un sistema masa-resorte-masa. Los cambios de impedancia a los que se ve sujeta la onda sonora harán que pierda energía en su trayecto [22]. Este sistema tendrá una frecuencia de resonancia que estará dada por las masas de los paneles y la distancia entre sus superficies internas. La frecuencia de resonancia es calculada de acuerdo a la ecuación (18).

$$f_{res}(HZ) = \frac{c}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{\rho}{d} \left(\frac{1}{M_{S1}} + \frac{1}{M_{S2}} \right)} \right) [4] \quad (18)$$

donde

d Es la distancia entre las superficies internas de los paneles y M_{S1} y M_{S2} son sus respectivas masas.

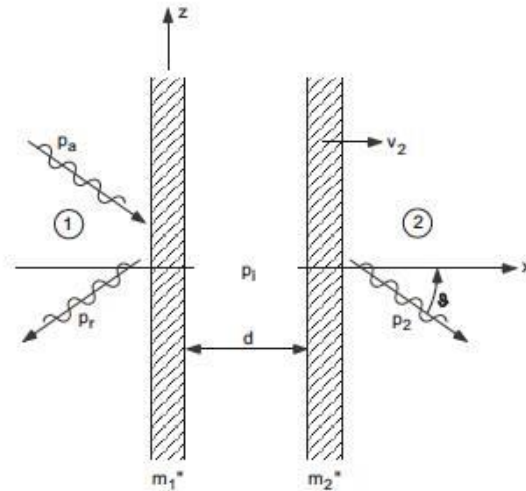


Figura 3. Comportamiento de una onda sonora ante una partición doble. Tomado de [1].

La curva de pérdida por transmisión es calculada para tres nuevas regiones en frecuencia. Estas regiones estarán determinadas por las características de las particiones y la cámara de aire. Un gráfico general de la curva de una partición doble puede observarse en la Figura 4.

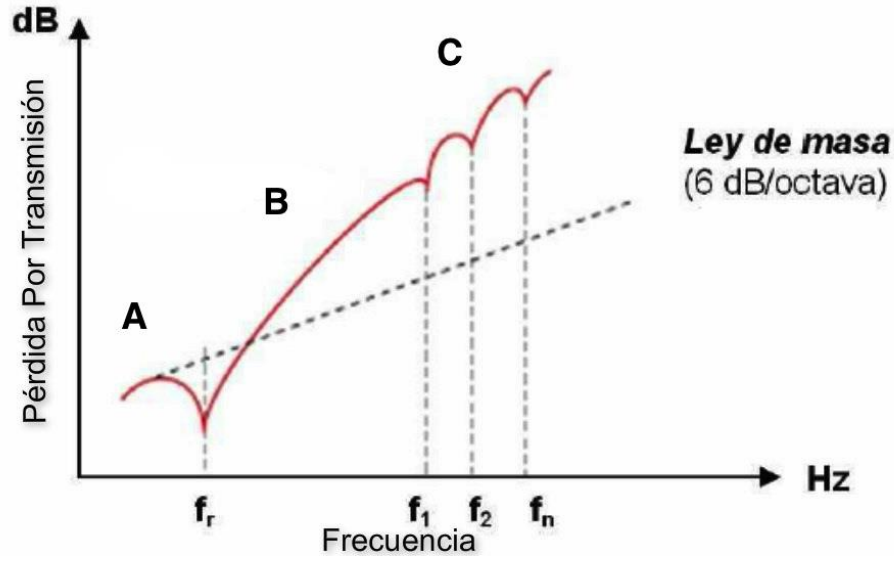


Figura 4. Pérdida por transmisión de una partición doble en función de la frecuencia. Adaptada de [22].

a. Región A

Corresponde a la zona en frecuencia antes de llegar a la frecuencia de resonancia. En esta zona el sistema verá a los dos tabiques como uno solo, haciendo que la transmisión dependa de las masas de los paneles. El cálculo del aislamiento en esta región está dado por la ecuación (19).

$$TL_A = 20 \log_{10}(M_{S1} + M_{S2}) + 20 \log_{10}(f) - 47.3 \quad [4] \quad (19)$$

b. Región B

En esta región empieza a ser importante el espacio de aire entre las dos particiones para el cálculo del aislamiento cuyo valor puede obtenerse a partir de la ecuación (20). En esta zona se presenta el mayor aislamiento de la curva ya que los dos paneles actúan de forma independientemente y la cavidad de aire no es mayor a la longitud de onda.

$$TL_B = TL_1 + TL_2 + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) \quad [4] \quad (20)$$

donde

TL_1 y TL_2 son las pérdidas por transmisión de los dos paneles respectivamente. La región B corresponde al rango de frecuencias que cumplan con:

$$f_{res} < f < \left(\frac{c}{2\pi d}\right) \quad [4] \quad (21)$$

c. Región C

En esta región el espacio de aire entre paneles es grande en comparación con la longitud de onda, por lo cual se comportará como un recinto donde habrán ondas estacionarias. La Región C comprende un rango de frecuencias mayores a $\frac{c}{2\pi d}$. El cálculo de la pérdida por transmisión para esta zona, asumiendo la inclusión de material absorbente dentro de la cavidad, se obtiene por medio de la ecuación (22).

$$TL_c = TL_1 + TL_2 + 10 \log_{10} \left[\frac{4}{1 + \left(\frac{2}{\alpha}\right)} \right] \quad [4] \quad (22)$$

donde

α es el coeficiente de absorción del material adherido a la cavidad.

En la Figura 5 se puede observar la configuración de una partición doble con elementos de diferente espesor.

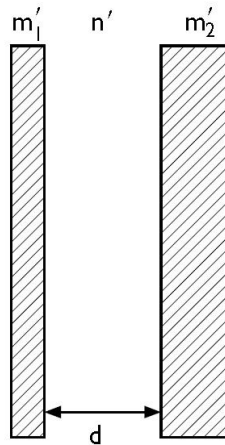


Figura 5. Partición doble con elementos de diferente espesor. Tomada de [23].

4.1.2.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:
 - Proporciona un aislamiento más eficiente que una partición simple para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia.
 - Agregar material absorbente en la cavidad de aire ayuda a mejorar el aislamiento.
2. Desventajas:
 - Solo es eficiente para frecuencias superiores a la frecuencia de resonancia.

- Implica parte del espacio de un recinto, lo cual puede ser una limitación en muchos casos.

4.1.2.2 Recomendaciones:

- Evitar particiones con igual espesor para que sus frecuencias críticas difieran.
- Agregar material absorbente para minimizar efectos de ondas estacionarias a alta frecuencia.
- Evitar cualquier tipo de cavidades que puedan representar una vía de transmisión directa.
- Agregar materiales elásticos que desacoplen en parte los elementos de la estructura.

4.1.3 Particiones Compuestas

Es usual encontrar particiones con más de un elemento, en muchos casos se tiene en una misma división ventanas, puertas, y muros hechos con diferentes materiales que implican tener que hacer un análisis que considere cada elemento por separado para obtener un aislamiento total [3]. El aislamiento de este tipo de particiones está en función de las áreas superficiales de cada elemento que la compone y sus respectivas pérdidas por transmisión, este puede calcularse a partir de la ecuación (23).

$$TL_T = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_{i=1}^q \frac{S_i}{TL_i}}{\frac{1}{10}} \right] [3] \quad (23)$$

donde

S_i es el área superficial del elemento i .

TL_i es la pérdida por transmisión del elemento i .

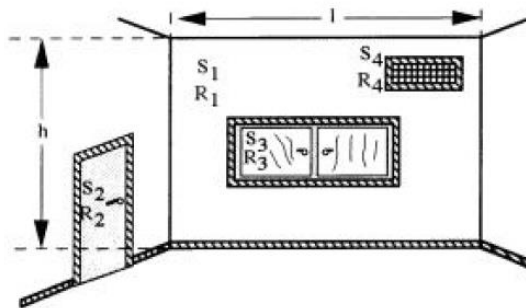


Figura 6. Ejemplo de una partición compuesta. Tomada de [22].

4.1.3.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:
 - Si se realiza un diseño previo a la construcción se puede obtener un aislamiento óptimo de la partición, acorde con las necesidades del recinto.
2. Desventajas:

- Un elemento con una pérdida por transmisión muy baja puede disminuir significativamente el aislamiento total de la partición.

4.1.3.2 Recomendaciones:

- Elementos como ventanas, puertas y ductos de ventilación que pueden tener huecos y vías alternas deben tener la menor área posible.
- Se debe procurar hermeticidad en todos los elementos. Cualquier vía directa representa una disminución grande en el aislamiento total a pesar de elementos con pérdidas por transmisión grandes.

4.2 Elementos Alternos

4.2.1 Aislamiento de Ventanas

Las ventanas son un constante problema en recintos tales como establecimientos comerciales donde se deben cumplir con niveles de ruido establecidos. Estos elementos tienen un aislamiento acústico bajo en comparación con muros y suelos debido a que su densidad superficial es menor y en muchas ocasiones poseen fisuras que significan una disminución grande en el aislamiento proporcionado.

Para asegurar una pérdida por transmisión alta de este tipo de elementos se debe considerar en primer lugar tener una buena hermeticidad, para evitar la transmisión de sonido por cavidades indeseadas que pueden ser críticas. Su curva de transmisión está determinada por las ecuaciones de particiones simples y dobles, por lo que variables como el espesor del vidrio, su densidad superficial y su cavidad de aire (en caso de ser una instalación doble) determinarán su aislamiento en función de la frecuencia.

Debido al uso que tienen estos elementos, el material absorbente que se considere agregar se debe ubicar alrededor (en los extremos) de este. En la Figura 7 puede observarse distintas configuraciones para ventanas dobles variando su espesor, número de láminas y cavidad de aire entre vidrios.

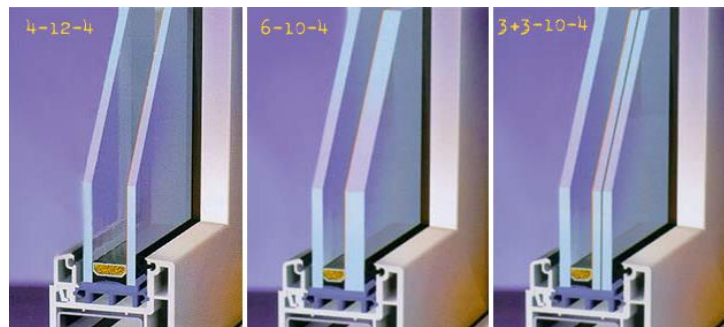


Figura 7. Tipos de configuración para ventanas dobles (los espesores y distancia entre placas están expresadas en mm). Tomada de [24].

4.2.1.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:

- Si se opta por una instalación doble tiene las ventajas de una partición doble, en función de las características descritas en la **sección 4.1.2.**
2. Desventajas:
- Su instalación es muy susceptible a que en el acabado queden aberturas, afectando el aislamiento del elemento.
 - Instalaciones simples no son efectivas como medida ya que en general la densidad superficial de los vidrios es baja.

4.2.1.2 Recomendaciones:

- Usar instalaciones dobles con alta hermeticidad.
- No instalar ventanas corredizas.
- Usar varias capas de vidrios para cada lado.

4.2.2 Aislamiento de Puertas

Otro problema de relevancia para el aislamiento sonoro son puertas con deficiente diseño acústico. Estos elementos trabajan como una partición al igual que las paredes y ventanas, y se puede aumentar su pérdida por transmisión haciendo construcciones con paneles dobles y variando su densidad superficial, pero debido a su montaje son especialmente susceptibles a tener puntos de fuga de aire que hacen de estos componentes un punto crítico para el aislamiento de un recinto.

En general, los marcos y acabados de carpintería son temas de especial cuidado para la implementación de puertas con fines acústicos, ya que es muy factible que en estos exista algún tipo de abertura cuya presencia tiene un impacto significativo en la reducción sonora global. El correcto sellamiento de estos puntos es fundamental para que la implementación del diseño acústico sea eficiente.

Existen varios tipos de puertas que se clasifican según su número de láminas y sistema de funcionamiento. Las más comunes son las de una hoja y dos hojas. En la Figura 8 se observa la configuración de estos dos tipos de puertas.

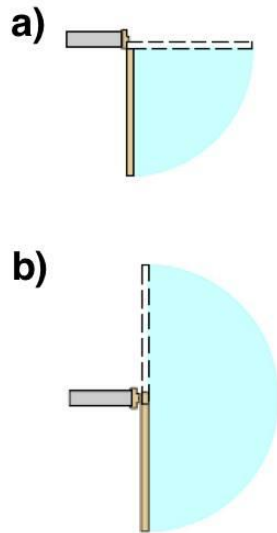


Figura 8. Tipos de puertas. a) una sola hoja. b) dos hojas. Tomada de [25]

4.2.2.1 Sellamientos

Para evitar la filtración de aire en los bordes de las puertas, se utilizan burletes. Estos elementos proporcionan la hermeticidad necesaria para que el aislamiento realizado a la puerta no presente alteraciones. Los burletes están hechos por materiales elásticos o espumas que evitan el paso de sonido. También es de suma importancia el correcto sellamiento de las cerraduras y manijas. En la Figura 9 se puede observar las configuraciones de burletes para puertas.



Figura 9. Burletes para puertas.

4.2.2.2 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:

- Al ser una partición tiene las características descritas en la sección 4.1

2. Desventajas:

- Si no se sellan de manera eficiente el aislamiento puede tener una disminución importante en su efectividad.

4.2.2.3 Recomendaciones:

- Optar por puertas con densidad superficial alta o de ser posible hacer instalaciones dobles que proporcionan mayor reducción sonora en gran parte del rango de frecuencias.
- Realizar un eficiente sellamiento del elemento en pro de que el diseño acústico no se vea distorsionado por vías indeseadas.
- En establecimientos comerciales donde haya una constante apertura de puertas, aislar el recinto del exterior con un “Lobby” como se muestra en la Figura 10.

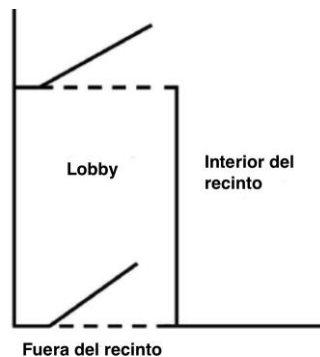


Figura 10. Distribución de un recinto con Lobby interior. Adaptada de [15]

4.2.3 Techo Flotante

En general los techos flotantes pueden funcionar como una partición doble con las características vistas en la **sección 4.1.2**, donde el aislamiento está en función de la transmisión por vía aérea. También es posible realizar un montaje que trabaje en conjunto con un suelo flotante para hacer un aislamiento integral de ruido de impacto haciendo uso de materiales elásticos y desacople estructural, esto será tratado en la **sección 4.3.1**. Los techos flotantes o *cielorrasos* pueden aportar también a la acústica interior de un recinto ayudando a reducir los tiempos de reverberación con la implementación de elementos absorbentes acústicos.

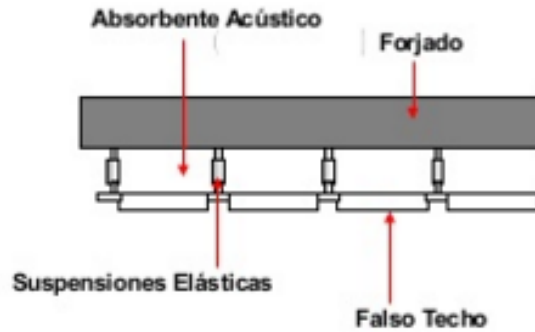


Figura 11. Configuración de un techo falso. Tomada de [26].

4.2.3.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:

- Funciona como medida de control de ruido y de acondicionamiento acústico.
- Tiene las propiedades de una partición doble.
- Ayuda como medida complementaria al aislamiento de ruido de impacto generado en recintos superiores.

2. Desventajas:

- Las instalaciones de iluminación y orificios para cables representan una vía directa para el sonido.

4.2.3.2 Recomendaciones:

- Sí existe cableado que pase por el montaje debe hacerse un doble techo para evitar filtraciones de sonido en los orificios.
- Las instalaciones de iluminación y demás detalles de acabado que impliquen aberturas en la partición, deben estar cuidadosamente selladas.

4.3 Aislamiento de ruido por vía estructural

El ruido no solo se transmite por vía aérea, también se transmite vía estructural por medio de vibraciones. Un sonido originado en medio aéreo puede provocar vibraciones en las superficies de un recinto. Si éste está conectado a otros recintos estructuralmente, las perturbaciones pueden llegar a propagarse debido a las conexiones estructurales creando un problema de ruido significativo [27]. En general la transmisión por vía estructural se mitiga aislando las conexiones rígidas entre elementos que puedan transmitir energía cinética de uno a otro, por medio de materiales elásticos que cumplan la función de resorte entre materiales y donde las vibraciones se disipen.

a. Aislamiento al ruido de impacto

Las perturbaciones directas a superficies por parte de golpeteos, pisadas u otros eventos que impliquen una gran cantidad de energía en un instante de tiempo corto es el denominado ruido de impacto. Al tener mucha energía y transmitirse rápidamente por la estructura, es uno de los

problemas que más quejas recibe por parte de vecinos continuos al sitio de propagación. Por lo general este tipo de ruidos son comunes en pisos donde el ruido se propaga en el recinto que se encuentra abajo. Para controlar este tipo de ruidos se utilizan suelos flotantes cuyo fin es amortiguar la energía vibratoria proporcionada por la fuente.

4.3.1 Suelo Flotante

Es un sistema construido para reducir el ruido de impacto, el principio de funcionamiento de este consiste en la implementación de un elemento amortiguador que aisle la transmisión estructural entre la capa rígida que está en contacto con la fuente y los soportes de la estructura.

El nivel de presión sonora reducido a causa de la implementación de suelos flotantes puede cuantificarse con la ecuación (24) [28].

$$\Delta L = 30 \lg \frac{f}{f_0} dB \quad [28] \quad (24)$$

donde

f Es la frecuencia central de la banda en tercios de octava.

f_0 Es la frecuencia de resonancia del sistema. Dada por la ecuación (25).

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{s'}{M_S}} [28] \quad (25)$$

donde

s' Es la rigidez dinámica por unidad de área de la capa elástica según la norma EN 29052-1, en mega newtons por metro cúbico.

M_S Es la densidad superficial del suelo flotante, en kilogramos por metro cuadrado.

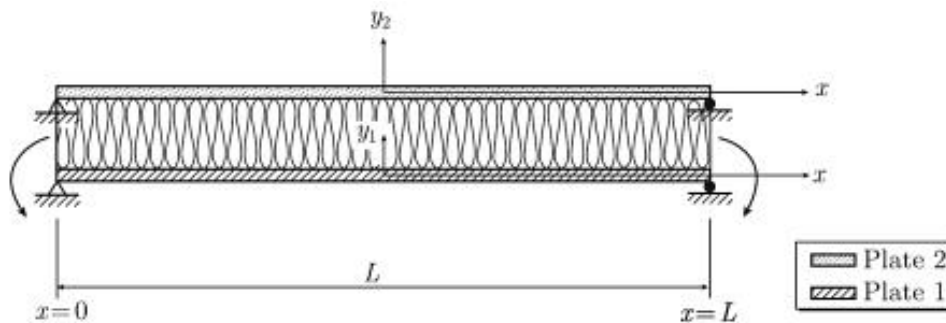


Figura 12. Configuración Suelo flotante. Tomada de [29].

4.3.1.1 Ventajas y desventajas como medida de aislamiento:

1. Ventajas:

- Es una solución efectiva para recintos donde hayan fuentes de ruido de impacto.

- Representa una alternativa eficiente para aislar acústicamente recintos con alto flujo de personas al interior de edificios, tales como locales comerciales y empresas.
- 2. Desventajas:
 - Para que sea efectivo debe tener un desacople estructural eficiente.

4.3.1.2 Recomendaciones:

- Usar materiales elásticos en los costados verticales para evitar transmisión por vías alternas.
- Tener especial cuidado a los parámetros relacionados con la frecuencia de resonancia ya que a partir de esta comienza la efectividad del elemento.

4.4 Aislamiento en instalaciones de climatización

Los sistemas de climatización pueden representar un foco de ruido significativo y de cuidado a la hora de realizar la insonorización de un recinto. Esto se debe a que representa una vía de ruido aéreo directa para el sonido producido por la sala hacia recintos contiguos; por otra parte al ser un sistema mecánico y al haber constante flujo de fluido dentro de él, representa un elemento crítico que debe tener un adecuado tratamiento.

4.4.1 Fuentes de ruido

Las principales fuentes de ruido en este tipo de sistemas son el sistema de ventilación, unidades interiores, unidades exteriores, conductos, rejillas y difusores [30].

a. Sistemas de ventilación:

El flujo de aire y movimiento de las aspas hacen un importante aporte de ruido en el espectro de frecuencias. Al ser un sistema, este tiene una frecuencia fundamental que está dada por el número de aspas y la velocidad de la máquina de acuerdo a la ecuación (26).

$$f_{aspas} = \frac{N^{\circ} Aspas RPM_{Ventilador}}{60} [31] \quad (26)$$

donde

$N^{\circ} Aspas$ Es el número de aspas

$RPM_{Ventilador}$ Es la velocidad de funcionamiento del ventilador.

En la frecuencia fundamental el sistema emitirá un mayor nivel de presión sonora y a partir de ésta aparecerán sus correspondientes armónicos con niveles significativos en el espectro. Para este tipo de fuentes es necesario conocer su potencia acústica ya que es una característica propia del elemento y determina su importancia en la emisión de ruido. El cálculo del nivel de potencia acústica puede determinado mediante la ecuación (27) que corresponde a la expresión de Madison-Graham [32].

$$L_w = 25 + 10 \log_{10} Q + 20 \log_{10} P [32] \quad (27)$$

donde

Q Es el caudal de aire.

P Es la presión estática.

b. Unidades interiores

El ruido aéreo generado por una maquina en el interior de un recinto puede ser transmitido a otros recintos del edificio, por lo que el ruido que produzca ésta debe ser considerado en el aislamiento. El nivel de presión sonora en cualquier punto del recinto está en función de la absorción del mismo, la directividad de la fuente y la distancia de esta al punto. Esta cantidad es calculada por la ecuación (28).

$$L_P = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{\emptyset}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad [32] \quad (28)$$

donde

L_P Es el nivel de presión sonora a una distancia “ r ” de la fuente.

r Es la distancia de la fuente al punto.

\emptyset Es la directividad de la fuente.

A Es el área absorbente de la sala.

c. Unidades Exteriores

El sonido producido por las maquinas ubicadas en el exterior puede recorrer distancias más grandes debido a que no hay un obstáculo físico en su propagación. Debido a esto, el nivel de presión sonora está directamente relacionado con la directividad de la fuente e inversamente relacionado con la distancia al punto. El cálculo del nivel de presión sonora en un punto por parte de una maquina exterior está dado por la ecuación (29).

$$L_P = L_w + 10 \log_{10} \left(\frac{\emptyset}{4\pi r^2} \right) \quad [32] \quad (29)$$

d. Conductos

En general los materiales usados para los conductos de este tipo de sistemas poseen altos coeficientes de reflexión. Este hecho presenta un problema grande en la insonorización total del sistema ya que el campo sonoro incrementa su nivel teniendo como resultado en muchos casos el de la situación de ruido presente en el recinto. Las fuentes de ruido asociadas al conducto son: El ruido generado por tramos rectos, bifurcaciones y figuras, y rejillas y difusores [30].

Los conductos con tramos rectos emiten sonido en función de la velocidad del flujo de aire que circula dentro de ellos y su área de sección transversal. Para conductos metálicos el nivel de potencia acústica generado está expresado en la ecuación (30).

$$L_w = 50 \log_{10} V + 10 \log_{10} S + 7 \quad [31] \quad (30)$$

donde

V Es la velocidad del fluido.

S Es el área de sección transversal del conducto.

Para poder expresar este parámetro en función de la frecuencia deben emplearse correcciones por bandas de octava mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Correcciones por bandas de octava para el nivel de potencia acústica de un conducto metálico de tramo recto. Tomado de [31]

F[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Corrección [dB]	-4	-6	-8	-13	-18	-23

e. Rejillas y difusores

Estos elementos representan una fuente de ruido debido importante debido a las turbulencias causadas por la salida del flujo de aire. Las estrategias usadas para controlar estos ruidos son presentadas en la **sección 4.4.2**.

4.4.2 Estrategias para insonorización de instalaciones de climatización

Las medidas utilizadas para el control de ruido de sistemas de climatización buscan obtener una reducción sonora alta, por lo que se deben controlar las variables que determinan la potencia acústica del sistema en sus diferentes componentes. Las estrategias se dividen en cuatro partes: absorción sonora, cambios de dirección, derivación y silenciadores. A continuación se presentan las medidas más relevantes.

a. Absorción sonora

La atenuación proporcionada por un conducto con tramo recto está en función del coeficiente de absorción del material de las paredes. La pérdida por transmisión TL puede ser calculada a partir de la ecuación (31).

$$TL = 1.05 \alpha^{1.4} \frac{Pe}{S} l \quad [31] \quad (31)$$

donde

α Es el coeficiente de absorción del material de las paredes del conducto.

P_e Es el perímetro interno del conducto.

l Es la longitud del conducto recto.

Agregar a las paredes materiales porosos con coeficientes de absorción altos en las frecuencias de interés representa un efecto notable en la atenuación sonora, ya que este disminuye las reflexiones dentro del canal, disminuyendo el nivel de presión sonora y en muchos casos vibración de las paredes. A menudo a los dispositivos utilizados para obtener reducción de la energía sonora en ductos por medios disipativos se les conoce como silenciadores disipativos.

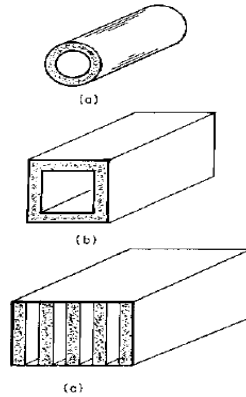


Figura 13. Configuraciones de silenciadores disipativos. (a) Sección transversal circular. (b) sección transversal rectangular. (c) tipo splitter. Tomada de [4].

b. Cambios de dirección

Son usualmente usados para tener una mayor pérdida por transmisión, cuya respuesta está en función de la frecuencia. Estos cambios se hacen mediante “codos” prefiriendo estos sobre cambios de dirección abruptos. En la Figura 14 puede observarse el esquema típico para esta estrategia.

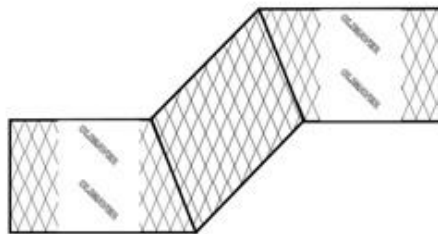


Figura 14. Esquema de cambio de dirección tipo “codo” en un ducto. Tomada de [31]

En la puede Figura 15 observarse la pérdida por inserción un elemento tipo codo en función de la frecuencia sus dimensiones y características geométricas [31].

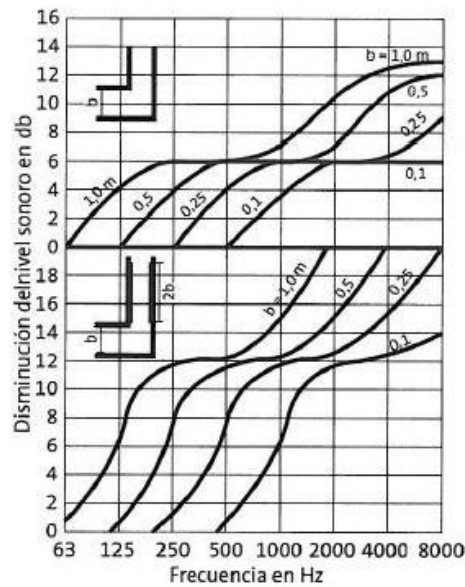


Figura 15. Pérdida por inserción de un cambio de dirección tipo “codo”. Tomada de [31].

c. Derivación

Otra manera de atenuar la energía sonora dentro de un ducto es la derivación de una sección principal en varias secciones como se observa en la Figura 16. La atenuación lograda por la utilización de la derivación de secciones en un ducto está en función de la suma total de las áreas de salida y obedece a la ecuación (32).

$$TL = 10 \log_{10} \left(\frac{S_i}{S_t} \right) [31] \quad (32)$$

donde

S_i representa la sección de entrada.

S_t representa la suma de las secciones de salida.

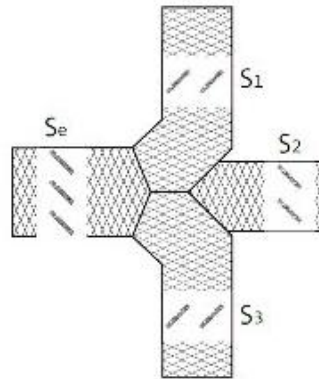


Figura 16. Derivación de un ducto en varias secciones. Tomada de [33]

d. Silenciadores

Son dispositivos hechos para atenuar el ruido dentro de un ducto. Se basa la provocación de reflexiones a partir de cambios de impedancia grandes logrados por un cambio de sección transversal. Este elemento tiene la particularidad de funcionar muy bien a frecuencias bajas a diferencia del silenciador disipativo cuya respuesta es más eficiente a media y alta frecuencia. La pérdida por transmisión para estos elementos está en función de la relación entre la sección transversal de entrada y de salida. La ecuación (33) presenta la pérdida por transmisión un silenciador.

$$TL = 10\log_{10} \frac{(m_s+1)^2}{4m_2} [31] \quad (33)$$

donde

m_s es la relación entre la sección trasversal de entrada s_1 y salida s_2 .

Para obtener un aislamiento más efectivo se utilizan las cámaras de expansión, que son elementos con varios cambios sucesivos de sección transversal. Estas tienen un mayor efecto al someter la onda sonora a varios y grandes cambios de impedancia. En la Figura 17 se presenta un diagrama general de la cámara de expansión.

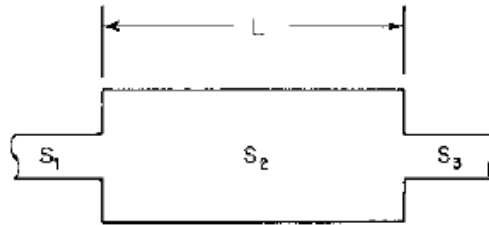


Figura 17. Diagrama cámara de expansión. Tomada de [4].

Se utiliza usualmente una configuración donde las áreas de sección transversal s_1 y s_3 son iguales. Para este caso la pérdida por transmisión está de acuerdo con la ecuación (34).

$$TL = 10 \log \left[1 + 0.25 \left(m_s - \frac{1}{m_s} \right)^2 \sin^2 kL \right] \quad [3] \quad (34)$$

donde

k Es el correspondiente número de onda.

L Es la longitud de la cámara.

4.4.2.1 Recomendaciones:

- Para aplicaciones en media y alta frecuencia utilizar el silenciador disipativo cuyo material absorbente podrá controlar de manera efectiva el rango para el que esté diseñado.
- Para problemas con frecuencias bajas utilizar el silenciador de cambio de sección.
- Se puede realizar combinaciones de silenciadores con derivación de sección transversal. Esto ayuda de manera importante al aislamiento.
- Las unidades exteriores deben ubicarse en lo posible en lugares donde no haya posibles afectados por el ruido.

5 SISTEMAS DE REFUERZO SONORO

El refuerzo sonoro consiste en la utilización de elementos electroacústicos para la reproducción de sonido en una determinada área de audiencia. Los objetivos particulares de este tipo de sistemas son: la obtención de un nivel de presión sonora en un área objetivo, la fidelidad de la señal reproducida, la obtención de una alta inteligibilidad, y un cubrimiento acústico uniforme [34]. Para lograr estos objetivos, se deben tener en cuenta varias consideraciones técnicas relacionadas con el funcionamiento de los dispositivos que componen el sistema y su acople. A continuación se presentan los elementos y configuraciones de sistemas de refuerzo sonoro, enfocados a la reproducción y control de sonido para establecimientos comerciales.

5.1 Cadena Electroacústica

Es el sistema conformado por todos los elementos electrónicos que tienen como fin la captura, manipulación y posterior emisión de sonido. Estos elementos pueden ser clasificados de acuerdo a la función que cumplen en la cadena como: transductores, elementos generadores de señal y procesadores de señal. En la Figura 18 se pueden observar los elementos y flujo de señal dentro de la cadena electroacústica.

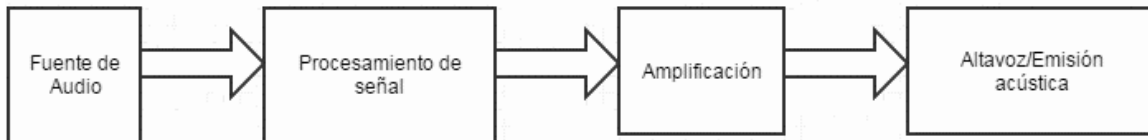


Figura 18. Flujo de señal en la cadena electroacústica.

5.1.1 Equipos

5.1.1.1 Transductores

Son dispositivos que convierten una señal de un tipo de energía en otro. En la cadena electroacústica existen transductores de salida (altavoces) y de entrada (micrófonos).

a) Micrófono

Es el primer elemento de la cadena electroacústica y es el encargado de convertir la energía acústica en señal de audio. En general hay 4 características que deben ser tenidas en cuenta para la selección de un micrófono [35], estas son:

- **Principio Operativo**

Esta característica se refiere al a la manera en que el dispositivo transduce, esto determinará algunas propiedades del micrófono como son la necesidad de alimentación externa y la resistencia a cambios de temperatura. Los dos tipos de transductores más comunes encontrados en los micrófonos son los **dinámicos** y de **condensador**.

La **transducción dinámica** consiste en un sistema conformado por un diafragma, una bobina móvil y un imán. Los micrófonos dinámicos generan energía eléctrica a partir de inducción electromagnética. La energía acústica incidente causa el movimiento del diafragma, haciendo vibrar una bobina adherida a este, dicha bobina está sujeta a un campo magnético cuyo movimiento genera una señal eléctrica equivalente a señal acústica. En la Figura 19 se pueden observar los elementos implícitos en un micrófono dinámico.

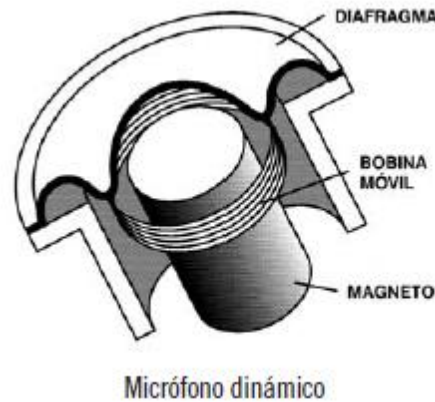


Figura 19. Elementos de un micrófono dinámico. Tomada de [35]

En la práctica estos micrófonos tienen la característica de ser muy robustos y poco sensibles al manejo, por lo que son altamente utilizados para aplicaciones de sonorización en vivo. Por otra parte se debe tener en cuenta que su respuesta en frecuencia no es lineal, por lo que se debe evaluar su utilización en aplicaciones que necesiten una alta fidelidad.

La **transducción capacitiva** consiste en un sistema conformado por un diafragma y una placa posterior cuyo montaje está eléctricamente cargado [35]. Los micrófonos de condensador generan señal eléctrica a partir de las variaciones del campo eléctrico existente entre el diafragma y la placa. Dicha variación es debida a que el movimiento del diafragma causado por la incidencia de energía acústica, cambia la distancia entre las dos placas, variando por consecuencia el campo magnético. En la Figura 20 se pueden observar los elementos de un micrófono de condensador.



Figura 20. Elementos de un micrófono de condensador. Tomada de [35].

Una de las características principales de este tipo de micrófonos es la necesidad de alimentación externa. Esto puede representar una limitación para algunas aplicaciones prácticas. Por otro lado tienen una alta sensibilidad en comparación con los micrófonos de dinámicos.

- **Respuesta en Frecuencia**

Es la medida del nivel de salida de un dispositivo de audio para cada frecuencia. Esta respuesta es visualizada por medio de una curva de nivel contra frecuencia que mostrará la alteración que sufrirá la señal al pasar por el sistema. Para cuantificar el cambio que tiene la curva se tiene el indicador de Tolerancia, que enseña la variación máxima de amplitud que presenta el elemento en función de la frecuencia [36]. En la Figura 21 se puede observar un plano o curva de respuesta en frecuencia de un micrófono.

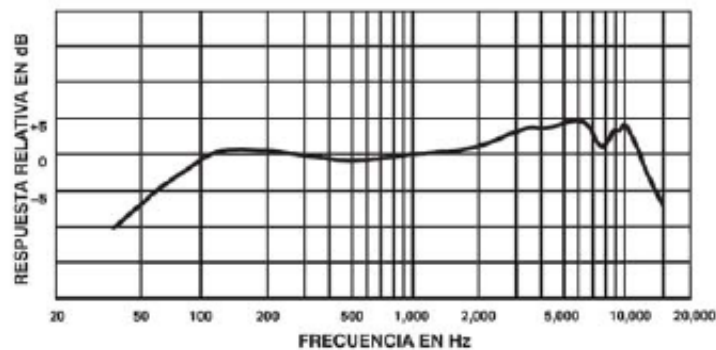


Figura 21. Curva de frecuencia de un micrófono. Tomada de [35].

- **Direccionalidad**

Los micrófonos no siempre presentan igual nivel de salida para todos los ángulos de incidencia de sonido, para cuantificar esto se tiene el término de **sensibilidad**, que corresponde al nivel de salida eléctrica ante una presión sonora dada. Para visualizar la sensibilidad de un micrófono se tienen los patrones polares, que representan su respuesta para todos los posibles ángulos de incidencia, y definen la direccionalidad del micrófono. Los dos tipos de patrones más comunes en los micrófonos son los **omnidireccionales** y **direccionales**.

Un micrófono tiene patrón **omnidireccional** cuando es igualmente sensible para todos los ángulos de incidencia. En la Figura 22 se presenta el patrón polar de un micrófono omnidireccional.

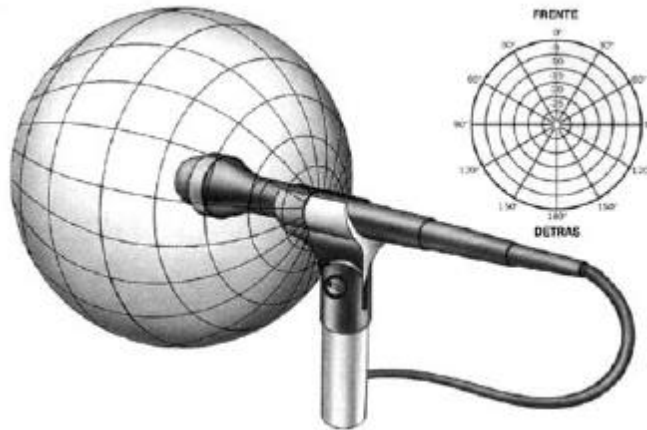


Figura 22. Micrófono con patrón polar omnidireccional. Tomada de [35].

Se tiene un patrón direccional cuando el micrófono es más sensible al sonido en ángulos específicos, en general al frente. Existen varios tipos de micrófonos unidireccionales que se diferencian entre ellos por la sensibilidad que tienen en los ángulos laterales. El más común entre ellos es el patrón polar **cardioide** cuya máxima sensibilidad se presenta a los cero grados y cuyo patrón puede observarse en la Figura 23.

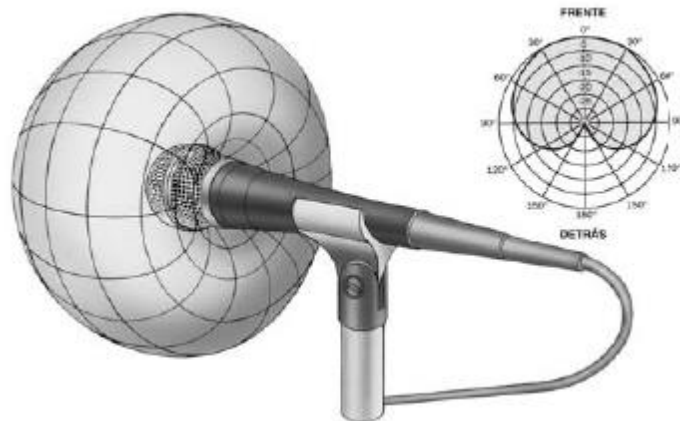


Figura 23. Micrófono con patrón polar cardioide. Tomada de [35].

- **Salida eléctrica**

La salida eléctrica del micrófono estará determinada por su sensibilidad, impedancia de salida y configuración [35]. La **sensibilidad** definida en la presente sección, podrá determinar factores como la ubicación del micrófono con respecto a la fuente y la distancia hacia ella; la impedancia

eléctrica determinará la longitud del cable que puede ser usada sin tener pérdidas considerables en su respuesta a alta frecuencia.

Los micrófonos con impedancia de salida mayores a $10Kohms$ se consideran de alta impedancia y no debe utilizarse con ellos cables de más de 6.1 metros, mientras que los transductores con impedancia de salida de máximo $600ohms$ se consideran de baja impedancia y pueden usarse con ellos cables de hasta 305 metros [37]; La configuración de salida presenta el tipo de cable con el que se podrá transportar la señal del micrófono. Este tema será tratado con más profundidad en la **sección 5.3**.

b) Altavoces:

Es el último elemento de la cadena electroacústica y es el encargado de convertir la señal de audio en energía acústica. Estos dispositivos están constituidos por cuatro partes fundamentales, las cuales son una bobina móvil, un imán, un cono y una estructura de soporte. En la Figura 24 se puede observar la ubicación de cada una de las partes que componen un altavoz.

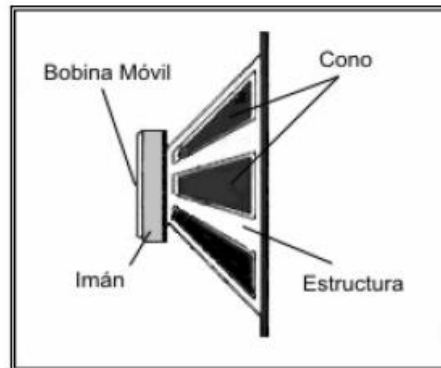


Figura 24. Partes de un altavoz. Tomada de [38].

El principio de funcionamiento de estos dispositivos es dinámico (ver **sección 5.1.1.1a**), en donde la bobina está conectada a un amplificador de potencia (ver **Figura 31**), recibiendo de este la señal de audio; el campo magnético al que está inmerso la bobina la hará vibrar en función de la señal de audio, arrastrando con ella el cono. El movimiento del cono causa compresiones y descompresiones de aire en sus dos caras, provocando la emisión de ondas sonoras.

En general, los altavoces tienen algunas de las características vistas en los micrófonos como son: **respuesta en frecuencia** y **sensibilidad** (Ver **sección 5.1.1.1a**). Pero además de esto existen otros factores que deben ser tenidos en cuenta para su selección y aplicación. Dichos factores son:

- **Impedancia de entrada:** que definirá la oposición al paso de potencia proveniente del amplificador y por lo tanto fijará las condiciones de la etapa de potencia (este parámetro

es importante para la configuración del sistema, tema que está expuesto en la **sección 5.2**);

- **Eficiencia:** definida como la relación entre la potencia acústica de salida y la potencia eléctrica de entrada. Este parámetro no es usualmente usado para el diseño de sistemas de sonido ya que no está directamente relacionado con el nivel de presión sonora radiado, en cambio sí es comúnmente usado para hacer comparaciones entre parlantes ya que representa una medida de como distribuye la potencia el dispositivo [39];
- **Directividad:** definida en la **sección 2.18**, que presenta la manera en la que radia energía el altavoz, este parámetro es relevante a la hora de realizar diseños acústicos para sonorización en zonas específicas. Todos estos factores están en función de la frecuencia, por lo tanto deben ser entendidos como una respuesta del parlante más que como un número, aunque en muchos casos se presenta solo un valor, el fabricante debe presentar las condiciones en las que se obtuvo dicho número [39]. En la Figura 25 se puede observar el diagrama polar que representa la directividad en un parlante.

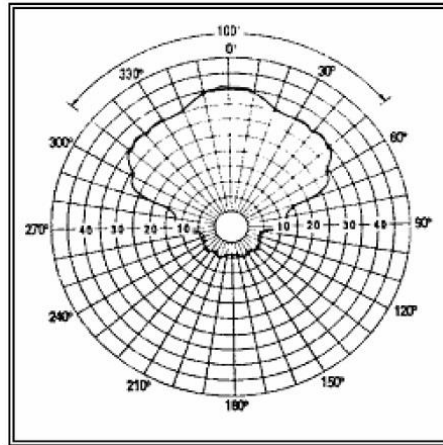


Figura 25. Representación de la directividad de un altavoz. Tomada de [38].

- **Distorsión** Se define distorsión como la alteración de la señal al pasar por un dispositivo de audio. En los altavoces es común la distorsión armónica, la cual agrega señales armónicas a la señal de entrada derivando en información indeseada para el audio. La distorsión armónica se cuantifica por medio del parámetro llamado *distorsión armónica total*, el cual representa la relación entre el valor eficaz de las componentes armónicas y el valor eficaz de la componente fundamental. Este se expresa como un porcentaje de distorsión. Se recomiendan valores de distorsión armónica total menores al 0.1% en función de tener una calidad de audio óptima. Estas señales pueden ser representadas por curvas de armónicos separadas como se presenta en la Figura 26.

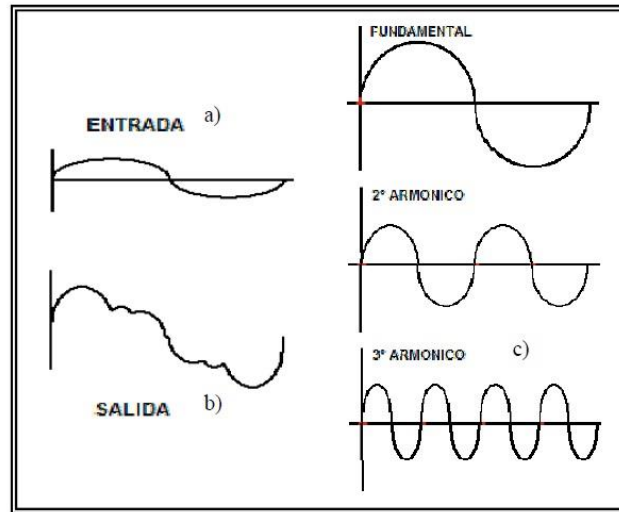


Figura 26. a) Señal de entrada. b) Señal de salida distorsionada. c) señal fundamental y su segundo y tercer armónico. Tomada de [38].



Figura 27. Altavoz de dos vías. Tomada de [40].

• Clasificación de altavoces

Los altavoces pueden clasificarse según el rango de frecuencias para el cual están hechos. Las frecuencias bajas exigen unas características físicas diferentes a las frecuencias altas para tener una radiación eficiente. A continuación se expondrán los tipos de altavoces según su clasificación.

I. Altavoces para reproducción de frecuencias bajas (Woofer)

Este tipo de altavoces tienen dimensiones grandes (alrededor de 12") en función de que el cono pueda vibrar eficientemente ante ondas sonoras con longitudes de onda grandes. En la Figura 28 se observa un altavoz para la reproducción de frecuencias bajas.

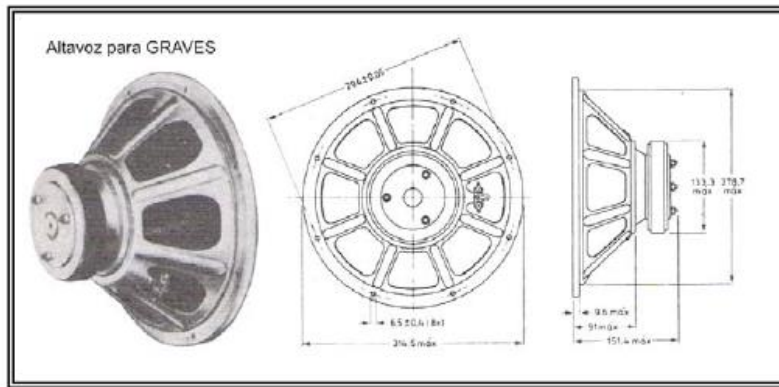


Figura 28. Altavoz para reproducción de frecuencias bajas. Tomada de [38].

II. Altavoces para reproducción de frecuencias medias (Midrange)

Son altavoces con dimensiones de entre 5 y 10 pulgadas. Este tipo de parlantes trabaja entre el corte en frecuencia superior del woofer y el corte inferior del tweeter, por lo que su rango de frecuencias de trabajo puede variar en función del sistema general. En la Figura 29 se puede observar un altavoz para la reproducción de frecuencias medias.

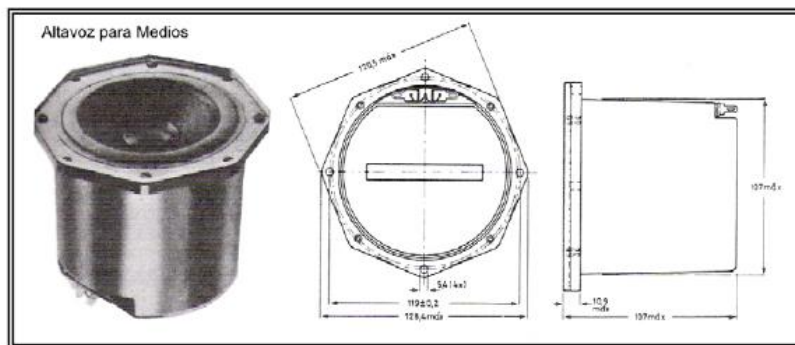


Figura 29. Altavoz para reproducción de frecuencias medias. Tomada de [38].

III. Altavoces para reproducción de frecuencias altas (Tweeter)

Debido a que la longitud de onda de las frecuencias altas es menor a la de las frecuencias bajas, conos con dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda proporcionarán una radiación ineficiente, debido a que a la onda le será difícil vencer la inercia del diafragma. En general estos parlantes tienen dimensiones menores a las 5 pulgadas y en algunos casos tienen forma de bocina. En la Figura 30 se observa un altavoz para reproducción de frecuencias altas.

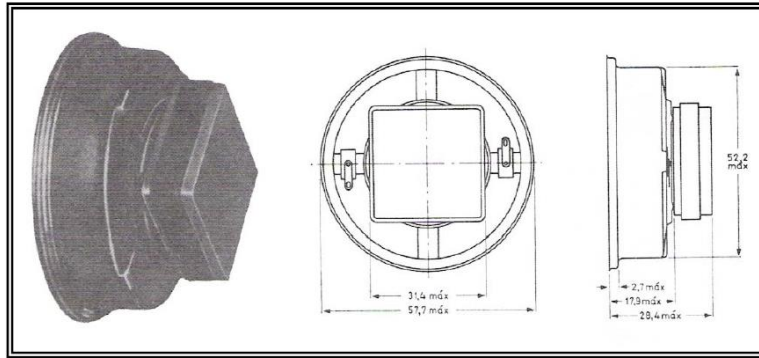


Figura 30. Altavoz para reproducción de frecuencias altas. Tomada de [38].

Se debe tener en cuenta que los parlantes serán una de las principales fuentes sonoras en establecimientos comerciales y que la insonorización de un recinto debe empezar por controlar su propagación.

5.1.1.2 Recomendaciones para uso de transductores en función de la insonorización de un recinto

- Preferir altavoces direccionales con la intención de radiar sonido directo solo a las áreas de interés.
- Buscar micrófonos direccionales que atenúen sonido de incidencia lateral no deseado.
- Buscar transductores con una respuesta en frecuencia enfocada a la aplicación deseada (Palabra hablada, música de ambiente, refuerzo sonoro de bandas en vivo, etc.).

5.1.1.3 Procesadores de señal

Son todos los elementos que modifican la señal de audio en alguna de sus características, estas pueden ser amplitud, frecuencia y rango dinámico. Los dispositivos procesadores más comunes para establecimientos comerciales son:

a) Consola/mesa de mezcla:

Es el dispositivo electrónico encargado de recibir y mezclar las señales provenientes de los elementos emisores de audio y micrófonos para obtener señales de salida. En la consola se le realizan varios procesos a la señal como son la pre-amplificación (amplificación de la señal a nivel de línea), ecualización y panorámica. Por lo general estos dispositivos permiten hacer más de una mezcla, lo que posibilita aplicaciones tales como el monitoreo de artistas y sonorización por zonas.

b) Ecualizador:

Es un dispositivo utilizado para corregir las deficiencias de la respuesta en frecuencia de los sistemas de refuerzo sonoro. Existen varios tipos de ecualizadores en función de necesidades particulares. Los ecualizadores más comunes son: Shelving (vistos en dispositivos como consolas de mezclas) que atenúan o realzan frecuencias bajas y altas pero con la desventaja de trabajar con frecuencias por encima y debajo del rango audible, causando pérdidas de potencia

y grandes exigencias a los altavoces; paramétricos (vistos en aplicaciones de audio digital) que con base en una frecuencia central y modificando los parámetros de ancho de banda y ganancia realizan la ecualización; y gráficos (más comunes en aplicaciones profesionales) que utilizan filtros por bandas de frecuencia para realizar el realce o atenuación.

c) **Limitadores acústicos**

Es un dispositivo diseñado para controlar el nivel de presión sonora generado por los equipos reproductores de sonido en locales comerciales, asegurando así que estos cumplan con las normativas locales de ruido de emisión [41].

- **Como funcionan**

Se define a la limitación acústica como la atenuación del nivel de salida de un sistema cuando la señal que pasa por este sobrepasa un nivel límite establecido [42]. Estos realizan una comparación entre un nivel de referencia y el nivel del sistema o de la sala para empezar a limitar; para aplicaciones en establecimientos comerciales donde el nivel de música tiende a ser más alto que el ruido de fondo (ruido producido por las personas, dispositivos con ruidos eléctricos, apertura de puertas y ventanas, entre otros), los limitadores utilizan micrófonos como sensores de nivel, de cuyos registros basará su funcionamiento. En función de cuidar la calidad del audio los limitadores manejan un control de ganancia encargado de dar un nivel máximo al sistema en general, esto se hace para evitar que el dispositivo tenga que limitar demasiado el nivel de la señal.

El limitador debe estar ubicado justo antes de la etapa de potencia en la cadena electroacústica (ver **sección 5.1.2**). Generalmente, a la señal captada por el micrófono se le aplica ponderación A, (debido a que la normativa nacional establece los niveles máximos de ruido con esta ponderación), aunque es posible su modificación [43]. Otra función importante que tienen estos dispositivos es la incorporación de módulos de registro donde se almacenan datos de niveles registrados por intervalos de tiempo, esto posibilita la gestión de la información para realizar informes de control [44].

- **Especificaciones técnicas**

Las características más generales a tener en cuenta en estos dispositivos son:

I. Clase:

Hace referencia a la precisión de la instrumentación usada. Usualmente se utiliza clase 2 cuya precisión corresponde a mediciones de campo.

II. Características de entrada:

Hace referencia al tipo de entrada, Impedancia y nivel máximo.

III. Características de salida

Hace referencia al tipo de salida e Impedancia.

IV. Distorsión armónica

Presenta un valor en porcentaje la distorsión agregada a la señal al pasar por el sistema. Cuanto menor sea esta, se tiene una mayor calidad. Se recomiendan valores no más altos al 0,1%.

V. Respuesta en frecuencia

Presenta el rango útil y nivel en la salida del dispositivo para las diferentes frecuencias (ver sección 5.1.1.1).

VI. Relación señal a ruido

Es la diferencia de nivel entre el ruido (eléctrico o propio del sistema) y la señal. Mientras mayor sea esta relación mayor será la calidad del dispositivo.

VII. Atenuación Manual

Es la atenuación en dB proporcionada por el limitador, usualmente se trabaja un rango de 0 a 50dB.

5.1.1.4 Ventajas y desventajas de los limitadores como medida de control de ruido

a) Ventajas:

- Son una medida complementaria al aislamiento acústico en función de cumplir con las normativas locales.
- No daña la calidad del audio si se hace una correcta configuración.
- Tiene la posibilidad de monitoreo constante.

b) Desventajas:

- Su correcto funcionamiento está limitado por la posición donde se pongan los micrófonos.
- Mientras menos micrófonos se tengan, menor será la representación del nivel en el recinto.
- En algunos casos puede modificar la respuesta en frecuencia de la señal, ecualizándola indeseadamente.
- Puede producir daños en equipos de la cadena producto del exceso de limitación de la señal.

d) Amplificador de Potencia

Es el elemento encargado de llevar la señal de nivel de línea a nivel de potencia para ser entregada al altavoz. Estos elementos deben tener la potencia suficiente para alimentar la cantidad de parlantes a los que esté sujeto, para esto se debe tener en cuenta el tipo de configuración que se realice (ver **sección 5.2**), y la impedancia de salida de este, ya que el acople entre la impedancia de salida del amplificador y la impedancia de entrada del parlante o el sistema de altavoces determinará que tanto se aproveche la potencia del mismo.

5.1.2 Configuración de la Cadena Electroacústica

El flujo de la cadena electroacústica está en función de las etapas de nivel de la señal y los procesos realizados a esta. El flujo adecuado para trabajar en establecimientos comerciales se presenta en la Figura 31.



Figura 31. Configuración de una cadena electroacústica básica. Adaptada de [41].

5.2 Sistemas de Distribución de Potencia Centralizados y Descentralizados

La forma en la que se distribuye la potencia en el sistema tiene un efecto directo sobre la calidad de audio del mismo y el tipo de dispositivos que se podrán usar. Las dos formas de distribución de potencia son: **centralizados** y **descentralizados**.

5.2.1 Sistemas de potencia centralizada

Es la configuración más utilizada en establecimientos de comercio y entretenimiento. Este tipo de sistemas permite la utilización de varios parlantes distribuidos a diferentes “zonas”, posibilitando el control independiente de áreas y el cubrimiento homogéneo de las mismas. Su principio consiste en la utilización de cables largos con tensiones del rango de 70.7 a 100 voltios [45], evitando pérdidas de potencia; para esto se utilizan transformadores tanto en la salida del amplificador como en la entrada de los altavoces.

5.2.1.1 Ventajas y desventajas como sistema de distribución de potencia

a) Ventajas:

- Permite la sonorización de varias zonas de control independiente y de varios altavoces con un solo amplificador.

b) Desventajas

- La respuesta en frecuencia está limitada por efecto de los transformadores involucrados.

- El daño del amplificador afecta a todo el sistema.

5.2.2 Sistemas de potencia descentralizada

Se utiliza para reproducción de audio con alta calidad. Se basa en la utilización de un amplificador para cada zona de sonorización. Entre sus características está la utilización de amplificadores con potencia más reducida en relación a los de potencia centralizada.

5.2.2.1 Ventajas y desventajas como sistema de distribución de potencia

a) Ventajas:

- Permiten la reproducción de audio de alta calidad.
- El daño de un amplificador solo afecta algunos altavoces.

b) Desventajas

- Implican más costos en relación con la potencia centralizada.
- Los amplificadores deben estar cerca de los altavoces.

5.3 Cableado

Los cables son los elementos encargados de transportar la señal de audio de un dispositivo a otro. Están compuestos de conductores trenzados hechos en general por aleaciones de cobre y bronce. A razón de proteger la señal de ruidos electroestáticos se utilizan blindajes envueltos o enmallados y materiales dieléctricos que ayudan a mejorar condiciones a las que están expuestos los conductores.

En audio existen dos tipos de conexiones para transporte de la señal que son la conexión **balanceada** y **no balanceada**.

5.3.1 Conexiones balanceadas

La línea balanceada lleva la señal dos veces, una con polaridad invertida. Estas conexiones se realizan en cables con tres conductores y conectores de tres pines para la señal, la señal invertida y tierra. Su función es la de atenuar las interferencias electro-magnéticas inducidas en los cables. Los tipos de conectores más usados para este tipo de conexión son los XLR y TRS.

En muchas ocasiones es erróneamente utilizado el término “cable estéreo” o “conector estéreo” para nombrar este tipo de configuraciones; en realidad lo que se tiene en esta distribución son conectores con tres conexiones.

5.3.2 Conexiones no balanceadas

Las líneas no balanceadas solo llevan una señal que se transporta en cables de dos conductores, y conectores con pines para la señal y la tierra. Estas conexiones son sensibles a interferencias electro-magnéticas y son usados para instrumentos musicales y dispositivos de audio no profesional. Los conectores más comunes para estas conexiones son TS y RCA.

5.3.3 Conectores

a) XLR

Es el conector más usado para aplicaciones de audio profesional, ya que puede ser utilizado para transportar señales balanceadas que se traduce en menos ruido. Está compuesto por tres pines cuya distribución puede observarse en la Figura 32.



Figura 32. Conector XLR, Hembra/Macho. Tomada de [46].

b) TS

Son conectores usados para conexiones no balanceadas, estos llevan en su parte superior (Tip) la señal y en su parte inferior (Sleeve) la tierra. Son comúnmente usados para conexión de instrumentos musicales.



Figura 33. Conector TS. Tomada de [46].

c) TRS

Se usa para conexiones balanceadas, tiene una sección más en comparación con el conector TS llamada “ring”, que es la encargada de llevar la señal invertida.



Figura 34. Conector TRS. Tomada de [46].

d) RCA

Conector usado para conexiones no balanceadas, en aplicaciones de audio se encuentran de varios colores que determinan su empleo.



Figura 35. Conector RCA. Tomada de [46].

e) Adaptadores

Son dispositivos que permiten cambiar de un tipo de conector a otro.



Figura 36. Adaptador. Tomada de [46].

6 DISTRIBUCIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS DE SONIDO PARA EL CONTROL DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA EN LOCALES COMERCIALES CON MÚSICA AMPLIFICADA

En general, los locales comerciales tales como bares, clubes y discotecas están sujetos a altos niveles de ruido. Una de las razones para que esto pase, es que, para los clientes de estos establecimientos es usualmente atractivo altos niveles de música. Por lo tanto las medidas de control deben estar enfocadas al cumplimiento de las normativas de emisión particulares, y el cuidado de la salud de las personas dentro del lugar; para el control de la emisión de música por parte de locales de uso comercial deben realizarse diseños acústicos previos a la construcción del recinto, o de control en caso de estar ya construido. Esto se hace teniendo en cuenta las variables que determinarán su comportamiento acústico como la distribución del local, la distribución del sistema de altavoces, y la existencia de actuaciones en vivo, que son temas que deben ser evaluados en pro de realizar un diseño de insonorización adecuado. A continuación se presentan recomendaciones de control de ruido enfocadas a la insonorización de locales comerciales que cuenten con música amplificada.

6.1 Distribución del local

Para realizar diseños de control sobre recintos se debe tener muy en cuenta su distribución, ya que la disposición de las paredes y superficies determinarán el comportamiento de las reflexiones dentro de la sala. Las variables a tener en cuenta a favor de la distribución del local se presentan a continuación:

6.1.1 Separación física

Es importante, de ser posible, distribuir el recinto por zonas de uso, con el fin de darle prioridad en el nivel a la audiencia que lo requiera, y disminuirlo en los sectores donde se considere ruido.

Un ejemplo de esto podría ser el caso de un club. En este debería existir una zona destinada a la pista de baile, cuya localización en el recinto debería estar alejada o separada de la barra, donde los niveles de ruido deben ser mucho menores. Esto en función de tener un menor nivel de presión sonora total dentro del recinto, y un mayor confort acústico por parte de los usuarios.

6.1.2 Superficies

Se debe realizar una evaluación del efecto que tiene o tendrá cada una de las superficies del recinto en el campo acústico total de la sala. Variables tales como la absorción y pérdida por transmisión sonora de los elementos deben ser tenidas en cuenta para los diseños, en fin de realizar intervenciones efectivas. Las estrategias para insonorización de los elementos que componen un recinto se especifican en la **sección 4** del presente documento, estas de manera preferencial deberían diseñarse antes de la construcción con el objetivo de tener un mayor control sobre la acústica del local.

6.1.3 Concentración de la música

En recintos donde no sea posible la separación por zonas debe procurarse la utilización de parlantes direccionales que radien el nivel de presión sonora a las áreas de interés (ver **sección 5.1.1.1b**)), esto reducirá el nivel de la música en zonas de destinadas actividades alternas (barras, cajas de pago, lobbies sin separación física, etc.). Este recurso debe ser aplicado en el diseño acústico de recintos, junto con la distribución de los altavoces, cuya temática será tratada de forma más específica en la **sección 6.2**.

6.2 Distribución del sistema de altavoces

En general para los locales comerciales se busca una distribución homogénea del nivel de presión sonora en función de las áreas a sonorizar. Para esto se debe tener en cuenta que el nivel producido por un parlante hasta un oyente cambiará en función de la distancia entre ellos y el tiempo de reverberación del lugar. Para obtener un nivel adecuado en el oyente, es recomendable que el eje del altavoz esté en dirección a este y que la distancia que los separa no sea muy grande. Dicho esto y en función de cumplir con los requerimientos acústicos de cada lugar, se debe tener en cuenta el tipo de distribución de altavoces a utilizar.

En locales comerciales donde se requiere niveles de presión sonora en zonas específicas, se debe optar por un sistema de altavoces **distribuido**, que consiste en ubicar parlantes dispersos alrededor del área a sonorizar, esto proporciona un campo acústico homogéneo debido a la acción de todos los altavoces en conjunto, además de esto tiene la ventaja de no requerir la emisión de altos niveles de presión sonora por parte de los parlantes ya que su distribución hace que no se pierda nivel en ningún punto de la zona. En la Figura 37 se observa la representación de un sistema de altavoces distribuido.

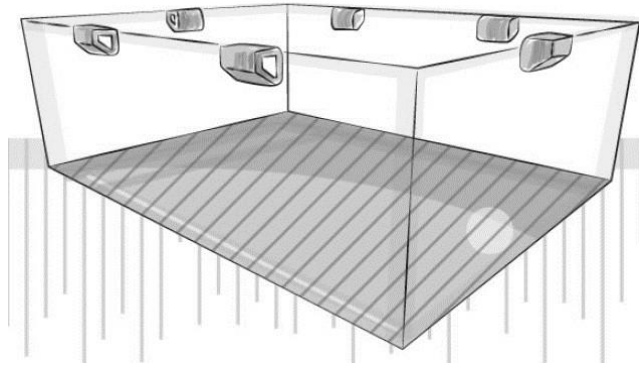


Figura 37. Representación de sistema de altavoces distribuido. Tomada de [47].

Por otra parte, el sistema de altavoces **centralizado** consiste en la focalización de un punto de emisión donde se encuentran los parlantes y de donde se radiará la energía sonora hacia el público, este tipo de sistema obliga al usuario a aumentar el nivel de los altavoces para llegar hasta los puntos más alejados, haciendo que las personas más cercanas estén expuestas a altos niveles de presión sonora. Este sistema no es recomendable para locales donde se reproduzca música de ambiente ya que no proporciona un nivel homogéneo. En la Figura 38 se observa la representación de un sistema de altavoces centralizado.

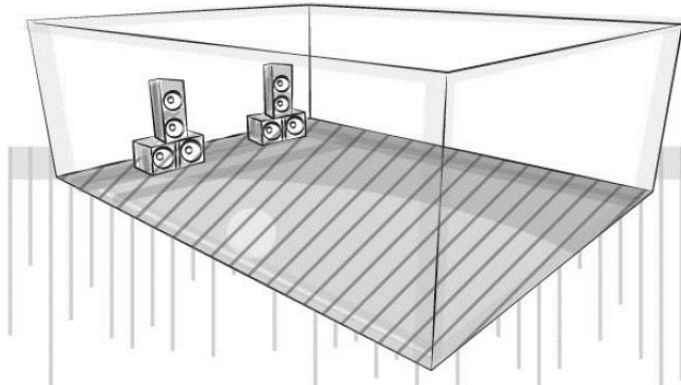


Figura 38. Representación de sistema de altavoces centralizado. Tomada de [47].

El posicionamiento de cada uno de los altavoces debe estar pensado, teniendo en cuenta su directividad, y paredes cercanas en función de evitar reflexiones indeseadas que aumenten el campo reverberante del recinto. Esto puede evitarse también con el posicionamiento de parlantes en el techo, ya que el sonido que radia este está direccionado solo a la audiencia de interés.

Debido a que los altavoces están unidos estructuralmente a las paredes del local, las vibraciones producidas por este pueden transmitirse mecánicamente a los elementos del lugar, y así causar ruido no solo en el recinto propio, si no, en recintos contiguos. Para evitar esto se deben usar elementos que ayuden al desacople estructural como los detallados en las metodologías para aislamiento por vía estructural en la **sección 4.3**.

En función de cuidar la calidad de la música reproducida se deben tener en cuenta los aspectos vistos en la **sección 5.1.1.1b)**. También, se debe tener en cuenta que el tiempo de reverberación propio de la sala influirá directamente sobre la percepción musical; altos tiempos de reverberación proporcionan pérdida de inteligibilidad en la música reproducida, esto es muchas veces confundido con falta de nivel, por lo que se tiende a subir los niveles de potencia a los dispositivos creando campos sonoros con altos niveles de presión sonora que no mejoran el problema. Para tratar este problema se recomienda realizar el diseño acústico del recinto, con la intención de seleccionar y ubicar correctamente materiales que ayuden a bajar los tiempos de reverberación. En la **sección 6.4** se presentan pasos para el diseño de sistemas de altavoces en función de las condiciones y propósitos particulares de cada establecimiento.

6.3 Actuaciones en vivo

En algunos locales es una constante la presentación de música en vivo, esto implica otras características que deben ser tenidas en cuenta en pro de disminuir los niveles de sonido transmitidos al exterior, sin alterar la calidad de la presentación. Uno de los factores relevantes será la ubicación de los músicos dentro del establecimiento; estos deben encontrarse ubicados cerca del área que se pretende sonorizar, con el fin de evitar la necesidad de altos niveles de potencia en los equipos de audio.

También es importante que los parlantes estén en posiciones elevadas para tener una mayor cobertura en función de su directividad. Es común que en establecimientos pequeños los músicos sean los que tengan el control del sistema de refuerzo sonoro, esto debe evitarse en función de que el establecimiento pueda asegurar en todo momento los niveles máximos a los que puede llegar. Otro de los problemas que se presenta a la hora de realizar la sonorización de actuaciones en vivo, es la incomodidad de los músicos debida a deficiencias en el monitoreo, ya que esta situación los obligan a subir el nivel de sus instrumentos aumentando el nivel de presión sonora en el recinto. Esto puede mejorarse proporcionando al músico un sistema de monitoreo individual como lo son los auriculares o **in-ears**, que además de suplir las necesidades propias de cada artista, no aporta ruido al recinto.

6.4 Pasos para el diseño de sistemas de altavoces en locales comerciales

Para la selección del sistema de reproducción más óptimo en función de las necesidades del establecimiento, se recomienda el siguiente procedimiento de evaluación:

6.4.1 Realizar un plano planta y de elevación del establecimiento

Con el fin de tener una visualización del local y el área en general, se deben realizar planos donde se presente:

- Las dimensiones del local.
- Las áreas de audiencia y áreas de menor cobertura.
- Sitios donde no se pueden instalar altavoces.

6.4.2 Estimar el volumen de la sala

Con las dimensiones de los planos de planta y de elevación realizados se debe calcular el volumen total del recinto. Se recomienda en caso de tener dimensiones irregulares el dividir el recinto en áreas rectangulares para simplificar el cálculo.

6.4.3 Estimar el tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación es un parámetro de gran relevancia en el diseño del sistema de sonido, ya que determina en gran parte el comportamiento de la energía acústica dentro de un recinto luego de ser excitado, este puede ser calculado por medio de la ecuación (4). Ya que este parámetro está en función de la frecuencia, se debe tener especial cuidado con los tiempos de reverberación de las bandas de 500Hz a 2000Hz debido a que es el rango donde se encuentra la mayor parte de la energía de la voz hablada [39]. Se debe tener en cuenta que lugares con tiempos de reverberación muy altos van a tener problemas para la implementación de sistemas de sonido y de preferencia deberían tratarse. En la Tabla 2 se presenta una referencia para la estimación del tiempo de reverberación.

Tabla 2. Referencia para la estimación del tiempo de reverberación. Adaptada de [39].

Tiempo de reverberación (Segundos)								
0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Seco			Moderadamente Reverberante			Reverberante		
Sala de Conferencias			Típico Auditorio			Coliseo		

Usualmente en establecimientos comerciales se desea tiempos de reverberación de alrededor de 1.5 segundos con la intención de mantener una buena inteligibilidad de la palabra [39], por lo tanto se recomienda tratar acústicamente a los recintos con valores altos en este parámetro. Es importante la asesoría de un consultor acústico en el proceso de estimación de parámetros acústicos.

6.4.4 Determinación del Nivel Máximo de Presión Sonora Continuo

Se debe hacer una determinación del nivel máximo de presión sonora continuo que se desea en el establecimiento. Esta determinación debe tener en cuenta parámetro como los niveles máximos permitidos por las normativas locales y el confort acústico de los usuarios en función del uso del local. Para esto se recomienda la Tabla 3 que ilustra la relación entre el nivel de presión sonora y el uso del establecimiento [39].

Tabla 3. Relación Nivel de Presión Sonora Dentro del Establecimiento y su Uso. Adaptada de [39].

Nivel de Presión Sonora (dB)							
75	80	85	90	95	100	105	110+
Moderadamente Fuerte		Fuerte		Muy Fuerte		Extremadamente Fuerte	
Refuerzo Típico Para Palabra Hablada		Música Para Entretener.		Club Nocturno		Concierto de Rock	

La medición del nivel de presión sonora continuo corresponde al nivel promedio medido por un sonómetro cuando el sistema está reproduciendo ruido rosa, y con operando en las condiciones de uso diseñadas.

6.4.5 Posición y Ángulo de Cobertura

La directividad de un parlante será determinante para su selección, con este parámetro se define como será el cubrimiento del área que se desea sonorizar y proporcionará información importante para la distribución y número de altavoces. Para el proceso de diseño se recomienda la utilización de los planos ya realizados y la información del Ángulo de cobertura de cada parlante (que debe ser proporcionada por el fabricante). Se debe poner los parlantes en una disposición tal que cubran el 80% del área que se desea sonorizar con una pérdida de no más de 3 dB. En la Figura 39 se presenta la representación gráfica de la cobertura de un altavoz, cuyo ángulo está definido por el decaimiento en 6 dB del nivel de presión sonora medido con respecto a su eje.

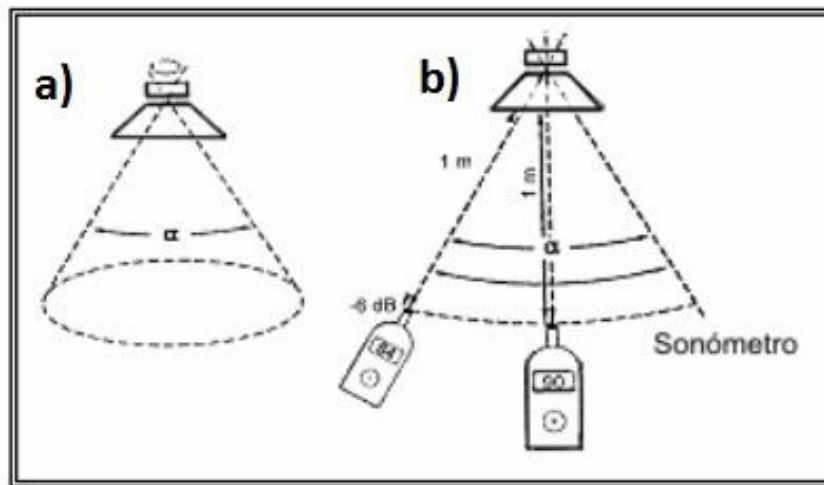


Figura 39. a) Representación del ángulo de cobertura de un altavoz. b) representación de la determinación del ángulo de cobertura [38].

6.4.6 Solapamiento de fuentes

Cuando se tiene un sistema distribuido, la disposición de los parlantes puede hacerse de muchas maneras en función de la disposición del área de audiencia y prioridades del recinto. Sin embargo existen algunos criterios que se basan en el número de altavoces por unidad de área. Se usan las configuraciones de espaciamiento rectangular y hexagonal como se presenta en la Figura 40.

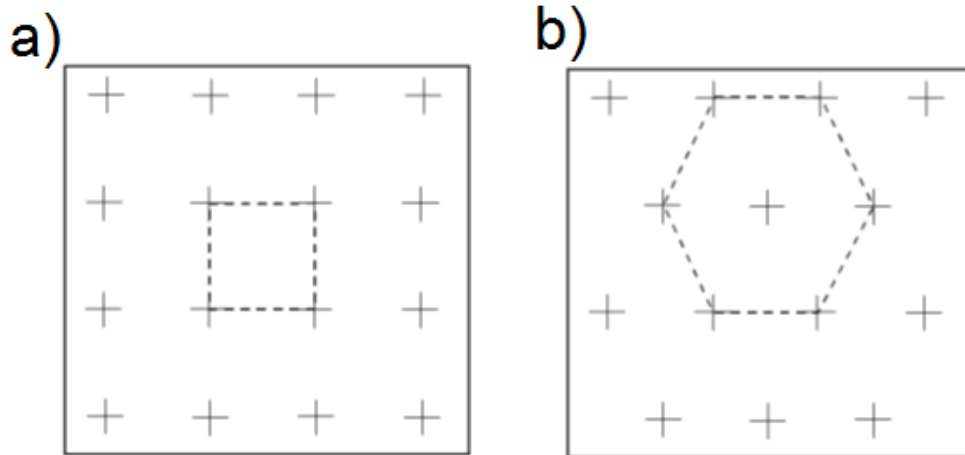


Figura 40. a) Configuración de espaciamiento rectangular. b) Configuración de espaciamiento hexagonal [48].

Se puede observar que la configuración rectangular implica menos cantidad de parlantes y por consiguiente es un sistema menos costoso.

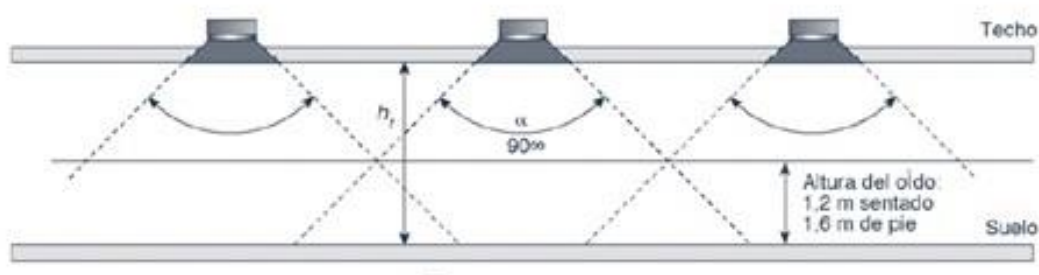


Figura 41. Representación de sistema de altavoces en función de su ángulo de cobertura [49].

Para el establecimiento de criterios de cobertura se debe tener en cuenta el ángulo de cobertura de los parlantes. Por lo tanto partiendo del radio de cobertura circular de cada parlante hasta la altura donde estará la audiencia se tienen los criterios en función de las configuraciones antes vistas. En la Figura 42 y Figura 43 se pueden observar los tipos de solapamiento para la configuración rectangular y hexagonal respectivamente.

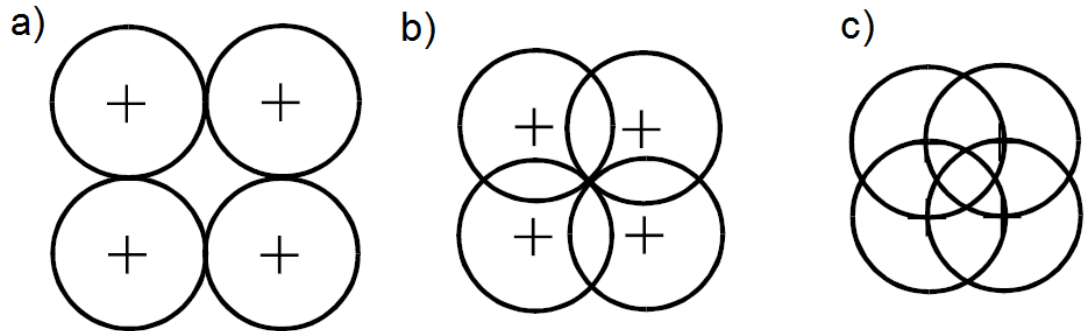


Figura 42. Tipos de solapamiento para configuración rectangular. a) Solapamiento cara a cara (sin solapamiento). b) Solapamiento mínimo (máxima cobertura y mínimo solapamiento). c) Solapamiento centro a centro (máxima densidad en la cobertura) [48] .

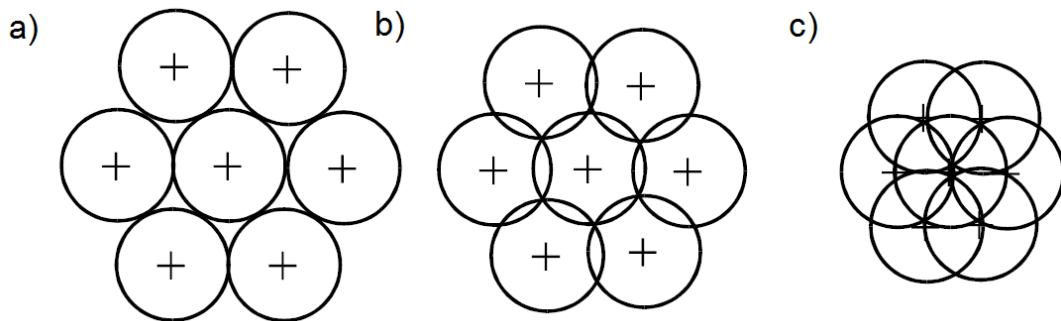


Figura 43. Tipos de solapamiento para configuración hexagonal. a) Solapamiento cara a cara (sin solapamiento). b) Solapamiento mínimo (máxima cobertura y mínimo solapamiento). c) Solapamiento centro a centro (máxima densidad en la cobertura) [48].

6.4.6.1 Criterios para la selección del tipo de solapamiento

Tener menos cantidad de parlantes y menos solapamiento entre ellos resultará en un sistema menos costoso pero implicará tener diferencias de nivel en algunas partes del área de audiencia (no homogeneidad acústica); por otra parte mayor cantidad de parlantes y solapamiento derivará en mayor cobertura en el área de audiencia y mejorará la relación entre la música y el ruido proveniente de las personas dentro del recinto. Se debe hacer una evaluación entre la funcionalidad de la música en el recinto para seleccionar la opción más efectiva. En la Tabla 4 se presenta una pauta para la selección del tipo de solapamiento en función de la funcionalidad de la música en el recinto.

Tabla 4. Pautas para la selección del tipo de solapamiento. Adaptada de [48].

	Solapamiento Cara a Cara	Solapamiento Mínimo	Solapamiento Centro a Centro
Música de ambiente de bajo nivel	✓	✓	✓
Música de ambiente con sistema de altavoces básico	Posiblemente	✓	✓
Música como primer plano con un sistema de alta calidad	✗	Posiblemente	✓
Refuerzo fuerte para voz	✗	Posiblemente	✓

6.4.7 Cálculo de niveles de potencia para altavoces en función del nivel de presión sonora deseado

Para la determinación de la potencia necesaria en cada altavoz del sistema es necesario establecer el nivel de presión sonora deseado en el área de audiencia, la distancia del altavoz al receptor y la sensibilidad del parlante [50]. Este cálculo puede realizarse a partir de la ecuación (35).

$$PER = 10^{\frac{L_p + 20 \log \frac{D}{r} - L_s}{10}} \quad [50] \quad (35)$$

donde

PER es la potencia eléctrica requerida por el altavoz (W).

L_p es el nivel de presión sonora deseado (dB).

D es la distancia del altavoz al receptor (m).

r es la distancia de referencia para la especificación de sensibilidad del altavoz (m).

L_s Sensibilidad del altavoz (dB).

7 DISEÑO DE SISTEMAS DE SONIDO LOCALES COMERCIALES DE DIFERENTES USOS

En la **sección 6** se presentaron las variables a tener en cuenta para el diseño de sistemas de sonido en locales comerciales. Para la aplicación del diseño deben ser tenidas todas estas variables pensadas en la funcionalidad del recinto y las necesidades para el confort acústico de los usuarios. Un café por ejemplo requerirá un sistema con características muy diferentes a una discoteca, ya que el nivel de presión sonora buscado en el área de audiencia es diferente. En general habrá dos situaciones para el diseño de sistemas en locales comerciales que difieren en la funcionalidad de la música para los mismos. Estas situaciones son: **La música como ambiente** y **la música como protagonista**.

7.1 Diseño de sistemas de sonido para locales con música de ambiente

Aunque el nivel de música de ambiente puede variar en función de los objetivos de cada local, se debe tener en cuenta que este tipo de configuraciones debe priorizar la comunicación entre las personas, ya que la música jugará un papel secundario en el recinto. Para esto debe tenerse en cuenta que a medida que la música tiene más nivel, las personas deberán hablar más fuerte, aumentando el nivel de ruido y reduciendo el confort acústico de las personas dentro de la sala. En la Tabla 3 se observan los niveles de presión sonora asociados al uso del recinto. Para locales con música de ambiente se recomiendan niveles de **75** hasta **90 dB**, y a partir de estos niveles realizar el diseño. En este tipo de recintos es recomendable el uso de parlantes ubicados en el techo ya que proporcionan los niveles de presión deseados en el área de audiencia y al mismo tiempo pueden estar alejados de superficies reflectantes que aumenten el nivel. El tiempo de reverberación es un parámetro de gran relevancia en estos locales, ya que altos valores pueden afectar la inteligibilidad de la palabra en el recinto afectando la comunicación entre las personas; se recomiendan tiempos no mayores de **1.5 segundos**, a favor de un alto confort acústico.

7.2 Diseño de sistema de sonido para locales con música en primer plano

Para locales con música como protagonista se requieren niveles de presión sonora mayores en comparación con locales para música de ambiente. Esto debido a la naturaleza de las actividades que en estos se realizan (baile, música como entretenimiento principal, shows en vivo, etc.). Para este tipo de sitios se debe tener especial cuidado en lograr un balance entre el confort acústico de los clientes y el cumplimiento de las normativas de emisión de ruido locales; para esto deben ser tenidos en cuenta las recomendaciones y parámetros vistos en la **sección 6**. Otro de los parámetros a tener en cuenta es la exposición al ruido por parte de los empleados del local, con el fin de cumplir con las regulaciones locales y proteger la salud de los trabajadores. Se recomienda en primer lugar la separación física (ver **sección 6.1.1**), y optar por soluciones alternativas tales como protección auditiva.

Los niveles de presión sonora usuales para este tipo de locales varían entre los **90** y **100 dB**, valores más altos deben ser evaluados función de no exceder con los niveles de emisión máximos establecidos. Debido a que en este tipo de sitios la palabra hablada no es la

protagonista, se pueden permitir tiempos de reverberación más altos en función de mejorar la percepción subjetiva de la música (ver Tabla 2) [9].

7.3 Consideraciones generales

Para el correcto diseño del sistema de sonido se debe tener en cuenta principalmente las necesidades del recinto. Características antes mencionadas como son las dimensiones del mismo, los materiales que lo componen, el nivel de presión sonora deseados y el tiempo de reverberación son variables que tendrán impacto directo en el sistema a seleccionar. Se recomienda contar siempre con la asesoría de un profesional en el tema para obtener el mejor balance entre los requerimientos del sitio y las limitaciones del mismo.

8 MEDICIÓN DE AISLAMIENTO ACÚSTICO

Para la evaluación de las condiciones previas y posteriores a una intervención acústica, deben realizarse mediciones que permitan cuantificar el grado de aislamiento que existe entre un recinto emisor y uno receptor. El estándar internacional para la medición de aislamiento acústico en edificios es el ISO 140-4 [51], donde se presenta la instrumentación requerida, procedimientos de medición y expresión de resultados para una correcta evaluación. A continuación se presentan los requisitos para una medición de aislamiento con base en el estándar antes mencionado.

8.1 Instrumentación

- Fuente omnidireccional (o seleccionada según el recinto para la obtención de un campo sonoro difuso).
- Sonómetro clase 0 o 1.
- Fuente impulsiva (pistola de fogeo, globo, entre otros).

La utilización de la fuente impulsiva está en función de la medición de tiempo de reverberación necesaria en la medición, este parámetro puede ser también medido con la interrupción de una fuente continua. El sonómetro debe calibrarse antes de cada medición y la señal excitadora debe ser un ruido de banda ancha cuya diferencia de nivel por bandas de tercios de octava no sean mayores a 6dB.

8.2 Procedimientos de medición

- Se debe realizar una medición de ruido de fondo con el fin de verificar una condición de mínimo 6dB de diferencia entre el nivel de este y el nivel con la fuente encendida.
- Se debe utilizar mínimo 2 posiciones de fuente en el recinto emisor que estén alejadas de elementos constructivos que puedan influenciar la transmisión de sonido.
- Se deben medir 5 posiciones de micrófono para cada posición de fuente en los dos recintos con registros no menores a 6 segundos.
- Se debe medir el tiempo de reverberación en el recinto receptor.

8.3 Expresión de resultados

El parámetro que se debe presentar luego de realizar la medición es la pérdida por transmisión acústica aparente que corresponde a la pérdida por transmisión definida en la **sección 2.11** tomando en cuenta la potencia sonora transmitida a través de elementos laterales.

8.4 Consideraciones

- En caso de tener recintos con diferentes volúmenes se debe utilizar al de volumen más alto como emisor.
- Las posiciones de los micrófonos deben cumplir: una distancia de 0,7 metros entre cada posición; 0,5 metros de distancia a los bordes del recinto; y 1 metro de distancia entre un micrófono y la fuente sonora.
- Las posiciones de la fuente deben cumplir: una distancia de 1,4 metros entre las dos posiciones; una distancia no menor de 0,5 metros desde la fuente a los bordes del recinto.

9 MEDICIÓN DE REVERBERACIÓN SEGÚN EL ESTÁNDAR ISO 3382-2

Uno de los parámetros más relevantes para caracterizar acústicamente un recinto es el tiempo de reverberación (ver **sección 2.8 y 2.9**). Este es presentado en el estándar **ISO 140-4** (ver **sección 8**) como insumo principal para la obtención del aislamiento acústico entre dos cuartos, y puede estimarse bajo los parámetros dictados por el estándar **ISO 3382-2** [52]. A continuación se presentan los requerimientos establecidos por el estándar para obtener el tiempo de reverberación de un recinto.

9.1 Métodos

Para la estimación del tiempo de reverberación, se obtiene en primer lugar la curva de decaimiento que representa gráficamente la caída de nivel de presión sonora en un punto en función del tiempo.

El estándar presenta dos posibles métodos para la obtención de la curva de decaimiento.

9.1.1 Método de la señal de ruido interrumpida

Se obtiene la curva de decaimiento al registrar la caída de nivel en un recinto, luego de ser excitado por un ruido de banda ancha [52].

9.1.2 Método de la respuesta impulsiva integrada

Se obtiene la curva de decaimiento al realizar la integración inversa en el tiempo de las respuestas impulsivas cuadráticas [52].

9.2 Instrumentación

En general se utiliza la misma instrumentación para los dos métodos. Debe tenerse en cuenta que el estándar propone algunas condiciones particulares para cada método.

- Micrófonos omnidireccionales.
- Fuente Omnidireccional (método de la señal de ruido interrumpida).
- Fuente Impulsiva (método de la respuesta impulsiva integrada).

- Sistema de adquisición de datos.

9.3 Procedimiento

- El número de posiciones de micrófono mínima es de 3.
- El número de posiciones de fuente mínimo es de 2.
- El número mínimo de registros será de 12 para cada posición de fuente sonora.

9.3.1 Método de la señal de ruido interrumpida

- La excitación a la sala se realiza con una fuente emitiendo una señal de ruido de banda ancha, con la duración suficiente como para obtener un estado estacionario de la energía acústica y con un nivel tal que el nivel más bajo del rango de evaluación esté por lo menos 10 dB por encima del ruido de fondo.
- Se realiza un promediado de varias mediciones con el fin de reducir la incertidumbre causada por desviaciones estadísticas.

9.3.2 Método de la respuesta impulsiva integrada

- La excitación se realiza con una fuente de ruido impulsivo, que produzca energía suficiente para obtener un estado estacionario en el ancho de banda de interés.
- Se realiza la integración inversa de la respuesta al impulso obtenida para todas las bandas de frecuencia obteniendo la curva de decaimiento.

A partir de la curva de decaimiento obtenida por cualquiera de los dos métodos, se estima el tiempo de reverberación por medio del cálculo de su pendiente de linealización.

9.4 Consideraciones

- Las distancias entre cada posición de micrófono deben ser de mínimo 1,5 metros.
- La distancia entre cada posición de micrófono y una fuente sonora debe ser de 2 metros.
- Las superficies del recinto y las posiciones de los micrófonos deben estar distanciadas por mínimo 1 metro.
- La distancia entre cada posición para la fuente sonora debe ser de 3 metros.

10 RECOMENDACIONES Y ASPECTOS GENERALES

Antes de realizar cualquier intervención acústica en un recinto, se deben tener en cuenta varios puntos que ayudarán a definir los parámetros de las medidas a utilizar. Dichos puntos pueden ser definidos en función de preguntas enfocadas a las condiciones acústicas del local. Dichas preguntas se presentan a continuación:

- ¿Está cumpliendo mi establecimiento con la normativa de ruido actual?
- ¿Están los niveles de presión sonora de mi establecimiento acordes con el uso al que está dirigido?
- ¿Están los elementos de mi establecimiento acondicionados de manera que el ruido no sea un problema tanto dentro como fuera de él?
- ¿Es mi sistema de refuerzo sonoro acorde con el uso para el que está siendo utilizado?
- ¿Existe confort acústico para clientes?, si la respuesta es no ¿Cuáles son las razones?

- ¿Es el tiempo de reverberación de mi recinto acorde con las actividades que se realizan en él?
- ¿Tengo cobertura homogénea en el área de audiencia de mi establecimiento?

11 RECOMENDACIONES TÉCNICAS Y HUMANAS

La implementación de todas las metodologías de insonorización deben ser realizadas por profesionales especializados en el área, tales como ingenieros de sonido o ingenieros acústicos, y personal técnico capacitado en la instalación de soluciones acústicas, quienes cuentan con los conocimientos necesarios para realizar procesos tanto de evaluación y diseño, como de implementación y control. Para el diseño de sistemas de refuerzo sonoro debe incluirse enfocada a equipos de audio y conocimientos de sonorización por parte de fuentes electroacústicas (con énfasis en aplicaciones de audio en vivo).

Para la implementación de las medidas de aislamiento deben tenerse en cuenta las recomendaciones vistas en la **sección 4**. También, se debe tener en cuenta que los montajes de medidas de control de ruido tienen en muchas ocasiones, implicaciones estructurales que deben ser evaluadas. Para esto es importante que un ingeniero civil o arquitecto especializado en estructuras avale la viabilidad de la medida.

Para la instalación de medidas de refuerzo sonoro deben tenerse en cuenta las recomendaciones vistas en la **sección 5**. En general se debe cuidar la integridad de los equipos de audio, por lo que se debe tener especial atención a la potencia eléctrica para la que están diseñados, y sus impedancias de entrada y de salida que determinará el flujo de la tensión dentro de estos. Es de relevancia elegir el sistema de distribución de potencia más óptimo según las necesidades particulares del establecimiento (ver **sección 5.2**) y tener en cuenta la disposición de los transductores de entrada y de salida para prevenir retroalimentaciones en el sistema que puedan dañarlo.

12 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Möser y J. L. Barros, Ingeniería Acústica, Teoría y Aplicaciones 2nda Edición, Springer, 2009.
- [2] L. L. Beranek, Acústica, Buenos Aires: Editorial Hispanoamericana, 1969.
- [3] C. H. H. David A. Bies, «Engineering Noise Control (Fourth Edition),» 2009.
- [4] R. F. Barron, Industrial Noise Control and Acoustics, New York: Marcel Dekker, Inc., 2001.
- [5] J. C. Malcom, Handbook of noise and vibration control, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2007.
- [6] T. J. Cox y P. D'Antonio, Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application, Second edition, Taylor & Francis, 2009.
- [7] M. Barron, Auditorium Acoustics and Architectural Design, Second Edition, Spon Press, 2010.
- [8] F. Miyara, Acústica y Sistemas de Sonido, UNR Editora, 2006.
- [9] A. Carrión, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Edicions UPC, 1998.
- [10] L. L. Doelle y M. Arch, Environmental Acoustics, McGraw-Hill, 1972.
- [11] SINTEC, «Conceptos fundamentales del sonido,» [En línea]. Available: <http://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf>. [Último acceso: 11 2015].
- [12] G. M. a. A. C. V. Desarnaulds, «Noise from amplified music played in discotheques, pubs and clubs - A review of some national regulations,» 2003.
- [13] EPA VICTORIA, «Noise Control Guidelines,» 2008.
- [14] CSR Bradford Insulation, *Acoustic Insulation Design Guide*.
- [15] Sound Service, *Basic Soundproofing For Pubs and Clubs. A Guide for the Venue Owner* .
- [16] ISOVER, Saint Gobain, *Soluciones de Aislamiento en Centros Comerciales*.
- [17] P. Kogan, «Anlisis de la eficiencia de la ponderación "A" para evaluar efectos del ruido sobre el ser humano,» Valdivia, 2004.
- [18] Ministerio de Trabajo e inmigración, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo., «Ruido en los Sectores de la Música y el Ocio,» 2009.
- [19] International Organization for Standardization, «ISO 717-1:2013 Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation,» 2013.
- [20] International Organization for Standardization, «ISO 717-2:2013 Acoustics -- Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 2: Impact sound insulation,» 2013.
- [21] FiberGlass Colombia, «Conceptos básicos de acústica - aislamiento del sonido transmitido por el aire - (VI Parte),» 2000. [En línea]. Available: <http://fiberglasscolombia.com/wp-content/uploads/2015/04/NTArq49.pdf>. [Último acceso: 2015].
- [22] B. Pedán Rebollo, «Aislamiento a Ruido Aéreo entre Locales. Estimación de la Incertidumbre de Medida,» 2011.
- [23] H. Kuttruff, Acoustic: An Introduction, Taylor & Francis , 2007.

- [24] Grupo Guachi, 2015. [En línea]. Available: <http://www.grupoguachi.es/consejos-de-guachi.htm>.
- [25] Lorient Polyproducts Ltd, *Sealing Systems for Door Assemblies: An Introductory Guide*, 2014.
- [26] E. Alexandre, *Aislamiento Acústico*, 2013.
- [27] Departamento de Teoría do Signal e Comunicaci3ns, «El Aislamiento Acústico,» [En línea]. Available: http://gcastro.webs.uvigo.es/PFC/Capitulo_dos_c.htm. [Último acceso: 2015].
- [28] ICONTEC, «NTC 5601-2 Acústica de la edificación. Estimaci3n de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 2: Aislamiento acústico a ruido de impactos entre recintos».
- [29] A. Nilsson y B. Liu, *Vibro-Acoustics Second Edition*, vol. 1, Springer, Ed., 2015.
- [30] Consejería de economía y hacienda, comunidad de Madrid, *Guía práctica sobre acústica en instalaciones de climatizaci3n*, Madrid, 2010.
- [31] FiberGlass, *Acústica en Instalaciones de Climatizaci3n*, 2012.
- [32] ISOVER, *HVAC Ducts Handbook*.
- [33] ISOVER, «Modelizaci3n Acústica en Instalaciones de Climatizaci3n: Contribuci3n de las Redes de Distribuci3n de Aire,» *DYNA*.
- [34] «Diseño e instalaci3n de sistemas de sonido,» [En línea]. Available: http://tsc.unex.es/~tabo/EA/EA_tema6_02_2h.pdf. [Último acceso: 2015].
- [35] T. Vear, «Guía de Sistemas de Audio. Casas de Adoraci3n,» 2008.
- [36] JBL Professional, *Sound System Design Reference Manual*, 1999.
- [37] Shure, *Microphone, techniques for music. Sound reinforcement.*
- [38] R. L. Bueno Jiménez y D. Téllez León, «Altavoces,» México D. F., 2008.
- [39] Bose, professional products, *Sound System Design Guide*, 1994.
- [40] M. Long, *Architectural Acoustics Applications of Modern Acoustics*, Elsevier Academic Press, 2006.
- [41] TELCO, 25 04 2013. [En línea]. Available: <http://telcoavi.es/blog/que-son-los-limitadores-de-sonido/>.
- [42] MCR AUDIO, *Manual de usuario, Controlador-Limitador LD-500*, Madrid, 2005.
- [43] OMS, «Guías para el ruido urbano,» 1999.
- [44] CESVA, «LRF-05 Limitador Registrador Frecuencial,» [En línea]. Available: http://datasheets.cesva.com/lrf-05_esp.pdf.
- [45] F. J. T. Rodriguez, «Sistemas de Audio Distribuido de Voltaje Constante,» 2005.
- [46] «Manual para radialistas,» [En línea]. Available: <http://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=33>.
- [47] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, «Guía de buenas prácticas en el sector comercio y servicios para mejorar la calidad acústica del municipio de Itagüí,» Itagüí, 2014.
- [48] JBL Professional, «Control Contractor Ceiling Loudspeakers. Technical Application Guide,» Northridge, Los Angeles, .
- [49] Universidad Nacional Abierta a Distancia, «Calculo del número de altavoces,» [En línea]. Available:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/208038/ContLin/clculo_del_numero_de_altavoces.html.
[Último acceso: 12 12 2015].

- [50] J. A. H. Urriola, «Diseño e implementación de un sistema de refuerzo sonoro para supermercado bigger,» Valdivia , 2011.
- [51] International Organization for Standardization, ISO 140-4: 1998 Acoustics -- Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms, 1998.
- [52] International Organization for Standardization, ISO 3382-2008 - Acoustics -- Measurement of room acoustic parameters -- Part2: Reverberation time in ordinary rooms, 2008.