

RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERA DE SONIDO

2. TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL ABFUSOR

3. AUTORES: Diana Marcela Medina Sánchez

4. LUGAR: Bogotá, D.C.

5. FECHA: Mayo de 2012

6. PALABRAS CLAVE: Difusión, coeficiente de difusión, patrón polar de difusión, difusor, absorción, coeficiente de absorción, absorbente, abfusor, tiempo de reverberación, respuesta al impulso, campo directo, campo lejano, análisis espectral.

7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: La siguiente investigación consistirá en el diseño de un panel abfusor, que tendrá las funciones de absorber y difundir el sonido a la misma vez, condición que llevará a una optimización del espacio donde se quiera aplicar dicho dispositivo. Para el cumplimiento de este propósito se necesitará una recolección bibliográfica de libros, proyectos de grado y artículos de investigación; bibliografía que contendrá la información necesaria para llegar al diseño final del dispositivo. A partir de la construcción del panel se podrá validar el diseño planteado por medio de mediciones, determinando los coeficientes de absorción y difusión del panel abfusor. Además de generar un nuevo concepto y aportar un sistema integrado que cumpla tareas tanto de difusión como de absorción al campo de la acústica arquitectónica, se abrirá una nueva línea de investigación, para que métodos para optimizar, predecir, medir y cuantificar superficies de difusión y absorción sean adaptados a estos innovadores dispositivos.

8. LINEAS DE INVESTIGACIÓN: Este proyecto se encuentra en la línea de investigación de Tecnologías Actuales y Sociedad, en la sublínea de la facultad *Procesamiento digital de señales*, ya que se necesita el análisis de señales para el desarrollo y validación del funcionamiento del panel abfusor. El campo de investigación corresponde a *La Acústica*, ya que este proyecto trabaja directamente con la manipulación de las propiedades físicas sonido.

9. FUENTES CONSULTADAS: COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. EVEREST, Alton. Master handbook of acoustic. Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, 2009. ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998. HAUSER, Gabriel, DIRK, Noy y STORIK, John. Commercial low frequency absorber: a

comparative study. Nueva York: Audio Engineering Society, 2008. MILLAN, Andrés Felipe. Difusor QRD aplicando la teoría de fractales, concepto binario y resonador de Helmholtz multisintonía. Trabajo de grado Ingeniero de Sonido. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sonido, 2008. PAYNE, Elizabeth y Angus, Jamie. Improvements to Binary Amplitude Diffusers. Viena: Audio Engineering Society, 2007.

10. CONTENIDOS: El sonido que se escucha en la mayoría de ambientes es una combinación del sonido directo proveniente de la fuente o fuentes y el de las reflexiones indirectas provenientes de las superficies y otros objetos. En un recinto, tanto el sonido directo como el reflejado determinan la calidad acústica del recinto. Por lo tanto, uno de los temas centrales en la acústica siempre ha sido como manipular estas reflexiones, que afectan la manera como el sonido se propaga y como es percibido. Para que un diseño acústico sea exitoso se debe empezar por la correcta elección de forma y volumen del recinto, además de un tratamiento acústico a sus superficies. Este tratamiento consiste en una adecuada distribución de materiales absorbentes, paneles difusores y superficies reflejantes. Los absorbentes y los difusores tienen un papel que desempeñar en un buen diseño acústico. Ellos tienen una función complementaria, lo que significa que cuando se utilizan adecuadamente, se puede conseguir una mejor acústica.

Al utilizar difusores y absorbentes en un diseño acústico se están evitando posibles distorsiones acústicas, ecos, coloraciones y cambios en la imagen estéreo. Al diseñar un dispositivo que cumpla al mismo tiempo la función de absorber y difundir sonido (abfusor), se está solucionando otro problema, aparte de los mencionados anteriormente, el problema de la limitación del espacio. En recintos pequeños como estudios de grabación, se requiere hacer un control modal de bajas frecuencias, por lo que es necesario el uso de difusores y absorbentes de gran tamaño y profundidad, que a la hora de aplicarlos se tienen que dejar a un lado, por la limitación del espacio y los costos que puede generar la instalación de estos elementos de gran tamaño. Combinando algunas de las teorías y conceptos existentes para el diseño de difusores y absorbentes se llegará al diseño del panel abfusor. Además de generar un nuevo concepto y aportar al campo de la acústica arquitectónica, se dará pie para que se siga trabajando en esta área y poner un precedente para futuras investigaciones.

11. METODOLOGÍA: El enfoque de esta investigación es *Empírico-Analítico*, debido a que se verificarán los cálculos matemáticos realizados para el diseño del panel abfusor con los datos experimentales recogidos por las mediciones realizadas al mismo. Esta verificación se hace para darle validez al diseño y determinar el funcionamiento del panel abfusor.

12. CONCLUSIONES: La ubicación de material absorbente dentro de la cavidad del panel perforado influye en la forma de la curva de absorción. Cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás del panel, la absorción es relativamente poco selectiva y a medida que dicho material se va separando del mismo, la curva se va estrechando. La absorción

más selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared posterior. La diferencia del coeficiente de absorción en las dos condiciones extremas es de 0,2.

De acuerdo a las mediciones de absorción y difusión realizadas al panel abfusor y a los resultados que estas arrojaron, es correcto afirmar que el panel cumple con la función de absorber el sonido en todo el rango de frecuencia desde 63 Hz hasta 8000 Hz, con un aumento significativo del coeficiente de absorción en la banda de 500 Hz. Además cumple con la función de difundir el sonido en un rango de frecuencias extendido que va de 100 Hz a 8000 Hz. Los coeficientes de absorción del panel abfusor calculados a partir de las mediciones están sujetos a las variaciones de RT producidas por los modos propios de la sala. De acuerdo al comportamiento del tiempo de reverberación en una frecuencia modal y las variaciones que esto genera en el valor promedio del tiempo de reverberación, se llegó a la conclusión que el RT en 63 y 125 Hz podría ser menor, lo que significa coeficientes de absorción más altos en dichas bandas de frecuencia. Si el panel hubiera sido diseñado para las frecuencias bajas a las cuales está difundiendo (200 Hz a 800 Hz) se hubieran necesitado 29 ranuras con un ancho de 21 cm cada una, lo que daría en su totalidad un panel de aproximadamente 6 m de largo. Por lo que se puede afirmar que al perforar las láminas se extiende significativamente el rango de difusión hacia frecuencias más bajas mediante la adición de masa al sistema, reduciendo la frecuencia de resonancia. Además de conseguir que la energía incidente se difundiera por medio de diferencias de fase producidas por los pozos; se generó difusión por cambios en la impedancia de la superficie a partir de resonadores de Helmholtz sintonizados a diferentes frecuencias. La difusión no esperada en altas frecuencias se puede deber a una difusión por cambios en el material, similar a un panel difusor de amplitud binaria BAD. La construcción típica de un BAD es un absorbente poroso que se enfrenta a una superficie perforada según una m-secuencia. El panel abfusor podría estar creando difusión adicional por modificación en la impedancia del medio, de la misma forma que un difusor de amplitud binaria lo hace. En cuanto al comportamiento del panel en frecuencias altas, las partes reflejantes de la superficie se encargaron de reflejar el sonido, ocultando ciertas partes de la fibra de vidrio ubicada detrás de las placas perforadas, causando disminución en la absorción de frecuencias altas, pero creando difusión en este rango de frecuencias.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL ABFUSOR

DIANA MARCELA MEDINA SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTÁ

2012

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PANEL ABFUSOR

DIANA MARCELA MEDINA SÁNCHEZ

Proyecto de grado

Asesor:

ALEXANDER ORTEGA

Ingeniero de sonido

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTÁ

2012

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, mayo de 2012.

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo al sustentador de mi vida, al que con su palabra me animó y me dio fuerzas para la realización de este proyecto, a DIOS. Si pudiera decir todas sus maravillas la eternidad no me alcanzaría, gracias a DIOS por todo.

También dedicó este trabajo a mi madre, que aunque hace muchos años no la tengo a mi lado, me enseñó los valores necesarios para ser una mujer dedicada y responsable. A mi padre que ha estado apoyándome y animándome en todo el desarrollo del proyecto. A mis hermanas Mariana y Paola, que a pesar de la distancia nunca han dejado de ser incondicionales para mí. A mi hermano Carlos por su colaboración y paciencia a lo largo de esta etapa final de mi carrera.

Y por último, pero no menos importantes a mis amigos, que a pesar de las dificultades e inconvenientes me han tendido su mano y me han brindado su pronta ayuda.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que todo a mi familia por su colaboración en la financiación de este proyecto y por su incondicionalidad no solo en el desarrollo del mismo, sino a lo largo de toda mi vida. Doy gracias a los docentes que me han brindado de sus conocimientos durante toda la carrera, conocimientos sin los cuales no hubiera podido desarrollar este proyecto. A todo el personal de laboratorios por su colaboración con el préstamo de los equipos dentro y fuera de la universidad. A mis amigos de carrera Dennys y Juan Camilo porque he contado con su apoyo, sobretodo en está etapa de finalización de mi carrera. A la empresa ACUSTEC DE COLOMBIA por el alquiler de su laboratorio de medición y a las personas que gestionaron el permiso para poder llevar a cabo las mediciones en este lugar.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
1.3 JUSTIFICACIÓN	15
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
1.4.1 Objetivo General	16
1.4.2 Objetivos Específicos	16
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO	17
1.5.1 Alcances	17
1.5.2 Limitaciones	17
2. MARCO DE REFERENCIA	18
2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL	18
2.1.1 Conceptos básicos	18
2.1.2 Difusión del sonido	19
2.1.2.1 Difusores policilíndricos	21
2.1.2.2 Difusores de Schroeder	22
2.1.2.3 Mejoras de los difusores de Schroeder	30
2.1.3 Absorción del sonido	34
2.1.3.1 Materiales absorbentes	34
2.1.3.2 Elementos absorbentes selectivos (Resonadores)	36
2.1.4 Superficies híbridas (abfusores)	48
2.1.4.1 Absorción de los difusores de Schroeder	48
2.1.4.2 Resonador de Helmholtz a base de rejillas de fase	54
2.1.4.3 Difusores micro-perforados (MPD)	56
2.1.4.4 Difusores de amplitud Binaria	58
2.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO	60
2.2.1 Norma ISO 354. Measurement of sound absorption in a reverberation room.	60
2.2.2 AES 4id. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.	64
3. METODOLOGÍA	69
3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	69
3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA	69

3.3	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN	69
3.4	HIPÓTESIS	69
3.5	VARIABLES	70
3.5.1	Variables Independientes	70
3.5.2	Variables dependientes	70
4.	DESARROLLO INGENIERIL	71
4.1	SELECCIÓN DE LAS TEORÍAS	71
4.2	ETAPA DE DISEÑO	74
4.2.1	Difusor QRD	74
4.2.2	Panel perforado	76
4.3	ETAPA DE CONSTRUCCIÓN	80
4.3.1	Material constructivo	80
4.3.2	Cantidades	85
4.3.3	Proceso de construcción	86
4.4	MEDICIONES ACÚSTICAS	88
4.4.1	ISO 354. Medición de absorción.	89
4.4.2	AES 4id-2001. Medición de difusión.	95
5.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
5.1	ABSORCIÓN DEL PANEL	100
5.2	DIFUSION DEL PANEL	107
5.2.1	Respuesta polar	107
5.2.2	Coeficiente de difusión direccional (d_{θ})	115
5.2.3	Coeficiente de difusión de incidencia aleatoria	118
6.	CONCLUSIONES	121
7.	RECOMENDACIONES	123
	BIBLIOGRAFÍA	124
	GLOSARIO	125
	ANEXOS	127
	ANEXO A. PROTOCOLOS DE MEDICIÓN	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión y difusión del sonido.	20
Figura 2. Comparativa entre las zonas de cobertura.	22
Figura 3. Difusores MLS.	23
Figura 4. Diagrama de difusión de un difusor unidimensional QRD con $p=7$.	26
Figura 5. Difusor QRD unidimensional.	27
Figura 6. Difusión producida por un difusor bidimensional QRD.	28
Figura 7. Difusor QRD bidimensional.	29
Figura 8. Sección transversal de un difusor de Schroeder usando láminas perforadas	31
Figura 9. Difusión de un QRD con $N= 7$	32
Figura 10. Proceso de disipación de energía al interior de un material poroso.	35
Figura 11. Esquema básico de un resonador de membrana.	37
Figura 12. Esquema básico de un resonador simple de cavidad montado en una pared.	39
Figura 13. Agrupación de resonadores simples.	42
Figura 14. Esquema básico de un panel perforado.	43
Figura 15. Dos pozos de un difusor de Schroeder.	50
Figura 16. Perfil de un absorbente de sonido con placas perforadas.	53
Figura 17. Resonador de Helmholtz a base de rejillas de fase.	55
Figura 18. Difusor micro-perforado (MPD) de $p=7$.	56
Figura 19. Difusor micro-perforado transparente instalado en frente de una ventana.	57
Figura 20. Vista detallada de un MPD.	58
Figura 21. Superficie híbrida BAD.	59
Figura 22. Proceso de reducción de datos.	67
Figura 23. Proceso de extracción del coeficiente de difusión desde un impulso.	68
Figura 24. Comparación de la Energía Vs Frecuencia Vs directividad.	72
Figura 25. Vista superior del panel abfusor.	75
Figura 26. Especificaciones para la construcción de los resonadores en el difusor QRD.	78
Figura 27. Vista Frontal del panel abfusor.	80
Figura 28. Plano detallado de las perforaciones del panel abfusor.	87
Figura 29. Vista posterior del panel abfusor.	88
Figura 30. Ubicación del panel abfusor dentro del laboratorio de medición.	91
Figura 31. Ubicaciones de fuente y micrófono para la medición de absorción	92
Figura 32. Medición de ruido de fondo en el laboratorio de medición de ACUSTEC.	92
Figura 33. Diagrama de conexión para las mediciones de absorción.	93
Figura 34. Medición de absorción del abfusor (posición de fuente1).	94

Figura 35. Medición de absorción del abfusor (posición de fuente2).	94
Figura 36. Posiciones de fuente y micrófono para la medición de difusión.	96
Figura 37. Diagrama de conexión para las mediciones de difusión.	97
Figura 38. Medición de difusión de la superficie de referencia	98
Figura 39. Medición de difusión del panel abfusor en la posición de referencia	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias constructivas entre difusores de Schroeder y absorbentes.	51
Tabla 2. Área de absorción del sonido equivalente máxima para una sala de 200 m ³	61
Tabla 3. Valores de la secuencia S_n y de la profundidades de las ranuras.	75
Tabla 4. Valores del volumen al interior de cada ranura del panel abfusor.	77
Tabla 5. Frecuencias de resonancia del difusor con y sin perforaciones.	78
Tabla 6. Coeficientes de absorción de la acustifibra	79
Tabla 7. Especificaciones generales del panel abfusor.	79
Tabla 8. Densidades de la madera de pino.	81
Tabla 9. Precios del tablero de pino con nudos.	82
Tabla 10. Densidades del MDF	82
Tabla 11. Precios del tablero del MDF.	83
Tabla 12. Evaluación cualitativa de los diferentes materiales.	85
Tabla 13. Cantidades necesarias de los materiales para el abfusor.	86
Tabla 13. Coeficientes de absorción de la baldosa y el concreto pintado.	89
Tabla 14. Área de absorción equivalente de la sala reverberante en ACUSTEC.	90
Tabla 15. Tiempo de reverberación para cada configuración del panel.	100
Tabla 16. Área de absorción equivalente para cada configuración del panel.	101
Tabla 17. Área de absorción total para cada configuración del panel.	101
Tabla 18. Coeficientes de absorción para cada configuración del panel.	101
Tabla 19. Valores de tiempo de reverberación por punto de medición.	106
Tabla 20. Coeficientes de difusión direccional del panel abfusor.	116
Tabla 21. Coeficientes de difusión de incidencia aleatoria.	118

INTRODUCCIÓN

Para el buen diseño acústico de un recinto, además de requerir un correcto volumen y una adecuada forma, es necesario un tratamiento a sus superficies, utilizando la combinación y ubicación de materiales absorbentes, paneles difusores y superficies que se adapten mejor a los requerimientos de diseño. Al utilizar superficies absorbentes y difusoras integradas en un diseño acústico se están evitando posibles distorsiones acústicas, ecos, coloraciones, cambios en la imagen estéreo y se hace un control adecuado del tiempo de reverberación, el cual involucra parámetros acústicos como la inteligibilidad de la palabra, la claridad musical, el brillo, la calidez, entre otros. Estos dos tipos de superficies tienen una función complementaria, lo que se significa que cuando se utilizan conjuntamente se puede obtener un mejor acondicionamiento acústico, así como también optimizar el espacio, debido a que es una de las limitaciones en el momento de hacer un diseño acústico.

La siguiente investigación consistirá en el diseño de un panel abfusor, que tendrá las funciones de absorber y difundir el sonido a la misma vez, condición que llevará a una optimización del espacio donde se quiera aplicar dicho dispositivo. Para el cumplimiento de este propósito se necesitará una recolección bibliográfica de libros, proyectos de grado y artículos de investigación; bibliografía que contendrá la información necesaria para llegar al diseño final del dispositivo. A partir de la construcción del panel se podrá validar el diseño planteado por medio de mediciones, determinando los coeficientes de absorción y difusión del panel abfusor.

Además de generar un nuevo concepto y aportar un sistema integrado que cumpla tareas tanto de difusión como de absorción al campo de la acústica arquitectónica, se abrirá una nueva línea de investigación, para que métodos para optimizar, predecir, medir y cuantificar superficies de difusión y absorción sean adaptados a estos innovadores dispositivos. También se pretender llegar a la comercialización del panel abfusor, como un dispositivo integrado y de bajo coste de fabricación e instalación para acondicionamiento acústico de espacios.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

“El sonido que se escucha en la mayoría de ambientes es una combinación del sonido directo proveniente de la fuente o fuentes y el de las reflexiones indirectas provenientes de las superficies y otros objetos. En un recinto, tanto el sonido directo como el reflejado determinan la calidad acústica del recinto. Por lo tanto, uno de los temas centrales en la acústica siempre ha sido como manipular estas reflexiones, que afectan la manera como el sonido se propaga y como es percibido”¹.

Desde la antigüedad se ha visto la necesidad de mejorar la acústica de recintos, se conocen escritos del Siglo I a.c, realizados por Marco Vitrubio, ingeniero militar de Julio Cesar, en donde se describen varios diseños de mejoras acústicas para los teatros romanos. Tanto los romanos como los griegos, utilizaban en sus teatros vasijas de bronce afinadas que actuaban como resonadores para frecuencias bajas y agudas.

En los grandes templos cristianos de bóvedas muy altas, construidos en la era moderna y post-moderna, se ubicaba una marquesina sobre el pulpito, que evitaba que la voz del predicador se perdiera en las bóvedas. Los teatros de esta misma época, tenían efectos de difusión no optimizados, que era generada por todos los elementos decorativos, balcones, estatuas, adornos, etc. Todas estas superficies irregulares creaban un campo sonoro difuso que generaban en los oyentes una preferencia subjetiva a este tipo de recintos, ya que al difundirse el sonido se evita distorsiones y coloraciones generadas por las reflexiones tempranas.

Hasta el siglo XIX, el diseño acústico era puramente práctico y consistía, principalmente, en imitar disposiciones de salas existentes en las que la música sonaba bien.

Debido al cambio en el tipo de arquitectura que se dio en el siglo XX, donde se cambió todas las superficies con adornos y relieves por superficies planas, se vio la necesidad de generar difusión de alguna otra forma. En respuesta a esta necesidad, el profesor M. R. Schroeder diseñó unas superficies difusoras de sonido basadas en secuencias matemáticas, que consisten en unas rendijas con diferentes profundidades. Los difusores

¹ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. Pag. 20.

de Schroeder están diseñados según las siguientes secuencias: de residuos cuadráticos (QRD), de raíces primitivas (PRD) y de máxima longitud (MLS).

A partir de esto, se ha seguido investigando para que por medio del uso de otras secuencias o realizando mejoras a los tipos de difusores existentes, generar una mejor difusión en un rango de frecuencia más extendido. En cuanto a superficies de absorción, “durante más de 100 años, desde la fundación de la acústica arquitectónica de Sabine, se ha hecho un considerable esfuerzo al estudio de superficies absorbentes. Durante este tiempo una colección considerable de coeficientes de absorción han sido tabulados”².

En esta etapa de investigación ha sido de gran importancia los aportes realizados por Trevor Cox y Peter d Antonio en sus publicaciones, una de ellas es el libro ***Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*** publicado en el año 2009, donde los autores presentan de forma detallada los tipos de difusores y absortores existentes, su diseño y que tan eficiente es su funcionamiento.

Existen muchas otras publicaciones en donde se proponen otros tipos de difusores basados en mejoras de los actualmente conocidos. Un ejemplo de esto, es la publicación, ***Diffusers with Extended Frequency Range***, hecha por la AES (Audio Engineering Society) en el año 2007, por Trevor Cox, Jamie Angus y Konstantinos Dadiotis, en donde ellos proponen un difusor de residuo de potencia basado en el difusor PRD, a partir del hecho de que los difusores de Shoroeder presentan en cierta frecuencias un fenómeno llamado “Flat Plate Effect”, que se percibe como si las ondas reflejaran sobre una superficie plana. Este difusor de residuo de potencia soluciona este problema elevando el número primo, pero generando un número pequeño de periodos.

Otros tipos de diseños fueron propuestos en el artículo ***Improvements to Binary Amplitude Diffusers***, publicado por la AES en el año 2007, por Elizabeth Payne, Gillian y Jamie Angus. Ellos proponen dos diseños basados en los difusores de amplitud binaria. El primero es un diseño fractal creado al agregar una difusión limitada, este tipo de difusor no dio resultados más eficaces de los que puede dar un difusor del mercado. El segundo diseño cambia las unidades de repetición original del difusor de amplitud binario por cuadrados de diferentes tamaños. Esto da una clara mejora del difusor original y da una nueva herramienta para los diseños acústicos.

En cuanto a absorción se encuentran publicaciones como: ***Commercial low frequency absorber: a comparative study***, publicado por la AES en el año 2008, por Gabriel Hauser, Dirk Noy, y John Storyk. Se presenta un conjunto de dispositivos disponibles en el mercado para la absorción de bajas frecuencias, a los cuales se les realiza la debida

² COX, Trevor y D`ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 20.

medición para determinar los coeficientes de absorción de cada uno de ellos y haciendo una comparación se determinan los dispositivos que tienen un mejor funcionamiento para absorber bajas frecuencias.

Una mejora a los resonadores de membrana se propone en este artículo: ***The flexible bass absorbers***, publicado por la AES en el año 2007, por Niels W. Adelman, Eric R. Thompson y Anders C. Gade. Ellos realizan un prototipo de un resonador de membrana variable, realizan las mediciones pertinentes y determinan que el resonador es más eficaz en torno a los 80 a 100 Hz.

Este artículo documenta la investigación y la creación de un nuevo prototipo de absorbente de bajos basado en dos formas de resonancia armónica simple: Resonancia de diafragma pistónico y resonancia por cavidad de Helmholtz. Este trabajo lleva el nombre de ***Room Mode Bass Absorption Through Combined Diaphragmatic & Helmholtz Resonance Techniques: "The Springzorber"***, publicado por la AES en el año 2003, por Evan Reiley y Anthony Grimani.

En la universidad de San Buenaventura se han realizado algunos proyectos de grado referentes a difusores, estos son:

- ***Difusor policilíndrico variable en un rango de difusión en función de la frecuencia.*** Este trabajo fue realizado por los estudiantes Edgar Mauricio Perdomo y Luis Fernando Duarte en el año 2006. Ellos desarrollaron un difusor policilíndrico variable por medio de un mecanismo electro - mecánico que permite variar el radio de curvatura en tres posiciones de octava 500Hz, 1000Hz y 2000Hz, obteniendo una difusión de energía uniforme.
- ***Difusor QRD aplicando la teoría de fractales, concepto binario y resonador de Helmholtz multisintonía.*** Este trabajo fue desarrollado por el estudiante Andrés Felipe Millan en el año 2008. Se construyó el panel en madera utilizando la teoría fractal y ubicando en los extremos del panel resonadores de Helmholtz. Por motivos explicados en el trabajo no se pudo aplicar el concepto binario para su diseño.
- ***Diseño y construcción de un panel de difusión numérico bidimensional.*** Este proyecto de grado fue realizado por el estudiante Juan Gabriel Cabrera en el año 2008. Por medio del concepto matemático de fractales se llegó a la construcción de un panel con un ancho de banda extendido que se puede aplicar en cualquier tipo de recinto.
- ***Diseño, elaboración y medición de un panel absorbente de sonido con materiales de diseño.*** Este trabajo de grado fue elaborado por Giovanni Almanza y Daniel Lascano en el año 2006. Construyeron un panel absorbente hecho de diferentes fibras de

desechos y por medio de las mediciones se encontró que tenía elevados coeficientes de absorción para las frecuencias medidas.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el acondicionamiento acústico de recintos se necesita que estos cumplan con ciertos parámetros de diseño, dependiendo su finalidad de uso, ya sean control rooms de estudios de grabación, mezcla o mastering, teatros, auditorios, etc. De la misma manera, es necesario crear un grado de difusión y absorción para que el oyente perciba el sonido de forma correcta y además agradable. En algunas ocasiones el ingeniero de sonido se enfrenta con limitaciones de espacio para trabajar e implementar sus diseños, ya que los difusores y absortores, especialmente los diseñados para bajas frecuencias ocupan demasiado espacio, imposibilitando al ingeniero para generar una difusión de rango extendido y una absorción efectiva. Es preciso por esta razón, dar una solución a la necesidad de crear difusión y absorción simultáneas por medio de un solo dispositivo (abfusor) para la optimización de espacios y así dar una solución efectiva Vs. el espacio disponible. Por lo tanto, es importante preguntarse:

¿Qué dispositivo acústico puede absorber y difundir el sonido al mismo tiempo y además solucionar las limitaciones de espacio a las que se enfrentan los ingenieros de sonido en sus diseños acústicos?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Para que un diseño acústico sea exitoso se debe empezar por la correcta elección de forma y volumen del recinto, además de un tratamiento acústico a sus superficies. Este tratamiento consiste en una adecuada distribución de materiales absorbentes, paneles difusores y superficies reflejantes. “Los absortores y los difusores tienen un papel que desempeñar en un buen diseño acústico. Ellos tienen una función complementaria, lo que significa que cuando se utilizan adecuadamente, se puede conseguir una mejor acústica”³.

³ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 24.

Al utilizar difusores y absortores en un diseño acústico se están evitando posibles distorsiones acústicas, ecos, coloraciones y cambios en la imagen estéreo. Al diseñar un dispositivo que cumpla al mismo tiempo la función de absorber y difundir sonido (abfusor), se está solucionando otro problema, aparte de los mencionados anteriormente, el problema de la limitación del espacio. En recintos pequeños como estudios de grabación, se requiere hacer un control modal de bajas frecuencias, por lo que es necesario el uso de difusores y absortores de gran tamaño y profundidad, que a la hora de aplicarlos se tienen que dejar a un lado, por la limitación del espacio y los costos que puede generar la instalación de estos elementos de gran tamaño.

Combinando algunas de las teorías y conceptos existentes para el diseño de difusores y absortores se llegará al diseño del panel abfusor. Además de generar un nuevo concepto y aportar al campo de la acústica arquitectónica, se dará pie para que se siga trabajando en esta área y poner un precedente para futuras investigaciones.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un panel abfusor que cumpla con la función de absorber y difundir el sonido y al mismo tiempo optimice espacio.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Definir las teorías y conceptos que se utilizarán para el diseño del abfusor.
- Diseñar un panel abfusor combinando las teorías y conceptos definidos previamente.
- Construir el panel abfusor según el diseño y cálculos realizados.
- Medir el patrón polar, coeficientes de difusión y de absorción del panel abfusor.
- Determinar el funcionamiento y eficacia del panel.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 Alcances

- Incentivar a que en el programa de ingeniería de sonido de la Universidad San Buenaventura y en Colombia se siga investigando en este campo de la acústica y se pueda llegar a innovar en la creación de paneles abfusores para la optimización de espacios.
- Poder comercializar el panel abfusor, como un elemento útil para el acondicionamiento acústico de espacios.

1.5.2 Limitaciones

- Falta del recinto acústico necesario para la medición de coeficientes de difusión (Cámara anecóica).
- Inexistencia del recinto acústico adecuado para la medición de coeficientes de absorción (cámara reverberante).
- Escasez de información de las teorías y conceptos que han sido desarrollados recientemente para el diseño de difusores y absortores.

2. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se dan las bases teóricas que respaldan la solución al problema planteado. Aquí se van a relacionar el conocimiento básico existente con el conocimiento especializado en el tema. Además contiene información acerca de la normatividad empleada para el desarrollo del proyecto.

2.1 MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL

2.1.1 Conceptos básicos

La difusión es el efecto de redistribuir la energía espacial y temporalmente, esta energía incide sobre un elemento que es el responsable de la difusión y que recibe como nombre Difusor. Este fenómeno consiste en que un a onda sonora incide sobre una superficie y esta misma es reflejada en múltiples direcciones, cada una con menos energía de la que tenía originalmente.

El coeficiente de difusión “Es la medida de la uniformidad del sonido reflejado. El propósito de este coeficiente es permitir el diseño de los difusores, y también acústicamente permite comparar el rendimiento de las superficies para el diseño de habitación y especificaciones de desempeño.”⁴.

El patrón polar de difusión es gráfico que muestra las características direccionales del panel difusor. Es la representación de la energía reflejada por el difusor en cada dirección del espacio a cada frecuencia de interés. Cuando el patrón polar forma un semicírculo completo quiere decir que el difusor tiene un buen funcionamiento. El patrón polar de radiación cambia en función del tiempo dada una excitación transitoria.

⁴ COX, Trevor y D`ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 128.

Un difusor es un “Dispositivo o superficie física que causa la difusión del sonido.”⁵ Su función consiste en eliminar reflexiones indeseables que se producen cuando el sonido incide directamente sobre las superficies de la sala, evitando coloraciones y generando un sonido mas natural.

La absorción es “La reducción de la energía asociada a las ondas sonoras, tanto en su propagación a través del aire como cuando inciden sobre cualquier superficie. Dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a un absorción producida por: el público y las sillas, los materiales absorbentes, superficies limites susceptibles en entrar en vibración, aire y materiales rígidos y no porosos.”⁶

El coeficiente de absorción es la fracción de la energía sonora que es absorbida en cualquier superficie. Tiene una valor teórico entre 0 y 1 y varía con la frecuencia y el ángulo de incidencia de la de sonido.

Un Absorbente es el material utilizado en el acondicionamiento acústico de recintos, por la propiedad que tiene para absorber la mayor parte de la energía que incide y reflejar un porcentaje mínimo de esa energía. Al introducir este tipo de materiales en un recinto se disminuye el tiempo de reverberación que aporta a que haya una mejor inteligibilidad de la palabra, se evitan reflexiones indeseadas y coloraciones.

Entre los materiales absorbentes encontramos: Materiales resonantes, materiales porosos, absorbentes en forma de panel o membrana y absorbente por resonador de Helmholtz.

El abfusor es una superficie hibrida que tiene las cualidades de absorber y difundir el sonido al mismo tiempo.

2.1.2 Difusión del sonido

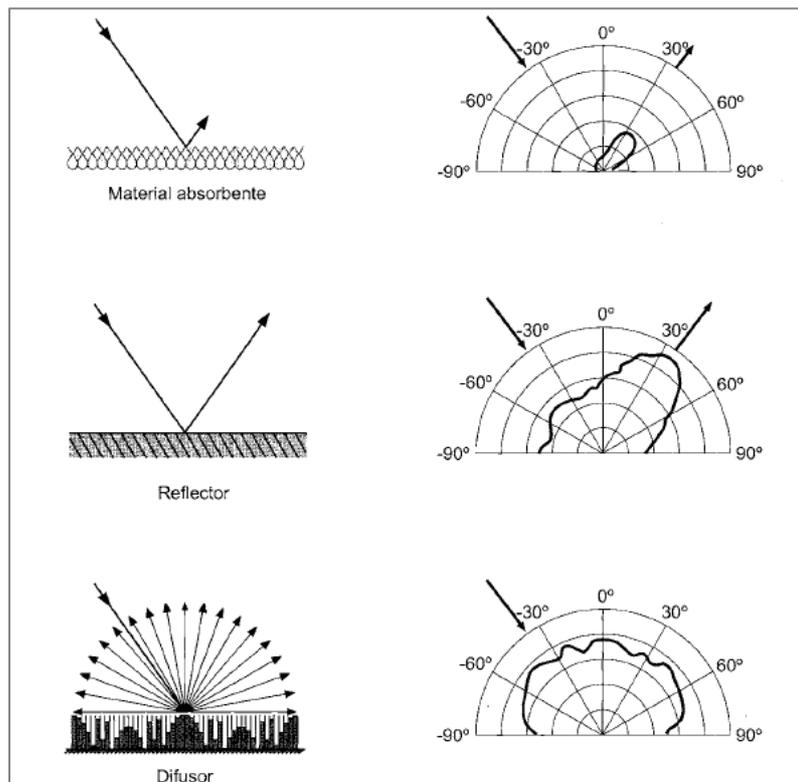
Para lograr difusión en un recinto es necesario incluir dentro de sus materiales elementos diseñados específicamente para difundir la energía sonora de forma uniforme y en diversas direcciones.

⁵ EVEREST, Alton y POHLMANN, Ken C. Master handbook of acoustics. Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, 2009. p. 483.

⁶ CARRION ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p 71.

En la siguiente figura, extraída del libro: “Diseño acústico de espacios arquitectónicos” se presenta una comparación entre el efecto producido sobre una onda sonora incidente por un material absorbente, por un reflector y por un difusor.

Figura 1. Comparativa entre los efectos de absorción, reflexión especular y difusión del sonido.



Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 123.

De la figura anterior se puede deducir que en el caso del material absorbente, la energía que se refleja en comparación a la energía incidente es mucho menor. En el caso del elemento reflector, la energía reflejada es mayor respecto a la energía incidente y esta concentrada en dirección de la reflexión especular. Y por ultimo en el caso del elemento difusor, la energía reflejada también es mayor que la energía incidente, pero a comparación del elemento reflector, la energía esta repartida uniformemente en múltiples direcciones y no solo en una misma dirección.

“La existencia de difusión del sonido en salas de concierto significa que la energía de campo reverberante llegará a los odios de los espectadores por un igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y, por lo tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente. Cuanto mayor sea el grado de impresión espacial, mejor será la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto en cuestión.”⁷

La difusión también es utilizada para eliminar problemas que pueden aparecer tanto en salas de concierto, como en cualquier otro tipo de recinto acústico como estudios de grabación o salas de conferencias entre otros. Algunos de los problemas que se pueden presentar son coloraciones, deslazamientos de la fuente sonora, ecos o focalizaciones de sonido.

“Si bien cualquier superficie produce un cierto grado de difusión la existencia de ornamentación, nichos, irregularidades y relieves en las superficies de una sala provoca un notable incremento de la difusión. Es el caso de las salas de concierto clásicas, repletas de molduras decorativas, estatuas y techos artesonados.”⁸ Es por ello que en la actualidad existen difusores contruidos a base de superficies irregulares, de acuerdo con secuencias matemáticas previamente fijadas. De todas formas, hay que tener en presente que solamente existe una óptima difusión en una banda de frecuencias limitada, y que dicha banda depende de las dimensiones del difusor.

2.1.2.1 Difusores policilíndricos

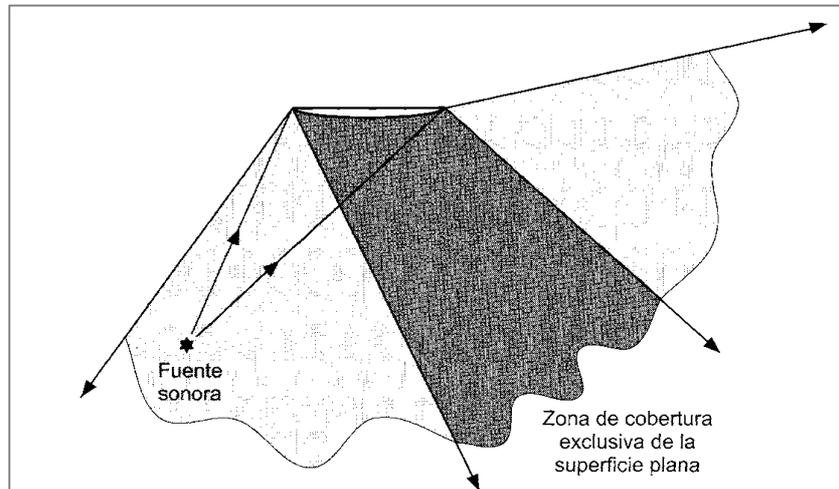
Este tipo de difusores consiste en un conjunto de superficies con forma convexa y de un material que sea reflejante (usualmente en madera) dispuestas secuencialmente y cuyo radio de curvatura no es mayor a 5 metros.

Las superficies convexas con un radio de cobertura superior a los 5 m actúan como reflectores de sonido, es decir, como si fueran superficies planas. La diferencia entre ambas estriba en que la zona de cobertura es mayor y por tanto, el nivel asociado a cada reflexión es menor. Al reducir el radio de cobertura por debajo de los 5 m, la zona de cobertura aumenta de tal manera que el sonido reflejado ya no puede ser concentrado sobre la zona de público.

⁷ ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 124.

⁸ ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 124.

Figura 2. Comparativa entre las zonas de cobertura asociadas a un reflector plano y a una superficie convexa integrante de un difusor policilíndrico.



Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 124.

2.1.2.2 Difusores de Schroeder

Estos difusores fueron un gran invento ya que antes de estos no existía un método predecible de difusión. Antes de los difusores de Schroeder solo existía un tipo de difusión no optimizada, que ayudaba en gran medida en el acondicionamiento acústico de espacios pero no era algo preciso. Estos difusores están basados en secuencias matemáticas. Los difusores de Schroeder se denominan genéricamente RPG ("Reflection Phase Grating"). Los difusores RPG más utilizados son los difusores MLS (Maximun Lenght Sequence), los QRD (Quadratic Residue Diffuser) y los PRD (Primitive Root Diffuser)

a) Difusores MLS

Los difusores MLS están basados en secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas como su nombre lo indica de longitud máxima, que solo pueden adquirir valores de -1 y +1.

Esta superficie difusora se crea partiendo de una superficie lisa hecha de un material reflejante, se divide en tramos de igual ancho y a cada tramo se le asigna un valor de la

secuencia pseudoaleatoria. Si el valor es -1, el tramo queda intacto, y si el valor es +1 se crea una ranura en el espacio ocupado por ese tramo.

El ancho (W) y la profundidad (d) de cada tramo se determinan por las siguientes fórmulas:

Ecuación 1. Ancho y profundidad de cada tramo para un difusor MLS.

$$W = \lambda/2$$

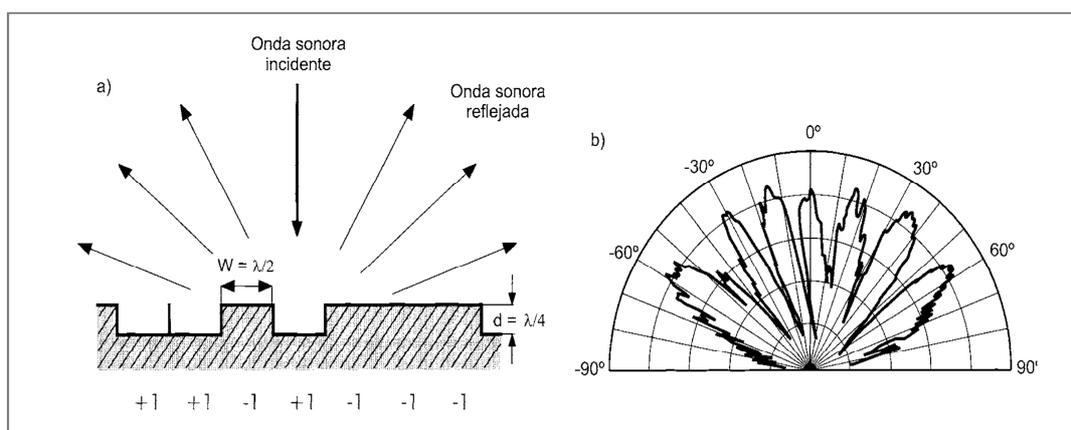
$$d = \lambda/4$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 390.

Donde λ es la longitud de onda de la frecuencia a la que se quiere diseñar el difusor.

Este tipo de difusor solo tiene un óptimo funcionamiento en el rango de una octava y tiene menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD, por lo que se podrían instalar en recintos donde se quiera tener un buen contenido en frecuencias bajas como lo son las salas de conciertos. Los difusores MLS son muy pocos utilizados en la práctica.

Figura 3. Difusores MLS: a) Perfil de un difusor; b) diagrama de difusión a la frecuencia de diseño.



Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 120.

b) Difusores QRD

Los difusores QRD reciben su nombre porque están basados en secuencias matemáticas de residuos cuadráticos (Quadratic Residue Diffiser). Existen dos tipos de difusores QRD: Unidimensionales y bidimensionales. Este funcionamiento de este tipo de difusores esta basado en el principio de interferencia entre las ondas sonoras. Cuando dos ondas se superponen, las presiones de las ondas sonoras se suman. Si las ondas tienen la misma amplitud y la misma fase, la amplitud se dobla (interferencia constructiva). Y sin ambas ondas tienen la misma amplitud pero una de ellas está desfasada 180° , la presión resultante es cero (interferencia destructiva).

• Unidimensionales

“Los difusores unidimensionales son los más utilizados a nivel práctico, tanto en salas de conciertos como en estudios de grabación. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Generalmente, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas) que producen, en un determinado margen de frecuencias, una dispersión o difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras.”⁹

El funcionamiento de un difusor QRD consiste en que cuando una onda incide en una de las ranuras, esta se propaga por interior hasta llegar al fondo y ésta se refleja y viaja en sentido contrario hacia el exterior de la ranura. La nueva fase de la onda que entró en la ranura depende del recorrido y la profundidad de la misma. Ya que las ranuras tienen profundidades distintas las ondas que inciden sobre la superficie difusora, al salir van tener fases distintas, creando un fenómeno de interferencia entre ondas y de esta interferencia depende la distribución de la energía en diferentes direcciones del espacio.

Para el diseño de difusores QRD unidimensionales, primero que todo debemos definir los siguientes parámetros:

- f_{\max} : Frecuencia máxima en la que se quiere lograr difusión.
- F_0 : Frecuencia mínima en la que se quiere lograr difusión.
- m_{\max} : Grado de difusión a la frecuencia f_0 (número entero).

⁹ ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p.121.

La secuencia que genera las profundidades se obtiene a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 2. Expresión generadora de la secuencia para QRD.

$$S_n = n^2 \bmod P$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 390.

Donde P es un número primo, n es un número entero que va desde 0 hasta (p-1) y mod es la operación matemática “módulo”.

La secuencia que resulta es periódica con un periodo P. El ancho de las ranuras (W), que es el mismo para todas se determina a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 3. Ancho de las ranura - Difusor QRD.

$$W = \frac{C}{2 f_{max}} - T$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 390.

Donde C es la velocidad de propagación del sonido (en mm/s), W es el ancho de las ranuras (en mm), T es el espesor de los divisores (en mm) y fmax es la frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión.

Si observamos la fórmula de anchura, la fmax es inversamente proporcional a el ancho de las ranuras, por lo tanto entre más alta queramos la frecuencia mas angostas van a ser las ranuras.

Los valores de T comúnmente se encuentran en el rango entre 1.5 y 5 mm. Cuanto más delgados sean los separadores, mayor va a ser la absorción en frecuencias bajas. En la práctica este valor debe ser 15 veces menor que el ancho de las ranuras (w).

El periodo (P), se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

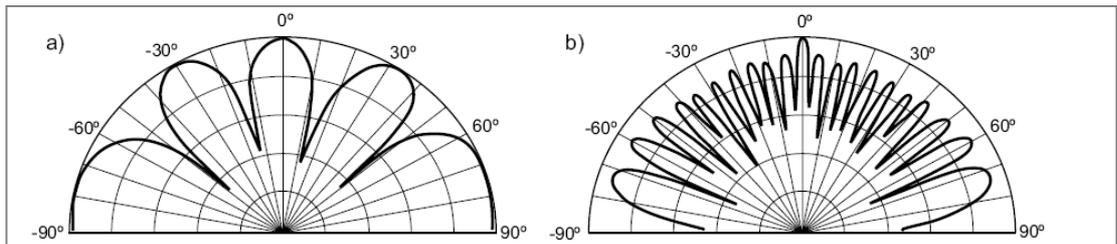
Ecuación 4. Periodo - Difusor QRD.

$$P = \frac{2m_{max}f_{max}}{f_0}$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 392.

Como se puede observar en la ecuación anterior, entre mayor se desee el grado de difusión (m_{max}) o mayor se quiera el rango de frecuencias en el que funcione el difusor, mayor deberá ser el número de ranuras por periodo P. se debe tener en cuenta que P debe ser un número primo. Si una vez fijados f_{max} , f_0 y m_{max} y reemplazados en la fórmula anterior da como resultado un P que no es un número primo, P se deberá aproximar al número primo próximo más elevado.

Figura 4. Diagrama de difusión, a la frecuencia de diseño f_0 , correspondientes a 2 periodos de un difusor unidimensional QRD, con a) $p=17$; b) $p=89$.



Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 392.

Una vez determinada el valor de p por medio de la ecuación 4, es posible calcular la profundidad real (d_n) de cada ranura por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Profundidad de las ranuras - Difusor QRD.

$$d_n = \frac{s_n c}{2P f_0} \text{ (en cm)}$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 392.

donde c se expresa en cm/s, y s_n es la secuencia generadora definida anteriormente.

Hay que tener en cuenta que la relación entre la f_{\max} y f_0 debe ser menor o igual a 8, es decir un rango útil de frecuencias de tres octavas máximo, fuera de este margen el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones especulares.

Un difusor QRD unidimensional finalizado se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 5. Difusor QRD unidimensional.



Fuente: página web <http://www.studio-22.com/acustica/qrd1.jpg>.

De todo lo explicado anteriormente se puede decir que a medida que la frecuencia más alta a la que se produce difusión se aumenta, se disminuye la anchura de las ranuras. Y a medida que la frecuencia más baja a la que se produce difusión disminuye, aumenta la máxima profundidad. Existe un límite entre esta relación, ya que se ha comprobado que las ranuras muy estrechas y profundas producen un exceso de absorción acústica. Este límite en la práctica es de tres octavas. Fuera de este margen el difusor se empieza a comportar como una superficie plana.

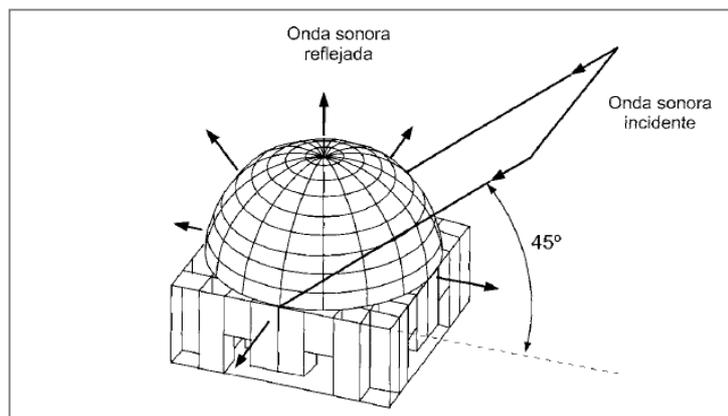
- **Bidimensionales**

Los difusores bidimensionales QRD aparecen como una generalización de los unidimensionales con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio.”¹⁰

En este tipo de QRD, las ranuras que se tenían en el unidimensional se reemplazan por pozos dispuestos paralelamente con diferentes profundidades y de forma cuadrada.

La difusión de energía producida por un difusor QRD bidimensional se puede observar claramente en la figura 4.

Figura 6. Difusión producida por un difusor bidimensional QRD de una onda sonora incidente con un ángulo de 45° respecto a su superficie.



Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 113.

Las ecuaciones utilizadas para el diseño de los difusores QRD bidimensionales son las mismas utilizadas para el diseño de los QRD unidimensionales, con excepción de la expresión generadora de la secuencia que si cambia y que se encuentra expresada en la siguiente ecuación:

¹⁰ ISBERT, Antoni, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p 133.

Ecuación 6. Expresión generadora de secuencia - Difusor QRD bidimensional.

$$s_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod P$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 113.

donde P es el número primo (3,5,7...) y (m y n) son número enteros que van desde 1 a (P-1).

La profundidad real de las ranuras se halla con la ecuación 2, la misma utilizada en el diseño de difusores QRD bidimensionales.

Un difusor QRD bidimensional finalizado se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 7. Difusor QRD bidimensional.



Fuente: Página web: <http://www.monografias.com/trabajos15/difusores-rpg/Image3945.jpg>.

c) Difusores PRD

Los difusores de raíces primitivas PRD (“Primitive Root Diffusor”) son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad de cada ranura se obtiene a partir de la siguiente ecuación generadora:

Ecuación 7. Expresión generadora de secuencia - Difusor PRD.

$$S_n = g^n \bmod P$$

Fuente: libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, p 134.

Donde P es un número primo, g es la raíz primitiva de P, n es un número entero que va desde 1 a (P-1) y mod es la operación matemática “módulo”.

Para reconocer que g es una raíz primitiva, es necesario que el número de residuos distintos generados por la expresión generadora de secuencia (ecuación 7) se iguala a p-1. Las raíces primitivas más comúnmente utilizadas son 2 y 3.

A diferencia que los difusores QRD, los PRD no tienen simetría dentro de cada periodo. “Las propiedades de este tipo de difusores son muy parecidas a las de los difusores unidimensionales QRD, salvo por el hecho de que la energía asociada a la reflexión especular es muy baja.”¹¹

2.1.2.3 Mejoras de los difusores de Schroeder

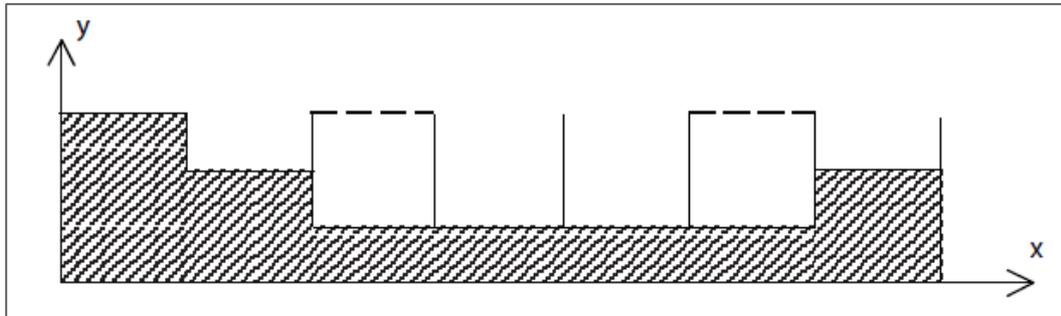
La profundidad utilizable de un difusor en un diseño es limitada por el espacio. Teniendo en cuenta que la longitud de onda del sonido se extiende a 17 m, es imposible construir un difusor práctico que sea eficiente en un ancho de banda completo y sea óptimo para utilizar en cualquier recinto debido a su tamaño. En consecuencia a esta necesidad se realizó esta mejora con el fin de crear difusión a frecuencias más bajas.

“Un régimen alternativo es utilizar laminas perforadas para añadir masa a la impedancia de los pozos, y así reducir las frecuencias resonantes de los mismos. Esto puede reducir la frecuencia de diseño”¹². Un ejemplo de este dispositivo se encuentra en la Figura 8, donde los pozos más largos, se acortaron gracias a las perforaciones.

¹¹ ISBERT, Antoni, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 135.

¹² COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 314.

Figura 8. Sección transversal de un difusor de Schroeder usando láminas perforadas.



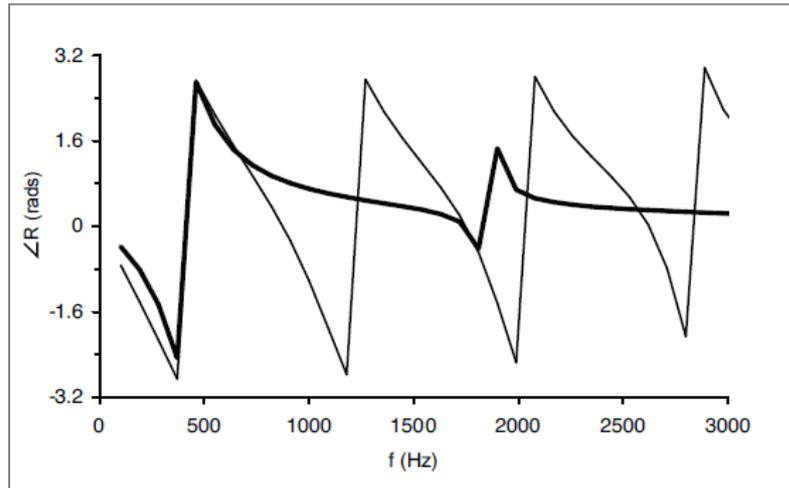
Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 313

“Tal acercamiento fue logrado por Hunecke en cuanto a la difusión, usando la microperforación, y para la absorción por Fujiwara et al. y Wu et al. Por medio de la utilización de diámetros mas grandes. Para un difusor es importante que el tamaño de las perforaciones no sea demasiado pequeño, de otra manera podrían ocurrir perdidas significativas”.¹³

El principio tenido en cuenta para este diseño es que el coeficiente de reflexión de un resonador de Helmholtz y un resonador de tubos de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, son muy similares. Es decir, que el resonador de tubos de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda, por el cual crean absorción los difusores, se puede remplazar por un dispositivo de Helmholtz. En la Gráfica 1, se muestran los coeficientes de reflexión para un resonador de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda y los coeficientes de un pozo con la mitad de profundidad, pero con una placa perforada para generar la frecuencia de resonancia correcta.

¹³ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 314.

Gráfica 1. Coeficiente de reflexión de dos profundidades.

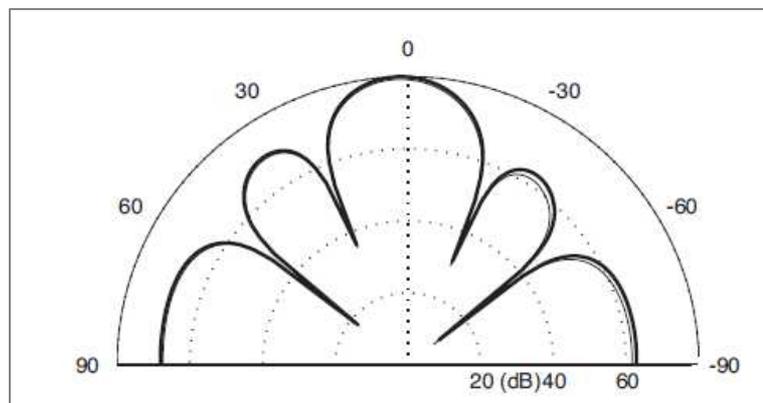


Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 314.

La línea delgada hace referencia al coeficiente de reflexión del difusor con sus profundidades normales y la línea gruesa a los coeficientes de reflexión del difusor perforado con sus profundidades acortadas.

Como se observa en la figura anterior, el coeficiente de reflexión difiere en frecuencias altas entre los dos tipos de resonadores. Por lo anterior es aconsejable solo llevar esta metodología de diseño en torno a la frecuencia específica de diseño. La Figura 9 muestra la dispersión en la frecuencia de diseño, tanto para el resonador de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda (difusor normal) y el resonador de Helmholtz (difusor perforado con las profundidades de los pozos reducidas).

Figura 9. Difusión de un QRD con N= 7.



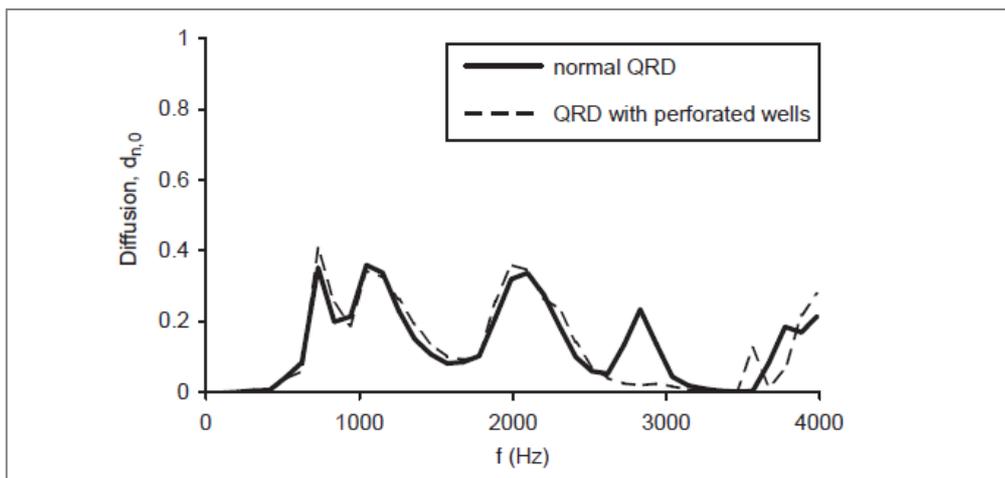
Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 314.

La línea delgada hace referencia a la difusión de un QRD normal y la línea gruesa es la difusión producida por un QRD con los pozos perforados y las profundidades reducidas.

“El difusor de Schroeder con perforaciones tiene aproximadamente la mitad de la profundidad del difusor original, de modo que se ha hecho un ahorro considerable del espacio”.¹⁴

Para la realización de este cálculo es importante incluir la impedancia de radiación del resonador de $\frac{1}{4}$ de onda. Este término es constante para la mayoría de pozos y por lo tanto no afecta la difusión. En la Gráfica 2 se muestra el coeficiente de difusión normalizado, mostrando que para muchas frecuencias el rendimiento es similar entre el dispositivo perforado y el difusor de Schroeder normal. A frecuencias más altas que lo indicado, la difusión del dispositivo perforado se vuelve especular, por lo que se debe ser cuidadoso en el diseño y en la aplicación que se necesita.

Gráfica 2. Difusión de un QRD con $N=7$.



Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 315.

¹⁴ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 314.

2.1.3 Absorción del sonido

En cualquier tipo de recinto, la disminución de la energía sonora que se propaga a través del aire o cuando ésta incide sobre las superficies límites del recinto, determina la calidad acústica del mismo.

Esta reducción de energía puede ser producida por:

- El público y las sillas
- Materiales absorbentes y elementos absorbentes selectivos (resonadores).
- Superficies límites de la sala que podrían entrar en vibración (por ejemplo, puertas, ventanas, paredes separadoras, etc.)
- El aire.
- Materiales constructivos del recinto utilizados para el techo, paredes y pisos que son rígidos y no porosos (por ejemplo, hormigón, cemento, baldosa, etc.).

2.1.3.1 Materiales absorbentes

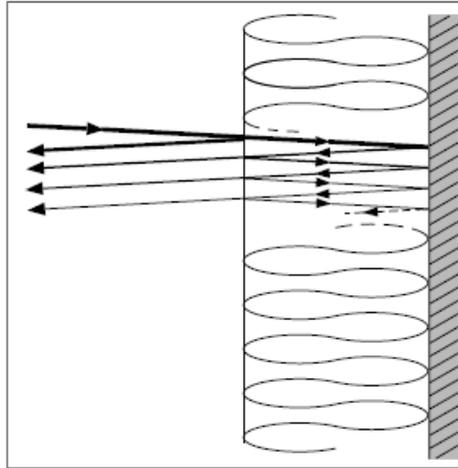
Estos se utilizan generalmente para conseguir algunos de los siguientes objetivos:

- Lograr tener el tiempo de reverberación necesario, según lo requiera el recinto (depende de la actividad a la cual está dedicado el recinto).
- Eliminación de ecos.
- Reducción del nivel de la presión sonora en espacios ruidosos. (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.)

Estos materiales tienen un gran número de poros por donde la onda sonora atraviesa y puede penetrar. Cuando la onda sonora entra en contacto con las paredes de estos poros (canales) se produce la transformación de esta energía en calor, por lo tanto hay una disminución de la energía sonora que ingresó. Entre mayor número de canales tenga el material (más poroso), mayor será la absorción producida.

En la siguiente figura se representa el proceso de disipación de energía en un material poroso y homogéneo, situado delante de una pared rígida.

Figura 10. Proceso de disipación de energía al interior de un material poroso.



Fuente: Libro Diseño acústico de espacios arquitectónicos. p. 76.

“La onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior.”¹⁵ Este mecanismo de absorción es característico de todos los materiales porosos, desde que los poros tengan acceso desde el exterior. En su mayoría estos materiales están formados por sustancias fibrosas o granulares, las cuales tienen que pasar por un proceso de prensa o tejido para que tengan que quedar compactas. Los materiales absorbentes que son comerciales de este tipo están hechos a partir de:

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

¹⁵ ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p. 76.

2.1.3.2 Elementos absorbentes selectivos (Resonadores)

Estos elementos absorbentes son utilizados para obtener absorción en frecuencias bajas y reducir el tiempo de reberveración en las mismas. Estos elementos presentan una curva de absorción con un valor máximo en una frecuencia determinada (frecuencia de resonancia), que está situada generalmente por debajo de los 500 Hz. Existen varios tipos de resonadores:

- De membrana o diáfragma.
- De cavidad simple (Helmholtz).
- De múltiple cavidad a base de paneles perforados o ranurados.
- De múltiple cavidad a base de listones.

a) Resonador de membrana

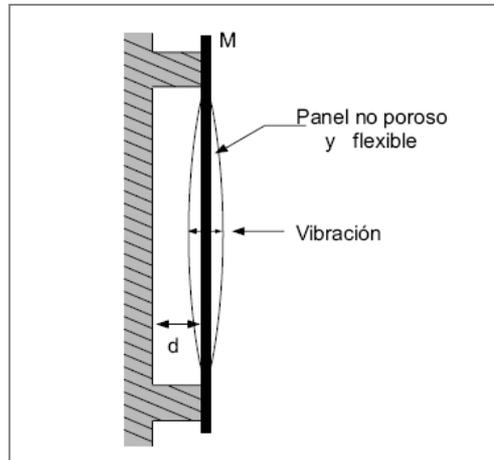
Este está formado por una superficie de un material liso y flexible, que no sea poroso, y se debe ubicar a cierta distancia de una pared rígida, con el objetivo de dejar una cámara de aire entre la superficie y la pared.

“Cuando una onda sonora incide sobre el panel, éste entra en vibración como respuesta a la excitación producida. Dicha vibración, cuya amplitud depende principalmente de la frecuencia del sonido y es máxima a la frecuencia de resonancia, provoca una cierta deformación del material y la consiguiente pérdida de una parte de la energía sonora incidente, que se disipa en forma de calor. Por otro lado, aunque el panel también produce una pequeña radiación, a efectos prácticos resulta ser totalmente inaudible.”¹⁶

A continuación se encuentra una imagen del esquema básico de un resonador de membrana constituido por un panel de masa M , separado a una distancia d de la superficie rígida:

¹⁶ ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Ediciones UPC, 1998, p. 88.

Figura 11. Esquema básico de un resonador de membrana.



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 89.

Se parte del hecho que a frecuencias bajas de cumple la siguiente relación de $d \ll \lambda$.

“El aire de la cavidad se comporta como un muelle, cuya rigidez aumenta a medida que el volumen de la misma disminuye (distancia “d” menor). Dicha rigidez del aire junto con la masa del panel constituyen un sistema resonante que presenta un pico de absorción a la frecuencia de resonancia f_0 .”¹⁷

La expresión utilizada para el cálculo de la frecuencia de resonancia a la cual actúa el resonador de membrana es la siguiente:

Ecuación 8. Frecuencia de resonancia del resonador de membrana.

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ (en Hz)}$$

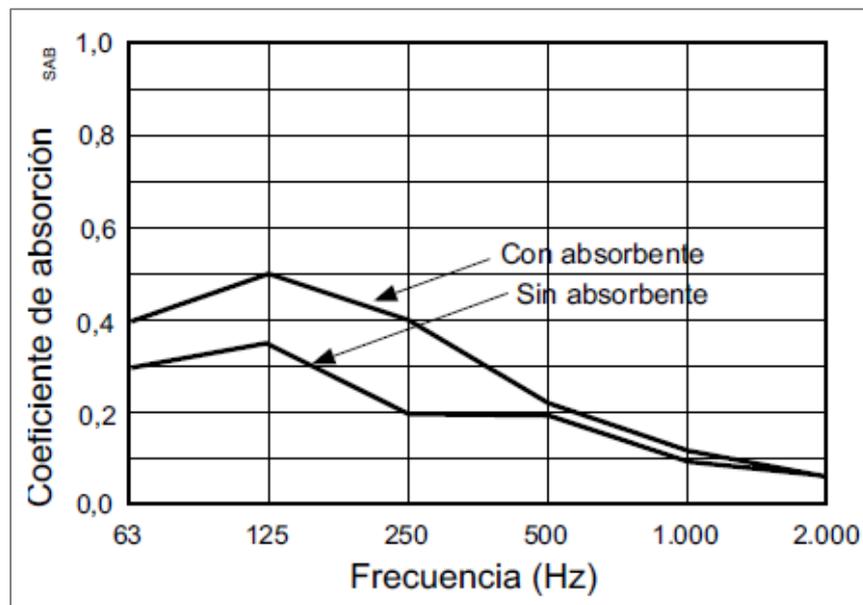
Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 89.

¹⁷ ISBERT, Antoni, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Ediciones UPC, 1998, p. 89.

Donde M es la masa por unidad de superficie del panel (en Kg/m^2) y d es la distancia del panel a la pared rígida (en cm).

A forma de ejemplo, en la Gráfica 3 se muestran las curvas de absorción de un resonador de membrana de un panel contrachapado de 3 mm de espesor y con $1,8 \text{ kg}/\text{m}^2$ de masa por unidad de superficie montado, montado a una distancia de 4,4 cm de la pared rígida, con y sin absorbente en la cavidad de aire.

Gráfica 3. Coeficientes de absorción de un resonador de membrana con $M=1,8 \text{ Kg}/\text{m}^2$ y $d=4,4 \text{ cm}$ (con y sin absorbente).



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 90.

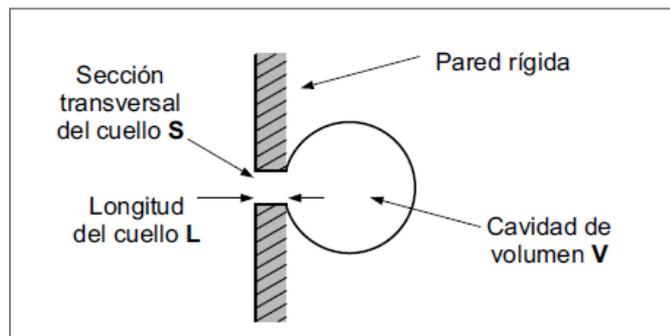
Según se puede observar en la imagen anterior, se puede decir que el hecho de agregar el material absorbente al resonador, produce un aumento notable en la absorción y da una curva más suavizada. También con este ejemplo se puede demostrar que la fórmula de cálculo de la frecuencia de resonancia que se dio anteriormente es aproximada, ya que este panel se había diseñado a una frecuencia de resonancia de 213 Hz y el valor real medido es de 125 Hz.

b) Resonador simple de cavidad (Helmholtz)

Este tipo de resonador consiste en una cavidad de aire cerrada que esta comunicada a la sala a través de una abertura o cuello estrecho.

En la Figura 12 se muestra el esquema basico de un resonador de este tipo.

Figura 12. Esquema básico de un resonador simple de cavidad montado en una pared.



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 92.

El volumen de la cavidad se indica con la letra V, la sección transversal con la letra S y por ultimo la longitud del cuello se representa con la letra L.

La expresión teórica de cáñculo de f_0 es la siguiente:

Ecuación 9. Frecuencia de resonancia del resonador simple de cavidad.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (en Hz)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 92.

donde:

S= seccion transversal del cuello (en cm^2)

L= longitud del cuello (en cm)

V= volumen de la cavidad (en cm³)

Hay que tener en cuenta que la longitud efectiva del cuello L es mayor que la longitud real L, esto se debe a que la masa efectiva del aire contenido en el resonador es mayor que la masa que le correspondería al volumen que ocupa. Si la abertura es circular el factor de corrección es el siguiente:

Ecuación 10. Factor de corrección de la longitud del cuello L.

$$L_c = 2(0,8 a) = 1,6 a$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 93.

Por consiguiente, la expresión final para el cálculo de f_0 es :

Ecuación 11. Frecuencia de resonancia corregida de un resonador de cavidad simple.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{L'V}} \text{ (en Hz)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 93.

donde :

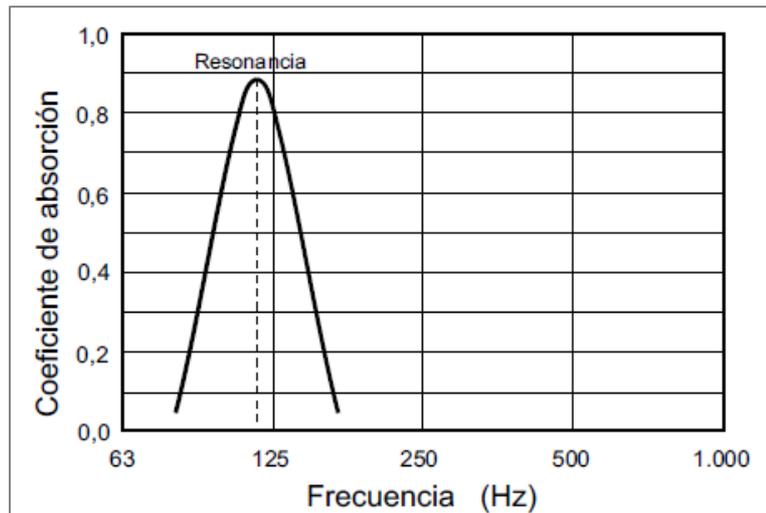
Ecuación 12. Longitud del cuello corregida.

$$L' = L + L_c = L + 1,6 a$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 93.

En la Gráfica 4 se muestra como es el comportamiento de la absorción con respecto a la frecuencia para este tipo de resonadores.

Gráfica 4. Evolución del coeficiente de absorción respecto a la frecuencia de un resonador de cavidad simple.

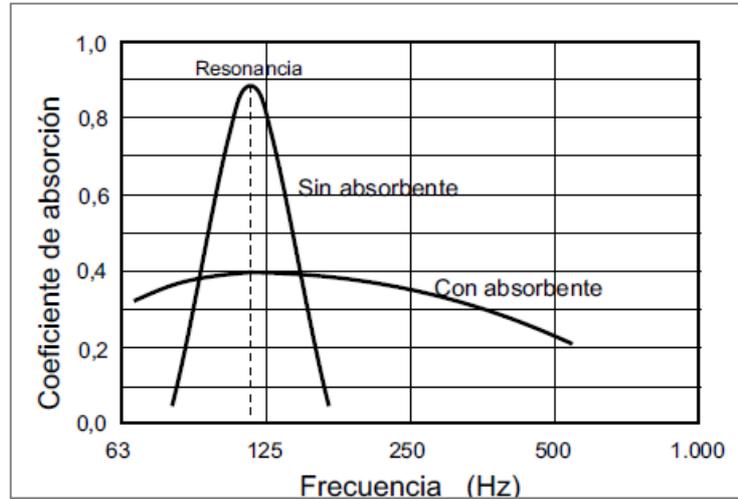


Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 94.

Según se puede observar, el comportamiento de este tipo de resonadores es muy selectivo, es decir, presenta una absorción muy alta a la frecuencia de resonancia, con un decaimiento muy brusco en cuanto la frecuencia considerada se aparta de la frecuencia de resonancia.

Si se quiere suavizar la curva de absorción, se debe rellenar con material absorbente la cavidad de aire. De esta forma se consigue absorción en un rango más amplio de frecuencias, aunque con una absorción menor en la frecuencia de resonancia. En la Gráfica 5 se muestra una nueva gráfica comparando el comportamiento del resonador con o sin absorbente en la cavidad de aire.

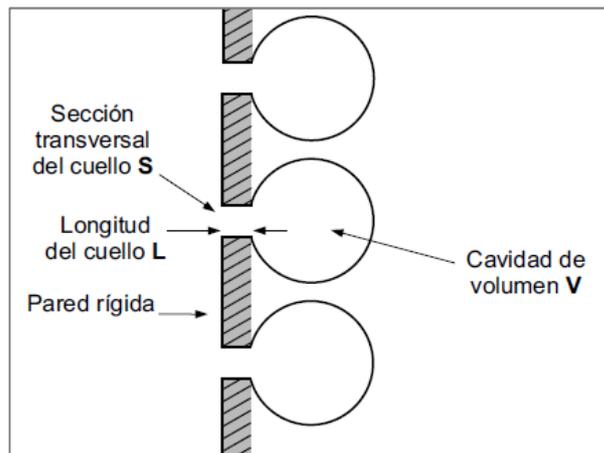
Gráfica 5. Comportamiento de absorción de un resonador de cavidad simple con y sin absorbente.¹⁸



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 94.

El uso de un resonador individual no es comunmente utilizado, ya que la superficie ocupada por el mismo en una sala es demasiado pequeña. Mas bien se suele utilizar una agrupación de resonadores simples dispuestos de la forma indicada en la Figura 13.

Figura 13. Agrupación de resonadores simples.



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 95.

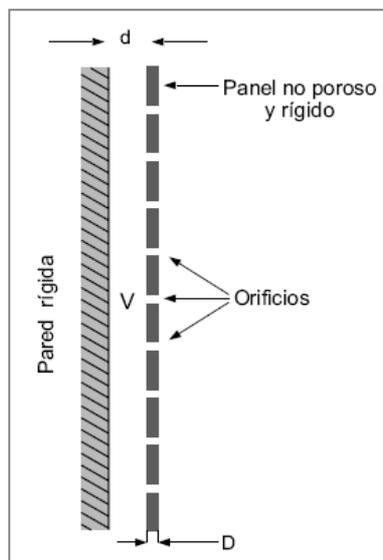
¹⁸ ISBERT, Antoni, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Edicions UPC, 1998, p 94

Este tipo de resonador es comunmente utilizado para eliminar los modos propios mas significativos que causan el conocido efecto de coloración, en recintos pequeños como por ejemplo estudios de grabación y locutorios.

c) Resonador multiple de cavidad a base de paneles perforados o ranurados

Estan formados por una superficie rigida y no porosa de espesor D , la cual tiene unas perforaciones circulares o ranuras. Esta superficie esta montada a una cierta distancia d de una pared rígida, esto con el fin de encerrar un volumen de aire entre la pared y la superficie perforada. En la Figura 14 se encuentra el esquema básico de un panel perforado.

Figura 14. Esquema básico de un panel perforado.



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 95.

La expresión que se utiliza para el cálculo de la frecuencia de resonancia f_0 se encuentra a continuación:

Ecuación 13. Frecuencia de resonancia del panel perforado o ranurado.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DV}} \text{ (en Hz)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 97.

donde S es la suma de las secciones transversales de los orificios (en cm^2), D es el espesor del panel (en cm) y V es el volumen de la cavidad (en cm^3).

Ahora bien:

Ecuación 14. Volumen de la cavidad.

$$V = S_p d$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 97.

siendo S_p , la superficie del panel (en cm^2) y d , la distancia del panel a la pared rígida (en cm).

Sustituyendo la ecuación 14 en la ecuación 13, llegamos a una nueva expresión simplificada de f_0 :

Ecuación 15. Frecuencia de resonancia del panel perforado o ranurado.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{P}{Dd}} \text{ (en Hz)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 97.

donde $P = S/S_p$, S es la suma de las secciones transversales de los orificios (en cm^2) y S_p es la superficie total del panel (en cm^2).

Hay que tener en cuenta que la longitud efectiva de los orificios es mayor que la longitud real D (el espesor del panel), por lo que la expresión de la frecuencia de resonancia vuelve a cambiar un poco, también varía según si el panel es de perforaciones circulares o es ranurado.

La expresión final para la frecuencia de resonancia es:

Ecuación 16. Frecuencia de resonancia del panel perforado o ranurado.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{P}{D'd}} \text{ (en Hz)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 98.

donde D' es la longitud corregida de los orificios.

Panel perforado

Si las perforaciones están distribuidas uniformemente sobre el panel, el porcentaje de perforación p se obtiene con la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Porcentaje de perforación del panel perforado.

$$p = \frac{\pi a^2}{D_1 D_2}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 98.

donde D_1 y D_2 es la distancia que existe entre las perforaciones horizontales y verticales respectivamente.

La ecuación para halla la longitud efectiva de las perforaciones D' para panel perforado es:

Ecuación 18. Longitud efectiva de las perforaciones del panel.

$$D' = D + 1,6a \text{ (en cm)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 98.

siendo D la longitud real de las ranuras y a el radio de la ranura.

Panel ranurado

En el caso de que sean ranuras y que estén uniformemente repartidas en el panel, las ecuaciones para el diseño del panel se encuentran a continuación.

El porcentaje de perforación P :

Ecuación 19. Porcentaje de perforación del panel ranurado.

$$p = \frac{a_1 a_2}{D_1 D_2}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 99.

donde D1 y D2 es la distancia que existe entre las ranuras, horizontal y verticalmente respectivamente.

La longitud efectiva de las perforaciones:

Ecuación 20. Longitud efectiva de las ranuras del panel.

$$D' = D + 1,6a_{eq} \text{ (en cm)}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 99.

Donde a_{eq} es el radio equivalente de las ranuras:

Ecuación 21. Radio equivalente de las ranuras.

$$a_{eq} = \sqrt{\frac{a_1 a_2}{\pi}} \text{ (en cm)}$$

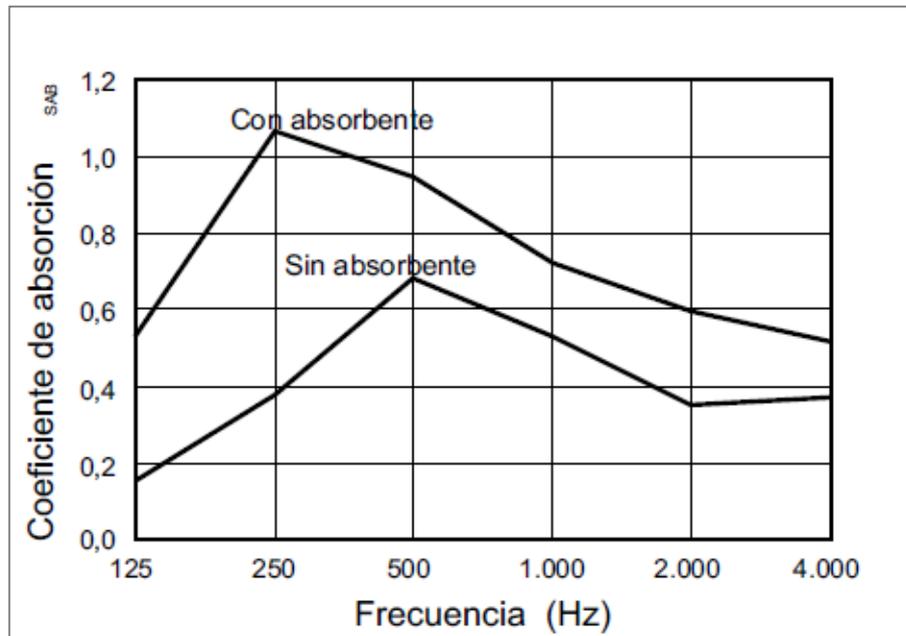
Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 99.

Debido al efecto de acoplamiento entre los diferentes orificios, ya sean perforaciones circulares o ranuras, este tipo de resonador es menos selectivo que el resonador simple. Esto quiere decir que ahora la curva de absorción en función de la frecuencia no va a ser tan selectiva en la frecuencia de resonancia, sino por lo contrario va a ser más abierta y va a absorber en un ancho de banda mayor.

Para aumentar la absorción en función de la frecuencia se debe rellenar la cavidad de aire con material poroso absorbente como lana de vidrio o lana mineral. Al añadir este material absorbente se presenta otro fenómeno y es un aumento aparente del volumen de la cavidad, y que da como resultado una disminución en la frecuencia de resonancia.

En el libro "Diseño acústico de espacios arquitectónicos" nos dan un ejemplo numérico, en la Gráfica 6 se muestra la absorción de un resonador múltiple formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado en un 18 por ciento y separado una distancia de 100 mm de la pared rígida. Se presentan dos curvas de absorción: una corresponde al resonador sin absorbente en la cavidad, y la otra pertenece al mismo resonador, pero con lana de vidrio de 80 mm de espesor en dicha cavidad. La frecuencia de resonancia f_0 teórica del resonador sin absorbente es de 550 Hz.

Gráfica 6. Coeficientes de absorción de un resonador múltiple de cavidad formado por un panel de cartón-yeso de 13 mm de espesor, perforado 18% y separado una distancia de 100 mm de la pared rígida (con y sin absorbente en la cavidad).



Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 99.

Si observamos la gráfica nos podemos dar cuenta que la frecuencia de resonancia con el absorbente se baja prácticamente a la mitad con respecto a la frecuencia de resonancia del panel sin absorbente. También se puede concluir que la absorción aumenta notablemente en todas las bandas de frecuencia cuando se agrega material absorbente dentro de la cavidad.

“Por otro lado, la colocación exacta del material absorbente dentro de la cavidad también influye en la forma de la curva de la absorción final. Cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás del panel, la absorción es relativamente poco selectiva, y a medida que dicho material se va separando del mismo, la curva se va estrechando. La absorción mas selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared rígida.”¹⁹

¹⁹ ISBERT, Antoni, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Barcelona: Edicions UPC, 1998, pag 100.

Los paneles perforados o ranurados suelen ser de alguno de los siguientes materiales:

- Madera.
- Dry-wall.
- Chapa metálica.
- Acrílico.
- Ladrillo.

2.1.4 Superficies híbridas (abfusores)

La función de un difusor es romper el frente de onda reflejado, para así difuminar el sonido en el espacio. Si bien esto puede lograrse por medio de la forma de la superficie, también puede lograrse cambiando su impedancia. Los difusores de Schroeder a menudo se interpretan como una superficie con una impedancia espacialmente variable. A lo largo de esta sección se encuentran los resultados de añadir elementos de masa a los difusores de Schroeder; además como resonadores de Helmholtz basados en rejillas de fase, generan difusión por cambios en la impedancia de la superficie y por último, como por medio de parches de absorción y reflexión se logran cambios de impedancia y así mismo difusión (Panel BAD).

2.1.4.1 Absorción de los difusores de Schroeder

Los difusores de Schroeder fueron diseñados exclusivamente para difundir el sonido en lugar de absorberlo, pero desde hace algún tiempo se ha demostrado que estos también causan absorción. Algunos estudios científicos han determinado el origen de la absorción, e incluso han mostrado la forma de convertir estos difusores en buenos absorbentes. “Por cambios en la geometría y el diseño, es posible cambiar una superficie de Schroeder, de un difusor con baja absorción a una superficie altamente absorbente.”²⁰

En el año de 1992, Fujiwara y Miyajima, midieron la absorción presentada por los difusores y llegaron a valores extremadamente altos, que iban de 0,3 a 1 y en ese momento esta absorción no pudo ser explicada. Después de un tiempo, ellos mismos

²⁰ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 232.

informaron que la calidad de la construcción era la culpable de algunos de los excesos en la absorción, por lo tanto para lograr una baja absorción es necesaria una mano de obra buena. Investigando experimentalmente las características de absorción de un difusor se encontraron valores pico de 0,5. Se demostró que inclinando el fondo de los pozos del difusor, la absorción podía reducirse.

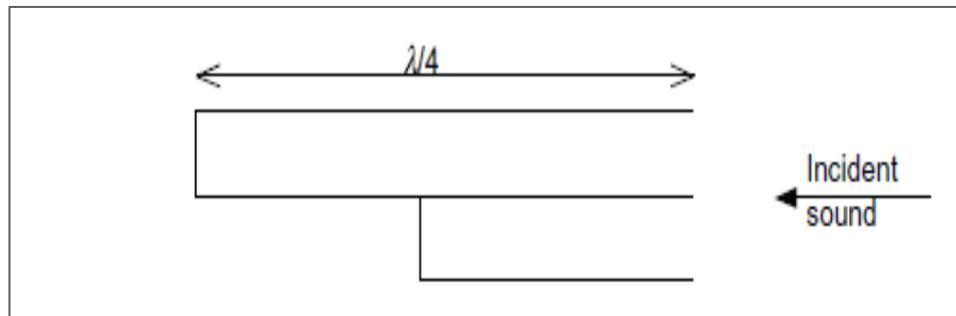
Aunque muchas veces la mano de obra deficiente puede explicar el exceso en la absorción, incluso los difusores construidos con una alta calidad pueden tener coeficientes de absorción mayores de lo esperado. Esta absorción se debe a las resonancias de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda de los pozos, pero la absorción medida es demasiado alta para ser explicada solo por esta absorción de resonancia. "Fue Kuttruff quien postuló por primera vez el flujo de energía entre los pozos como una causa probable para la absorción medida por los otros. Mechel examinado a fondo las bases teóricas para el efecto de absorción, y aunque sus estudios carecían de verificación experimental, desarrolló un modelo de predicción que fue verificado por otros."²¹ Continuando esta investigación, siguió Wu et al, que reunió el modelo de predicción realizado por Mechel con mediciones para llegar a la verificación experimental de que la alta absorción se debía al flujo de energía o a un fuerte acoplamiento entre los pozos.

Para explicar más a fondo este fenómeno, considere un tono puro incidiendo en un difusor de Schroeder. Por cuestiones de simplicidad, solo se tendrán en cuenta dos pozos vecinos. Además suponiendo que uno de los pozos entra en resonancia con el tono puro, mientras el otro pozo no resuena como se muestra en la Figura 15. "La energía en la boca del pozo que resuena será mucho mayor que el pozo que no resuena. Esto significa que habrá mucho más flujo de energía en el pozo resonante que en el pozo que no esta resonando. En consecuencia, alrededor de las entradas de los pozos hay una alta velocidad de partícula."²² Fujiwara demostró que la velocidad de partícula era 14 veces mayor en la entrada de los pozos en comparación con el campo incidente. Como el sonido se mueve al frente de las divisiones, cuando el sonido pasa de un pozo a otro, en ese momento se produce el exceso en la absorción. Esta es la fuente de la absorción adicional en los difusores de Schroeder y se genera incluso en las estructuras perfectamente construidas.

²¹ COX, Trevor y D`ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 232.

²² COX, Trevor y D`ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 235.

Figura 15. Dos pozos de un difusor de Schroeder.



Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 233

Es posible construir difusores de Schroeder para maximizar la absorción o maximizar la difusión. “Tanto la superficie usada para producir alta absorción como la utilizada para dispersar el sonido tienen la misma ascendencia, diferencias cruciales en el diseño resultan en radicales diferencias en las propiedades de absorción.”²³ La información de diseño para las dos superficies se contrasta en la Tabla 1.

²³ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 232.

Tabla 1. Diferencias constructivas entre difusores de Schroeder y absorbentes.

	<i>Absorber</i>	<i>Diffuser with little absorption</i>
Well width	Usually narrow to exploit viscous boundary layer losses.	Usually > 2.5 cm to minimize boundary layer losses.
Covering	Key to good absorption. Covering should be chosen so surface resistance is $\approx \rho_0 c$ when added to well resistance to maximize absorption.	Should not be covered. If covering unavoidable, use low flow resistivity material away from well entrances.
1D vs 2D	2D surface often gives more absorption.	2D surface gives hemispherical dispersion, 1D surface diffuses in a single plane.
Number of different depth wells, N	Determined by the need to have a sufficient number of quarter wave resonances in absorption bandwidth.	A larger N usually makes a better diffuser.
Depth sequence	Well depths should be chosen to evenly distribute well resonances across absorption bandwidth, best done using numerical optimization.	Chosen to maximize dispersion, best done using numerical optimization. Narrow period widths should be avoided.
Deepest well depth	Determines low frequency limit of absorption.	Determines low frequency limit of diffusion, except when period width is small.
Construction	Well sealed, no slits.	Well sealed, no slits.
Mass elements (addition of perforated sheets or membranes)	Can be used to lower bandwidth of absorption.	Can be used to lower bandwidth of diffusion.
Well sides	Can be rough.	Should be smooth.

Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 233

Como se indica en la tabla anterior, las mediciones muestran que las superficies 2D absorben más que las que las superficies 1D. La razón de esto probablemente se debe a dos situaciones específicas:

- a) Un mayor número de profundidades en la superficie 2D en comparación con la superficie 1D, esto significa que hay más resonancias de $1/4$ de onda en la superficie 2D, dando lugar a más frecuencias a las que se está produciendo resonancia. Esto a su vez significa más absorción en un rango más grande de frecuencias.
- b) Hay una mayor área superficial de los límites de los pozos en la superficie 2D en comparación con la superficie 1D. Es en estos límites que es donde ocurren las

pérdidas por la viscosidad. En consecuencia se espera que cuanto mayor sea el área límite, mayor es la absorción.

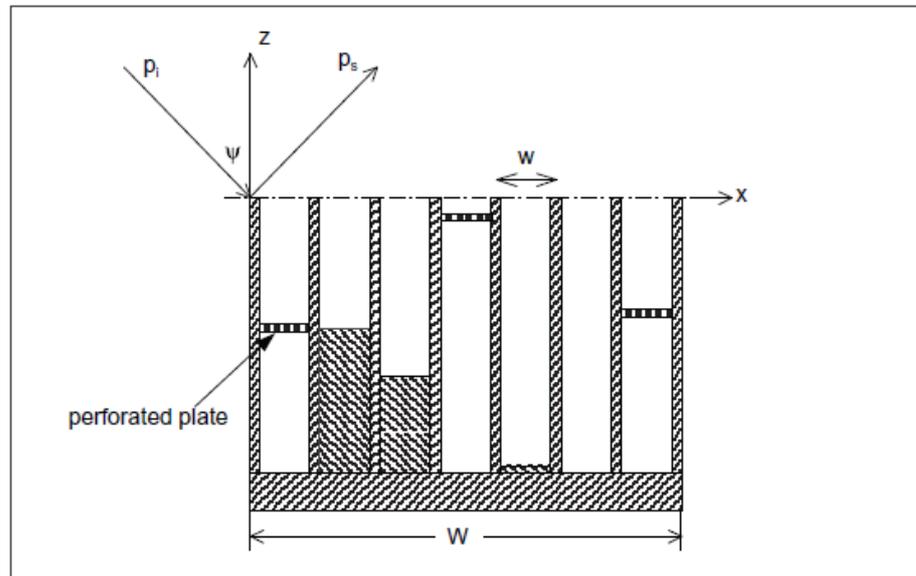
- **Absorción por el uso de elementos de masa.**

La alta absorción a bajas frecuencias es más difícil de lograr. En consecuencia, el reto es conseguir esta absorción en bajas con ayuda de las diferentes profundidades determinadas por la secuencia del difusor. En un artículo presentado por Fujiwara y Miyarama, informaron que las estructuras mal construidas podrían proporcionar una alta absorción por debajo de la menor frecuencia de resonancia. Se especula que esta absorción adicional proviene de la grietas en el fondo, que forman resonadores de Helmholtz con cavidades de aire detrás. De esta investigación surgió la idea de que usando placas perforadas en algunos de los pozos se extendería significativamente el rango de absorción hacia frecuencia mas bajas mediante la adición de masa al sistema, reduciendo así la frecuencia de resonancia. Una construcción típica de este dispositivo se muestra en la Figura 16.

Fujiwara fue de los primeros en publicar los resultados de medición de una estructura con resonadores de Helmholtz en los pozos, añadiendo masa y así consiguiendo una mejor absorción a bajas frecuencias. Wu et al. continuó con este trabajo mediante la producción de un modelo de predicción validado con las mediciones y algunas de las metodologías de diseño básico. El concepto simple de las frecuencias resonantes de esparcimiento, como se discute en la sección 2.1.2.3, se puede utilizar de nuevo, aunque la predicción de las frecuencias de resonancia es más incomoda para los elementos de masa. Además, se deben considerar las múltiples resonancias de cada uno de los pozos. “Wu et al. encontró que los pozos con las perforaciones y los pozos de profundidad variable sin perforaciones eran necesarios para obtener un rango suficientemente amplio de frecuencias resonancia. La masa añadida con las perforaciones hace difícil mantener la reactancia de la pequeña impedancia a altas frecuencias y así demasiados pozos con perforaciones hacen difícil lograr absorción en alta frecuencia.”²⁴ Los orificios de las perforaciones deben ser cuidadosamente elegidos. Si ofrecen una resistencia significativa, puede ser necesario reducir la resistencia del material resistivo para lograr una buena absorción.

²⁴ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 239.

Figura 16. Perfil de un absorbente de sonido con placas perforadas.

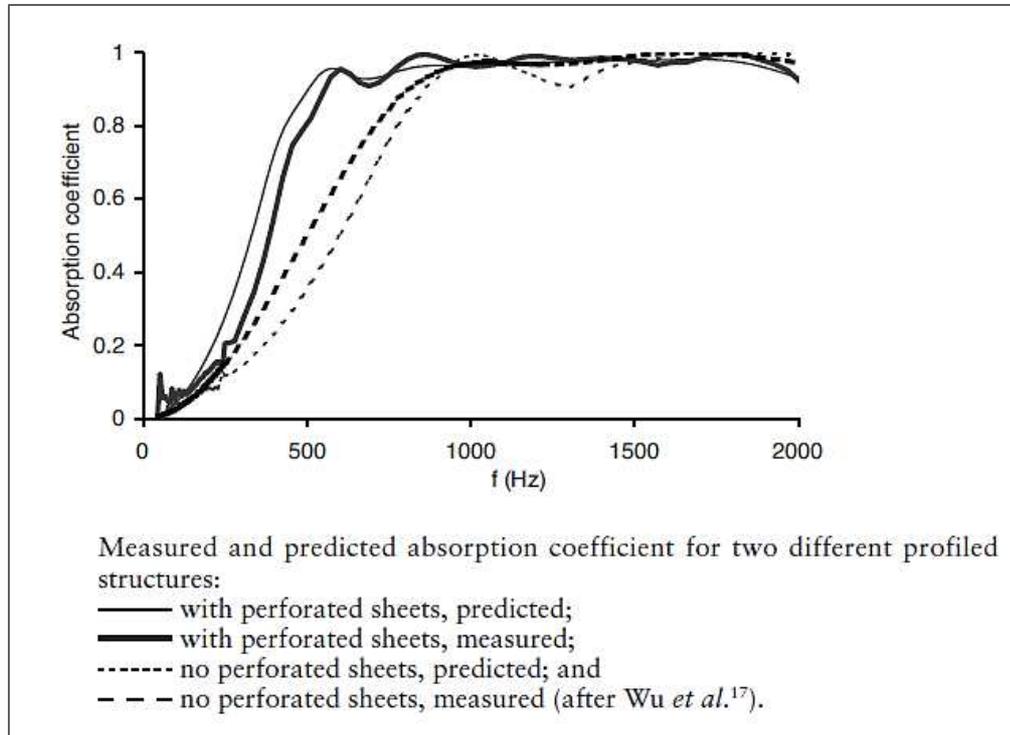


Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 238.

Estos dispositivos pueden producir una mayor absorción que un conjunto de resonadores apilados uno junto al otro, por las múltiples resonancias dentro de los pozos, pero estos son más costosos para construir.

La Gráfica 7 muestra un resultado típico de dos diseños optimizados, uno con placas perforadas y el otro sin perforaciones. Esto demuestra que añadiendo elementos de masa se puede extender el rendimiento de estos dispositivos a bajas frecuencias.

Gráfica 7. Perfil de un absorbente de sonido con placas perforadas.



Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 239.

2.1.4.2 Resonador de Helmholtz a base de rejillas de fase

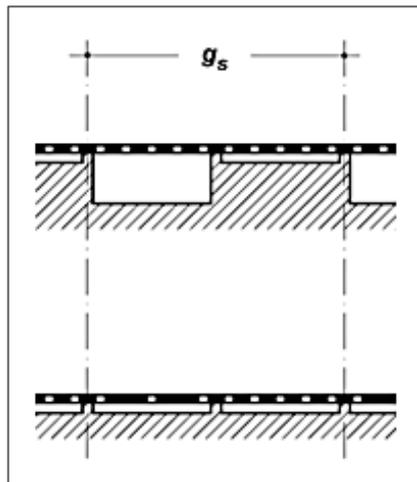
Las estructuras periódicas con variaciones en la impedancia de la superficie son llamadas rejillas de fase. Además de la impedancia de la superficie, el factor de reflexión puede ser utilizado para describir las características acústicas de una superficie. Ambas cantidades están representadas por números complejos, y para superficies reaccionantes puede ser fácil pasar de una magnitud a otra. En cuanto a las siguientes consideraciones, el factor de reflexión permite una descripción más rápida. El valor absoluto del factor de la reflexión corresponde a la amplitud de la onda reflejada relacionada con la amplitud de la onda incidente. Así si el valor absoluto del factor de reflexión es 1, esto significa que la onda incidente esta totalmente reflejada. Un valor absoluto de 0, por el contrario, significa que la onda incidente se absorbe completamente.

Para conseguir una reflexión difusa de la mayor parte de la energía sonora incidente, las diferentes áreas de las superficies de la pared deben ser poco absorbentes y causar la

mayor diferencia entre las fases de las ondas reflejadas. En consecuencia, estas condiciones se pueden realizar utilizando resonadores de Helmholtz sintonizados. Alrededor de la frecuencia de resonancia la diferencia de fase entre la onda reflejada y la onda incidente debe ser de máximo 180 grados. “La diferencia de fase entre las áreas adyacentes puede ser alcanzada por medio de dos resonadores consecutivos que estén sintonizados a diferentes frecuencias.”²⁵

Meyer, Kuttruf y Rischbieter investigaron que tan largas deben ser las áreas individuales de la pared y a que frecuencias debían estar sintonizadas. Ellos se limitaron a estructuras formadas por dos resonadores dispuestos en franjas. Los resonadores están hechos por una placa perforada conectada a un volumen de aire. Las diferentes frecuencias de resonancia pueden ser producidas por franjas con el mismo patrón de perforación y diferentes volúmenes de aire, o por franjas con diferentes patrones de perforación y un volumen igual de aire. Las dos opciones de diseño se encuentran representadas en la Figura 17.

Figura 17. Resonador de Helmholtz a base de rejillas de fase.



Fuente: Disponible en <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/phase-grids.html>

Según Hunecke²⁶, en el caso de tener dos frecuencias de resonancia, estas deben estar separadas por 3 o 4 tercios de octava, lo que conseguirá buenos coeficientes de difusión

²⁵ Disponible en <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/phase-grids.html>

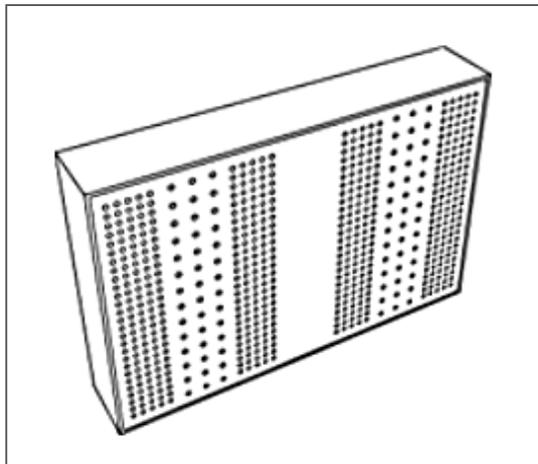
²⁶ Disponible en <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/phase-grids.html>

en una banda de frecuencias entre aproximadamente un tercio de octava por debajo de la frecuencia de resonancia inferior y alrededor de un tercio de octava por encima de la frecuencia de resonancia superior, que da un total de alrededor 2 octavas. Los coeficientes de dispersión más altos se obtienen si las dos franjas tienen la misma anchura.

2.1.4.3 Difusores micro-perforados (MPD)

Consisten en bandas individuales contiguas micro-perforadas que actúan como resonadores sintonizados a diferentes frecuencias de resonancia (ver Figura 18). De esta forma cada área tendrá una impedancia diferente lo que generará que las ondas incidentes se difundan por cambios en la impedancia de la superficie, como es el mismo caso de los resonadores de Helmholtz basados en rejillas de fase, explicados anteriormente en la sección 2.1.4.2.

Figura 18. Difusor micro-perforado (MPD) de $p=7$.



Fuente: Disponible en: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/mpd.html>

“Las frecuencias de resonancia de las franjas individuales de un difusor micro-perforado corresponden a la misma secuencia pseudo- estocástica utilizadas en la construcción de

un difusor de Schroeder.”²⁷ Desde un punto de vista acústico los pozos de los difusores de Schroeder con sus diferentes profundidades son resonadores de $\frac{1}{4}$ de longitud de onda. La profundidad de los pozos es equivalente al $\frac{1}{4}$ de longitud de onda de una onda sonora que excita al resonador a su frecuencia de resonancia. Para difusores micro-perforados se utilizan resonadores micro-perforados sintonizados a la misma frecuencia en vez de resonadores de $\lambda/4$.

“Las características de difusión de los difusores micro-perforados son ligeramente menores que las asociadas a los difusores de Schroeder, pero la profundidad necesaria para su fabricación es considerablemente menor.”²⁸ Estos se pueden construir en diversos materiales como madera, acrílico, vidrio entre otros. La Figura 19 y la figura 20 son imágenes de difusores micro-perforados construidos en acrílico.

Figura 19. Difusor micro-perforado transparente instalado en frente de una ventana.



Fuente: Disponible en: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/mpd.html>

²⁷ Disponible en: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/mpd.html>

²⁸ Disponible en: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/mpd.html>

Figura 20. Vista detallada de un MPD.



Fuente: Disponible en: <http://www.hunecke.de/en/knowledge/diffusors/mpd.html>

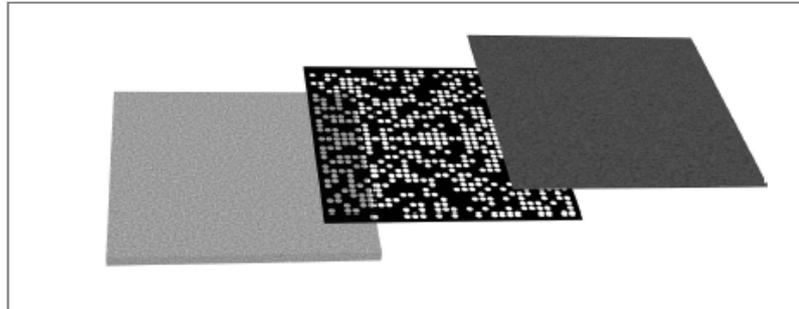
2.1.4.4 Difusores de amplitud Binaria

Este tipo de difusores son más conocidos por su sigla en inglés BAD (Binary Amplitud Diffisorber). Este difusor es una superficie plana híbrida ya que tiene la capacidad de absorber como de difuminar el sonido al mismo tiempo. “El panel proporciona simultáneamente la difusión del sonido en las bandas de frecuencias altas y medias y proporciona absorción por debajo de la frecuencia de corte de la difusión (Bandas de frecuencias bajas).”²⁹

Estos paneles están contruidos con absorbente poroso como la lana de vidrio y una superficie plana perforada (según secuencia de números binarios 1 y 0). La superficie perforada puede ser cubierta por una tela acústicamente transparente para darle una mejor apariencia al panel. A continuación se puede observar una imagen desglosada del panel BAD.

²⁹ COX, Trevor y D`ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and aplication. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 373.

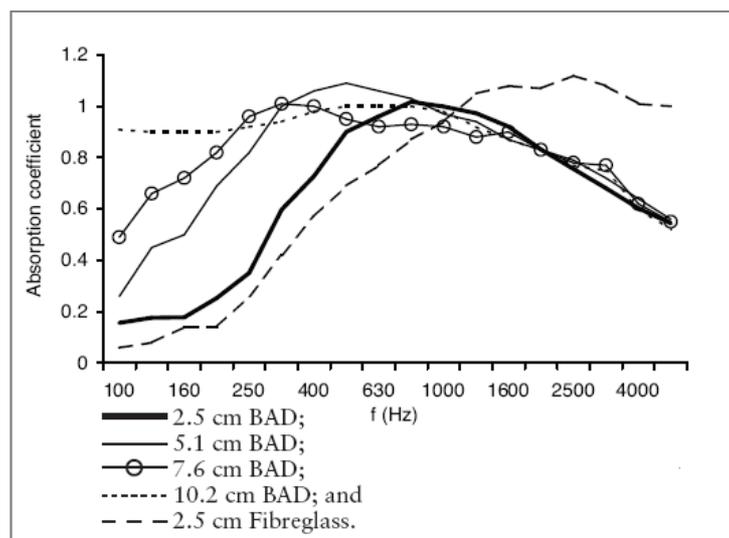
Figura 21. Superficie híbrida BAD: Absorbente poroso (izquierda), Superficie perforada (centro) y Revestimiento de tela (derecha).



Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 374.

Los puntos blancos son los agujeros que dan al absorbente poroso y las partes negras son la superficie reflejante. La Gráfica 8 muestra el coeficiente de absorción del panel BAD en comparación con la fibra de vidrio sola con una incidencia aleatoria. En esta imagen se muestra coeficientes de absorción para paneles BAD ubicados a diferentes profundidades. La masa adicional que vibra dentro de los agujeros de la superficie perforada genera absorción en frecuencias bajas y medias bajas. En cuanto al comportamiento del panel en frecuencias altas, las partes duras (negras) de la superficie se encargan de reflejar el sonido, ocultando ciertas parte de la fibra de vidrio, causando una disminución en la absorción de frecuencias altas, pero creando dispersión en este rango de frecuencias.

Gráfica 8. Coeficientes de absorción de paneles BAD en comparación con la fibra de vidrio sola.



Fuente: Libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*. p. 374.

“Para llevar a cabo dispersión en media- alta frecuencia es necesario una matriz de 31 x 33 en dos dimensiones conformado por áreas absorbentes y reflectivas. Las áreas reflejantes de la matriz son representadas por el bit 1 y las áreas absorbentes por el bit 0 en una secuencia pseudoaleatoria de números binarios. La distribución de los elementos binarios se basa en una secuencia binaria óptima con un espectro plano de potencia, ya que maximiza la dispersión.”³⁰

Este tipo de superficies híbridas, que absorben y difunden el sonido tienen un mayor rendimiento acústicamente hablando en comparación con los paneles absorbentes comunes (paneles de fibra de vidrio con algún recubrimiento de tela). Los BAD tienen una mayor cobertura en el rango de frecuencias sin presentar una absorción excesiva en frecuencias medias y altas que son las fáciles de absorber. La construcción de estos paneles es sencilla y barata. Los materiales más comunes para la superficie que va perforada son madera o algún metal, lo importante es que sea un material reflejante.

2.2 MARCO LEGAL Y NORMATIVO

Aquí se presentan los soportes de las normas existentes que respaldan este trabajo de investigación. Las normas necesarias para el desarrollo del proyecto es la ISO 354 para la medición de absorción sonora en una sala reverberante y la recomendación AES 4 id para la medición de la uniformidad de esparcimiento en una superficie.

2.2.1 Norma ISO 354. Measurement of sound absorption in a reverberation room.

Medición de absorción sonora en una sala reverberante.

Esta normativa internacional especifica el método de medición del coeficiente de absorción del sonido de materiales acústicos utilizado en paredes o cielorrasos. También el área de absorción equivalente de personas u otros objetos en una sala reverberante. A continuación se explica brevemente las condiciones y el procedimiento necesario para la medición.

³⁰ COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009. p. 375.

Términos

- $T \rightarrow$ Tiempo de reverberación.
- $A_1 \rightarrow$ Área de absorción equivalente en el recinto sin la muestra (m^2).
- $A_2 \rightarrow$ Área de absorción equivalente en el recinto con la muestra (m^2).
- $\Delta A \rightarrow$ Diferencia entre A_2 y A_1 .
- $S \rightarrow$ Área de la muestra (m^2).
- $\alpha_s \rightarrow$ Coeficiente de absorción del sonido.

Especificaciones de la sala

- Volumen recomendado $\rightarrow 200 m^3$.
- Forma \rightarrow debe cumplir la siguiente condición:

$$l_{max} < 1,9 V^{1/3}$$

Ecuación 22. Relación de la longitud más larga de la sala con el volumen.

donde:

l_{max} es la longitud de la línea recta mas larga de la sala (en metros).

V es el volumen de la sala (en metros cúbicos)

- Características \rightarrow Altamente difusa, generalmente son requeridos el uso de difusores. Los materiales constructivos deben ser reflejantes para obtener altos tiempos de reverberación a su interior.

Área de absorción

Después de obtener A_1 con la medición de tiempo de reverberación T_1 , se debe comparar estos valores con los valores encontrados en la Tabla 2. Los valores obtenidos de la medición no deben sobrepasar a los valores recomendados.

Tabla 2. Área de absorción del sonido equivalente máxima para una sala de 200 m³.

Frequency, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Equivalent sound absorption area, m ²	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Frequency, Hz	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
Equivalent sound absorption area, m ²	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

Estos valores recomendados son aplicados a un volumen de 200 m³. En el caso que el volumen sea diferente a 200 m³, cada uno de los valores debe ser multiplicado por $(V/200)^{2/3}$.

Características de la muestra

- Debe tener un área ente 10 m² y 12 m², si el volumen de la sala es cercano a 200 m³.
- La relación entre el ancho y el largo de la muestra debe estar en un rango entre 0,7 y 1.
- Debe estar ubicado por lo menos a 1m de las superficies límite de la sala.
- Si el objeto es muy pesado se puede ubicar en el piso y recostado en alguna de las superficies limite de la sala.

Temperatura y humedad

- La humedad relativa debe ser igual en toda la medición y debe estar en un rango entre 30% y 90%.
- La temperatura debe ser al menos de 15° C durante toda la medición.

Medición del tiempo de reverberación

- Métodos de medición: El primero, es el método de ruido interrumpido y el segundo, es el método de respuesta al impulso que puede ser directa o indirecta.
- Características del micrófono: Omnidireccional, la distancia a la fuente debe ser al menos de 1,5 m y la distancia a cualquier superficie límite y a la muestra debe ser de 1 m. Deben escogerse por lo menos 3 posiciones de medición.
- Fuente: Omnidireccional y debe ser ubicada a 3 m de cada posición de fuente que se elija. Deben escogerse por lo menos 2 posiciones de fuente.

Resultados

- a) Se calcula T_1 (Tiempo de reverberación SIN la muestra).
- b) Se calcula T_2 (Tiempo de reverberación CON la muestra).
- c) Se calcula A_1 y A_2 con ayuda de la siguiente ecuación:

Ecuación 23. Área de absorción equivalente.

$$A_{(1,2)} = \frac{55,3 V}{C T_{(1,2)}} - 4m_{(1,2)}$$

donde:

V es el volumen en m³ de la sala vacía.

C es la velocidad de propagación del sonido en m/s.

T₁ es el tiempo de reverberación sin la muestra.

T₂ es el tiempo de reverberación con la muestra.

m₁ Coeficiente de atenuación de energía (ISO 9613-1) durante la medición sin la muestra.

m₂ Coeficiente de atenuación de energía (ISO 9613-1) durante la medición con la muestra.

Ecuación 24. Coeficiente de atenuación de la energía.

$$m_{(1,2)} = \frac{\alpha}{10 \log(e)}$$

Ecuación 25. Velocidad de propagación del sonido.

$$C = (331 + 0,6t/C^\circ) \text{ m/s}$$

donde **t** es la temperatura en grados centígrados.

d) Se calcula **At** a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 26. Área de absorción equivalente total.

$$At = A_2 - A_1$$

e) Se calcula α_s con ayuda de la siguiente ecuación:

Ecuación 27. Coeficiente de absorción.

$$\alpha_s = \frac{At}{S}$$

siendo S el área de la muestra en m^2 .

2.2.2 AES 4id. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.

Caracterización y medición de la uniformidad de dispersión de una superficie.

Este documento proporciona lineamientos para caracterizar la uniformidad de dispersión de una superficie sobre mediciones o predicciones de respuestas de esparcimiento polar. En este contexto la superficie de esparcimiento se cuantifica en términos del coeficiente de difusión simple. El coeficiente de difusión es una medida de calidad diseñada para ser usada por productores y usuarios de las superficies, que difunden el sonido de manera deliberada o accidental. A continuación se explica brevemente las condiciones y el procedimiento necesario para la medición.

Términos más relevantes

- **Superficies plana de referencia:** Superficies plana, rígida y delgada con la misma forma proyectada o huella que la superficie de prueba.
- **Punto de referencia:** Centro geométrico de gravedad de la superficie de la referencia plana.
- **Reflexión especular:** Rayo sonoro incidente que experimenta una reflexión especular obedeciendo la Ley de Snell.
- **Respuesta polar:** Nivel de presión sonora creado por la energía esparcida desde la superficie como una función del ángulo de medida sobre la referencia normal, generado bajo un campo libre o bajo condiciones de un pseudo campo libre, en un plano específico, en un semicírculo centrado en el punto de referencia.
- **Coeficiente de difusión direccional d_θ :** Medida de la uniformidad de difusión producida por una superficie para una posición de fuente. Este coeficiente esta

limitado entre 0 y 1, siendo 1 la difusión completa. El subíndice θ es utilizado para indicar el ángulo de incidencia relativo a la referencia normal de la superficie.

- **Coefficiente de difusión $d_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n}$** : Medida de la uniformidad de difusión para más de una posición de fuente. Por medio del coeficiente de difusión direccional para diferentes posiciones de fuente se puede calcular el coeficiente de difusión.
- **Coefficiente de difusión de incidencia aleatoria d** : Medida de la uniformidad de difusión para el ejemplo representativo de una superficie a medir sobre un semicírculo completo para un difusor de un solo plano o una semiesfera completa para un difusor semiesférico. La falta de un subíndice para d indica incidencia aleatoria.

Ambiente de medición

Para evitarse errores en la medición causados por objetos reflejantes de sonido, el ambiente de medición debería ser una cámara anecóica. Para simular un ambiente libre de reflexiones pueden ser usados grandes espacios no anecóicos.

Las mediciones con superficie límite inferior reflejante también pueden ser realizadas para prescindir de la necesidad de un espacio que sea anecóico en un plano.

Campo de medición

Los difusores son aplicados en situaciones donde alguna o todas las fuentes se encuentran en campo cercano. Las mediciones en campo cercano pueden ser usadas para evaluar los errores del campo cercano, particularmente la focalización. La prueba en campo lejano muestra la cantidad de difusión alcanzada.

Para las mediciones de campo lejano debe ser capturada la respuesta polar semicircular o semiesférica. Las condiciones de campo lejano pueden ser obtenidas si las distancias (r) entre la fuente y el receptor, y el punto de referencia cumplen con los siguientes requerimientos:

Ecuación 28. Ecuaciones de cálculo para la distancia fuente-receptor.

$$r \gg D_{max}$$

$$r/D_{max} \gg D_{max}/\lambda$$

$$r = 2r_1r_2/(r_1 + r_2)$$

donde:

D_{\max} es la dimensión mas larga del difusor.

λ es la longitud de onda.

r_1 es la distancia de la fuente al punto de referencia.

r_2 es la distancia desde el receptor hasta el punto de referencia.

Las mediciones deben hacerse con una resolución angular máxima de 5° para el receptor. Para obtener la incidencia aleatoria del coeficiente de difusión, las posiciones de la fuente deben ser medidas con un máximo de separación angular de 10° , cubriendo el semicírculo o hemisferio medido sobre la referencia normal. Cuando el tiempo es limitado por las condiciones de la medición, los coeficientes direccionales de difusión pueden ser obtenidos por ángulos de incidencia normal y de 55° .

Muestra bajo prueba

- Cuando la muestra es un difusor de un solo plano, tendrá una superficie e impedancia acústica que es la constante en una dirección (d).
- En lo posible, la muestra bajo prueba debe ser la misma que se colocaría dentro de un auditorio real. Esta elección asegura que la difracción debida a la aspereza y a los efectos de borde serán propiamente caracterizados.

Técnicas de medición

- a) Métodos:** La medición de la magnitud de la respuesta polar se puede obtener usando técnicas de función de transferencia, por ejemplo, mediciones de respuesta al impulso, Fast Fourier transform (FFT), time delay spectrometry (TDS), o maximum-length sequences (MLS). De estos métodos el MLS es el más rápido y el de más fácil repetición.
- b) Fuente:** Se debe escoger un altavoz que irradie todo el difusor como si este fuera omnidireccional. En el mejor de los casos que sea una fuente omnidireccional.
- c) Pruebas:** Para cada fuente y receptor deben hacerse las mediciones de respuesta al impulso con la superficie de prueba presente, $h_1(t)$ y la respuesta al impulso sin la superficie de prueba presente, $h_2(t)$.

Procesamiento de la respuesta polar.

Figura 22. Proceso de reducción de datos.

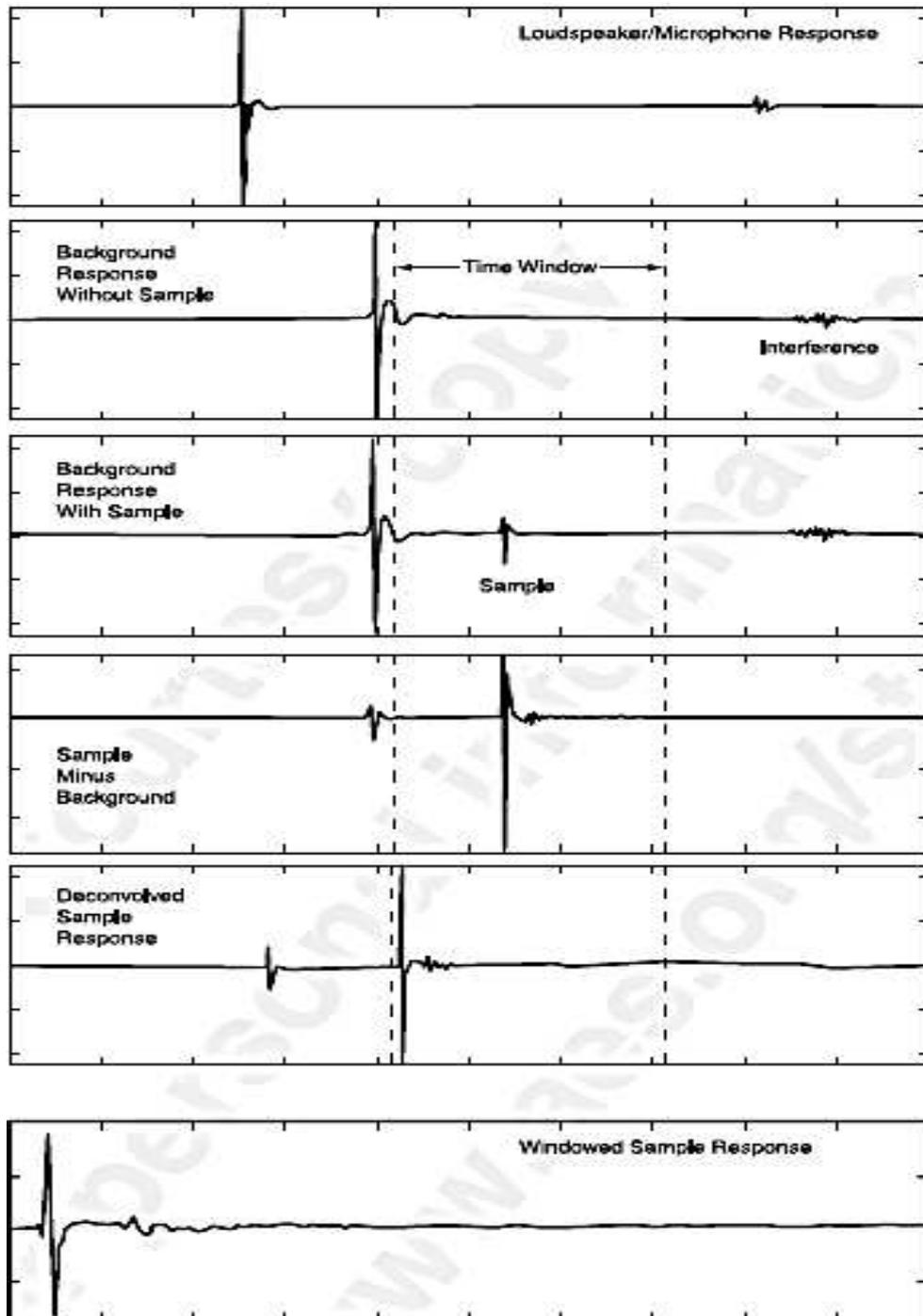
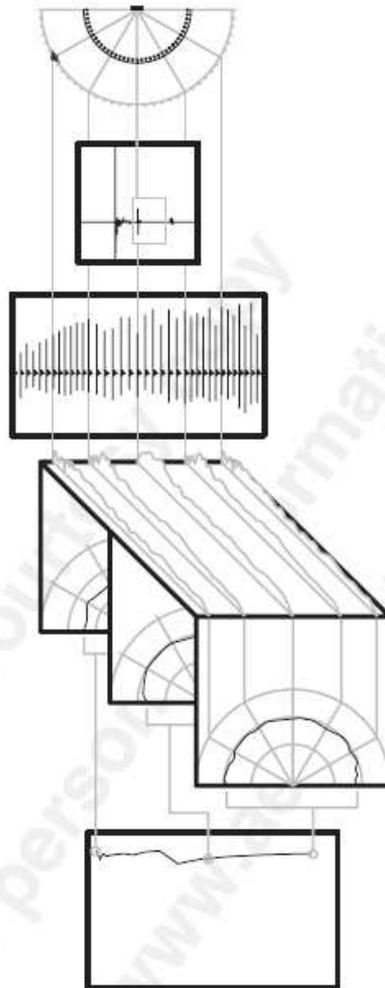


Figura 23. Proceso de extracción del coeficiente de difusión desde un impulso.



Una ventana rectangular debe ser aplicada a la respuesta al impulso. La ventana tiene ganancia unitaria donde las reflexiones de la superficie de prueba están presentes y es cero en cualquier otra parte. La ventana remueve las reflexiones residuales que se encuentran claramente separadas de las reflexiones de la superficie de prueba en el eje del tiempo.

* Este método de la AES es estandarizado como ISO-17497-2. Esta dato esta registrado en el libro *Master Handbook of Acoustic* en la pagina 402.

En el anexo 1, se encuentran los protocolos de medición de la norma ISO 354 y de la recomendación AES 4id-2001.

3. METODOLOGÍA

Este capítulo contiene información acerca de la estrategia que se utilizará para llegar al cumplimiento de los objetivos propuestos. Además se plantea un posible resultado del trabajo de investigación con las variables que pueden afectar en el desarrollo del mismo.

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de esta investigación es **Empírico-Analítico**, debido a que se verificarán los cálculos matemáticos realizados para el diseño del panel abfusor con los datos experimentales recogidos por las mediciones realizadas al mismo. Esta verificación se hace para darle validez al diseño y determinar el funcionamiento del panel abfusor.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB-LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

Este proyecto se encuentra en la línea de investigación de Tecnologías Actuales y Sociedad, en la sublínea de la facultad **Procesamiento digital de señales**, ya que se necesita el análisis de señales para el desarrollo y validación del funcionamiento del panel abfusor. El campo de investigación corresponde a **La Acústica**, ya que este proyecto trabaja directamente con la manipulación de las propiedades físicas sonido.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN

La primera técnica de recolección utilizada fue la bibliográfica, es decir toda la información teórica necesaria para el desarrollo del proyecto. Esta información fue encontrada en libros, trabajos de grado realizados por estudiantes de la universidad San Buenaventura, papers, internet y normativa actual.

La siguiente técnica de recolección de información, es la medición según normativa de los coeficientes de absorción, coeficientes de difusión y patrón polar del panel abfusor.

3.4 HIPÓTESIS

El panel abfusor fue diseñado según los métodos elegidos y construido con el tamaño y materiales más adecuados para cumplir con las funciones de absorber y difundir el sonido.

Al lograr difusión y absorción por medio de un solo elemento se llegó también a la optimización de espacios.

3.5 VARIABLES

3.5.1 Variables Independientes

- Métodos y conceptos utilizados para el diseño del panel abfusor.
- Dimensiones del panel.
- Materiales utilizados para la construcción del panel.
- Correcta construcción del panel abfusor.
- Lugar de medición.

3.5.2 Variables dependientes

- Coeficientes de absorción del panel abfusor.
- Coeficientes de difusión del panel abfusor.
- Patrón polar arrojado por el panel abfusor.

4. DESARROLLO INGENIERIL

Durante el capítulo se irá explicando detalladamente el desarrollo de los objetivos propuestos. Primero se expondrán las teorías seleccionadas para la construcción del panel y posteriormente todo el proceso de diseño para la parte difusora y la parte absorbente del panel. Además se presentará un estudio hecho a tres diferentes materiales que facilitó la selección del material para la construcción del abfusor. Y finalizando este capítulo se encontrará paso a paso el procedimiento de las mediciones según la ISO 354 y la recomendación AES 4id para la medición de absorción y difusión respectivamente.

4.1 SELECCIÓN DE LAS TEORÍAS

Entre las diferentes teorías existentes para el diseño de difusores e igualmente para el diseño de absortores se llegó a la selección de dos teorías bastante utilizadas comercialmente y que dan excelentes resultados. En cuanto a la difusión, se escogió en primera instancia los difusores de Schroeder como base para el diseño, pero además se tuvieron en cuenta las mejoras realizadas a este tipo de difusores, que se explicaran en detalle a lo largo de esta sección. En cuanto a la parte absorbente del panel, se eligió como base de diseño la teoría de resonadores de Helmholtz de múltiple cavidad y al igual que en la parte difusora se tendrá en cuenta una innovación que se realizó a este tipo de resonadores.

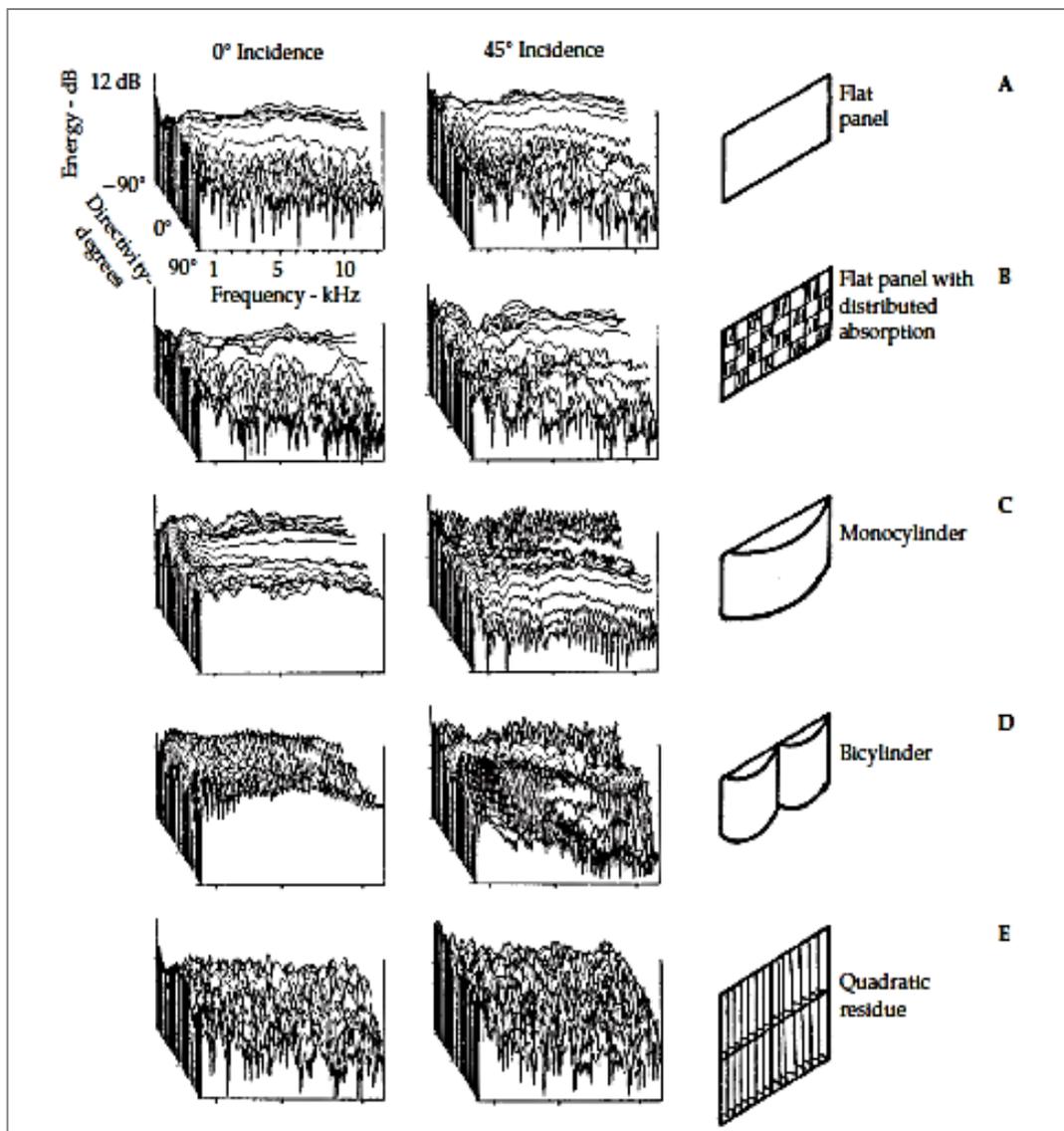
Se escogió trabajar con difusores de Schroeder ya que son construcciones muy sencillas y difunden el sonido de una manera predecible, además ofrecen la posibilidad de producir una óptima difusión, requiriendo solo un pequeño número de ecuaciones para un diseño simple.

Entre los difusores de Schroeder se encuentran: Los MLS (“Maximum Length Sequency”), los QRD (“Quadratic Residue Diffusor”) y por último los PRD (Primitive Root Difusor”). En una comparación bibliográfica entre estos tres tipos de difusores se obtuvo que los difusores PRD solo funcionan a frecuencias discretas, lo que significa que son difusores poco prácticos. Los difusores MLS tienen una falencia, cuando la profundidad de las ranuras es la mitad de la longitud de onda, la superficie se comporta como una superficie plana, porque todas las ondas irradian con la misma fase. Los difusores QRD unidimensionales son los que presentan mejores resultados, ya que mantienen una buena

difusión espacial, además de que son los más utilizados a nivel práctico tanto en salas de concierto como en estudios de grabación.

A continuación se muestra un estudio comparativo entre diferentes superficies difusoras realizado por la empresa *RPG Diffusor Systems Inc.*

Figura 24. Comparación de la Energía Vs Frecuencia Vs directividad de seis diferentes superficies difusoras.



Fuente: Libro *Master Handbook of Acoustic*. p. 275.

De acuerdo a estas estas mediciones, Peter d'Antonio en el libro "Master Handbook of acoustic" hizo varias anotaciones sobre ventajas y desventajas de cada una de las superficies y llegó a la conclusión que los difusores de residuos cuadráticos (QRD) son los que mejor mantienen una distribución de la energía tanto frecuencial como espacialmente, incluso en la incidencia de 45°. "La densidad de las muescas que se distribuye uniformemente en todo el espectro de frecuencia y la energía relativamente constante, indica un buen rendimiento"³¹.

Por las razones mencionadas anteriormente se decidió realizar el diseño de un **difusor QRD unidimensional**.

Es de saber que la profundidad de este tipo de difusores en un diseño es limitada por el espacio, teniendo en cuenta que la longitud de onda se extiende aproximadamente a unos 17 m y la aplicación de dispositivos que funcionen en el rango de frecuencias bajas se ve condicionado por la longitud de onda de las mismas. Como solución a este problema, Trevor Cox y Peter d' Antonio plantean en su libro *Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application*, la adición de elementos de masa a la impedancia de los pozos del difusor por medio de perforaciones en sus láminas (**Resonador de Helmholtz de múltiple de cavidad**), lo que genera que el rango de frecuencias de difusión se extienda a frecuencias más bajas de las de diseño. Además de presentar una mejora en la difusión, se crea absorción en un rango de frecuencias más bajas, mediante la adición de masa al sistema, reduciendo así frecuencia de resonancia normal del difusor (por resonancia de $\lambda/4$).

Una mejora realizada al resonador de Helmholtz también se tuvo en cuenta para el diseño del panel abfusor. Esta consiste en resonadores basados en rejillas de fase con el fin de absorber el sonido en diferentes frecuencias y además generar difusión por cambios de impedancia en la superficie. Para conseguir una reflexión difusa de la mayor parte de la energía incidente, las secciones de la superficie deben ser poco absorbentes e irradiar el sonido con diferentes fases. Esto se puede lograr utilizando resonadores de Helmholtz sintonizados como plantea esta teoría. Según Hunecke, las diferencias de fase entre las áreas adyacentes pueden ser alcanzada por medio de dos resonadores consecutivos que estén sintonizados a diferentes frecuencias, ya sea utilizando diferentes patrones de perforación y un mismo volumen ó con un mismo patrón de perforación pero con diferentes volúmenes.

³¹ ALTON, Everest, Master Handbook of Acoustic, Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, 2009, p. 276.

4.2 ETAPA DE DISEÑO

4.2.1 Difusor QRD

En primera instancia se realizó el diseño del difusor QRD, sin tener en cuenta el efecto de las perforaciones. De acuerdo al procedimiento de diseño que se siguió, se debían establecer inicialmente los siguientes parámetros:

- f_{\max} (Frecuencia máxima en la que se quiere lograr difusión).
- F_0 (Frecuencia mínima en la que se quiere lograr difusión).
- m_{\max} (Grado de difusión a la frecuencia f_0 (número entero)).

El rango de frecuencias de diseño y el grado de difusión en la frecuencia mínima, son a elección del diseñador, los valores escogidos se presentan a continuación:

- $f_{\max} = 2000 \text{ Hz}$
- $F_0 = 1000 \text{ Hz}$
- $m_{\max} = 3$

Este rango de frecuencia inicialmente corto, se seleccionó por cuestiones dimensionales del panel, que son determinadas a partir de la longitud de onda de las frecuencias seleccionadas. Teniendo en cuenta que este rango se extenderá a frecuencias mas bajas por la adición de elementos de masa (perforaciones).

Con los parámetros anteriormente definidos podemos obtener el número primo que indica la cantidad de periodos que tiene difusor.

Ecuación 29. Cálculo del número primo para el diseño del abfusor.

$$P = \frac{2 \times 3 \times 2000}{1000} = 12$$

Ya que el resultado debe ser un número primo, este se debe aproximar al número primo superior, en este caso $P= 13$.

Para un cálculo mas rápido de la secuencia (Sn) y de las profundidades (dn), se elaboró un algoritmo, el cual, al ingresar los datos de Fmax, Fo, Mmax y P arrojó automáticamente el número de la secuencia y la profundidad de cada una de las ranuras.

Tabla 3. Valores de la secuencia Sn y de las profundidades de las ranuras para el panel abfusor.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Sn	0	1	4	9	3	12	10	10	12	3	9	4	1	0
dn (cm)	0,0	1,3	5,3	11,9	4,0	15,9	13,3	13,3	15,9	4,0	11,9	5,3	1,3	0,0

La secuencia que resulta es periódica con un periodo P. El ancho de las ranuras (W), que es el mismo para todas se encuentra a continuación:

Ecuación 30. Cálculo del ancho de las ranuras del abfusor.

$$W = \frac{345000 \left(\frac{mm}{s}\right)}{2 \times 2000 (Hz)} - 3 = 83,5 \text{ mm}$$

En la figura 27 se muestra una vista superior del panel abfusor donde se pueden detallar las diferentes profundidades:

Figura 25. Vista superior del panel abfusor.



La altura que se determinó para el panel fue de 1,2 m. Este valor se eligió simplemente por razones estéticas con el fin de obtener un panel de forma cuadrada.

Extensión del rango de frecuencias de difusión:

Las perforaciones realizadas al panel se encuentran especificadas en la sección 4.2.2. Las frecuencias de resonancia fueron seleccionadas según el criterio especificado por Hunecke en su teoría de resonadores de Helmholtz basados en rejillas de fase. Según lo descrito en su teoría se consiguen altos coeficientes de difusión 1/3 de octava por debajo de la frecuencia de resonancia inferior hasta 1/3 de octava por encima de la frecuencia de resonancia superior, debidos a cambios de impedancia entre una placa y otra. Si las frecuencias de resonancia son: 63, 125, 250 y 500 Hz, entonces el rango de frecuencias de difusión adicional es:

- $F_0 = 50 \text{ Hz}$
- $F_{\max} = 630 \text{ Hz}$

4.2.2 Panel perforado

Formado por una superficie rígida y no porosa de espesor (D), el cual tiene unas perforaciones circulares. Esta superficie esta montada a una cierta distancia (d) de una pared rígida, esto con el fin de encerrar un volumen de aire entre la pared y la superficie perforada. La expresión que se utiliza para el cálculo de la frecuencia de resonancia f_0 se encuentra a continuación:

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DV}} \text{ (en Hz)}$$

donde S es la suma de las secciones transversales de los orificios (en cm^2), D es el espesor del panel (en cm) y V es el volumen de la cavidad (en cm^3).

Con los cálculos del difusor realizados anteriormente, se pudo determinar el volumen de cada una de las ranuras. La tabla a continuación muestra el volumen en centímetros cúbicos referente a cada una:

Tabla 4. Valores del volumen al interior de cada ranura del panel abfusor.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Volumen (cm ³)	15907	14582	10605	3977	11930	0	2651	2651	0	11930	3977	10605	14582	15907

Utilizando las diferentes profundidades del difusor y así mismo los diferentes volúmenes que este encierra, se diseñaron 5 tipos de resonadores sintonizados a diferentes frecuencias. Según Hunecke en su teoría de resonadores a base de rejillas de fase, la separación entre cada banda de frecuencia seleccionada debe ser de 3 a 4 tercios de octava. Acorde a esto, las bandas de frecuencias escogidas fueron: 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz y 500 Hz. La selección de este rango de frecuencias bajas se debe al problema planteado al inicio del trabajo. Las frecuencias bajas son difíciles de absorber y los elementos utilizados para esta labor ocupan espacios significativos por la longitud de onda de dichas frecuencias. La función de este abfusor es crear absorción y difusión al mismo tiempo con la finalidad de optimizar espacios. Por esta razón, aprovechando los volúmenes de aire encerrados por el difusor se generó absorción en bajas frecuencias.

Para el cálculo del número de perforaciones, su radio y porcentaje de perforación y la distancia entre las mismas, se diseñó un algoritmo de cálculo.

En la siguiente imagen se puede observar el diseño del panel difusor con las perforaciones. Para cada ranura o sección se especificó el número de perforaciones que debe llevar (# perf.), el diámetro de las perforaciones y por último la distancia que debe haber entre perforación y perforación (d). Con cada uno de estos parámetros se obtuvo finalmente la frecuencia de resonancia a la cual absorbe cada una de las secciones.

Figura 26. Especificaciones para la construcción de los resonadores en el difusor QRD.

SECCIONES														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d (cm)	9	9	6	5	5	–	3	–	5	5	6	9	9	
Diametro (mm)	5	5	5	5	5	–	7	–	5	5	5	5	5	
# perf/seccion	12	12	36	48	48	–	72	–	48	48	36	12	12	

Absorción														
Fo (Hz)	61	64	129	244	143		511		143	244	129	61	64	

Dos de las secciones no llevan perforaciones debido a que no encierran ningún volumen de aire (de profundidad cero), lo que hace imposible que actúen como resonadores.

A continuación se presenta una tabla que contiene la información de las frecuencias de resonancia del panel sin las perforaciones y con las perforaciones (frecuencias de diseño).

Tabla 5. Frecuencias de resonancia del difusor con y sin perforaciones.

Frecuencias de resonancia (Hz)														
Secciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
QRD sin perforar	537	586	805	2148	716	–	3222	–	716	2148	805	586	537	
QRD perforado	61	64	129	244	143	–	511	–	143	244	129	64	61	

De la tabla anterior se puede decir que las frecuencias de resonancia de diseño son muy inferiores a las que se esperaba que absorbería el panel en condiciones normales, es decir

sin perforaciones. El rango de frecuencias medias- altas no fue tenido en cuenta a la hora de diseño, puesto que estas frecuencias son mas fáciles de absorber con materiales o elementos que no ocupan gran espacio.

Con el fin de hacer más homogénea la curva de absorción, fue preciso incluir al interior de las cavidades de aire un material absorbente, tipo lana de vidrio o lana mineral. De esta forma se va a conseguir una absorción útil en una margen mas amplio de frecuencias, si bien con una absorción claramente inferior en la frecuencia de resonancia F_0 . El material que se incluyó dentro del panel fue acustifibra de 1" distribuida por la empresa Fiber Glass. A continuación se presenta la tabla con los coeficientes de absorción entregada por la empresa:

Tabla 6. Coeficientes de absorción de la acustifibra

ACUSTIFIBRA	Montaje	125	250	500	1000	2000	4000	NRC*
1"	4	0,03	0,22	0,69	0,91	0,96	0,99	0,70
1 ½"	4	0,12	0,52	0,95	1,0	0,98	1,0	0,90

Fuente: Disponible en <http://www.fiberglasscolombia.com/>

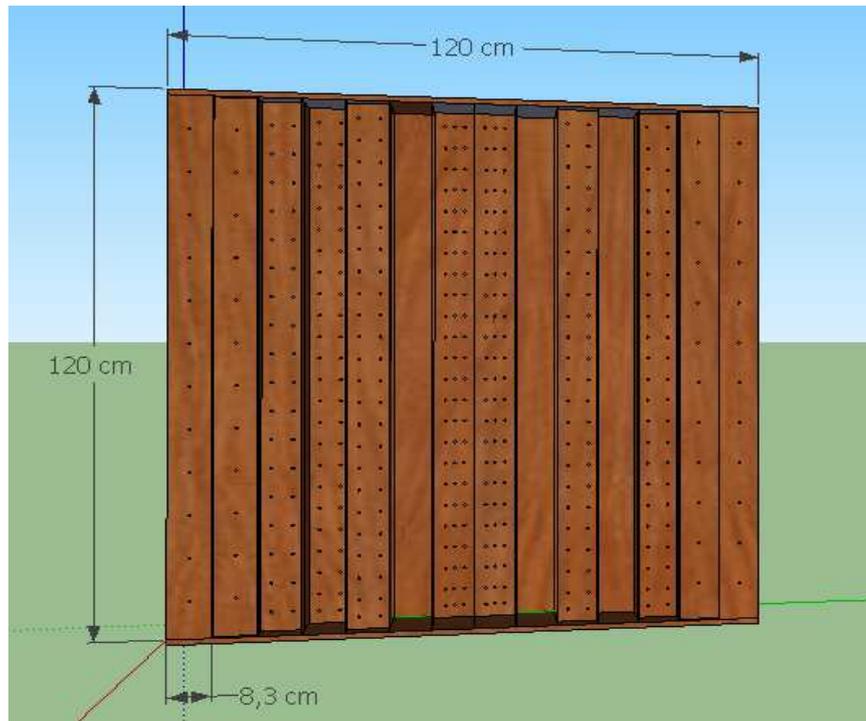
Las demás especificaciones del panel se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Especificaciones generales del panel abfusor.

Especificaciones	
D (espesor del panel) en cm	1,2
w (ancho sección) en cm	8,3
Profundidad máxima en cm	16
h (altura del panel) en cm	120

Para un mayor entendimiento del diseño, la Figura 27 muestra la vista frontal del panel con las medidas más relevantes.

Figura 27. Vista Frontal del panel abfusor.



4.3 ETAPA DE CONSTRUCCIÓN

4.3.1 Material constructivo

Para la elección del material constructivo del panel se hizo un estudio y evaluación de varios materiales. Los factores con los que inicialmente se eligieron estos materiales fueron: primero la facilidad de adquisición en el mercado y segundo la facilidad de trabajo. Con ayuda de expertos en el tema, se encontraron los siguientes resultados:

- Madera de Pino.
- Madera aglomerada MDF.

- Acrílico.

Para realizar la elección entre estos tres materiales se hizo un análisis de cada uno de ellos teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Durabilidad.
- Rigidez.
- Densidad.
- Facilidad de trabajo.
- Costos.
- Demanda en el mercado.

a) PINO:

Durabilidad: No es resistente al ataque de hongos e insectos. Posee una duración en uso exterior menor a un año.

Rigidez: Este parámetro de la madera está inversamente correlacionado con el área proporcional de nudos. Es de saber que esta madera comúnmente presenta una gran cantidad de nudos, por lo que se infiere que no es una madera tan rígida. Esta madera es muy maleable y debido a su capacidad para dejarse moldear es llamada la madera noble.

Densidad:

Tabla 8. Densidades de la madera de pino.

DENSIDAD (g/cm ³)	VERDE	SECA AL AIRE	ANHIDRA	BÁSICA
	1.04	0.48	0.45	0.39

Fuente: Disponible en <http://www.unalmed.edu.co/~lpforest/PDF/Pino%20radiata.pdf>

Facilidad de trabajo: Es fácil de trabajar con herramientas manuales y en las diferentes operaciones de maquinado.

Costos: La tabla de precios que se muestra a continuación fue obtenida del catalogo online de la empresa CONSTRUCTOR.

Tabla 9. Precios del tablero de pino con nudos.

TABLERO PINO CON NUDOS				
CÓDIGO	MEDIDAS	ESPESOR	PRECIO	UND.
186810	1 x 0.30 m	18 mm	\$	18.900 C/U
186811	1 x 0.40 m	18 mm	\$	23.900 C/U
186812	1 x 0.60 m	18 mm	\$	33.900 C/U
186808	2 x 0.60 m	18 mm	\$	57.900 C/U
186807	2 x 0.40 m	18 mm	\$	38.900 C/U
186806	2 x 0.30 m	18 mm	\$	28.900 C/U
186809	2.40 x 1.20 m	18 mm	\$	109.900 C/U

Fuente: Disponible en <http://www.constructor.com.co/guiaMaestra/2012/bogota/carpinteria/>

Demanda en el mercado: Esta madera tiene una gran demanda en el mercado, ya que es de bajo costo y es de fácil acceso.

Los datos de durabilidad, rigidez, densidad, facilidad de trabajo y demanda en el mercado fueron extraídos de la investigación realizada por estudiantes de la universidad de San Buenaventura en su trabajo de grado titulado: “Construcción y optimización de un difusor QRD para ampliar su rango de frecuencias útiles”

b) MDF (sigla en inglés de *Medium Density Fibreboard*):

Durabilidad: Es un material muy resistente a la alta temperatura y la humedad, evitando en gran parte que el material sea afectado por la humedad y sea quebradizo.

Rigidez: “La solidez y la compacidad son características del MDF. El MDF es un excelente sustituto de la madera natural. La resistencia promedio en condición seca es de 17,64 MPa y en la condición saturada de 10,37 MPa. La rigidez promedio en la condición saturada se reduce en aproximadamente un 40% respecto en la condición seca.”³²

Tabla 10. Densidades del MDF

³² Disponible en <http://www.actiweb.es/mueblescoaquira/materiales.html>

Espesor (mm)	Densidad (Kg/m ³)
2,5 a 3	800
4 a 6	780
7 a 9	770
10 a 16	760
18 - 19	755
22 - 25	750

Fuente: Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Tablero_de_fibra_de_densidad_media

Facilidad de trabajo: Presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina que permite que sus caras tengan un acabado perfecto. Se trabaja prácticamente igual que la madera maciza, pudiéndose fresar y tallar en su totalidad. La estabilidad dimensional, al contrario que la madera maciza, es óptima, pero su peso es muy elevado. Es perfecto para lacar o pintar.

Costos: Es un tablero de bajo costo económico en el mercado actual. La tabla de precios que se muestra a continuación fue obtenida del catálogo online de la empresa CONSTRUCTOR.

Tabla 11. Precios del tablero del MDF.

TABLERO MDF				
CÓDIGO	MEDIDAS	ESPESOR	PRECIO	UND.
103741	2.44 x 1.83 m	3 mm	\$ 22.900	C/U
110581	2.44 x 1.83 m	5.5 mm	\$ 44.900	C/U
27903	2.44 x 1.83 m	9 mm	\$ 48.900	C/U
27904	2.44 x 1.83 m	12 mm	\$ 62.900	C/U
27905	2.44 x 1.83 m	15 mm	\$ 82.900	C/U
27907	2.44 x 1.83 m	18 mm	\$ 94.900	C/U

Fuente: Disponible en <http://www.constructor.com.co/guiaMaestra/2012/bogota/carpinteria/>

Demanda en el mercado: en la actualidad, uno de los segmentos de mercado más fuertes y crecientes en Colombia es el de MDF y que, debido a que ninguna empresa lo produce a nivel local, ha sido necesaria la importación del 100 por ciento de este insumo, de otros países como Chile, China, Brasil y Venezuela; de hecho, hoy en día el mercado del MDF en

Colombia supera los USD\$ 40 millones de ventas al año. La anterior información fue extraída del artículo hecho a la empresa TABLEMAC por la revista M&M en el año 2009.

c) ACRILICO:

Durabilidad: Es un material muy resistente, conserva la mayoría de sus propiedades cuando se sumerge en agua de temperaturas muy elevadas; es muy resistente al calor. Posee una gran rigidez y una baja tendencia a agrietarse por el esfuerzo.

Rigidez: Es un plástico muy rígido, usado en ingeniería, porque su estabilidad dimensional es muy buena, ofrece una alta resistencia a la deformación plástica y a la fatiga por vibración; con un bajo coeficiente de fricción; brinda una alta resistencia a la abrasión y a los productos químicos.

Densidad: Tiene una densidad aproximada de 2000 Kg/m³, esto en parte se debe a peso molecular de cada átomo que lo conforma C, H, O y N, ya que son ligeros y la separación entre cada uno de ellos dentro del material es relativamente grande.

Facilidad de trabajo: Es un material muy versátil, el cual se puede trabajar fácilmente con maquinas especializadas, ya que necesita condiciones muy precisas para poder darle la forma, dimensiones y características que se requieran. Es muy difícil trabajarlo con herramientas manuales.

Costos: Los precios que se presentan a continuación son de la cotización realizada a la empresa ACRILICOS B13.

- Calibre: 5mm
Color: transparente, blanco opal y humo
Medidas: 120*180cm
Valor unitario: \$190.000 IVA incluido.
- Calibre: 10mm
Color: transparente y blanco opal
Medidas: 120*180cm
Valor unitario: \$400.000 IVA incluido.

Demanda en el mercado: La industria del pastico ha tenido un ritmo de crecimiento moderado en las ultimas dos décadas (el momento de mayor apogeo fue durante las décadas de los cincuenta y sesenta), convirtiéndose en una materia prima imprescindible para la sociedad actual.

Los datos de durabilidad, rigidez, densidad, facilidad de trabajo y demanda en el mercado fueron extraídos de la investigación realizada por estudiantes de la universidad de San Buenaventura en su trabajo de grado titulado: “Construcción y optimización de un difusor QRD para ampliar su rango de frecuencias útiles”

EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES

Después de obtener la información de interés acerca de los diferentes materiales, a cada parámetro estudiado se le asignó una calificación de 0 a 5 (siendo 5 la mejor calificación y 0 la peor). La siguiente tabla muestra las calificaciones correspondientes a cada material:

Tabla 12. Evaluación cualitativa de los diferentes materiales.

Aspectos/Material	PINO	MDF	ACRILICO
Durabilidad	2	4	5
Rigidez	3	4	4
Densidad	4	2	3
Facilidad de trabajo	5	5	4
Costos	4	5	2
Demanda en el mercado	5	5	4
CALIFICACIÓN	3,8	4,2	3,7

De acuerdo a la calificación realizada, el material con mayor puntuación fue el MDF, por lo que el panel abfusor fue construido en este material.

4.3.2 Cantidades

Para la construcción del panel se necesitó madera de dos grosores diferentes. El primer grosor de 12 mm, que fue empleado para las caras frontales de las ranuras y las superficies límites del panel. Y el segundo grosor de 3 mm, que se utilizó para las divisiones existentes entre ranura y ranura del abfusor. En el interior del abfusor fue incluida acustifibra de 1” distribuida por la empresa Fiber Glass.

A continuación se presenta una tabla con las cantidades necesarias para cada uno de los materiales:

Tabla 13. Cantidades necesarias de los materiales para el abfusor.

Material	m(2) Necesarios	Tamaño lámina (Fabricante)	No. De láminas
MDF de 12 mm	3,46	2,44 x 1,83 m	1
MDF de 3 mm	2,65	2,44 x 1,83 m	1
Acustifibra de 1"	1,2	2,44 x 1,22 m	1

4.3.3 Proceso de construcción

La construcción del panel se hizo en 3 etapas: etapa de corte, etapa de perforación y por último etapa de ensamble. A continuación se describe más detalladamente cada una de las etapas.

Etapas de corte: Se realizó el corte de las láminas de la siguiente manera:

- 2 láminas de espesor 12 mm con dimensiones de 118 cm x 17 cm.
- 2 láminas de espesor 12 mm con dimensiones de 120 cm x 17 cm.
- 12 láminas de espesor 12 mm con dimensiones de 120 cm x 8,3 cm.
- 1 lámina de espesor 12 mm con dimensiones de 118 cm x 120 cm.
- 13 láminas de espesor 3 mm con dimensiones de 120 cm x 17 cm.

Etapas de perforación: Las perforaciones se realizaron a las 12 láminas de espesor 12 mm con dimensiones de 120 cm x 8,3 cm. El número de perforaciones por lámina y su respectivo diámetro se encuentra detallado en la siguiente figura:

Figura 28. Plano detallado de las perforaciones del panel abfusor.



donde d es la distancia en cm entre cada perforación.

Etapas de ensamble: Primero se ensambló las superficies límites del difusor, dando como resultado un cajón. Las láminas perforadas y las divisorias fueron ubicadas y pegadas con ayuda de puntillas y pegante para madera. La lámina posterior del panel que se muestra en la figura 29, a excepción del resto, fue acoplada con tornillos para poder quitar y poner, esto con el fin de poder adicionar o quitar la acustifibra del interior.

Figura 29. Vista posterior del panel abfusor.



4.4 MEDICIONES ACÚSTICAS

Los instrumentos necesarios para la medición de absorción con ISO 354 y la medición de difusión con la recomendación AES 4id fueron:

- Micrófono de medición ECM 8000.
- Fuente omnidireccional 01dB OMNI-12.
- Sonómetro RION.
- Interfaz de audio Fast track pro de M- Audio.
- Computador portátil.
- Software EASERA SysTune v.1.0.6

4.4.1 ISO 354. Medición de absorción.

Ambiente de Medición:

La norma ISO 354 establece como recinto de medición una sala reverberante con un volumen recomendado de 200 m³ y con materiales constructivos reflejantes para obtener altos tiempos de reverberación en su interior. Debido a la inexistencia de este tipo de recintos en Colombia, se vio la necesidad de buscar el lugar que mejor se adaptara a las condiciones exigidas por la norma.

El recinto escogido para la medición fue la sala receptora de un laboratorio de transmisión ubicado en las instalaciones de la empresa ACUSTEC DE COLOMBIA en la dirección Dg128 B Bis 56 C-14 en Bogotá.

Las características de la sala son:

- Volumen: 18,66 m³.
- Área superficial: 53,61 m².
- Dimensiones de la sala: 1,8m x 3,6m x 3,3m (ancho x largo x alto).
- Materiales constructivos: Concreto pintado y Baldosa. A continuación se presentan los coeficientes de absorción de estos materiales por bandas de octavas.

Tabla 13. Coeficientes de absorción de la baldosa y el concreto pintado.

Coeficientes de absorción						
Material/Frecuencia(Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Baldosa	0,02	0,04	0,05	0,05	0,1	0,05
Concreto pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02

Fuente: Libro *Master Handbook of Acoustic*.

Para confirmar que la sala cumple con el área de absorción necesaria para la prueba, se debe confirmar que los valores no sobrepasen los niveles estimados por la norma. De acuerdo con la ISO 354 los valores recomendados (sala ideal) se tienen que ajustar si el volumen no es de 200 m³, esto se hace multiplicando estos valores por el factor $(V/200)^{2/3}$.

A continuación se presenta una tabla que contiene los valores recomendados ajustados y los valores de la sala empleada para la medición.

Tabla 14. Área de absorción equivalente de la sala reverberante en ACUSTEC.

Área de absorción equivalente						
Sala/Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Sala Ideal (m ²)	1,5	1,5	1,5	1,6	2,1	2,9
Sala Acustec (m ²)	1,7	1,4	1,3	1,6	1,7	2,1

La sala no sobrepasa los valores recomendados, con excepción de la banda de 125 HZ. Es decir que esta cumpliendo en gran medida con esta condición.

Características de la muestra:

Debe tener un área ente 10 m² y 12 m², si el volumen de la sala es cercano a 200 m³. Se realizó una regla de 3 para hallar el área superficial necesaria para un volumen de 20 m³ y el resultado obtenido fue que el área de la muestra debía estar entre 1 m² y 1,2 m².

Para el cálculo del área de la muestra se tomó el área total de las placas perforadas, que son las que actúan como resonadores. El área calculada para las 12 láminas fue de 1,19 m². Esto quiere decir que la muestra cumple con la recomendación realizada por la norma, teniendo en cuenta las limitaciones del espacio.

La relación entre el ancho y el largo de la muestra debe estar en un rango de 0,7 y 1. La muestra cumplió con este requerimiento, ya que sus medidas totales de ancho y largo son 1,20 m x 1,20 m.

Según la ISO 354, si el objeto es muy pesado se puede ubicar en piso y recostado en alguna de las superficies limite de la sala. Ya que la muestra es de un peso muy elevado se siguió con esta recomendación y el panel se ubicó junto a una de las paredes del recinto como se puede observar en la imagen 30.

Figura 30. Ubicación del panel abfusor dentro del laboratorio de medición.



Temperatura y humedad:

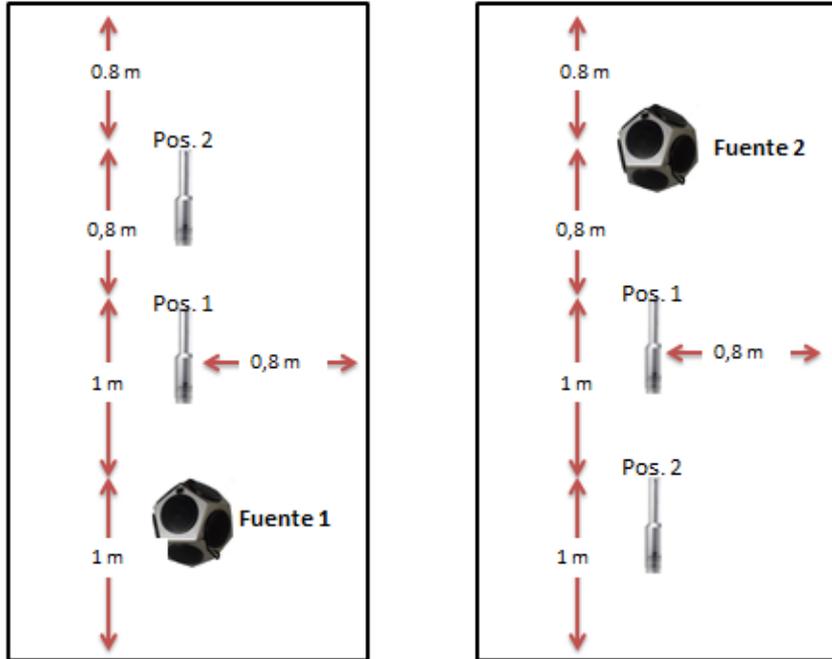
La temperatura de la sala está entre 15 C° y 18 C° y la humedad relativa está entre 45% y 55%. Estos parámetros cumplen con lo exigido por la norma, una temperatura de al menos 15° y una humedad relativa entre un rango de 30% y 90%.

Medición del tiempo de reverberación:

El procedimiento para llevar a cabo la medición se describe paso a paso a continuación:

- a) Se establecieron posiciones de micrófono y fuente. Por el tamaño reducido de la sala, se escogieron 2 posiciones de micrófono con dos posiciones de fuente. En la figura 31 se muestra el plano con las diferentes ubicaciones.

Figura 31. Ubicaciones de fuente y micrófono para la medición de absorción.



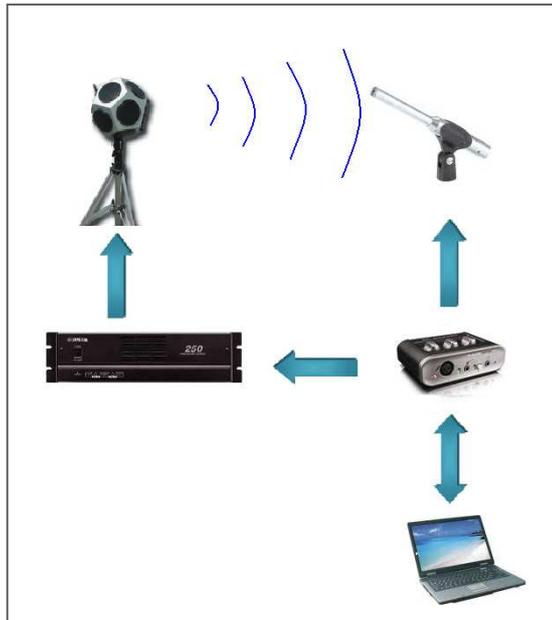
- b)** Se midió el nivel de presión sonora continuo equivalente (L_{eq}) sin ponderar durante 10 minutos, cuyo valor fue de 47 dB.

Figura 32. Medición de ruido de fondo en el laboratorio de medición de ACUSTEC.



- c) Se realizó el montaje de los equipos y las conexiones necesarias para la medición de tiempo de reverberación. A continuación se muestra el diagrama de conexión para las mediciones:

Figura 33. Diagrama de conexión para las mediciones de absorción.



- d) Se calibró el sistema, teniendo en cuenta que el nivel S/N debía superar 40 dB. El ruido de fondo al reproducir la señal dio un nivel de presión sonora de 90 dB, cumpliendo así con este requisito.
- e) Se midió el tiempo de reverberación **SIN** la muestra para cada una de las posiciones de micrófono y fuente determinadas anteriormente. El método de medición correspondiente al diagrama de conexión anterior es el de respuesta al impulso integrada.
- f) Se midió el tiempo de reverberación **CON** la muestra para cada una de las posiciones de micrófono y fuente determinadas anteriormente.

Se realizaron las mediciones de RT con las siguientes configuraciones del panel:

- Configuración 1: Panel con acustifibra en el interior pegada a las caras perforadas.
- Configuración 2: Panel con acustifibra en el interior pegada a la cara posterior.
- Configuración 3: Panel sin acustifibra en el interior.

Las imágenes 34 y 35 son fotografías tomadas el día de medición.

Figura 34. Medición de absorción del abfusor (posición de fuente1).



Figura 35. Medición de absorción del abfusor (posición de fuente2).



4.4.2 AES 4id-2001. Medición de difusión.

Ambiente de medición:

Según la recomendación el ambiente de medición debe ser una cámara anecóica. En el caso de no contar con un espacio así, se puede utilizar un espacio al aire libre para simular un ambiente libre de reflexiones. El lugar escogido para la medición fue la cancha de tenis de la Universidad de San Buenaventura Bogotá.

Campo de medición:

Con esta medición se quiere determinar la cantidad de difusión alcanzada por el elemento de prueba, hallando el coeficiente de difusión. Esta medición solo se puede hacer en *campo lejano*, por lo que la medición se realizó en este tipo de campo. Para asegurarse que las mediciones se hicieran en campo lejano se debía cumplir con las relaciones de la Ecuación 28.

En este caso:

$D_{\max} = 1,7$ metros.

$\lambda = 2,72$ m para 125 Hz (frecuencia mínima de medición).

$r_1 = 3$ metros.

$r_2 = 8$ metros.

Se comprobó que las relaciones anteriormente expuestas se cumplieran.

$$r = 4,36$$

$$2,56 \gg 0,6$$

$$4,36 \gg 1,7$$

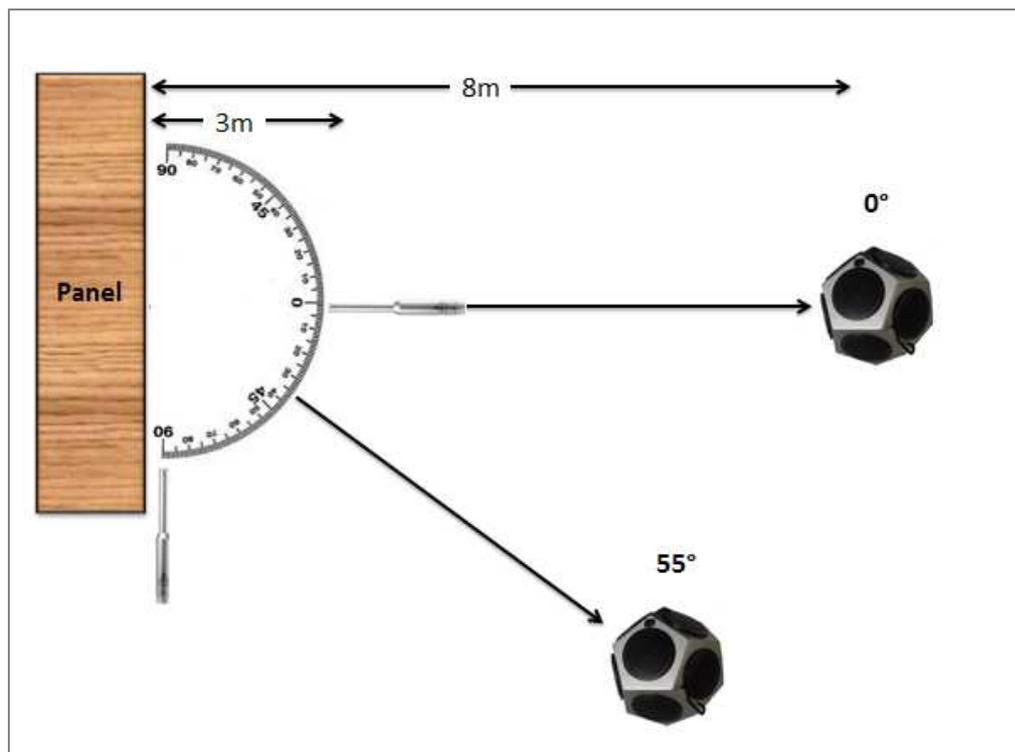
Superficies de medida

Se llevaron a cabo mediciones sobre dos diferentes superficies de medida. La primera fue una superficie plana de referencia que debía ser lisa, rígida y con las mismas dimensiones del panel difusor. Y la segunda superficie fue el panel difusor QRD unidimensional.

Posiciones de micrófono y fuente

Se realizó una grilla con las posiciones de micrófono a una resolución angular de 5° . Y con dos posiciones de fuente, una a 0° y otra a 55° como se muestra en la imagen 36.

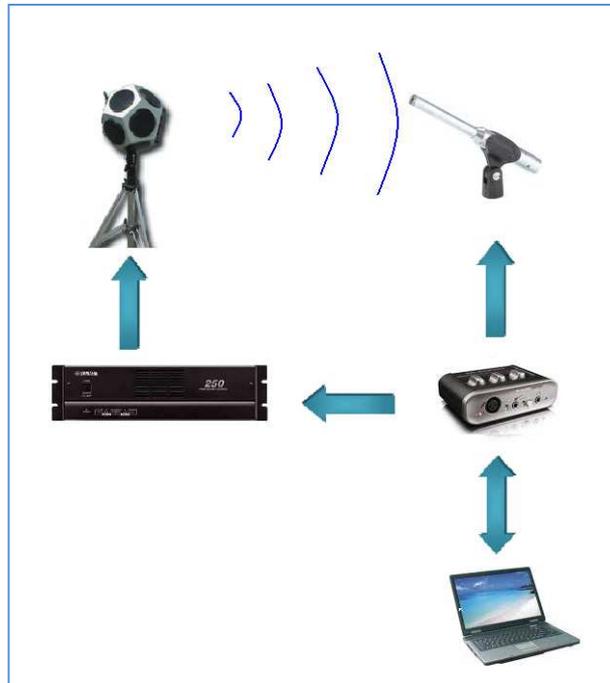
Figura 36. Posiciones de fuente y micrófono para la medición de difusión.



Procedimiento de medición

- a) Se realizó el montaje de los equipos y las conexiones necesarias para la medición. El método elegido para la obtención de los impulsos fue el de respuesta al impulso integrada, por medio de un barrido de frecuencias que iban de 100 Hz a 10 KHz con una duración de 10 segundos. A continuación se muestra el diagrama de conexión para las mediciones:

Figura 37. Diagrama de conexión para las mediciones de difusión.



- b) Se midió el nivel de presión sonora continuo equivalente (I_{eq}) sin ponderar durante 10 minutos, para determinar el ruido de fondo presente. El resultado fue de 58 dB, por lo tanto se procedió a calibrar el sistema, ajustando el nivel de presión sonora de la fuente 40 dB por encima del ruido de fondo.

- c) Se realizaron las siguientes pruebas para cada una de las posiciones de receptor y fuente:
- Respuesta al impulso con la superficie plana de referencia.
 - Respuesta al impulso con el abfusor.
- d) En total se realizaron 148 mediciones. A cada una de las mediciones se le realizó el proceso de convolución para obtener la respuesta al impulso integrada.
- e) De los dos impulsos resultantes, se eligió el impulso del sonido reflejado, ya que este es el que se debe analizar. A este impulso le fue aplicado la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener los valores de nivel de presión sonora por bandas de tercios de octava como lo exige la norma. Este proceso se realizó en el software EASERA SysTune v.1.0.6 con licencia de la Universidad de San Buenaventura.

A continuación se presentan una serie de fotografías tomadas el día de la medición.

Figura 38. Medición de difusión de la superficie de referencia.



Figura 39. Medición de difusión del panel abfusor en la posición de referencia.



Figura 40. Medición de difusión del panel abfusor con receptor a (-55°).



5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ABSORCIÓN DEL PANEL

Con las señales obtenidas de la medición se hizo la evaluación del tiempo de reverberación. Los RT promediados que se obtuvieron para cada configuración se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 15. Tiempo de reverberación para cada configuración del panel.

TIEMPO DE REBERVERACIÓN								
Configuración/ frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
RT configuracion 1 (s)	1,25	1,46	1,53	1,61	1,50	1,51	1,25	0,89
RT configuracion 2 (s)	1,32	1,57	1,51	1,64	1,52	1,50	1,25	0,88
RT configuracion 3 (s)	1,25	1,44	1,50	1,48	1,47	1,46	1,22	0,87
RT sala vacia (s)	1,40	1,77	2,11	2,43	1,95	1,77	1,45	0,99

- Configuración 1: Panel con acustifibra en el interior pegada a las caras perforadas.
- Configuración 2: Panel con acustifibra en el interior pegada a la cara posterior.
- Configuración 3: Panel sin acustifibra en el interior.

Después de haber obtenido los valores de tiempo de reverberación CON y SIN la muestra (sala vacía), se despejaron los valores de absorción para cada una de las situaciones, con ayuda de la ecuación 23.

Los valores de absorción para cada configuración se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Área de absorción equivalente para cada configuración del panel.

ÁREA DE ABSORCIÓN EQUIVALENTE								
Configuración/ frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A1 configuracion 1 (m2)	2,45	2,09	2,00	1,90	2,04	2,02	2,44	3,45
A1 configuracion 2 (m2)	2,31	1,94	2,02	1,86	2,01	2,04	2,44	3,46
A1 configuracion 3 (m2)	2,44	2,12	2,04	2,06	2,08	2,10	2,51	3,53
A2 sala vacia (m2)	2,18	1,72	1,45	1,26	1,57	1,72	2,11	3,08

El paso a seguir fue el cálculo de la absorción total (A_t), la cual es la diferencia entre la absorción con la muestra (A2) y la absorción sin la muestra (A1).

Los valores de absorción total para las tres configuraciones fueron:

Tabla 17. Área de absorción total para cada configuración del panel.

ÁREA DE ABSORCIÓN TOTAL (A2-A1)								
Configuración/ frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A_t configuracion 1 (m2)	0,27	0,37	0,56	0,64	0,47	0,30	0,34	0,37
A_t configuracion 2 (m2)	0,13	0,22	0,57	0,61	0,44	0,32	0,34	0,38
A_t configuracion 3 (m2)	0,26	0,40	0,59	0,81	0,51	0,37	0,41	0,45

Finalmente se cálculo el coeficiente de absorción de la muestra por bandas de octava, con ayuda de la Ecuación 27.

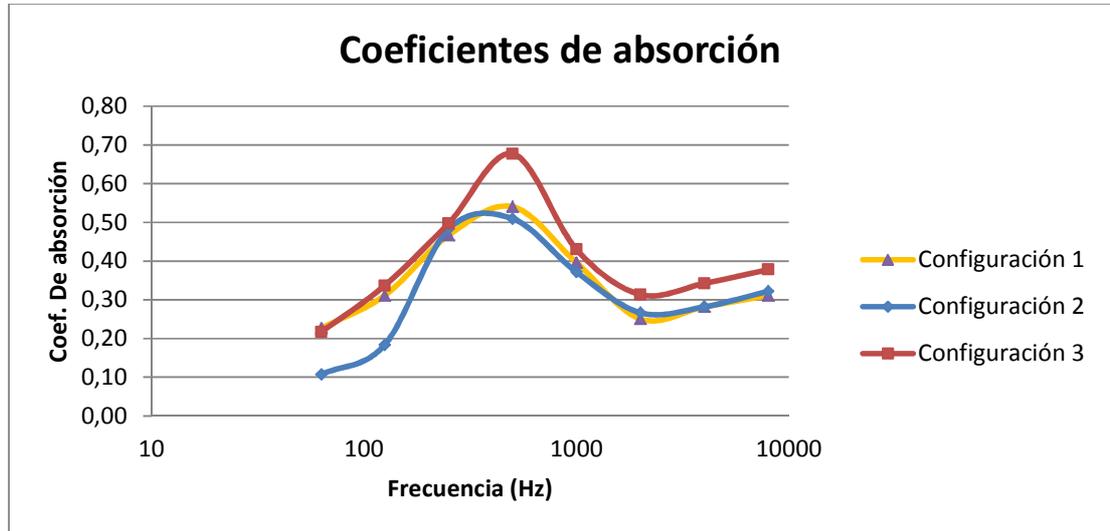
En la tabla 18 se presentan los valores de coeficiente de absorción para las diferentes configuraciones del panel abfusor.

Tabla 18. Coeficientes de absorción para cada configuración del panel.

COEFICIENTES DE ABSORCIÓN								
Configuración/ frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
α configuracion 1	0,23	0,31	0,47	0,54	0,40	0,25	0,28	0,31
α configuracion 2	0,11	0,18	0,48	0,51	0,37	0,27	0,28	0,32
α configuracion 3	0,22	0,34	0,50	0,68	0,43	0,31	0,34	0,38

En la siguiente Gráfica se pueden observar los resultados obtenidos:

Gráfica 9. Coeficientes de absorción del panel en sus diferentes configuraciones.



- Configuración 1: Panel con acustifibra en el interior pegada a las caras perforadas.
- Configuración 2: Panel con acustifibra en el interior pegada a la cara posterior.
- Configuración 3: Panel sin acustifibra en el interior.

De acuerdo a los coeficientes de absorción obtenidos en cada configuración se puede señalar que:

- La absorción máxima alcanzada por el panel en cualquiera de sus configuraciones es en la banda de 500 Hz.
- La curva referente a la configuración 3 es la más selectiva de las tres. Es decir, al dejar la cavidad de aire vacía, la curva se hizo más selectiva a la frecuencia de resonancia (500 Hz).
- La configuración 1, muestra una distribución mas uniforme en todo el rango de frecuencias. Al ubicar la acustifibra junto a las caras perforadas hizo que la absorción en la frecuencia de resonancia disminuyera. Esta ubicación también generó absorción en frecuencias por debajo a la frecuencia de resonancia (500 Hz).

- La diferencia entre la configuración 1 y 2 radica únicamente en frecuencias bajas. Al poner la acustifibra en la cara posterior del panel generó pérdida de absorción en las bandas de 63 y 125 Hz.
- Existe una baja absorción en frecuencias altas debido a que el panel abfusor se diseñó para absorber en un rango de frecuencias entre 63 Hz a 500 Hz. A pesar de llevar acustifibra en su interior, material con coeficientes de absorción por encima de 0,9 en bandas superiores a 1000 Hz, no generó absorción en este rango de frecuencias. Esto se debe a que el área superficial efectiva de la acustifibra es equivalente al área superficial de las perforaciones, es decir muy reducida.

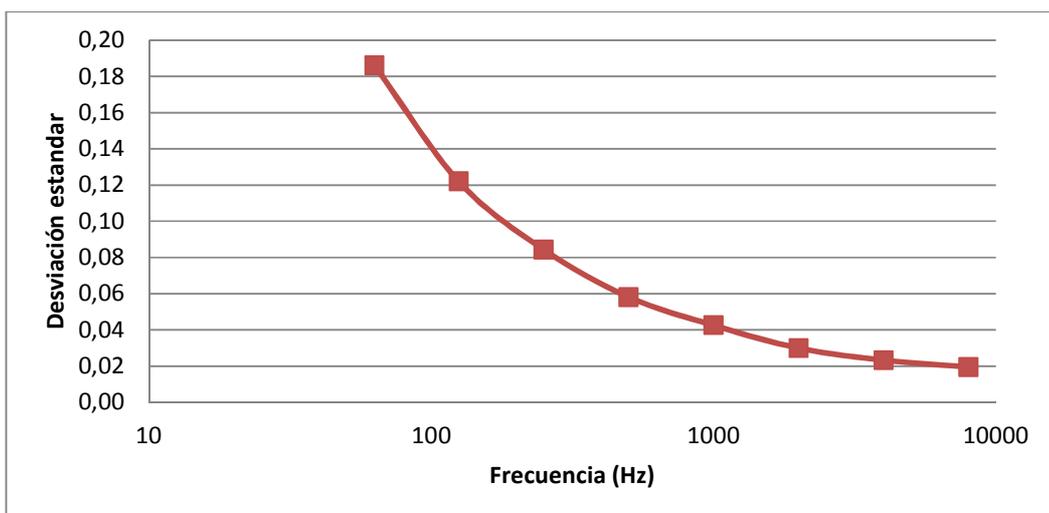
De acuerdo a las mediciones de absorción realizadas al panel abfusor y a los resultados que estas arrojaron, es correcto afirmar que el panel cumple con la función de absorber el sonido en todo el rango de frecuencia desde 63 HZ hasta 8000 Hz, con un aumento significativo del coeficiente de absorción en la banda de 500 Hz.

INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

- **Por la repetitividad de las mediciones**

A continuación se presenta la gráfica correspondiente a la desviación estándar del tiempo de reverberación según el número de repeticiones realizadas.

Gráfica 10. Incertidumbre de la medición por la repetitividad de las mediciones.



Se puede ver que a medida que aumenta la frecuencia, esta incertidumbre de medición se va haciendo mínima. Las bandas de 63 y 125 Hz presentan una incertidumbre de 0,19 y 0,12 respectivamente, valores demasiados altos que van a influir en los resultados finales de los coeficientes de absorción. Hay que tener en cuenta que los resultados presentados están sujetos a esta incertidumbre de medición.

Por el recinto de medición

Los modos propios plantean dificultades particulares al caracterizar el tiempo de reverberación de salas pequeñas. Se han realizado estudios donde se ha demostrado por medio de mediciones que las frecuencias encontradas entre los modos presentan curvas de decaimiento más rápidas, es decir un menor tiempo de reverberación; mientras que las frecuencias modales presentan tiempos largos de decaimiento y lo que se va a obtener en las mediciones es la velocidad de desintegración de los distintos modos, más no la condición promedio de la sala.

El concepto de tiempo de reverberación es difícil de aplicar a salas pequeñas con dimensiones comparables a la longitud de onda. Las ecuaciones de tiempo de reverberación de Sabine, Eyring-Norris, entre otras, se basan en la hipótesis de un espacio cerrado con una distribución uniforme de la energía sonora y con una propagación del sonido en dirección aleatoria. A bajas frecuencias, una sala pequeña presenta una distribución de la energía desigual y la dirección de propagación del sonido está lejos de ser aleatoria.

Según la norma ISO 354, por debajo de los 100 Hz es difícil obtener mediciones de tiempo de reverberación exactas, debido a la densidad modal en bajas frecuencias del tiempo de reverberación. Esta consideración es válida para recintos que cumplan con el volumen recomendado por la norma, volumen que se encuentra en un rango de 150 m³ a 200 m³.

En el caso del recinto empleado para las mediciones, cuyo volumen es de 18,66 m³, el efecto de los modos propios de la sala va a ser mayor que en una sala de gran tamaño por lo explicado anteriormente. De acuerdo a la acústica ondulatoria, la fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

Ecuación 32. Frecuencia superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia nula.

$$F_{max} = 1849 \sqrt{\frac{Rt_{mid}}{V}}$$

Fuente: Libro *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. p. 58.

siendo Rt_{mid} el tiempo de reverberación promedio entre las bandas de 500 Hz y 1000 Hz en segundos y V el volumen de la sala en m^3 .

Por medio del uso de la ecuación anterior, se calculó la frecuencia límite a partir de la cuál se puede tener una exactitud mayor en las mediciones.

$$F_{max} = 1849 \sqrt{\frac{2,19}{18,66}} = 633 \text{ Hz}$$

Esta frecuencia se encuentra en la banda de octava de 500 Hz, se considera que las bandas por debajo de esta frecuencia no van a arrojar datos exactos, es decir que las bandas de frecuencia de 63, 125 y 250 Hz van a tener variaciones del tiempo de reverberación por los modos propios de la sala en estas bandas de frecuencias.

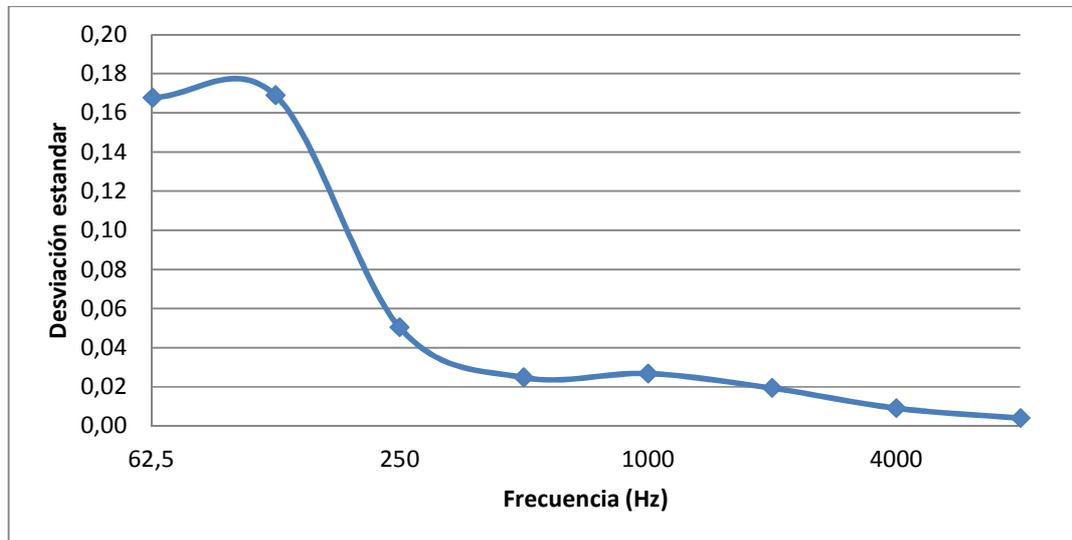
A partir de las diferencias encontradas en las mediciones de tiempo de reverberación en cada posición del recinto, se pudo determinar la incertidumbre de los valores a causa del tamaño de la sala medida. A continuación se presenta la tabla con los valores de tiempo reverberación referentes a cada posición de medición. Se encuentran encerrados por círculos de color rojo, los valores con cambios considerables respecto al promedio.

Tabla 19. Valores de tiempo de reverberación para cada configuración por punto de medición.

	Posición/frec (Hz).	63	125	250	500
Panel con acustifibra pegada a las perforaciones	Fuente 1 - Mic 1	1,38	1,39	1,57	1,49
	Fuente 1 - Mic 2	1,47	1,42	1,58	1,52
	Fuente 2 - Mic 1	1,31	1,39	1,62	1,48
	Fuente 2 - Mic 2	1,68	1,90	1,66	1,50
	<i>Desviación est.</i>	0,16	0,25	0,04	0,01
Panel con acustifibra pegada a la madera lateral	Fuente 1 - Mic 1	1,39	1,35	1,66	1,59
	Fuente 1 - Mic 2	1,51	1,47	1,57	1,51
	Fuente 2 - Mic 1	1,59	1,50	1,63	1,48
	Fuente 2 - Mic 2	1,81	1,73	1,70	1,50
	<i>Desviación est.</i>	0,18	0,16	0,05	0,05
Panel sin acustifibra	Fuente 1 - Mic 1	1,40	1,36	1,48	1,47
	Fuente 1 - Mic 2	1,47	1,41	1,41	1,45
	Fuente 2 - Mic 1	1,30	1,49	1,44	1,48
	Fuente 2 - Mic 2	1,59	1,74	1,59	1,48
	<i>Desviación est.</i>	0,12	0,17	0,08	0,01
Sala vacia	Fuente 1 - Mic 1	1,64	2,01	2,42	1,96
	Fuente 1 - Mic 2	1,64	2,04	2,41	1,95
	Fuente 2 - Mic 1	1,74	2,19	2,41	1,92
	Fuente 2 - Mic 2	2,08	2,20	2,48	1,97
	<i>Desviación est.</i>	0,21	0,10	0,03	0,02

De la anterior tabla se puede inferir que en la posición “Fuente 2 - Mic 2”, se presentan modos propios de la sala, ya que el tiempo de reverberación en ese lugar es mucho mayor que en el resto de posiciones. Las variaciones del RT entre punto y punto están entre 0,10 y 0,25. La incertidumbre de tiempo de reverberación causada por el recinto de medición se encuentra en la Gráfica 11.

Gráfica 11. Incertidumbre del tiempo de reverberación causada por el recinto de medición.



Las bandas de frecuencia con mayor incertidumbre son las bandas de 63 y 125 Hz con un valor de 0,17. Los resultados de coeficientes de absorción del panel abfusor se ven sujetos a estas variaciones de RT, ya que la absorción depende de forma inversamente proporcional al tiempo de reverberación. De acuerdo a la teoría expuesta anteriormente es correcto suponer que el tiempo de reverberación promedio debe ser menor, ya que la curva de decaimiento en una frecuencia modal es mayor que en una que no lo es, aumentando así mismo el valor de RT y afectando el valor promedio de las mediciones. Si el tiempo de reverberación puede ser menor en estas frecuencias significa que los coeficientes de absorción del panel en 63 Hz y 125 Hz pueden ser mayores a los calculados a partir de las mediciones.

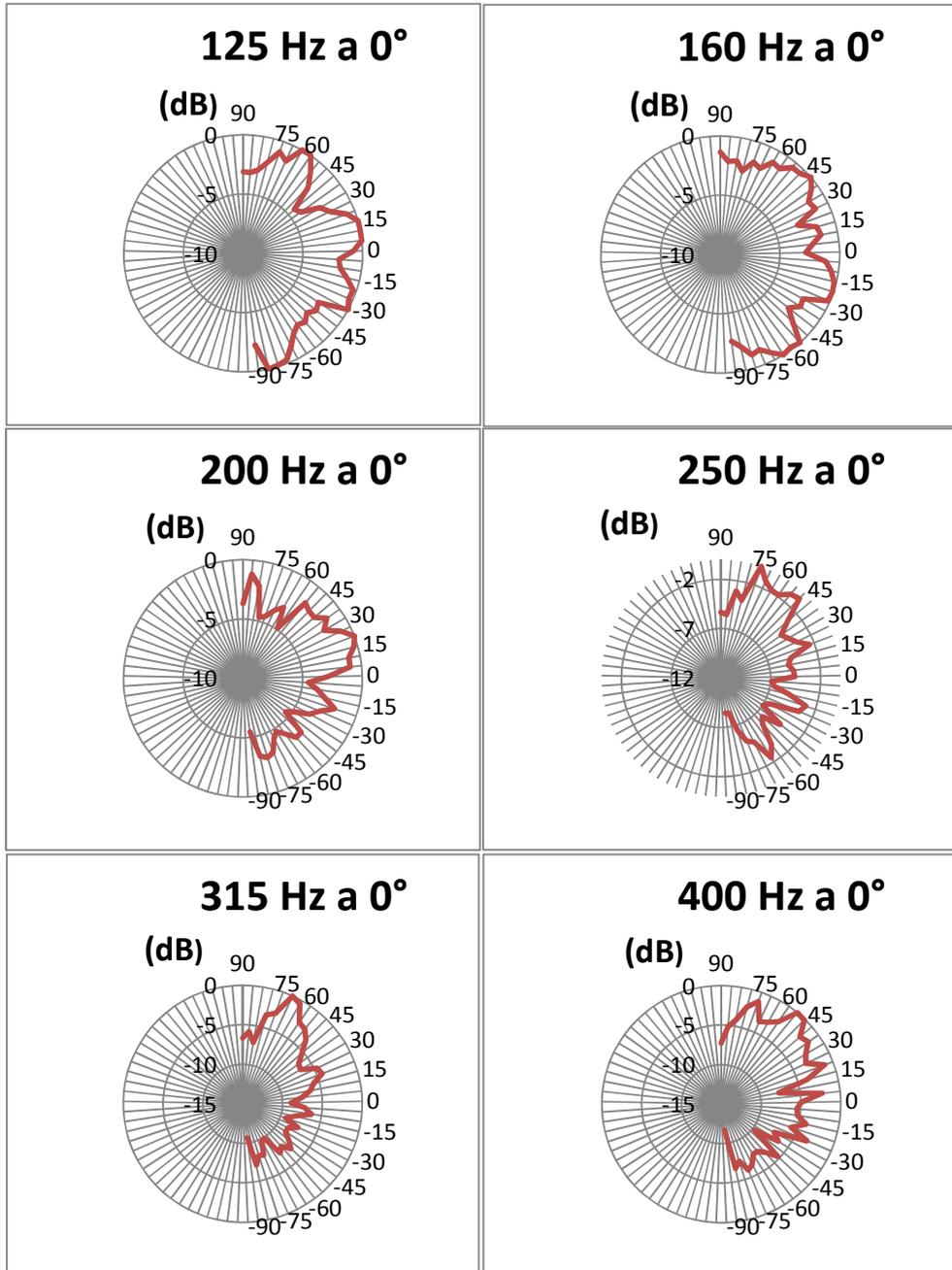
5.2 DIFUSION DEL PANEL

5.2.1 Respuesta polar

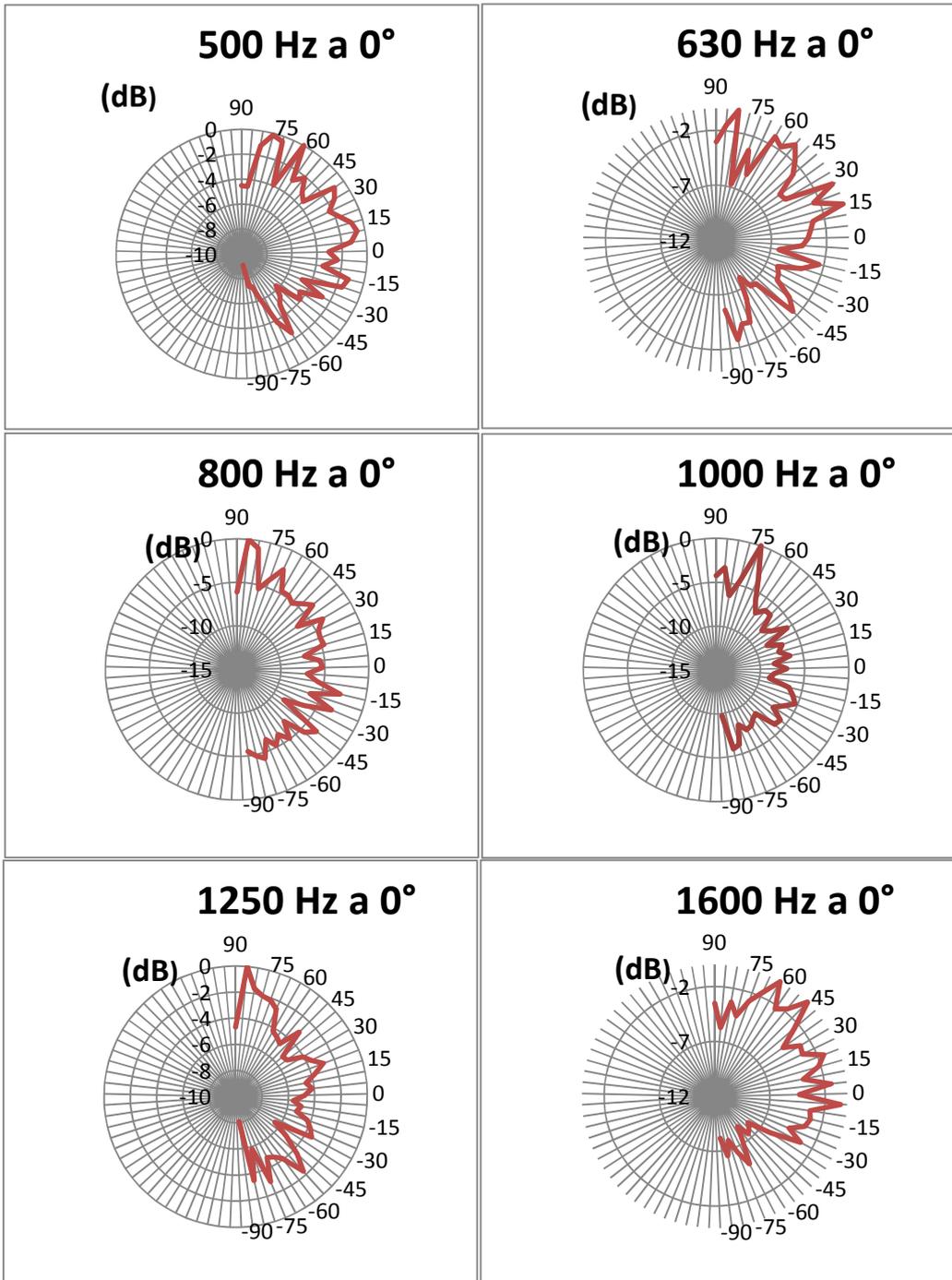
Es el nivel de presión sonora creado por la energía esparcida desde la superficie como una función del ángulo de medida sobre la referencia normal. Los valores graficados en los diagramas polares se obtuvieron por medio de una resta entre el nivel de presión sonora en cada posición y el nivel máximo encontrado en todas las posiciones. Este mismo procedimiento se hizo en cada banda de frecuencia.

A continuación se presentan los diagramas polares de difusión en incidencia normal (fuente a 0°).

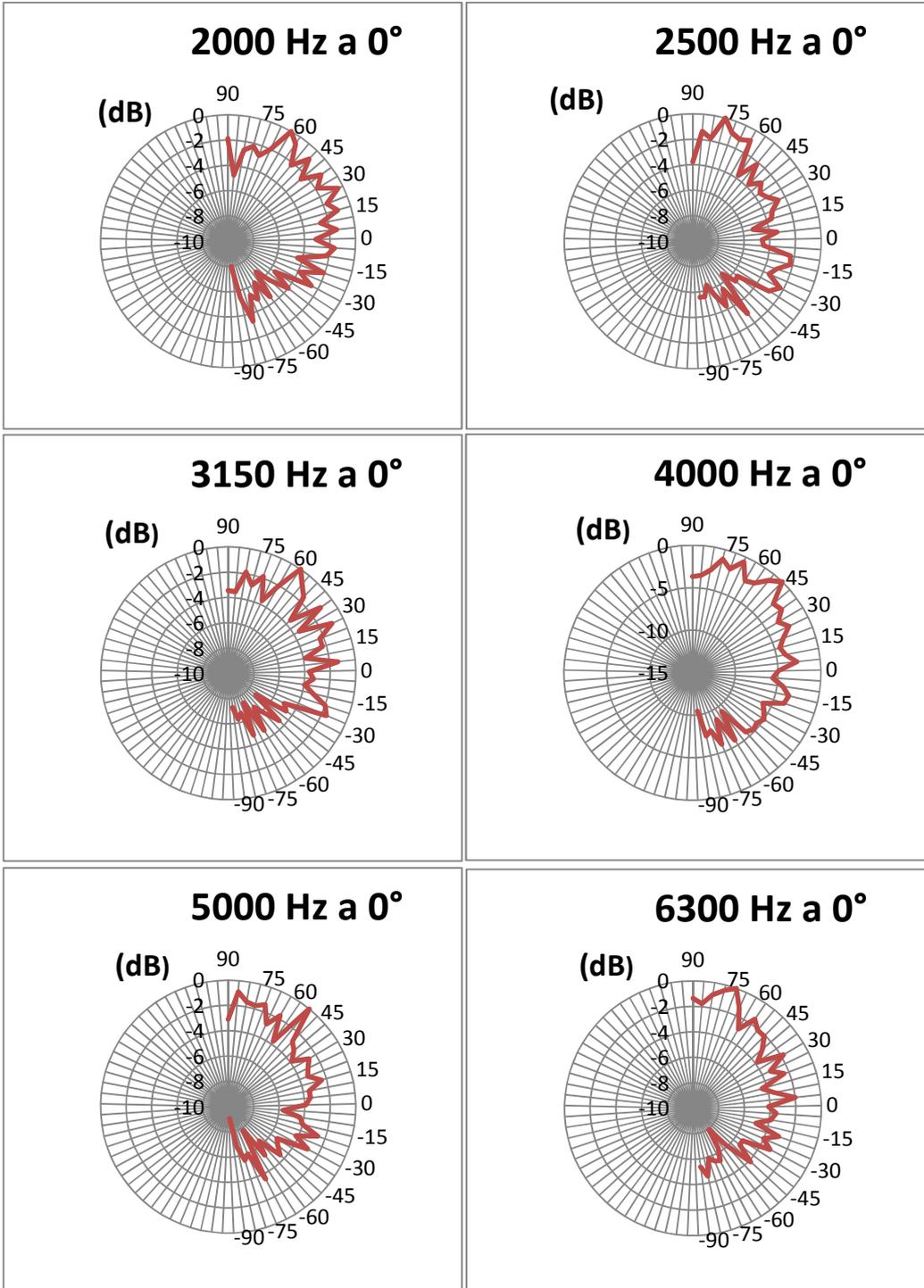
Gráfica 12. Patrones polares para las bandas entre 125Hz y 8000Hz para una incidencia a 0°.



Gráfica 12. (Continuación).



Gráfica 12. (Continuación).

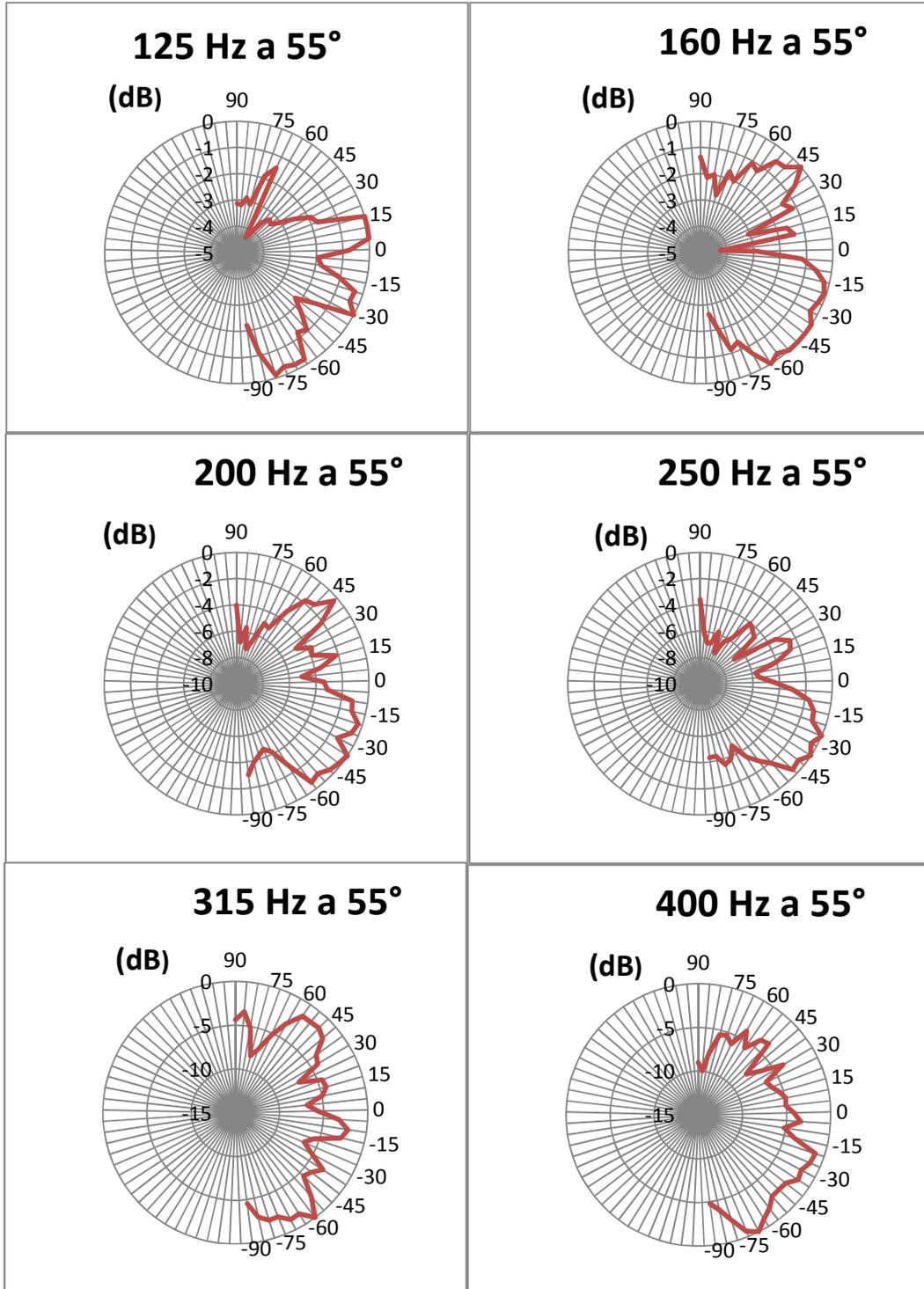


De las gráficas anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

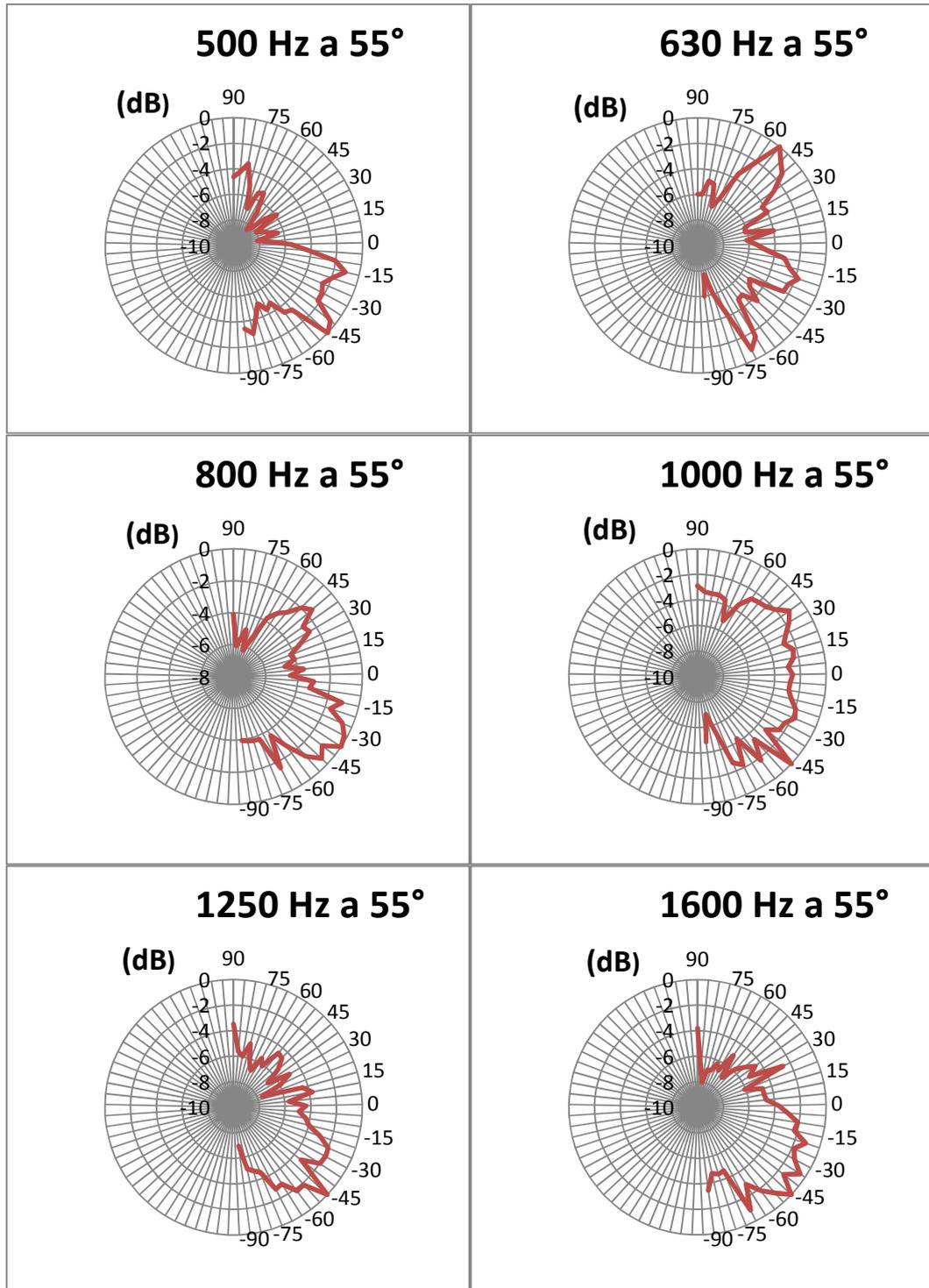
- Las bandas de frecuencias bajas que presentan mayor uniformidad espacial son las bandas de 125, 160 y 200 Hz, ya que no existen grandes diferencias entre los valores de una posición a otra en el plano semicircular.
- En los diagramas polares para la banda de 500 Hz y la banda de 630 Hz se puede observar claramente las 7 lobulaciones que fueron definidas en el diseño del panel con $m_{\max}=3$.
- En las bandas de frecuencias entre 1000 Hz y 2000 Hz (frecuencias iniciales de diseño del panel), se puede ver una buena dispersión de la energía sin presentar ningún tipo de reflexión especular sobresaliente. A pesar de no ser las bandas con la mejor distribución en todo el rango de frecuencia medido, presenta una buena uniformidad de la energía, en especial la banda de 2000 Hz.
- En el rango de frecuencias más altas, las bandas de 4000, 5000 y 6300 Hz presentan una buena distribución de la energía, evidente por la diferencia mínima existente entre los valores de un punto y otro.

A continuación se presentan los diagramas polares de difusión en incidencia normal (fuente a 55°).

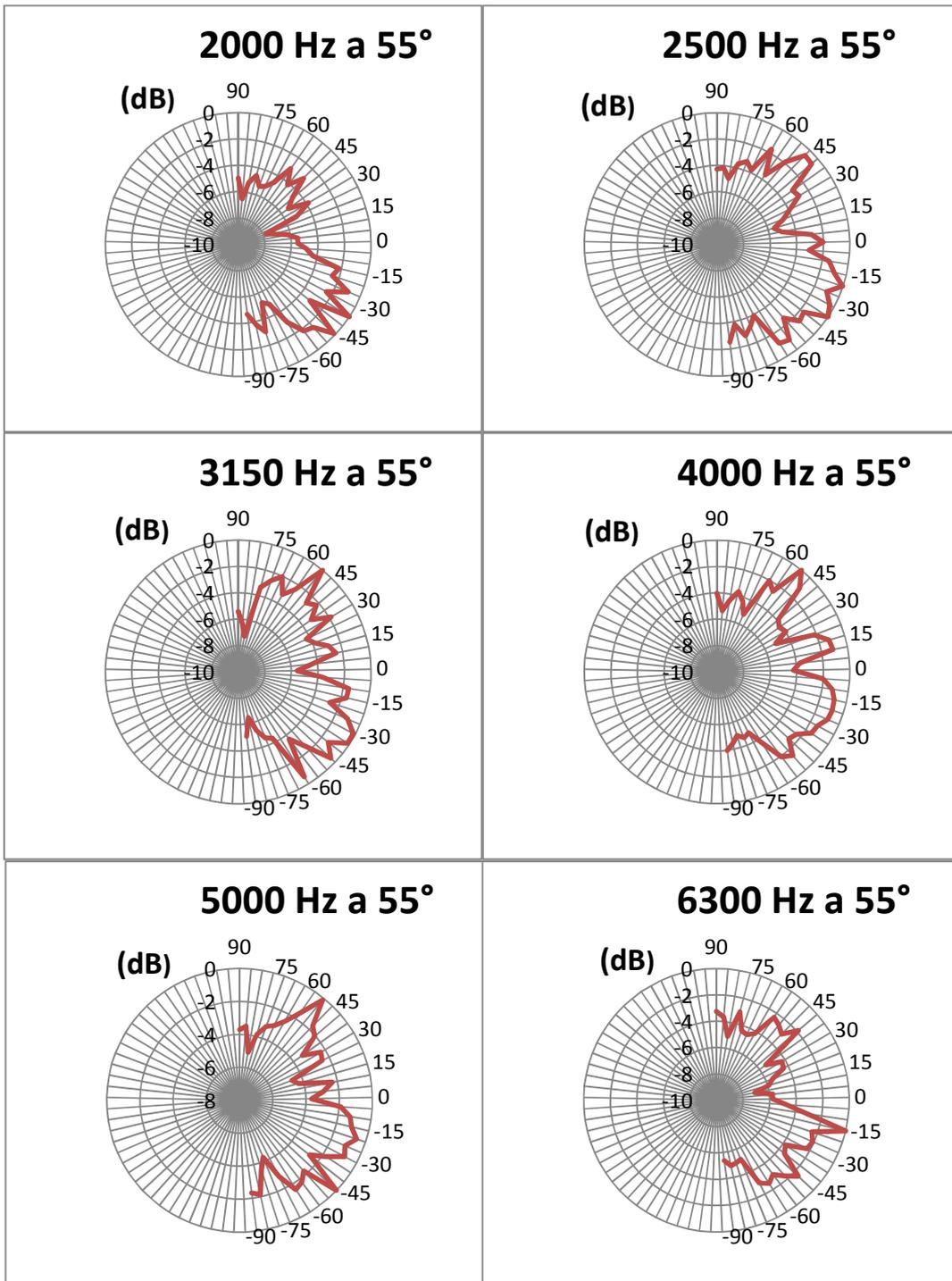
Gráfica 13. Patrones polares para las bandas entre 125Hz y 8000Hz para una incidencia a 55°.



Gráfica 13. (Continuación).



Gráfica 13. (Continuación).



De las gráficas anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

- Las respuestas polares para 160, 200, 400 y 500 Hz muestran una distribución más uniforme de la energía. Estas bandas de frecuencias se encuentran en el rango de diseño, que va desde 50 Hz hasta 630 Hz.
- Teniendo en cuenta que el ángulo de incidencia es de 55° , las respuestas polares para todas las bandas de frecuencia (con excepción de 1000 y 3150 Hz) evidencian una mayor concentración de la energía en dirección de la reflexión especular, es decir a -55° . Las bandas donde se hace más notoria esta concentración energética son: 250, 160, 400 y 500 Hz.
- Al igual que en la incidencia normal (a 0°), las bandas de frecuencia entre 1000 Hz y 2000 Hz, frecuencias para las cuales fue diseñado el panel, presentan una buena distribución de la energía.
- La banda con mejor uniformidad en todo el rango de frecuencias medido es la banda de 1000 Hz, evidenciable por la diferencia mínima existente entre los valores de un punto y otro.
- En cuanto al rango de frecuencias altas, sobresalen las bandas de 4000 y 5000 Hz por su uniformidad constante en la mayoría de puntos del plano semicircular.

5.2.2 Coeficiente de difusión direccional (d_θ)

Este coeficiente proporciona información acerca de la uniformidad de difusión producida por la superficie para una posición específica de fuente. Este valor está limitado entre 0 y 1. Un difusor que esparce el sonido completamente tiene un coeficiente de difusión de 1. Cuando el nivel de esparcimiento está concentrado en una localización, el coeficiente se acerca a 0. El subíndice θ indica el ángulo de incidencia relativo a la referencia normal de la superficie.

El cálculo del coeficiente se realizó en cada banda de tercio de octava, a partir de los niveles de presión sonora L_i en decibeles, de las 37 posiciones de receptor. La ecuación empleada para este cálculo fue:

Ecuación 33. Coeficiente de difusión direccional.

$$d_{\theta} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{Li}{10}}\right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{Li}{10}}\right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{Li}{10}}\right)^2}$$

Fuente: Recomendación AES 4id-2001.

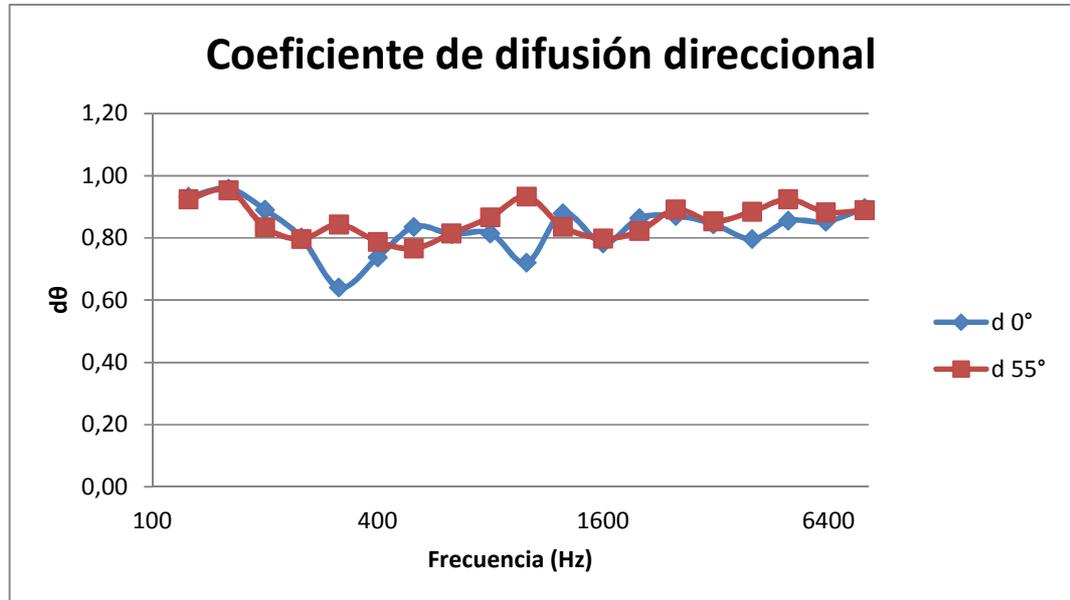
En la Tabla 19 se puede apreciar los coeficientes de difusión direccional para una incidencia normal a 0° y una incidencia a 55°.

Tabla 20. Coeficientes de difusión direccional del panel abfusor.

Frecuencia (Hz) / dθ	d 0°	d 55°
125	0,93	0,92
160	0,96	0,95
200	0,89	0,83
250	0,80	0,80
315	0,64	0,84
400	0,74	0,79
500	0,84	0,77
630	0,81	0,81
800	0,81	0,87
1000	0,72	0,93
1250	0,88	0,84
1600	0,78	0,80
2000	0,86	0,82
2500	0,87	0,89
3150	0,84	0,85
4000	0,80	0,88
5000	0,86	0,92
6300	0,85	0,88
8000	0,90	0,89

La gráfica que relaciona los datos de la anterior tabla se encuentra a continuación:

Gráfica 14. Coeficientes de difusión direccional del panel abfusor.



De la anterior grafica se desprenden las siguientes observaciones:

- La curva de incidencia a 0° y a 55° son muy similares en todo el rango de frecuencia con excepción de las bandas de 315 y 1000 Hz, en donde la incidencia de 55° tiene un mejor comportamiento y un coeficiente de difusión más alto que la incidencia normal. Este fenómeno no es común puesto que la incidencia normal debe tener un mejor comportamiento que si viniera de otra dirección, ya que las reflexiones especulares no son evidenciables en este ángulo de incidencia.
- Para ambas incidencias, el rango de frecuencias entre 125 Hz y 250 Hz (rango que abarca una octava) el coeficiente de difusión es bastante elevado, con valores entre 0,8 y 1 (valor máximo de difusión).
- Las bandas de frecuencia entre 2000 y 8000 Hz (rango que abarca dos octavas), presentan altos coeficientes de difusión. Todos los valores por encima de 0,8.
- Para la incidencia a 0° la banda de 160 Hz presenta un coeficiente más alto de difusión, coherente con lo anterior visto en la gráfica de respuesta polar.

- Para la incidencia a 55° las bandas de 160 Hz y 1000 Hz presentan los valores más altos de difusión, resultado de la buena distribución de la energía evidente en los diagramas polares de dichas frecuencias.

5.2.3 Coeficiente de difusión de incidencia aleatoria

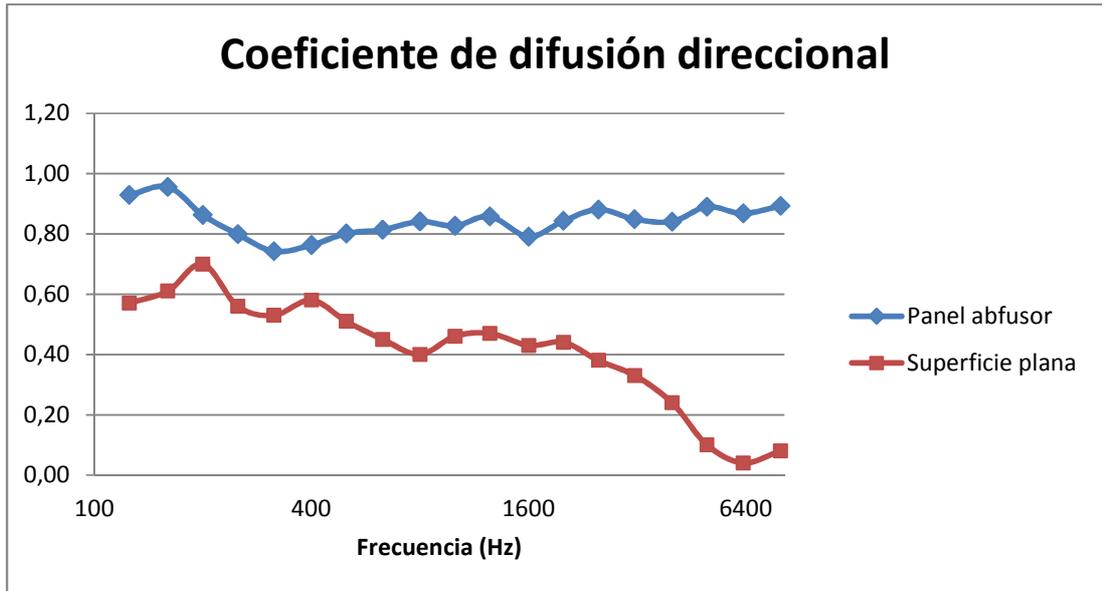
Para el cálculo de este coeficiente se promediaron los valores de los coeficientes de difusión direccional para 0° y para 55°. Este coeficiente es la medida general de la uniformidad de difusión del panel. En seguida se presenta la tabla y la gráfica que contiene los coeficientes de difusión aleatoria del panel abfusor y de la superficie plana de referencia.

Tabla 21. Coeficientes de difusión de incidencia aleatoria.

Incidencia aleatoria		
Frecuencia (Hz)	Panel abfusor	Superficie plana
125	0,93	0,57
160	0,96	0,61
200	0,86	0,7
250	0,80	0,56
315	0,74	0,53
400	0,76	0,58
500	0,80	0,51
630	0,81	0,45
800	0,84	0,4
1000	0,83	0,46
1250	0,86	0,47
1600	0,79	0,43
2000	0,84	0,44
2500	0,88	0,38
3150	0,85	0,33
4000	0,84	0,24
5000	0,89	0,1
6300	0,87	0,04
8000	0,89	0,08

Para una mejor comprensión de los datos obtenidos se realizó la siguiente gráfica:

Gráfica 15. Coeficientes de difusión de incidencia aleatoria.



De la anterior gráfica se desprenden las siguientes observaciones:

- Sin excepción de ninguna banda, todos los valores del panel abfusor superan en más de 0,1 los valores obtenidos por la superficie plana de referencia, lo que según la recomendación AES 4id es suficiente para considerar que se ha mejorado la uniformidad de difusión.
- Se puede considerar que el ancho de banda de difusión del panel es completa, ya que en todas las bandas se logra una difusión significativamente mayor comparada con la superficie plana de referencia.
- El panel abfusor difunde el sonido en el rango de frecuencias de diseño, es decir desde la banda de 100 Hz hasta la banda de 2000 Hz.

De los resultados de difusión realizados según la recomendación de la AES 4id presentados en este capítulo, es correcto afirmar que el panel cumple con la función de difundir el sonido en un rango de frecuencias extendido que va de 100 Hz a 8000 Hz. La difusión no esperada en altas frecuencias se puede deber a una difusión por cambios en el material, similar a un panel difusor de amplitud binaria BAD. Un panel BAD es una superficie plana híbrida que tiene la capacidad de absorber como de difundir. Estos tipos de paneles generan difusión en medias y altas frecuencias. La construcción típica de un BAD es un absorbente poroso que se enfrenta a una superficie perforada según una m-secuencia. El panel abfusor podría estar creando difusión adicional por modificación de la impedancia del medio de la misma forma que un difusor de amplitud binaria lo hace.

6. CONCLUSIONES

- La ubicación de material absorbente dentro de la cavidad del panel perforado influye en la forma de la curva de absorción. Cuando el absorbente se sitúa inmediatamente detrás del panel, la absorción es relativamente poco selectiva y a medida que dicho material se va separando del mismo, la curva se va estrechando. La absorción más selectiva se obtiene cuando el absorbente se coloca sobre la pared posterior. La diferencia del coeficiente de absorción en las dos condiciones extremas es de 0,2.
- De acuerdo a las mediciones de absorción y difusión realizadas al panel abfusor y a los resultados que estas arrojaron, es correcto afirmar que el panel cumple con la función de absorber el sonido en todo el rango de frecuencia desde 63 Hz hasta 8000 Hz, con un aumento significativo del coeficiente de absorción en la banda de 500 Hz. Además cumple con la función de difundir el sonido en un rango de frecuencias extendido que va de 100 Hz a 8000 Hz.
- Los coeficientes de absorción del panel abfusor calculados a partir de las mediciones están sujetos a las variaciones de RT producidas por los modos propios la sala. De acuerdo al comportamiento del tiempo de reverberación en una frecuencia modal y las variaciones que esto genera en el valor promedio del tiempo de reverberación, se llegó a la conclusión que el RT en 63 y 125 Hz podría ser menor, lo que significa coeficientes de absorción mas altos en dichas bandas de frecuencia.
- Si el panel hubiera sido diseñado para las frecuencias bajas a las cuales está difundiendo (200 Hz a 800 Hz) se hubieran necesitado 29 ranuras con un ancho de 21 cm cada una, lo que daría en su totalidad un panel de aproximadamente 6 m de largo. Por lo que se puede afirmar que al perforar las láminas se extiende significativamente el rango de difusión hacia frecuencias mas bajas mediante la adición de masa al sistema, reduciendo la frecuencia de resonancia.
- Además de conseguir que la energía incidente se difundiera por medio de diferencias de fase producidas por los pozos; se generó difusión por cambios en la impedancia de la superficie a partir de resonadores de Helmholtz sintonizados a diferentes frecuencias.
- La difusión no esperada en altas frecuencias se puede deber a una difusión por cambios en el material, similar a un panel difusor de amplitud binaria BAD. La construcción típica de un BAD es un absorbente poroso que se enfrenta a una superficie perforada según una m-secuencia. El panel abfusor podría estar creando

difusión adicional por modificación en la impedancia del medio, de la misma forma que un difusor de amplitud binaria lo hace.

- En cuanto al comportamiento del panel en frecuencias altas, las partes reflejantes de la superficie se encargaron de reflejar el sonido, ocultando ciertas partes de la fibra de vidrio ubicada detrás de las placas perforadas, causando disminución en la absorción de frecuencias altas, pero creando difusión en este rango de frecuencias.

7. RECOMENDACIONES

- Es necesario cumplir con las disposiciones y recomendaciones hechas por la normatividad empleada, pues de esto depende la confiabilidad de los resultados. En Colombia no existen recintos especializados para la medición de absorción y difusión, los cuales son sala reverberante y cámara anecóica respectivamente. Ya que no se cuentan con estos espacios, de debe buscar que el ambiente de medición sea similar al proporcionado por este tipo de recintos.
- La programación de un algoritmo facilita el cálculo de la secuencia y las profundidades del difusor y así mismo el cálculo de las perforaciones del resonador.
- En la elección del material constructivo del panel, se debe tener en cuenta el peso del material empleado, ya que si el elemento a construir es de gran tamaño, el peso del mismo será bastante elevado y se dificultará su movilidad y transporte.
- Realizar pruebas de difusión en campo cercano con el propósito de evaluar errores en este campo, particularmente de focalización.
- A partir de las conclusiones entregadas en este documento generar una investigación acerca de la relación existente entre las perforaciones y la profundidad de las ranuras de un panel difusor QRD.

BIBLIOGRAFÍA

- ARAU, Higinio. ABC de la Acústica Arquitectónica. Barcelona: Ediciones CEAC, 1999.
- COX, Trevor y D'ANTONIO, Peter. Acoustic absorbers and diffusers: Theory, design and application. New York: Taylor & Francis, 2009.
- EVEREST, Alton. Master handbook of acoustic. Estados Unidos: The McGraw-Hill Companies, 2009.
- ISBERT, Antoni, Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Barcelona: Edicions UPC, 1998.
- HAUSER, Gabriel, DIRK, Noy y STORIK, John. Commercial low frequency absorber: a comparative study. Nueva York: Audio Engineering Society, 2008.
- MILLAN, Andrés Felipe. Difusor QRD aplicando la teoría de fractales, concepto binario y resonador de Helmholtz multisintonía. Trabajo de grado Ingeniero de Sonido. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sonido, 2008.
- PAYNE, Elizabeth y Angus, Jamie. Improvements to Binary Amplitude Diffusers. Viena: Audio Engineering Society, 2007.
- AES 4id-2001. Characterization and measurement of surface scattering uniformity.
- ISO 354. Measurement of sound absorption in a reverberation room.
- Website disponible en:
file:///C:/Users/DianaM/Desktop/EScritorio/Laboratorio%20de%20Productos%20F
orestales%20-%20Fichas%20T%C3%A9cnicas.htm

GLOSARIO

Absorbente acústico: Materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de los recintos, por su capacidad de absorber la mayor parte de la energía que reciben.

Absorción sonora: Proceso físico por el cual la energía de una onda sonora se transforma en cualquier otra forma de energía, generalmente calorífica, al atravesar un medio o incidir sobre una superficie.

Abfuser: Superficie híbrida que tiene las cualidades de absorber y difundir el sonido al mismo tiempo.

Acondicionamiento acústico: Tratamiento de las superficies de un recinto mediante materiales absorbentes, reflectores o difusores con el fin de mejorar sus características acústicas y crear un campo sonoro difuso.

Acústica arquitectónica: Rama de la acústica, que se encarga del acondicionamiento acústico de recintos, bien sea, en lugares abiertos (al aire abierto) o en salas cerradas.

Análisis de espectro: Medición cuyo objeto es determinar el espectro de un sonido o una señal.

Banda de octava: Un rango de frecuencias especificado.

Cámara anecoica: Recinto revestido en todas sus superficies con materiales acústicos de muy alta absorción en el cual se ha eliminado prácticamente toda reflexión sonora, anulando los efectos de eco y reverberación del sonido.

Cámara reverberante: Recinto cuyas superficies han sido tratadas con materiales muy reflectores (como por ejemplo alicatado cerámico).

Campo difuso: Campo sonoro tal que en un punto dado es igualmente probable cualquier dirección instantánea de la onda sonora.

Campo directo: Parte del campo sonoro debido a las ondas sonoras que llegan desde la fuente sin haber experimentado ninguna reflexión.

Campo lejano: La porción del campo sonoro de una fuente de sonido en que el nivel de presión sonora (debido a esta fuente) desciende en 6 dB por cada duplicación de la distancia desde una fuente puntual.

Coefficiente de absorción sonora: Cociente entre la energía incidente y la energía absorbida por una superficie o sustancia. Normalmente, se expresa en Sabios dentro de una escala de 0 a 1.

Decibelio: Unidad en la que se expresa el nivel de presión sonora, y en general la relación entre dos valores de presión, tensión eléctrica, o potencia.

Difusión: Efecto de redistribuir la energía espacial y temporalmente, esta energía incide sobre un elemento que es el responsable de la difusión y que recibe como nombre Difusor.

Difusor: Dispositivo o superficie física que causa la difusión del sonido

Reflector: Superficie altamente reflejante.

Resonador: Sistema de resonancia sintonizado a una frecuencia única.

Respuesta al impulso: Huella digital de cualquier sistema, recintos y/o dispositivo

ANEXOS

ANEXO A. PROTOCOLOS DE MEDICIÓN

PROTOCOLO DE MEDICIÓN ISO 354

Elementos necesarios para realizar las mediciones:

- Micrófono de medición omnidireccional.
- Fuente omnidireccional (dodecaedro).
- Tarjeta de sonido (interfaz de audio).
- Computador portátil con software de grabación de audio y de análisis de señales.
- Flexómetro
- Papel y lápiz.

El procedimiento que se debe llevar a cabo según la norma ISO 354, se describe paso a paso a continuación:

- 1) Realizar las mediciones arquitectónicas al recinto (sala reverberante), para calcular su volumen y verificar que este cumpla con el valor de 200 m^3 , valor recomendado por la norma. Es necesario adicionalmente comprobar que el recinto cumpla con la siguiente relación:

$$I_{max} < 1,9 V^{1/3}$$

Donde:

I_{max} es la longitud de la línea recta mas larga dentro del recinto (en m).

V es el volumen del recinto (en m^3).

- 2) Confirmar que la muestra cumpla con las características estimadas en la normatividad. Las características que debe cumplir son:
 - Debe tener un área de 10 m^2 a 12 m^2 , si el volumen es cercano a 200 m^3 .
 - Debe existir una relación entre su ancho y largo de 0,7 a 1.

- 3) Hacer las mediciones de temperatura y humedad relativa y comparar estos con los valores recomendados en la norma. Esos valores son de 30% a 90% para la humedad y de 15° C como mínimo para la temperatura.
- 4) Determinar la posición de la muestra. Dependiendo del tipo de elemento que se quiere medir, se elige el tipo de montaje más adecuado (tipos de montaje explicados en el anexo B de la norma en cuestión).
- 5) Establecer las posiciones de micrófono y fuente. Por lo menos se deben elegir 3 posiciones de micrófono y 2 posiciones de fuente. La distancia del micrófono a la fuente debe ser de 1,5 m como mínimo y a 1 m de la muestra y de las superficies límites de la sala. Entre cada posición de fuente debe haber una separación de por lo menos 3 metros.
- 6) Realizar el montaje de los equipos y las conexiones necesarias para la medición de tiempo de reverberación.
- 7) Medir el tiempo de reverberación **SIN** la muestra para cada una de las posiciones de micrófono y fuente determinadas anteriormente. El método de medición correspondiente al diagrama de conexión anterior es el de respuesta al impulso integrada. También se puede realizar la medición con el método de ruido interrumpido, esto va en la elección del ingeniero.
- 8) Medir el tiempo de reverberación **CON** la muestra para cada una de las posiciones de micrófono y fuente determinadas anteriormente.
- 9) Con las señales obtenidas de la medición, se hace la evaluación del tiempo de reverberación 5 dB por debajo del nivel de presión sonora inicial, con un rango de evaluación de 20 dB.
- 10) Después de obtener los valores de tiempo de reverberación con y sin la muestra, se despejan los valores de absorción para cada una de las situaciones (A1 y A2). La ecuación utilizada es:

$$A = \frac{55,3V}{CT} - 4m$$

donde:

V es el volumen de la sala (en m³).

C es la velocidad de propagación del sonido (en m/s).

T es el tiempo de reverberación (en s)

m es el coeficiente de atenuación de energía.

- 11)** Calcular la absorción total (A_t), la cual es la diferencia entre la absorción con la muestra (A_2) y la absorción si la muestra (A_1). Es decir:

$$A_t = A_2 - A_1$$

- 12)** Calcular el coeficiente de absorción de la muestra por bandas de tercio de octava, con ayuda de la siguiente ecuación:

$$\alpha_s = \frac{A_t}{S}$$

PROTOCOLO DE MEDICIÓN AES 4id-2001

Elementos necesarios para realizar las mediciones:

- Micrófono de medición omnidireccional.
- Fuente omnidireccional (dodecaedro).
- Sonómetro.
- Tarjeta de sonido (interfaz de audio).
- Computador portátil con software de grabación de audio y de análisis de señales.
- Flexómetro.
- Transportador.

El procedimiento que se debe llevar a cabo según la recomendación AES 4id, se describe paso a paso a continuación:

- 1) Escoger un lugar óptimo para llevar a cabo las mediciones. Según la recomendación el ambiente de medición debería ser una cámara anecóica. En el caso de no contar con un espacio así, se puede utilizar un espacio grande que no se anecóico para simular un ambiente libre de reflexiones poniendo una ventana de tiempo en la respuesta al impulso medido antes de aplicar FFT o también usando las mediciones TDS para excluir las reflexiones.
- 2) Confirmar que la muestra cumpla con las características estimadas en la recomendación. Las características que debe cumplir son:
 - Debe tener una superficie e impedancia acústica constante en una dirección. (difusor de un solo plano)
 - En lo posible, la muestra bajo prueba debe ser la misma que se colocará dentro del auditorio real.
 - Si la muestra es de tamaño muy grande se deben medir por lo menos 4 secuencias completas repetidas.
- 3) Determinar en que tipo de campo sonoro que se quiere medir:
 - Cuando se mide en campo cercano se quiere evaluar la función del difusor en una situación real donde alguna o todas las fuentes se encuentran en campo cercano. Esto se hace con el fin de determinar si hay focalizaciones de sonido.
 - Cuando se mide en campo lejano se quiere determinar la cantidad de difusión alcanzada por el elemento de prueba. La medición del coeficiente de difusión solo se puede hacer en campo lejano.
- 4) Para las mediciones de campo lejano se deben cumplir las siguientes relaciones:

$$r \gg D_{max}$$

$$r/D_{max} \gg D_{max}/\lambda$$

$$r = 2r_1r_2/(r_1 + r_2)$$

Donde:

D_{\max} es la dimensión mas larga del difusor.

λ es la longitud de onda.

r_1 es la distancia de la fuente al punto de referencia.

r_2 es la distancia desde el receptor hasta el punto de referencia.

r es la distancia entre el receptor (punto de referencia) y la fuente.

- 5) Establecer las posiciones de micrófono y fuente. Las posiciones de micrófono deben hacerse en una resolución angular máxima de 5° . Las posiciones de fuente para incidencia aleatoria deben hacerse en una resolución angular de 10° . Si el tiempo de medición es limitado, los coeficientes direccionales de difusión pueden ser obtenidos por ángulos de incidencia normal (0°) y de 55° . La fuente y el micrófono utilizados deben tener una respuesta omnidireccional.
- 6) Elegir el método de medición. La medición de la magnitud de la respuesta polar se puede obtener usando técnicas de función de transferencia como: Respuesta al impulso, FFT (Fast Fourier Transform), MLS, entre otras.
- 7) Realizar el montaje de los equipos y las conexiones necesarias para la medición de los impulsos.
- 8) Realizar las siguientes pruebas para cada una de las posiciones de receptor y fuente:
 - a) Respuesta al impulso con la superficie de prueba presente $h_1(t)$.
 - b) Respuesta al impulso sin la superficie de prueba presente $h_2(t)$.
- 9) El procedimiento para obtener la respuesta polar se describe a continuación:
 - a) Se obtiene la respuesta al impulso, ya sea de la superficie plana o de la superficie de prueba (difusor).
 - b) De esa respuesta al impulso se elimina el impulso que aparece primero (sonido directo) y se deja el impulso que aparece después (sonido reflejado).
 - c) Ahora se le aplica la FFT al impulso que nos quedó, esto para obtener los valores de intensidad reflejados por cada banda de tercio de octava.

- d) Ahora se deben comparar el valor de la intensidad de referencia (superficie plana) con la intensidad del difusor. Con estos valores obtenemos el coeficiente de reflexión R en cada punto de medición.

$$R = 1 - \left(\frac{10^{\frac{Lp \text{ referencia}}{10}} - 10^{\frac{Lp \text{ reflejado}}{10}}}{10^{\frac{Lp \text{ referencia}}{10}}} \right)$$

Donde:

Lp referencia es el valor de la intensidad reflejada por la superficie plana de referencia en decibeles.

Lp reflejado es el valor de la intensidad reflejada por la superficie bajo prueba en decibeles.

- e) El diagrama polar de esparcimiento se obtiene como resultado de graficar cada uno de los coeficientes de reflexión por banda de tercio de octava para cada uno de los 37 puntos (semicírculo). Hay que tener en cuenta que el coeficiente de reflexión varía entre 0 y 1 siendo el valor de 1 la máxima reflexión.

- 10)** Hallar el coeficiente de difusión direccional por bandas de tercio de octava, a partir de los niveles de presión sonora L_i (L_p reflejado para cada posición) en decibeles, en los n receptores.

$$d_{\theta} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2}$$

- 11)** Por último se calcula el coeficiente de difusión (incidencia aleatoria), este valor se halla promediando los coeficientes de difusión direccional.