

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO DE SONIDO
2. **TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PANEL ACÚSTICO VARIABLE ROTATORIO DE 360° CON CONTROL AUTOMÁTICO. (P.A.V.R)
3. **AUTORES:** Oscar Julián Mantilla García
4. **LUGAR:** Bogotá D. C.
5. **FECHA:** Noviembre 10 de 2014
6. **PALABRAS CLAVES:** Absorción, coeficiente de absorción, absorbente, reflexión, coeficiente de reflexión, reflejante, Difusión, coeficiente de difusión, patrón polar de difusión, difusor, tiempo de reverberación, respuesta al impulso, campo directo, campo lejano, análisis espectral.
7. **DESCRPCIÓN DEL TRABAJO:** La siguiente investigación trata del diseño y construcción de un panel prismático que tendrá características para difundir, reflejar o absorber el sonido, esto con el fin de optimizar los espacios donde se quiera implementar este panel. Es necesario realizar una recopilación de información en proyectos de grado, libros, artículos investigativos; con el propósito de crear una bibliografía óptima para llevar a cabo el desarrollo final de este dispositivo. Aparte del diseño y construcción del panel (P.A.V.R) se podrá validar y comprobar el diseño planteado por medio de simulaciones y mediciones, determinando los coeficientes de absorción reflexión y difusión del panel. Este es un sistema integral que aporta un nuevo concepto a la línea de acústica variable integral, cumpliendo tareas de absorción, reflexión y difusión, abriendo camino a nuevos métodos de predicción, medición y cuantificación en superficies de difusión y absorción
8. **LINEAS DE INVESTIGACION:** Es te proyecto se encuentra en la línea de investigación de *Tecnologías Actuales y Sociedad*, en la sublínea de la facultad de *Procesamiento digital de señales*, ya que es por medio de un análisis de señales que se le da desarrollo y validación al funcionamiento del panel (P.A.V.R). El campo de investigación corresponde a la *Acústica* ya que se manipula directamente propiedades físicas del sonido
9. **METODOLOGIA:** el enfoque de esta investigación es **empírico-analítico**, debido a que se verificarán los cálculos matemáticos realizados para el diseño del panel acústico variable con los datos experimentales recogidos por las mediciones realizadas al mismo de parámetros tales como el tiempo de reverberación atreves de los coeficientes de reflexión y absorción . Esta verificación se hace para darle validez al diseño y determinar el funcionamiento del panel de acústica variable.
10. **CONCLUSIONES:** Cada recinto, sala, cuarto tienen características únicas de distribución del sonido. son estas características sumadas a las diversas fuentes de propagación de sonido las que nos dan una percepción sonora de nuestro espacio.  
Es la combinación de sonidos directos y reflejados lo que nos permiten hacer una representación espacial del recinto y esto determina su calidad acústica. Por lo tanto es una prioridad para la acústica poder controlar y manipular estas características de propagación del sonido que afectan nuestra percepción.  
Teniendo en cuenta esto, observamos que la elección de un correcto volumen del recinto es necesaria para un exitoso diseño acústico, además de diseñar y aplicar un tratamiento a sus superficies a través de la implementación de conceptos de materiales absorbente, reflejantes y de teorías de difusión del sonido para generar un campo estable de propagación para este mismo.  
Es por eso que el diseño acústico tradicional se ha venido desarrollando en el diseño de recintos con único propósito funcional, trabajando técnicas de control de reflexiones y distribución de materiales absorbentes, reflejantes y difusores. La innovación del diseño de recintos acústicos va a tener espacio en la construcción de salas que puedan tener una acústica variable y personalizada a través de la implementación de paneles con dispositivos automáticos que puedan cambiar las cualidades de sus superficies, generando así un concepto que llamaremos sala con acústica variable o multipropósito .Este concepto también es llevado a recinto pequeños como los de los estudios casero, puesto que es una industria que ha demostrado ser muy competente y en crecimiento acelerado, la aplicación del concepto de sala con acústica multipropósito a estos espacios reducidos es pertinente, ya que poder generar diferentes percepciones de espacialidad y control modal sin tener que rediseñar o reconstruir la sala, simplemente con la introducción del (P.A.V.R) es una idea que ciertamente que aporta una avance a la acústica arquitectónica moderna y deja un precedente para investigaciones futuras en esta línea de investigación

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PANEL  
ACÚSTICO VARIABLE ROTATORIO DE 360° CON CONTROL  
AUTOMÁTICO. (P.A.V.R)**

**OSCAR JULIAN MANTILLA GARCIA**

**UNIVERSIDAD DE SANBUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE SONIDO  
INGENIERIA DE SONIDO**

**BOGOTA D.C. 2014**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE PANEL  
ACÚSTICO VARIABLE ROTATORIO DE 360° CON CONTROL  
AUTOMÁTICO. (P.A.V.R)**

**OSCAR JULIAN MANTILLA GARCIA**

**Proyecto De Grado**

**ASESOR:**

**Luis Jorge Herrera Fernández**

**Máster en Ingeniería Acústica en la Industria y el Transporte**

**UNIVERSIDAD DE SANBUENAVENTURA  
FACULTAD DE INGENIERIA DE SONIDO  
INGENIERIA DE SONIDO  
BOGOTA  
2014**

**Nota De Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C, Noviembre 10 de 2014.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a la persona más especial que ha estado cada paso, siempre con los brazos abiertos llenos de amor y mucha paciencia para conmigo, a quien me regalo una preciosa esposa e hija, a Dios, al motivador y sustentador de mi vida y mi familia. También a mi esposa por su comprensión, apoyo, fortaleza y su sonrisa de aprobación para cada proyecto que emprendo. A mi hija Martina, quien es el motorcito de mi corazón e inspiración. A mis padres por su apoyo incondicional y ejemplo impecable de trabajo dedicación y sobretodo de amor. A mis suegros su apoyo pues me acompañaron esta etapa de mi vida. Y a todas las personas que en algún momento pude compartir en el transcurso de mi carrera, profesores, amigos, compañeros y conocidos.

Mil gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco antes de todo a mi familia por su incondicional apoyo emocional, espiritual y financiero no solo en mi carrera sino a lo largo de toda mi vida. A los docentes y profesores que hicieron parte de este proceso de formación sin su conocimiento no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto. Al personal de laboratorio, al personal administrativo a la facultad y en general a todas las personas que propiciaron el desarrollo de este trabajo.

## Contenido

Contenido .....	7
Lista de figuras .....	9
Ecuaciones.....	11
Tablas .....	12
INTRODUCCION .....	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. ....	15
1.1 Antecedentes .....	15
1.2 Descripción Y Formulación Del Problema .....	16
1.3 Justificación .....	17
1.4 Objetivos De La Investigación .....	18
1.4.1 Objetivo General.....	18
1.4.2 Objetivos Específicos .....	18
1.5 Alcances Y Limitaciones Del Proyecto.....	18
1.5.2 Alcances .....	18
1.5.3 Limitaciones .....	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1 Marco Teórico .....	20
2.1.1 Absorción Del Sonido .....	20
2.1.2 Reflexión Del Sonido .....	26
2.1.3 Difusión Del Sonido .....	34
2.1.4 Sistemas de control automático .....	46
2.2 Marco Legal.....	49
2.2.1 Norma ISO 354. Measurement of sound absorption in a reverberation room. .....	49
2.2.2 AES 4 id Characterization And Measurement Of Surface Scattering Unifomity.....	54
3. METODOLOGÍA .....	58
3.1 Enfoque De La Investigación.....	58
3.2 Línea De Investigación De USB / Sub-Línea De Facultad. ....	58
3.3 Técnicas De Recolección De Información.....	58

3.4 Hipótesis .....	58
3.5 variables.....	58
3.5.1 Variables dependientes.....	58
3.5.2 Variables independientes.....	58
4. DESARROLLO INGENIERIL .....	60
4.1 Etapa De Diseño Y Construcción.....	60
<b>4.1.1 Diseño Y Construcción Prototipo De Panel .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.2 Diseño Y Construcción Del Difusor QRD .....</b>	<b>65</b>
<b>4.1.3 Diseño Y Construcción De La Cara Absorbente Del Panel. ....</b>	<b>80</b>
4.1.4 Diseño Y Construcción De La Cara Reflectora Del Panel.....	90
4.1.5 Diseño Etapa De Potencia.....	95
4.1.6 Diseño Controlador Automático .....	96
4.1.7 Simulación Y Comparación .....	97
5. CONCLUSIONES .....	101
7. RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFIA.....	104
GLOSARIO.....	105
ANEXOS.....	107
Marco Jurídico .....	107
Sección A.....	107
Sección B.....	110



## Lista de figuras

Figura 1. Gráficas Para la determinación del producto $4m$ ( $m$ es la constante de atenuación del sonido en el aire) (Carrion, 1998) .....	21
Figura 2. Proceso de disipación de energía a interior de un material poroso, situado frente a una pared rígida. (Carrion, 1998) .....	22
Figura 3. Amplitud de la velocidad " $u$ " de las partículas de aire en función de la distancia a la pared ( $D \ll \lambda'$ ) (Carrion, 1998) .....	24
Figura 4. Amplitud de la velocidad de partícula " $u$ " en función de la distancia a la pared rígida $D=\lambda'/4$ . (Carrion, 1998).....	24
Figura 5. Variación de la absorción en función de la frecuencia de material absorbente con distintos grados de porosidad (Carrion, 1998) .....	25
Figura 6. Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60mm de espesor de 40 y 100 Kg/m <sup>3</sup> (Carrion, 1998).....	25
Figura 7. Amplitud de la velocidad " $u$ " de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida $d=\lambda/4$ (Carrion, 1998).....	26
Figura 8. Visualización de los efectos de difracción y reflexión sobre dos superficies reflectantes de diferentes dimensiones para una misma onda incidente de longitud (Carrion, 1998) .....	28
Figura 9. Difracción del sonido alrededor de una barrera acústica diseñada para protección del ruido a vivienda (Carrion, 1998).....	28
Figura 10. Visualización del reflector de dimensiones $A \times B$ y la onda incidente - receptor (Carrion, 1998).....	30
Figura11. Disminución relativa de la presión sonora $\Delta L_p$ correspondiente al sonido reflejado por un reflector de dimensiones. (Carrion, 1998).....	30
Figura12. Forma gráfica para determinar la dirección de las reflexiones especulares (Carrion, 1998) .....	33
Figura13. Zonas de cobertura asociadas a diferentes superficies reflectantes a) superficie convexa b) superficie plana c) superficie cóncava (Carrion, 1998) ..	33
Figura14. Focalización del sonido en sala semiesférica (Carrion, 1998) .....	33
Figura 15. Difusión producida por un conjunto de pirámides colocadas sobre una pared rígida (Carrion, 1998).....	35
Figura 16. Zonas de cobertura correspondientes a un reflector plano y una superficie convexa integrante de un difusor policilindrico. (Carrion, 1998) .....	36
Figura17. Difusor MLS a) perfil de un difusor con indicación de la dirección de onda incidente y sus reflejadas b) diagrama de difusión a la frecuencia de diseño. (Carrion, 1998) .....	37
Figura18. Diagrama de difusión a) difusor MLS a una frecuencia el doble de la de diseño b) superficie plana y lisa .....	38
Figura19. Perfil de difusores QRD para a) $P=7$ ; b) $P=19$ ; c) $P=43$ (Carrion, 1998).....	40
Figura20. Diagrama de difusión, difusión unidimensional QRD de 1 periodo, $P = 23$ .....	40
Figura21. Recorrido de la onda incidente en las ranuras de un difusor QRD unidimensional (Carrion, 1998).....	40

Figura22. Diagrama de difusión correspondiente a 2 periodos de un difusor unidimensional QRD a) $p = 17$ b) $p = 89$ (Carrion, 1998).....	43
Figura 23. Difusor QRD terminado.....	43
Figura 24. Difusor QRD bidimensional.....	44
Figura25. Difusión producida por difusor QRD bidimensional de una onda incidente con ángulo de 45 grados con respecto a la superficie (Carrion, 1998) .....	45
Figura26. Proceso de obtención del coeficiente de difusión desde un impulso a) medición del difusor en cada punto cada 5 grados b) seleccionar el impulso reflejado y obviar el primer impulso c) se aplica la FFT por octavas d) se grafican los valores obtenidos por octava para el patrón polar c) gráfica coeficientes de difusión.....	56
Figura 27. Panel trifusor y sus combinaciones, fuente (rpgeurope, s.f.)a) configuración cara difusora b) cara reflectora c) cara absorbente d) arreglo combinado (RPG Diffusor Systems, s.f.) .....	60
Figura 28. Esquemas con las dimensiones (RPG Diffusor Systems, s.f.).....	61
Figura 29. Caras del panel por separado de frente y perspectiva.....	62
Figura 30. Esquema de Distribución del panel ensamble de las caras.....	62
Figura 31. Esquema de la estructura soporte de los paneles .....	63
Figura 32. Sistema de seguro mecánico, diseñados en la base y la cabecera del panel, método para anclar los paneles a) esquema dispositivo b) foto del prototipo y el sistema de anclaje.....	64
Figura 33. Montaje completo de los paneles en la estructura de apoyo en diferentes perspectivas a) estructura metálica de perfil b) estructura metálica vista frontal.....	65
Figura 34. Gráfica de valores de $sn(max)/p$ para.....	67
Figura 35. Esquema cara difusora trifusor prototipo de panel .....	68
Figura 36. Vista superior profundidades y serie del difusor (software, 2014) ...	68
Figura 37. Terminado del difusor uno por cara, 3 periodos .....	69
Figura 38. Posiciones de fuente y micrófono mediciones difusor .....	70
Figura 39. Esquema de conexión - fuente y micrófono mediciones difusor .....	71
Figura 40. Medición superficie referencia del panel difusor a $0^\circ$ .....	72
Figura 41. Medición superficie difusora del panel difusor a $0^\circ$ .....	72
Figura 42. Diagramas polares fuente a 0 grados por bandas de octavas .....	73
Figura 43. Diagramas polares fuente a 55 grados por bandas de octavas.....	76
Figura 44. Coeficientes de difusión direccional del panel difusor.....	79
Figura 45. Dimensiones de los módulos que contendrán el material absorbente .....	80
Figura 46. Módulo solo y modulo con membrana de black teather .....	82
Figura 47. Panel construido implementado en los tres trifusores.....	82
Figura 48. Diagrama de conexión instrumentación para medición de tiempo de reverberación.....	84
Figura 49. Mediciones de tiempo de reverberación del prototipo de panel para acústica variable .....	85
Figura 50. Coeficiente de absorción de la muestra, panel cara absorbente .....	89
Figura 51. Esquema panel reflejante vista isométrica y dimensiones.....	90
Figura 52. Dimensiones panel reflejante corte horizontal .....	90
Figura 53. Montaje de la cara reflejante en los tres trifusores .....	91

Figura 54. Coeficientes de reflexión de las caras reflejantes del prototipo por bandas de octava.....	94
Figura 55. Esquema de conexión sistema electrónico Arduino- motor .....	95
Figura 56. Esquema de conexión sistema electrónico Arduino- motor- modulo bluetooth .....	96
Figura 57. Código de programación Arduino .....	97
Figura 58. Levantamiento del recinto en software EASE .....	98
Figura 59. RT Recinto con las diferentes disposiciones panel, simulación.....	99

## **Ecuaciones**

Ecuación 1. Cálculo de la absorción total de sabina .....	21
Ecuación 2. Calculo de las frecuencias de corte en la pendiente de disminución generada por reflexión .....	30
Ecuación 3. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor QRD .....	38
Ecuación 4. Calculo para determinar el ancho de los tramos del difusor QRD.....	41
Ecuación 5. Calculo para hallar los periodos en el difusor QRD.....	41
Ecuación 6. Calculo para hallar las profundidades de las ranuras en el difusor QRD .....	43
Ecuación 7. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor QRD bidimensional .....	45
Ecuación 8. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor PRD .....	46
Ecuación 9. Área de absorción equivalente .....	53
Ecuación 10. Calculo coeficiente de atenuación de la energía .....	53
Ecuación 11. Ecuación de velocidad de propagación del sonido teniendo en cuenta el factor temperatura .....	53
Ecuación 12. Área de absorción equivalente total .....	53
Ecuación13. Calculo coeficiente de absorción.....	53
Ecuación 14. Método de cálculo para la distancia fuente-receptor .....	55
Ecuación 15. Calculo anchura de cada ranura .....	66
Ecuación 16. Ecuación para hallar $f_0$ del difusor .....	66
Ecuación 17. Ecuación para calcular profundidad real de cada ranura .....	67
Ecuación 18. Coeficiente de difusión direccional ( $d\theta$ ).....	79
Ecuación 19. coeficiente de atenuación.....	88
Ecuación 20. coeficiente de absorción.....	89

## Tablas

Tabla 1. Relación entre frecuencias estándar y longitudes de onda asociadas.	31
Tabla 2. Secuencia unidimensional de residuo cuadrático $sn$ para un $p=7$	40
Tabla 3. Secuencia bidimensional de residuo cuadrático $sm,n$ para un $p=7$	45
Tabla 4. Secuencia $sn$ para un $g=3$ y $p=7$	46
Tabla 5. Área de absorción del sonido equivalente máxima para una sala de 200 m <sup>3</sup> .	51
Tabla 6. $Sn$ contra $P$	67
Tabla 7. Tabla relación entre $n$ , $Sn$ , $dn$	68
Tabla 8. Coeficientes de difusión direccional del panel difusor.	79
Tabla 9 coeficientes de absorción del Black teather suministrados por Fiberglass	81
Tabla 10. coeficientes de absorción por bandas de octava para cada uno de los materiales nombrados	86
Tabla 11. valores del área de absorción equivalente para una sala ideal según la norma	86
Tabla 12. valores del área de absorción equivalente ajustados para una sala de un volumen diferente al indicado por la norma	87
Tabla 13. RT sala vacía y con el prototipo en cara absorbente	87
Tabla 14 Área de absorción equivalente de la sala vacía y con el prototipo cara absorbente	88
Tabla 15 Tabla área de absorción total recinto vacío y con el prototipo de panel en cara absorbente	89
Tabla 16. coeficiente de absorción de la muestra, panel cara absorbente	89
Tabla 17. Coeficientes de absorción por bandas de octava para la madera enchapada	91
Tabla 18 tiempos de reverberación para la cara reflejante del panel.	92
Tabla 19. Área de absorción equivalente $A_1$ (recinto vacío) y $A_2$ (cara reflejante)	93
Tabla 20. Área de absorción total recinto vacío y con la inclusión de las cara reflejantes	93
Tabla 21. Coeficiente de absorción y coeficientes de reflexión por bandas de octava de las caras reflejantes del prototipo	93
Tabla 22 RT del recinto vacío simulación	98
Tabla 23. RT del recinto vacío, con la cara absorbente y reflectora del prototipo	99

## INTRODUCCION

La acústica variable ha sido desarrollada en las últimas décadas ante la gran demanda de espacios multipropósito que se adecúen a diferentes tipos de espectáculos. Anteriormente (y en la mayoría de casos en la actualidad) los recintos sólo presentaban una percepción sonora inmodificable, lo cual limitaba la versatilidad de presentaciones de diferentes espectáculos, ya que si el recinto era muy reverberante la inteligibilidad del habla no era muy buena y por lo tanto se limitaban los espectáculos de teatro o conferencia; por el otro lado, si la sala tenía un tiempo de reverberación bajo no era prudente ser utilizada para shows de música orquestal. Por esta razón se vio la necesidad de crear una sala cuya acústica pudiese ser modificada por medios mecánicos o electrónicos, que permitiesen manipular los tiempos de reverberación por diferentes métodos físicos como modificación del volumen del espacio, modificación de la absorción en el recinto, o métodos electrónicos como la resonancia asistida. Los géneros musicales también tienen su propio tiempo de reverberación característico, por ello es necesario que cada espectáculo musical cuente con su respectivo tiempo de reverberación para que, tanto el músico como el espectador, se sientan inmersos e identificados con la música.

Ante la gran acogida que ha tenido la aparición de los home estudio (alrededor de los años ochenta), se ha venido presentando el problema de ser espacios con características acústicas únicas y de ser catalogado como estudios no comerciales, simplemente como un hobby (aunque tengan grandiosos equipos). Se da entonces que los estudios de grabación tienen varios studio room cada uno con comportamientos acústicos diferentes; análogamente (y en donde se centrará el desarrollo de este prototipo), en los estudios de grabación no se presenta versatilidad para grabar los distintos estilos musicales ni ofrece versatilidad para desarrollar diferentes interpretaciones, ya que el comportamiento acústico en la mayoría de las salas es fijo.

El proyecto que se llevará a cabo será el diseño y construcción de un prototipo de panel prismático acústico rotatorio de 3 caras de una dimensión de 1m x 1m, cuya movilidad será accionada por un mecanismo electromecánico. Las 3 caras serán independientes y con características acústicas diferentes; las caras serán una reflejante, una absorbente y otra difusora. Se construirá un solo prototipo, pero se llevarán a cabo estimaciones con el fin de hacer un diagnóstico de cuánto cambia el tiempo de reverberación utilizando varios prototipos de éste en el recinto elegido.

Las caras del prisma rectangular equilátero podrán ser removibles, lo cual hace que el proyecto tenga una mayor versatilidad y un mayor abarcamiento de comportamientos acústicos. Es de vital importancia recordar que el proyecto está pensado para ser parte del diseño de un estudio, puesto que para mayor eficacia y estética, el panel ha de ser empotrado a la pared; es decir, al momento de diseñar un estudio donde se desee aplicar este panel, las dimensiones de este deben ser tenidas en cuenta de tal manera que las caras del panel estén al mismo nivel de la superficie límite, es decir no estén fuera del eje del muro. La

superficie que controlará el movimiento de los paneles se diseñará con las tres opciones que ofrece el arreglo lineal de los paneles (las tres caras iguales acopladas al mismo ángulo, como parte de la pared).

El proyecto tiene diversos alcances, como el control de varios dispositivos al tiempo, la combinación de las caras con diferentes paneles (con variación de materiales) para llegar a distintos tiempos de reverberación de acuerdo a los diferentes coeficientes de absorción y el control inalámbrico de los paneles.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.**

Tener un recinto específico para cada estilo musical, presentación teatral, exposición de diálogos o cualquier evento que signifique propagación del sonido en ese recinto, es muy poco eficiente por los costos que representan, es por ello que se ve la necesidad de adecuar la sala con acústica variable, para que pueda presentar diferentes características acústicas como variación de tiempos de reverberación, por medio de la implementación de diferentes materiales o arreglos del panel y de esta manera lograr controlar algunos parámetros acústicos por lo tanto una mayor versatilidad.

### **1.1 Antecedentes**

La percepción que tenemos de nuestro entorno y su espacialidad es el resultado del procesamiento de información que hace nuestro cerebro de las señales sonoras y su variación en el tiempo. Este es un concepto que ha estado presente desde los orígenes de las sociedades humanas ligado estrechamente a la comunicación y expresión del ser. (Cetta, 2003)

Desde la antigüedad la percepción de los espacios se concentró en dos focos, aquellos con la acústica de una caverna y los de acústica al aire libre. Es del primero donde se asocia el surgimiento de la música y las salas de concierto; del segundo se le atribuye las voces habladas y el teatro.

La acústica ha tenido grandes adelanto especialmente en investigación sobre el control de las ondas sonoras y los efectos de controlar parámetros de velocidad y presión en el medio donde se propaga la energía sonora. Es a partir el siglo XX donde el profesor M. R. Schroeder ve la necesidad de generar difusión en los recintos pues es a partir de este siglo donde las superficies de los recintos pasaron de ser cargadas en adornos y relieves (los cuales funcionaban como difusores), por superficies planas. A partir de aquí se generan estudios para implementar difusores en recintos Los diseños de difusores Schroeder están basados en las siguientes secuencias: (QRD) de residuos cuadráticos, (PRD) de raíces primitivas, (MLS) de máxima longitud. (Trevor J. Cox, 2009). Todas estas soluciones fijas responden a necesidades específicas que dependen de la aplicación y utilidad de cada recinto.

Al observar la variación de las características acústicas debido a la implementación en un recinto, de distintos materiales, surge la idea de poder obtener una sala o recinto con la versatilidad de tener variaciones acústicas controladas y de esta manera tener diferentes ambientes sonoros en un mismo recinto.

La percepción sonora de espacios arquitectónicos está relacionada con las señales directas e indirectas que llegan a nuestro cerebro y nos dan información para crear una imagen volumétrica del recinto. Uno de los parámetros que contiene más información sobre estas señales es el tiempo de reverberación. Para variar los tiempos de reverberación, se han implementado diferentes

métodos basados en la utilización de elementos físicos variables y de sistemas electrónicos.

Los sistemas acústicos están relacionados con la variabilidad del volumen del recinto utilizando: mamparas móviles, sistema de cierre y abertura de falso techo, cavidades reverberantes acopladas a la sala, paneles móviles suspendidos del techo, también la implementación de sillas móviles y la variación de la absorción adicional (implementación de cortinas, paneles móviles reflectantes, paneles perforados superpuestos, paneles giratorios). Los sistemas electrónicos utilizados son: la resonancia asistida, el sistema de control acústico y la reverberación de canal múltiple, entre otros. (Carrion, 1998). Aunque pudiéramos hacer una buena elección y combinación de estos métodos de control el resultado sería un recinto con un carácter acústico controlado único.

En Colombia actualmente no existe una empresa especializada en el diseño y construcción de paneles de este tipo. Estas empresas son especializadas en el tratamiento acústico mediante el diseño de infraestructuras y materiales fijos, sin paneles móviles automatizados.

A nivel de Latinoamérica, se han venido adelantando estudios y proyectos para generar salas con acústica variable como lo es el caso del VN 211 (variable acoustic room system) desarrollado en Argentina, que es una forma de acondicionamiento acústico del recinto mediante DSP, que controla a su vez paneles giratorios, plegables y deslizables. Este dispositivo trae programados los tipos de recintos, y de acuerdo al elegido, modificará los paneles para obtener dicho tiempo de reverberación. (Ing. Carlos María Ortega (UBA), s.f.)

Actualmente la empresa RPG Diffusor Systems, Inc., comercializa su producto "Triffusor", panel de las mismas características de presentación y de cualidades acústicas, pero sin un sistema mecánico para el movimiento de los 3 paneles acoplados. (RPG Diffusor Systems, s.f.)

## **1.2 Descripción Y Formulación Del Problema**

Es indispensable tener en cuenta la correcta distribución de los métodos de difusión, absorción y reflexión para tener un diseño acústico exitoso, aun así, tener hoy en día un escenario independiente, apto para cada una de las presentaciones que impliquen la propagación de sonido para transmitir información, es un tema que eleva los costos de cualquier proyecto, es por eso que existe una necesidad de diseñar métodos para implementar en los diseños arquitectónicos que amplíen la versatilidad de las salas, por eso es importante preguntarse:

***¿Es posible construir un dispositivo que nos permita modificar de manera comprobable características acústicas en un recinto para generar versatilidad sonora?***



### **1.3 Justificación**

Para cambiar los tiempos de reverberación de la sala deberán ser manipulados los coeficientes de absorción y de reflexión de la sala. Las salas que tienen un solo propósito, tienen establecidos estos coeficientes, por ello si se pretende tener una sala multipropósito, estos valores deben poder variar.

La intención de tener un panel rotatorio de 3 caras, es tener en cada una un material diferente, para poder tener 3 tiempos de reverberación diferentes y por lo tanto, 3 coloraciones distintas. Pero muchas veces si se accionan manualmente los paneles rotatorios, la repetitividad no es exacta, para proceder con exactitud se acudirá a usar un dispositivo electromecánico que controle el movimiento de los paneles.

Es vital resolver el problema del recinto de un solo carácter acústico, puesto que no pueden construirse varias salas para diferentes usos y estilos musicales. Existen diferentes maneras de lograr la variabilidad de la acústica de un recinto, la que se propone no es muy compleja, no atañe grandes costos y su manejo es fácil. El desarrollo de proyectos afines trae consigo varios beneficios como un mayor compromiso con el sonido por parte de las personas, en producción la existencia de varios estudios con la capacidad de grabar diferentes estilos y de ser utilizados para toda índole de trabajos asociados con el audio, una mayor familiaridad del músico con lo que está interpretando y con el producto que será comercializado, un mayor aprendizaje de un tema en desarrollo.

## **1.4 Objetivos De La Investigación**

### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de panel acústico variable rotatorio de 360° con control automático que permita modificar la acústica de un recinto.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

-Caracterizar el recinto donde se implementará el panel por medio de mediciones acústicas para tener una posición inicial de comparación al momento de aplicar el prototipo.

-Medir el comportamiento acústico de los materiales utilizados en las caras del panel para implementarlos en los análisis.

-Predecir los tiempos de reverberación con la implementación de más de 2 paneles por medio de un software y analizar las variaciones del comportamiento acústico en el recinto simulado.

-Implementar el dispositivo electromecánico que se encargará de la movilidad del panel para controlar las diferentes configuraciones.

## **1.5 Alcances Y Limitaciones Del Proyecto.**

### **1.5.2 Alcances**

-Controlar varios dispositivos al mismo tiempo con un solo comando de activación.

-Estudiar la combinación de las diferentes caras del panel en el arreglo con el fin de dar más versatilidad a la sala.

-Controlar de manera inalámbrica el mecanismo de rotación. Implementado en el desarrollo del proyecto

-Al tener caras removibles, intercambiar las caras con otras que tengan diferente comportamiento acústico.

-El sistema será comercialmente competitivo. Ya que en Colombia no hay una solución acústica con la implementación de control electromecánico como lo presenta este panel.

### **1.5.3 Limitaciones**

-Inexistencia de Cámara reverberante (recinto acústico adecuado para la medición de coeficiente de absorción)

-Inexistencia de cámara anecóica (recinto acústico para la medición de coeficiente de difusión)

- por ser un prototipo, y su finalidad es que no atañe tantos costos la movilidad del panel se dará de forma simultánea, no independiente para cada cara

## **2. MARCO DE REFERENCIA**

### **2.1 Marco Teórico**

#### **2.1.1 Absorción Del Sonido**

La atenuación de la energía asociada a las ondas sonoras en un recinto, ya sea cuando se propagan en el aire o cuando inciden en una superficie límite, es un factor a tener en cuenta al momento de determinar la calidad acústica de un recinto.

Existen unos actores que influyen en este proceso de atenuación, organizados de mayor a menor importancia son:

- El público y las sillas.
- Los materiales absorbentes y /o materiales selectivos (resonadores).
- Cualquier superficie límite de la sala que pueda llegar sintonizarse en vibración (puertas, ventana, módulos de separación delgados).
- El aire
- Los materiales rígidos y no porosos (como el hormigón).

La calidad de absorción de estos materiales no depende solamente de sus propiedades físicas, es importante destacar que los detalles constructivos y condiciones del entorno son muy influyentes al momento de analizar su absorción.

##### **2.1.2.1 Absorción del aire.**

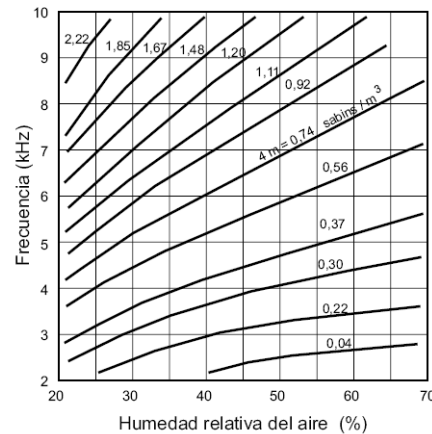
Se asume que la absorción del aire es significativa solo bajo ciertas condiciones algunas de estas son:

- Recintos de grandes dimensiones
- A frecuencias mayores a 2KHz
- Humedad relativa con valores bajos entre 10% a 30%

Esta absorción es representada por la constante de atenuación del sonido en el aire  $\alpha$ .

Es posible determinar el valor del producto  $\alpha m$  en condiciones estándares de presión y temperatura ( $P_0=10^5\text{Pa}$  y  $20\text{ °C}$ ) relacionando cada frecuencia y porcentaje de humedad relativa del aire. La figura 1 muestra como determinar esta constante de atenuación por método grafico

Figura 1. Gráficas Para la determinación del producto  $4m$  ( $m$  es la constante de atenuación del sonido en el aire) (Carrion, 1998)



Si se conoce el volumen  $V$  del recinto y el producto de  $4m$ , se puede realizar los cálculos pertinentes del valor del tiempo de reverberación  $RT$  de la sala la fórmula que aplica es la de Sabine completa:

*Ecuación 1. Cálculo de la absorción total de sabina*

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} + 4mV}$$

$A_{tot}$  Es la absorción total del recinto en sabins.

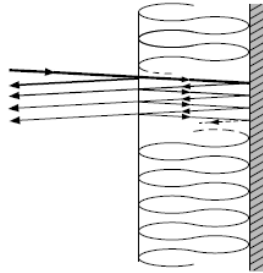
### 2.1.2.2 Materiales absorbentes.

Es muy importante hacer una buena selección de los materiales absorbentes que recubrirán el recinto, pues la calidad de absorción de estos va en función de la frecuencia y varía en cada material, esto quiere decir que para tratar una banda de frecuencia específica existen materiales que se destacan por una mayor eficiencia. Generalmente un material acústico es utilizado para:

- Eliminar ecos
- Reducir el nivel de presión sonora en espacios ruidosos. (restaurantes, fabricas, estaciones, etc.)
- Obtener un tiempo de reverberación requerido y esto depende de la actividad.

Una de las características de estos materiales es su porosidad, la cual actúa como conductos por donde incide la onda sonora, el fenómeno de absorción en estos conductos se da por disipación de energía en calor cuando la onda entra en contacto con las paredes de los conductos, cuanto mayor cantidad de canales mayor cantidad de absorción, es decir cuánto más poroso sea mayor absorción. La figura 2 muestra el proceso de transformación de esta energía.

Figura 2. Proceso de disipación de energía a interior de un material poroso, situado frente a una pared rígida. (Carrion, 1998)



“la onda sonora incidente es parcialmente reflejada. La energía sonora no reflejada penetra en el material, se atenúa y alcanza de nuevo su superficie después de reflejarse en la pared rígida posterior. La energía remanente se divide, nuevamente, en una parte que atraviesa la superficie del material y otra que vuelve a la pared posterior a través del material.” (Carrion, 1998)

Esta es una característica que llevan los materiales porosos, por esta razón la composición de estos materiales está dada por sustancias fibrosas o granuladas, las cuales son compactadas o tejidas para que puedan tener una apariencia uniformemente resistente, dentro de los materiales absorbentes más destacados están :

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

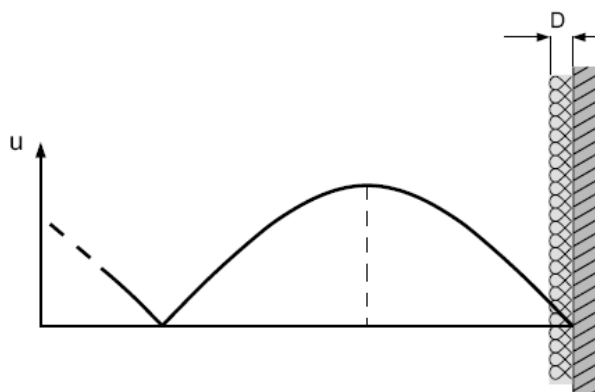
### **2.1.2.3 Variación de la absorción en función del espesor del material**

Para aumentar la absorción del material es necesario aumentar el espesor del mismo, es decir el espesor que se referencia y que es la distancia desde que inicia el material hasta la pared rígida. Este aumento afecta especialmente las frecuencias bajas y medias. Esta relación de absorción con espesor se puede describir de la siguiente manera:

La absorción es baja para todas aquellas frecuencias para las que el espesor  $D$  es muchísimo menor que la longitud de onda  $\lambda'$  del sonido dentro del material  $D \ll \lambda'$ . Se puede decir que la velocidad de las partículas de aire en contacto con la pared rígida es cero, por lo que esta superficie no les permite moverse y al alejarse de esta los valores de velocidad seguirán siendo cercanos a cero ya que  $D \ll \lambda'$

La figura 3 muestra una frecuencia tal que su longitud de onda sea  $D \ll \lambda'$ . De ahí se puede deducir su relación entre la amplitud de velocidad de las partículas del aire “u” En función del espesor, es decir, de la distancia del material, el que a su vez vendría siendo el recorrido de la partícula que se tiene en cuenta para calcular absorción.

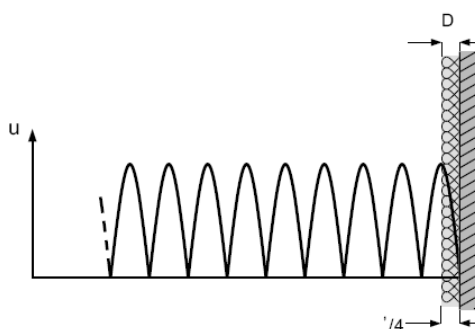
Figura 3. Amplitud de la velocidad “u” de las partículas de aire en función de la distancia a la pared ( $D \ll \lambda'$ ) (Carrion, 1998)



La fricción entre las paredes de los canales internos del material es mínima ya que la velocidad es demasiado baja en cada uno de los puntos del material absorbente, por lo que la transformación de energía sonora a energía calorífica es mínima.

El caso contrario sucede a medida que se va aumentando la frecuencia y la longitud de onda  $\lambda'$  disminuye, en este caso el espesor se hace cada vez más grande con relación a esta longitud de onda es decir que las partículas de sonido “u” tendrán un aumento en la velocidad dentro de las paredes internas del material, por lo tanto la disipación o transformación de la energía será mayor. La figura 4 analiza este fenómeno con una longitud de onda de  $D = \lambda'/4$ .

Figura 4. Amplitud de la velocidad de partícula “u” en función de la distancia a la pared rígida  $D = \lambda'/4$ . (Carrion, 1998)



La velocidad de las partículas dentro del material es mucho mayor que en el caso anterior de una frecuencia un poco más baja. De lo cual deducimos que las condiciones de baja absorción se cumplen para bajas y medias frecuencias ( $D \ll \lambda'$ ) si el espesor es pequeño. En el momento en que la longitud de onda se incrementa la absorción es mayor por la cantidad de camino que debe recorrer dentro del material.

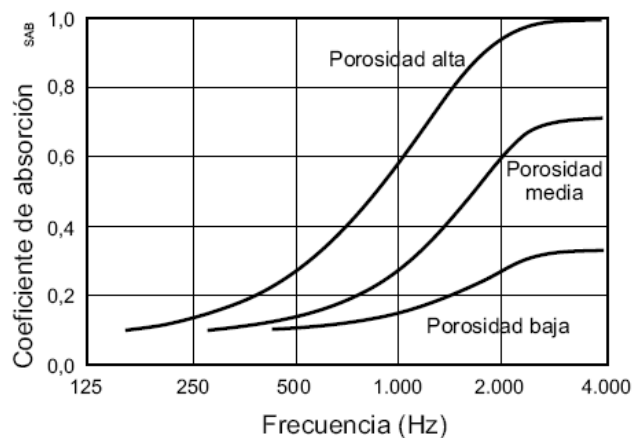


#### 2.1.2.4 Variación de la absorción en función de la porosidad del material

Se asocia la porosidad con la capacidad que tiene el material de permitir la entrada de las ondas incidentes dentro de sí mismo esto significa más caminos por donde la onda hará su recorrido

La figura 5 muestra un caso de un mismo material pero con variación de su porosidad y como se ve afectada la absorción del sonido dentro de este.

Figura 5. Variación de la absorción en función de la frecuencia de material absorbente con distintos grados de porosidad (Carrion, 1998)



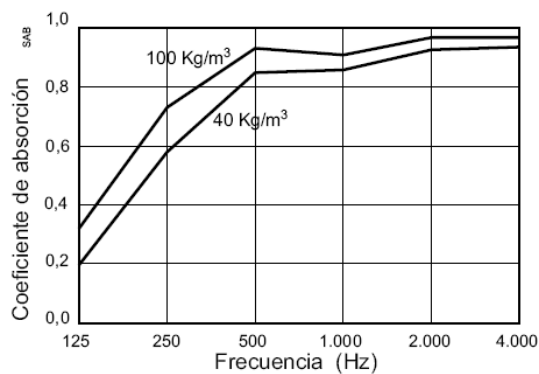
#### 2.1.2.5 Variación de la absorción en función de la densidad del material

La densidad del material también juega un papel importante en absorción, si esta aumenta, se eleva la absorción hasta llegar a un valor límite, si la densidad disminuye, menor será la penetración de las ondas incidentes en el material y se puede interpretar como mayor reflexión.

Es aconsejable que los materiales utilizados para tratamientos acústicos tengan una densidad entre 40 y 70 Kg/m<sup>3</sup> no superando en ningún caso 100 Kg/m<sup>3</sup>.

Para ilustrar más este concepto la figura 6 muestra los coeficientes de absorción de una lana de roca de 60mm de espesor y densidad variable de 40 y 100 Kg/m<sup>3</sup>.

Figura 6. Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60mm de espesor de 40 y 100 Kg/m<sup>3</sup> (Carrion, 1998)

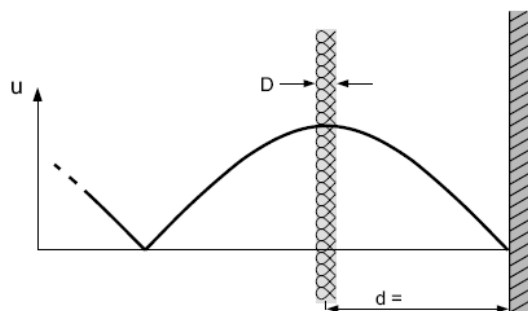


### 2.1.2.6 Variación de la absorción en función de la distancia del material a la pared rígida

Al concentrarse en los conceptos de densidad y espesor es razonable que para frecuencias bajas se deba utilizar materiales muy gruesos. Solo es necesario utilizar un material con un espesor medio a una distancia específica de la pared rígida.

Esta variación del método de absorción tendrá su máxima eficiencia cuando la distancia de separación del material cumpla con ser un cuarto de la longitud de onda ( $\lambda/4$ ) pues es allí donde se da la mayor velocidad de propagación de la onda como lo demuestra la figura 7

*Figura 7. Amplitud de la velocidad "u" de las partículas de aire en el interior de un material absorbente situado a una distancia de la pared rígida  $d=\lambda/4$  (Carrion, 1998)*



A medida que la distancia "d" aumenta la frecuencia afectada con absorción máxima, disminuye. Si este se separa demasiado es necesario trabajarlo como dos cavidades acopladas.

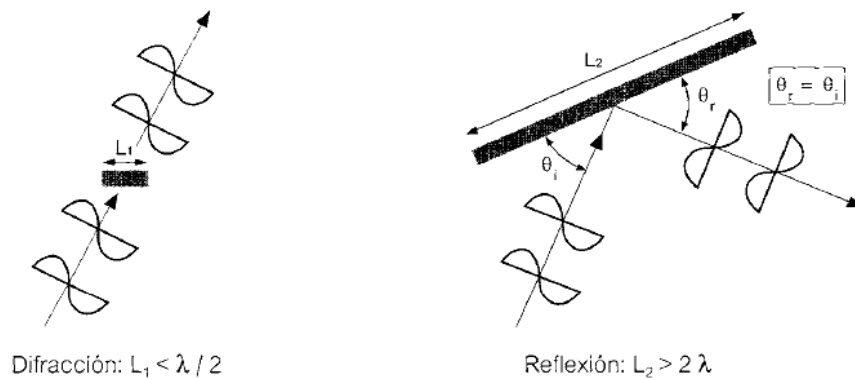
### 2.1.2 Reflexión Del Sonido

Es importante destacar que el fenómeno de reflexión del sonido solo se dará de forma completa si la superficie donde la onda incide es lisa y sus dimensiones son mayores en comparación a la longitud de onda del sonido estimado. Esto quiere decir que para un componente amplio de frecuencias generadas e

impactadas en el elemento, la reflexión solo se dará a partir de las frecuencias que cumplan con que su longitud de onda sea menor que las dimensiones del reflector y todas aquellas cuya longitud de onda sea mayor al reflector tendrá lugar un efecto de difracción, este efecto consiste en un cambio de dirección de propagación, de manera que, en lugar de reflejarse rodea el reflector y continua con su dirección omitiendo el elemento reflectivo.

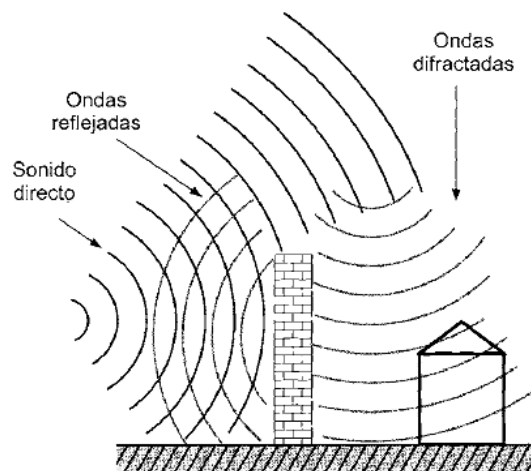
La Figura 8 muestra como es el comportamiento de una onda incidente en un panel de dimensiones predefinidas.

Figura 8. Visualización de los efectos de difracción y reflexión sobre dos superficies reflectantes de diferentes dimensiones para una misma onda incidente de longitud (Carrion, 1998)



El efecto de difracción se produce principalmente a bajas frecuencia y disminuye a medida que la frecuencia aumenta. Otro ejemplo del efecto de difracción es el una barrera acústica colocada cerca de una vivienda, como lo muestra la figura 9

Figura 9. Difracción del sonido alrededor de una barrera acústica diseñada para protección del ruido a vivienda (Carrion, 1998)



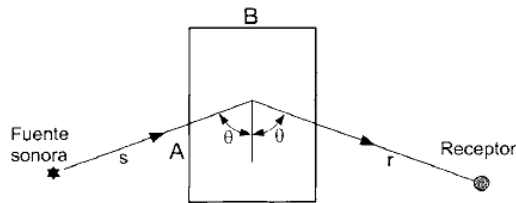
De aquí se puede asegurar que cuando existe un obstáculo entre un receptor y una fuente ruidosa, este obstáculo hará una atenuación considerable en componentes de frecuencias altas de este ruido mientras que las frecuencias bajas seguirán siendo percibidas a menos que las dimensiones del obstáculo sean exageradamente grandes.

### 2.1.3.1 Reflectores Planos

Existe un caso en concreto de difracción muy simple pero que merece ser abordado. En 1986 Rindel realizó un exhaustivo estudio acerca de la difracción.

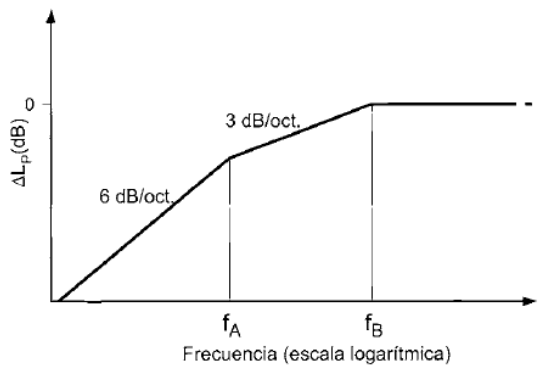
Este estudio trata sobre un reflector de dimensiones  $A \times B$  separado de las superficies límites de la sala y en el cual incide una onda sonora con un ángulo definido  $\theta$ , la fuente que genera esta onda está situada a una distancia " $s$ " del centro del reflector y a una distancia  $r$ , también, del centro del reflector se encuentra el receptor el montaje esta explicado en la figura 10

Figura 10. Visualización del reflector de dimensiones A x B y la onda incidente - receptor (Carrion, 1998)



El hecho de que sea un reflector finito da lugar a que en esta ocasión se genere difracción de la onda incidente, esto significa que a medida que las frecuencias disminuyan la presión sonora de las ondas refleja también disminuirá. Esta disminución de niveles de presión está representada por  $\Delta L_p$  (en dB), la figura 11 muestra la variación en función de la frecuencia.

Figura 11. Disminución relativa de la presión sonora  $\Delta L_p$  correspondiente al sonido reflejado por un reflector de dimensiones. (Carrion, 1998)



$f_a$  y  $f_b$  son las frecuencias de corte correspondientes y se calculan de la siguiente manera

Ecuación 2. Calculo de las frecuencias de corte en la pendiente de disminución generada por reflexión

$$f_a = \frac{c}{\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r}\right) B^2 \cos^2 \theta}$$

$$f_b = \frac{c}{\left(\frac{1}{s} + \frac{1}{r}\right) A^2}$$

Donde:

s= distancia de la fuente con relación al centro del reflector. (m)

r=distancia del receptor con relación al centro del reflector. (m)

A=longitud del reflector. (m)

B=anchura del reflector. (m)

$\theta$ = ángulo de incidencia y reflexión de la onda incidente.  
 $c$ = velocidad del sonido (345 m/s a 22°C).

De esta gráfica se puede extraer varias conclusiones como:

- Para frecuencias mayores a  $f_b$  el decremento de dB es 0 se comporta como un reflector finito.
- Para las frecuencias que se encuentren entre  $f_a$  y  $f_b$  el decremento se dará de 3 dB por octava y la difracción empezará a aparecer por consecuencia de la anchura finita B
- Para frecuencias menores a  $f_a$  se encontrará una disminución ostensible de 6 dB por octava esto por efecto de la difracción producida por la anchura B y la longitud A

De los cálculos entregados para hallar las frecuencias límites se puede deducir que;

- Son inversamente proporcionales al cuadrado de uno de las dimensiones del reflector. Es decir que mientras más grande es el reflector, menores serán las frecuencias a partir de las cuales se produce difracción.
- El reflector resultará más efectivo, si las distancias de la fuente o el receptor a al reflector son menores, esto hará que las frecuencias límites sean menores.
- Los valores de las frecuencias límites disminuyen cuando el ángulo de incidencia de la onda sea menor con respecto a la normal.

De lo anterior es importante resaltar que para frecuencias bajas y el efecto de difracción va por lo general de la mano, pues es prácticamente imposible diseñar reflectores tan grandes para las longitudes de onda de las frecuencias bajas. Por eso para el correcto diseño de los reflectores es necesario tener en cuenta la relación entre las frecuencias y sus respectivas longitudes de onda. La tabla 1 muestra algunas de las frecuencias estandarizadas y sus longitudes de onda.

*Tabla 1. Relación entre frecuencias estándar y longitudes de onda asociadas.*

FRECUENCIA (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
LONGITUD DE ONDA (m)	2.76	1.38	0.69	0.34	0.17	0.09

A manera de consejo, es práctico diseñar los reflectores para que operen a partir de una frecuencia centrada en 500 Hz.

### **2.1.3.1 Reflectores Curvos**

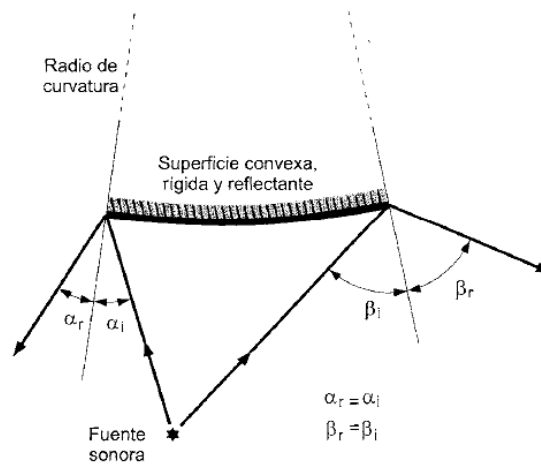
Los reflectores curvos como el convexo tienen como característica dispersar el sonido en una mayor cantidad que los reflectores planos, es decir abarca una mayor zona de dispersión y en cualquier punto de esta zona el nivel de energía

de las reflexiones es menor que la original incidente, para que un reflector convexo cumpla su función las dimensiones de su radio tiene que ser menor o igual que 5 metros, para dimensiones menores a estas el elemento deja de comportarse como un reflector y empieza a comportarse como un difusor de sonido.

Otro de los reflectores curvos son los elementos cóncavos, y estos dan lugar a un fenómeno llamado “focalización del sonido” es decir que no disipan el sonido sino que por el contrario lo centran en una zona reducida. Desde un punto de vista geométrico el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales con respecto a la dirección del radio de curvatura la figura 12 hace referencia a este fenómeno.

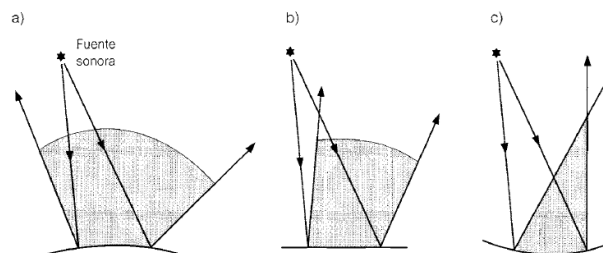


Figura 12. Forma gráfica para determinar la dirección de las reflexiones especulares (Carrion, 1998)



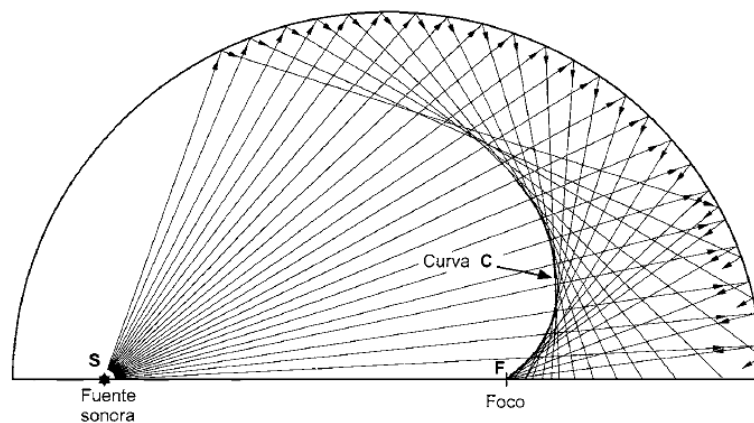
La figura 13 muestra las reflexiones correspondientes a una superficie conexas y cóncava con respecto a una plana

Figura 13. Zonas de cobertura asociadas a diferentes superficies reflectantes a) superficie convexa b) superficie plana c) superficie cóncava (Carrion, 1998)



La figura 14 muestra como ejemplo de focalización de sonido una onda incidente en una superficie cóncava

Figura 14. Focalización del sonido en sala semiesférica (Carrion, 1998)

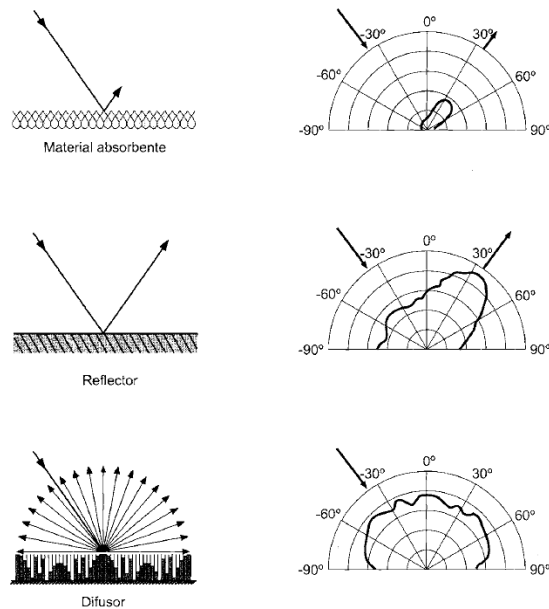


Como se puede observar existe una convergencia a lo largo de la curva c, y una concentración máxima en el punto f esta concentración causa desequilibrio entre la sonoridad correspondiente sobre los puntos situados alrededor de esta curva, la anomalía es más notable en frecuencias bajas.

### 2.1.3 Difusión Del Sonido

Cuando se habla de difusión en un recinto se hace referencia a los elementos diseñados con el fin de disipar la energía sonora de manera uniforme y en todas las direcciones. La figura 15 hace una ilustración de la difusión de una onda incidente sobre un elemento absorbente reflejante y difusor.

*Figura 15. Comparación de comportamiento entre elementos acústicos cuando una onda de sonido incide sobre ellos absorción, reflexión especular y difusión (Carrion, 1998)*



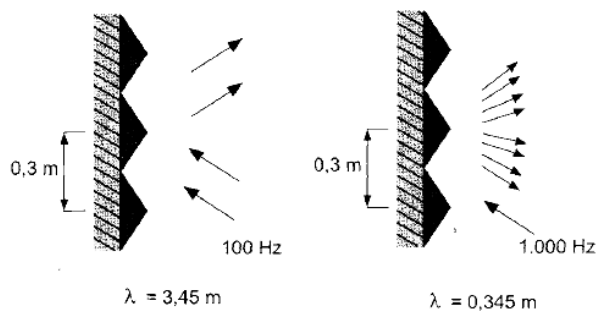
De estas gráficas se puede deducir que la energía sonora reflejada en el absortor es mínima comparada con la incidente, en el reflector es un poco mayor y se centra en la dirección de la reflexión especular y para el caso del difusor es elevada y repartida uniformemente en el espacio. Hacer una correcta difusión del sonido es especialmente usado en salas de concierto aunque hay varios estudios de grabación que utilizan este concepto.

Cuando hablamos de difusión del sonido se puede enlazar con el término “impresión de espacialidad” significa que el campo reverberante llegara a todos los espectadores con una igualdad de intensidad desde todas las direcciones, esto induce en un campo de sonido altamente envolvente, la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto será mayor, a medida que la impresión espacial es mayor. La difusión también nos ayuda a prevenir coloraciones del recinto y algunos otros efectos generados por las reflexiones, por ejemplo; el desplazamiento de la fuente sonora, ecos y focalización del sonido.

En la actualidad existen diferentes tipos de difusores contruidos a base de superficies irregulares pero con una secuencia matemática fijadas previamente. No obstante es necesario aclarar que la difusión es efectiva solo en un rango de frecuencias limitada y dependerá del tamaño del difusor.

A continuación un ejemplo de difusión producida por unas pirámides construidas a base de un material reflectante y colocado en una pared rígida.

*Figura 15. Difusión producida por un conjunto de pirámides colocadas sobre una pared rígida (Carrion, 1998)*



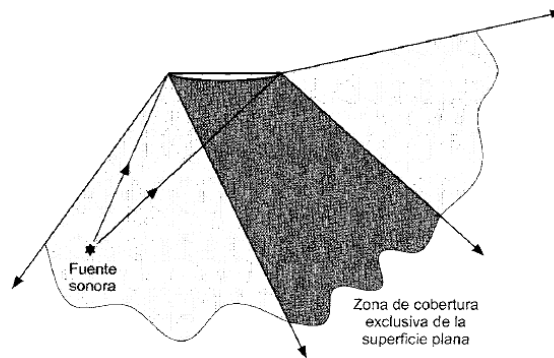
Como se puede observar para una frecuencia de 100Hz, las reflexiones generadas son especulares, es decir que las dimensiones de las pirámides son despreciables para la onda incidente y se refleja como una superficie plana. El otro caso sucede para la frecuencia de 1000Hz donde la difusión si se hace más clara, ya que las dimensiones de las pirámides es del mismo orden de la longitud de onda.

En un recinto o sala el elemento que más se asocia con la difusión son las sillas vacías u ocupadas, aunque la energía disipada es un poco débil por la cantidad de absorción que es propia de estos elementos. Esto nos lleva a tener que manejar la difusión con otros elementos colocados en la sala.

#### **2.1.4.1 Difusor Policilindrico**

Consiste en superficies lisas y convexas, van colocadas en secuencia y con un radio inferior de 5 metros aproximadamente, usualmente son construidas con madera. El radio es de estas dimensiones pues como ya se había mencionado anteriormente cuando son mayores a este se comportan como superficies planas de reflexión. La figura 16 muestra una comparativa entre un difusor policilindrico y un reflector.

Figura 16. Zonas de cobertura correspondientes a un reflector plano y una superficie convexa integrante de un difusor policilindrico. (Carrion, 1998)



#### 2.1.4.2 Difusores de Schroeder

Hay otros elementos difusores de sonido aparte de los reflectores y difusores policilindrico, estos elementos están diseñados para comportarse como superficies difusoras pero un margen limitado de frecuencias y se basan en una teoría de números, desarrollada por el prestigioso investigador alemán Manfred R. Schroeder.

Los difusores de Schroeder se denominan comúnmente RPG ("Reflection Phase Grating") y se basan en distintas secuencias matemáticas fijadas previamente.

El material más común para la construcción de estos difusores es la madera y los más relevantes son los siguientes:

- Difusores MLS
- Difusores QRD
- Difusores PRD

A continuación se describe cada uno de ellos

- **Difusores MLS**

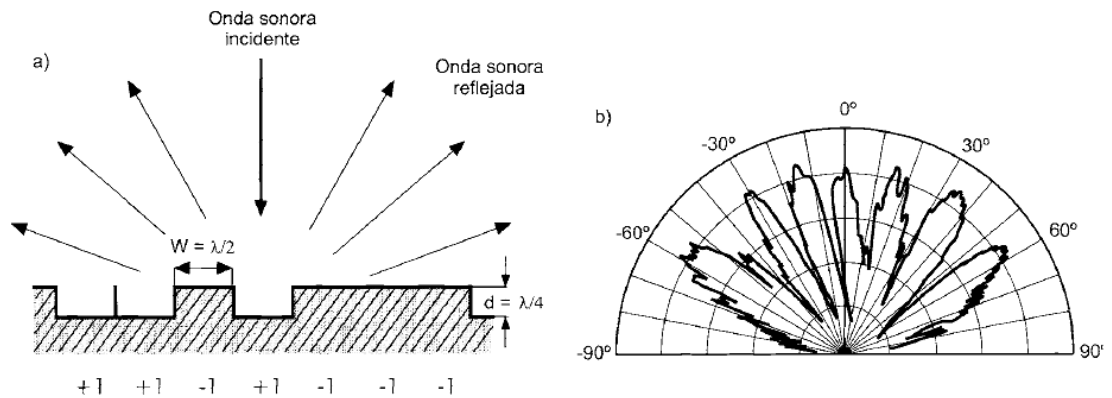
Estos difusores son diseñados teniendo en cuenta secuencias pseudoaleatorias periódicas, las cuales se denominan de longitud máxima o de Galois, estas secuencias solo pueden tomar dos valores diferentes y son 1 y -1.

Este difusor tiene una apariencia dentada. Se crea a partir de una superficie plana lisa y reflectante, luego se divide en tramos de igual anchura y creando ranuras con la misma profundidad, es en este momento donde a cada tramo se le asigna valores de la secuencia pseudoaleatoria, el procedimiento es el siguiente:

- Si el valor asignado es -1 ese tramo no se altera
- Si el valor asignado es 1 se crea una ranura en el espacio ocupado por ese tramo

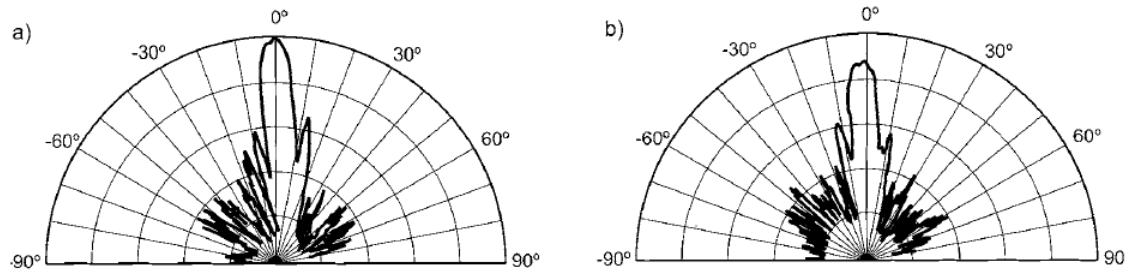
La profundidad “d” de cada tramo y la anchura “w” deben ser  $W = \lambda/2$ ,  $d = \lambda/4$  donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la frecuencia de diseño a la que se desea que el difusor opere. La gráfica 17 muestra un difusor de este tipo y su diagrama de difusión

Figura 17. Difusor MLS a) perfil de un difusor con indicación de la dirección de onda incidente y sus reflejadas b) diagrama de difusión a la frecuencia de diseño. (Carrion, 1998)



El rango de frecuencias donde es efectiva la difusión es una octava, se puede comprobar observando el diagrama de difusión de la octava anterior

Figura 18. Diagrama de difusión a) difusor MLS a una frecuencia el doble de la de diseño b) superficie plana y lisa



En salas de concierto este difusor se puede utilizar en mayor porcentaje ya que no tiene tanta absorción en bajas frecuencias como lo tiene los difusores QRD y PRD lo que implica que no reducirá excesivamente el tiempo de reverberación de dichas frecuencias.

- **Difusor QRD**

Sus siglas provienen de (“Quadratic-Residue Diffusor”) existen dos tipos de estos difusores de residuos cuadráticos unidimensionales y bidimensionales

**a) Difusores unidimensionales QRD**

Este diseño de difusores es el más utilizado en la práctica tanto en salas de concierto como en estudios de grabación, consiste en una serie de ranuras paralelas con forma rectangular, donde la anchura es constante pero la profundidad cambia. La profundidad de estas ranuras se basa en una serie matemática periódica y producen una difusión en un margen de frecuencias determinado más efectivamente cuando inciden perpendicularmente a dicha ranura.

La expresión generadora de esta serie es:

*Ecuación 3. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor QRD*

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

Donde:

P= número primo

n=número entero que va desde 0 hasta p-1

mod= “modulo” operación matemática, indica que el valor de  $s_n$  se obtiene del residuo del cociente entre  $n^2$  y p

Es por esta operación que recibe el nombre de residuo cuadrático y la secuencia resultante es periódica y de periodo  $p$ .

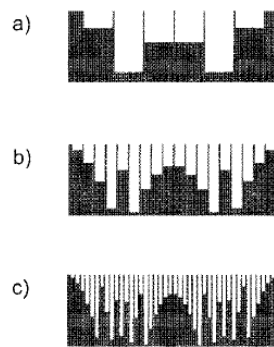
Como ejemplo la siguiente tabla de valores de una secuencia unidimensional de residuo cuadrático para  $p=7$

Tabla 2. Secuencia unidimensional de residuo cuadrático  $sn$  para un  $p=7$

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$n^2$	0	1	4	9	16	25	36
$S_n=n^2 \bmod 7$	0	1	4	2	2	4	1

La figura 19 muestra el diseño de tres difusores para  $P=7$ ,  $P=9$  y  $P=43$  respectivamente de un periodo, de la cual se puede observar la simetría en cada periodo.

Figura19. Perfil de difusores QRD para a)  $P=7$ ; b)  $P=19$ ; c)  $P=43$  (Carrion, 1998)



A modo de ejemplo del grado de difusión que puede llegar a tener estos QRD se muestre el siguiente diagrama de difusión para un QRD de 1 periodo y un  $P = 23$

Figura20. Diagrama de difusión, difusión unidimensional QRD de 1 periodo,  $P = 23$

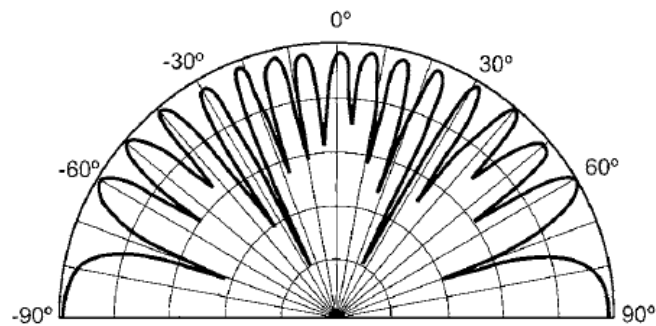
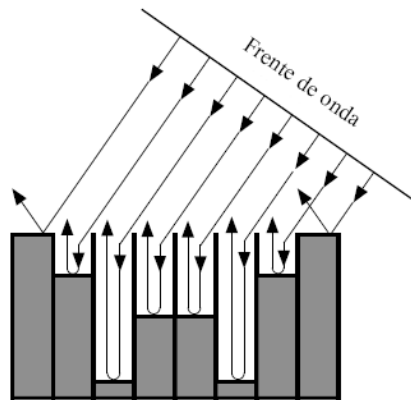


Figura21. Recorrido de la onda incidente en las ranuras de un difusor QRD unidimensional (Carrion, 1998)





El proceso de diseño de un difusor QRD se empieza definiendo los siguientes parámetros:

- $F_{\max}$ : frecuencia máxima en la que se quiere generar difusión
- $F_0$ : frecuencia mínima a la que se quiere dar difusión
- $M_{\max}$ : grado de difusión a la frecuencia  $f_0$  (número entero)

Después se determina la secuencia que genera las profundidades con la ecuación 3 ya mencionada y los anchos de los tramos con la siguiente ecuación

*Ecuación 4. Calculo para determinar el ancho de los tramos del difusor QRD*

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

donde:

$W$ = ancho de las ranuras en (mm)

$C$ = la velocidad del sonido (en mm/s)

$T$ = espesor de los divisores (mm)

$f_{\max}$ = frecuencia máxima para la cual se espera difusión

Se puede observar que la frecuencia máxima ( $f_{\max}$ ) es inversamente proporcional al ancho de las ranuras, es por eso que a medida que subimos la frecuencia máxima efectiva de difusión las ranuras van a ser más angostas. Los valores que toma  $T$  por lo general están entre 1.5 y 5 mm. Habrá mayor absorción en frecuencias bajas a medida que los separadores sean más delgados. Existe una relación en la práctica para determinar este valor y es 15 veces menor al ancho de la ranura.

Luego de fijar los valores de  $f_{\max}$ ,  $f_0$  y  $m_{\max}$ , el periodo ( $P$ ) lo hallamos con la siguiente ecuación:

*Ecuación 5. Calculo para hallar los periodos en el difusor QRD*

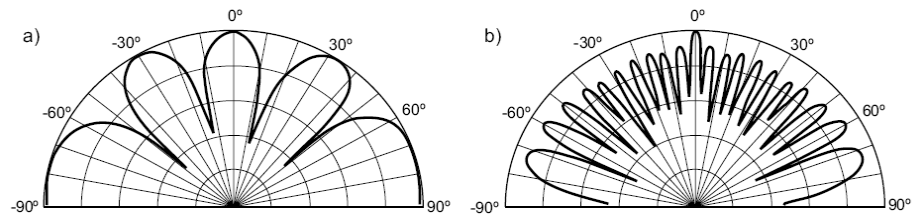
$$P = \frac{2 m_{\max} f_{\max}}{f_0}$$

Analizando la ecuación se puede deducir, que cuanto mayor sea el grado de difusión ( $m_{\max}$ ) o el margen de frecuencias efectivas a utilizar, mayor será el número de ranuras por periodo  $p$ .

Otro análisis de esta ecuación es el aumento del grado de difusión que existiría cuando se aumente  $p$  en un margen de frecuencias determinado

A modo de ejemplo, la figura 22 muestra los diagramas de difusión, a la frecuencia de diseño  $f_0$ , de dos difusores formados por dos periodos  $p = 17$  y  $p = 89$

Figura22. Diagrama de difusión correspondiente a 2 periodos de un difusor unidimensional QRD a)  $p = 17$  b)  $p = 89$  (Carrion, 1998)



Cuando se pasa de un periodo de 17 a 89 se puede notar un aumento en los lobulos y angulos de difusion

### Determinar profundidad de las ranuras $d_n$

La profundidad de las ranuras la se puede calcular de la siguiente manera

*Ecuación 6. Calculo para hallar las profundidades de las ranuras en el difusor QRD*

$$d_n = \frac{s_n c}{2 p f_0}$$

donde  $c$  se expresa en cm/s, y  $s_n$  es la secuencia generadora. Además, al ser  $s_n$  periodica y el periodo  $p$ , también lo es la secuencia de profundidad  $d_n$ .

hay que tener en cuenta que la relación que existe entre la  $f_{\max}$  y  $f_0$  debe ser menor o igual a 8, esto quiere decir que el rango útil de frecuencias debe ser de tres octavas máximo, fuera de ese margen el difusor tiene la tendencia de comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones especulares

la siguiente imagen muestra un difusor QRD

Figura 23. Difusor QRD terminado

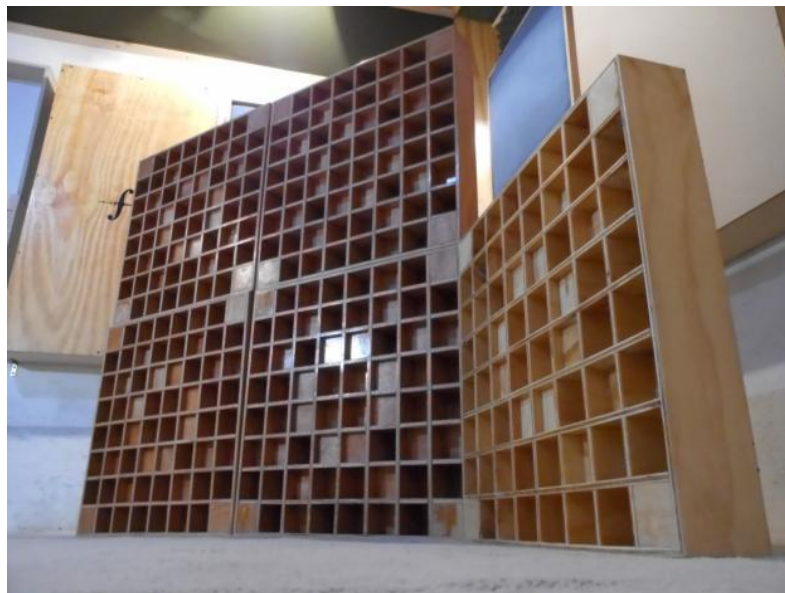


Fuente: (producerempire, 2014)

#### **b) Difusor bidimensional QRD**

Nace bajo la necesidad de generar una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. Estos difusores tienen la característica de estar conformado por pozos dispuestos en paralelo en vez de ranuras, estos pozos tienen profundidades variables y de forma habitualmente cuadrada, como lo muestra la figura 24

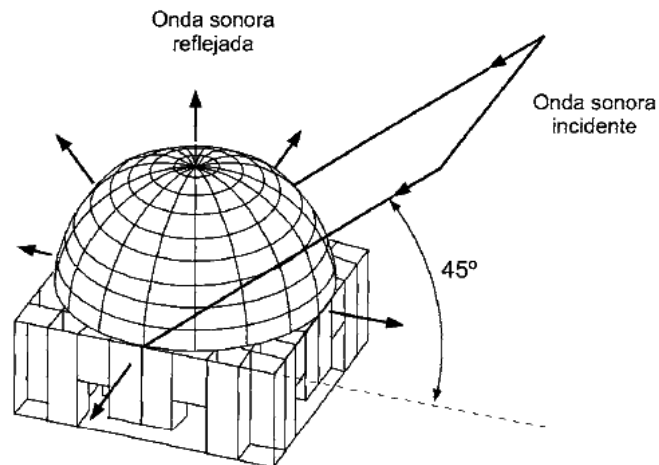
*Figura 24. Difusor QRD bidimensional*



**Fuente:** (Fotos de Difusores acusticos QRD 2, s.f.)

En un difusor QRD unidireccional las direcciones de difusión señalaban una máxima sobre un mismo plano, lo contrario sucede con los difusores bidireccionales, en los cuales los ángulos de difusión indican máximas de energía localizadas sobre una superficie semiesférica, la figura 25 muestra la locación en el plano semiesférico

*Figura25. Difusión producida por difusor QRD bidimensional de una onda incidente con ángulo de 45 grados con respecto a la superficie (Carrion, 1998)*



Las ecuaciones para tener en cuenta en el diseño de difusores bidimensionales son las mismas de los unidimensionales excepto la que determina la secuencia adimensional de profundidades de los pozos que mostramos a continuación

*Ecuación 7. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor QRD bidimensional*

$$S_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod p$$

donde:

p= número primo

m y n= número entero de 0 a p-1

La tabla 3 muestra un ejemplo de valores de una periodo de la secuencia bidimensional de residuos  $S_{m,n}$  correspondiente a  $p=7$

*Tabla 3. Secuencia bidimensional de residuo cuadrático  $s_{m,n}$  para un  $p=7$*

m/n	0	1	2	3	4	5	6
0	0	1	4	2	2	4	1
1	1	2	5	3	3	5	2
2	4	5	1	6	6	1	5

3	2	3	6	4	4	6	3
4	2	3	6	4	4	6	3
5	4	5	1	6	6	1	5
6	1	2	5	3	3	5	2

La profundidad real de las ranuras se obtendrá del producto de los valores de la secuencia adimensional por el mismo factor

- **Difusor PRD**

Sus siglas significan (“Primitive Root Diffusor”) su procedimiento de diseño es análogo al diseño del difusor QRD, con una diferencia a la hora de calcular la profundidad de cada ranura la cual se halla a partir de la siguiente ecuación generadora.

*Ecuación 8. Calculo de la serie que genera las profundidades en el difusor PRD*

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

donde:

P= número primo

g= es la raíz primitiva de P

n= número entero de 0 hasta p-1

mod = operación matemática del módulo (devuelve el residuo de la división de  $g^n$  entre p)

Es necesario que el número de residuo de esta operación matemática sea igual a p-1,

La tabla 4 muestra los valores de la secuencia para g=3 y p=7

*Tabla 4. Secuencia  $s_n$  para un g=3 y p=7*

n	1	2	3	4	5	6
$g^n$	3	9	27	81	243	729
$S_n = g^n \bmod P$	3	2	6	4	5	1

A diferencia de los difusores QRD, los PRD no tienen simetría y la energía de sus reflexiones especulares son muy bajas

#### 2.1.4 Sistemas de control automático

Los sistemas de control automático son un conjunto de componentes físicos relacionados entre sí, que controlan de manera parcial o completa las acciones de un dispositivo

#### **2.1.4.1 ARDUINO**

Según la descripción en la web de Arduino lo describen como una plataforma de computación física de código abierto, basado en una placa electrónica simple, y un entorno de desarrollo para escribir software para la placa. Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos, teniendo en las entradas de una variedad de interruptores o sensores, y en el control de una variedad de luces, motores y otras salidas físicas. Los proyectos de Arduino pueden ser autónomos, o pueden comunicarse con el software que se ejecuta en su computadora (por ejemplo, Flash, Processing, MaxMSP.)

Las tablas se pueden montar a mano o comprados pre-ensamblada; el IDE de código abierto se puede descargar de forma gratuita. El lenguaje de programación de Arduino es una implementación de cableado, una plataforma similar a un sistema de computación física, que se basa en el entorno de programación multimedia de procesamiento. (Arduino, s.f.)

#### **2.1.4.2 Bluetooth**

La tecnología Smart Bluetooth es un sistema de comunicaciones inalámbricas destinado a sustituir los cables de conexión de muchos tipos de dispositivos, desde teléfonos móviles y auriculares, para escuchar los monitores y equipos médicos.

“Bluetooth es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal(WPAN) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia en la banda ISM de los 2,4 GHz. Los principales objetivos que se pretenden conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles.
- Eliminar los cables y conectores entre éstos.

Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.” (Wikipedia, 2014)

“El estándar Bluetooth, del mismo modo que WiFi, utiliza la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum, en español Espectro ensanchado por saltos de frecuencia), que consiste en dividir la banda de frecuencia de 2.402 - 2.480 GHz en 79 canales (denominados saltos) de 1 MHz de ancho cada uno y, después, transmitir la señal utilizando una secuencia de canales que sea conocida tanto para la estación emisora como para la receptora.” (kioskea, s.f.) Por lo tanto, al cambiar de canales con una frecuencia de 1600 veces por segundo, el estándar Bluetooth puede evitar la interferencia con otras señales de radio.

#### **2.1.4.3 Modulo Bluetooth HC-05**

Módulo de comunicación inalámbrica Bluetooth HC05, éste módulo puede ser configurado como Maestro o como Esclavo, es un transceiver (Tx y Rx) de bajo costo y muy fácil de usar. Tiene disponible 7 pines de entradas/salidas digitales.

Interface serial UART a 3.3V y maneja comandos AT para la configuración y comunicación con el módulo bluetooth. Módulo para montaje superficial, fácil de soldar.

Compatible con plataformas como ARDUINO, CHIPKIT, Raspberry PI y con micro controladores de cualquier fabricante.

**Descripción: HC-05** es una clase-2 **módulo bluetooth** con perfil de puerto serie, que se puede configurar ya sea como maestro o esclavo. Un reemplazo Drop-in para conexiones en serie con cable, uso transparente. Se puede utilizar simplemente para un reemplazo puerto serie para establecer la conexión entre MCU, PC a su proyecto integrado y etc.

#### **HC-05 Especificación:**

- Protocol Bluetooth: Especificación Bluetooth v2.0 + EDR
- Frecuencia: banda ISM de 2,4 GHz
- Modulación: GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying)
- Potencia de emisión:  $\leq 4\text{dBm}$ , Clase 2
- Sensibilidad:  $\leq -84\text{dBm}$  en 0.1% BER
- Velocidad: asíncronos: 2.1Mbps (Max) / 160 kbps, Synchronous: 1Mbps / 1Mbps
- Seguridad: Autenticación y encriptación
- Perfiles: puerto serie Bluetooth
- Fuente de alimentación: + 3.3VDC 50mA
- Temperatura de trabajo:  $-20 \sim + 75\text{Centigrade}$
- Dimensión: 26.9mm x 13mm x 2,2 mm.

Estos datos son tomados de (rajguruelectronics, 2014)



## 2.2 Marco Legal

Todas las normas que respaldan y dan soporte a este trabajo de investigación se presentaran a continuación. Las normas necesarias para el desarrollo de este proyecto son la ISO 354 para la medición de absorción sonora y reflexión en una sala reverberante y las recomendaciones de la AES 4id 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.

La normativa internacional ISO 354, especifica el método de medición del coeficiente de absorción del sonido en materiales acústicos utilizado en cielorrasos y paredes. Además el área de absorción equivalente de personas u otros objetos en una sala reverberante.

El procedimiento de implementación de esta norma es el siguiente:

Definamos los términos a utilizar:

#### Términos

- **T**→ Tiempo de reverberación.
- **A<sub>1</sub>**→ Área de absorción equivalente en el recinto sin la muestra (m<sup>2</sup>).
- **A<sub>2</sub>**→ Área de absorción equivalente en el recinto con la muestra (m<sup>2</sup>).
- **At**→ Diferencia entre A<sub>1</sub> y A<sub>2</sub>.
- **S**→ Área de la muestra (m<sup>2</sup>).
- **α<sub>s</sub>**→ Coeficiente de Absorción del sonido.

#### Especificación de la sala

- recomendación para el volumen → 200 m<sup>3</sup>
- forma → cumplir con la siguiente condición

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

donde

$l_{\max}$ : longitud de la línea recta más larga de la sala (en metros)

V: volumen de la sala en metros cúbicos

- altamente difusa, generalmente son requeridos difusores, los materiales constructivos deben ser reflejantes para poder obtener tiempos de reverberación altos en su interior

#### Área de absorción

Después de tener A<sub>1</sub> con la medición de tiempo de reverberación t<sub>1</sub>, se compara estos valores con los valores encontrados en la tabla 5. Los valores de la medición no deben sobre pasar los valores recomendados



Tabla 5. Área de absorción del sonido equivalente máxima para una sala de 200 m<sup>3</sup>

Área de absorción equivalente	frecuencia	Área de absorción equivalente	frecuencia	Área de absorción equivalente	frecuencia
6.5	100	6.5	500	10.5	2500
6.5	125	6.5	630	12.0	3150
6.5	160	6.5	800	13.0	4000
6.5	200	7.0	1000	14.0	5000
6.5	250	7.5	1250		
6.5	315	8.0	1600		
6.5	400	9.5	2000		

Estos valores son estimados para recintos con un volumen de 200 m<sup>3</sup> si el recinto a medir es de un volumen diferente, cada uno de sus valores debe ser multiplicado por el siguiente factor  $(V/200)^{2/3}$

### Característica De Las Muestras

- el valor del área debe estar entre 10m<sup>2</sup> y 20m<sup>2</sup>, si el volumen del recinto es cercano a 200m<sup>3</sup>.
- la relación entre el largo y el ancho de la muestra tiene que estar dentro de un límite o rango de 0.7 a 1.
- la ubicación es por mínimo 1 metro de las superficies límites.
- Se puede ubicar en el piso y recostado en alguna de las superficies límites cuando el objeto es muy pesado

### Temperatura Y Humedad

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

### Medición Del Tiempo De Reverberación

- Dentro del método de medición, primero se hará la medición de ruido interrumpido y después y segundo la respuesta al impulso que puede ser directa o indirecta.
- Características del micrófono: debe ser omnidireccional, la distancia a la fuente debe ser al menos 1.5m y la distancia a cualquier superficie debe ser de 1 m. y definir por lo menos 3 posiciones de medición.
- La fuente debe ser 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

- Calcular el **T<sub>1</sub>** (tiempo de reverberación SIN la muestra)
- Calcular el **T<sub>2</sub>** (tiempo de reverberación CON la muestra)

- c) Se calcula  $A_1$  y  $A_2$  por medio de la siguiente ecuación del área de absorción equivalente

*Ecuación 9. Área de absorción equivalente*

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

Donde:

**V** es el volumen en m<sup>3</sup> de la sala vacía.

**C** velocidad de propagación del sonido en m/s.

**T<sub>1</sub>** es el tiempo de reverberación SIN la muestra.

**T<sub>2</sub>** es e tiempo de reverberación CON la muestra.

**m<sub>1</sub>** coeficiente de atenuación de energía (ISO 9613-1) durante la medición SIN la muestra.

**m<sub>2</sub>** coeficiente de atenuación de energía (ISO 9613-1) durante la medición CON la muestra.

El termino **m<sub>(1,2)</sub>** que es el coeficiente de atenuación de la energía lo calculamos así:

*Ecuación 10. Calculo coeficiente de atenuación de la energía*

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

A continuación la ecuación de velocidad de propagación del sonido teniendo en cuenta el factor temperatura

*Ecuación 11. Ecuación de velocidad de propagación del sonido teniendo en cuenta el factor temperatura*

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

Donde **t** es la temperatura en grados centígrados

- d) Se calcula **A<sub>t</sub>** (área de absorción equivalente total) a partir de la siguiente ecuación:

*Ecuación 12. Área de absorción equivalente total*

$$A_t = A_2 - A_1$$

- e) Calculamos **α<sub>s</sub>** (coeficiente de absorción ) con ayuda de la siguiente ecuación:

*Ecuación13. Calculo coeficiente de absorción*

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

Siendo **S** el área de la muestra en m<sup>2</sup>

### 2.2.2 AES 4 id Characterization And Measurement Of Surface Scattering Uniformity

Este documento aporta lineamientos y procesos para caracterizar la uniformidad de dispersión de una superficie con respecto a mediciones o predicciones de la respuesta de esparcimiento polar.

La superficie de esparcimiento se cuantía por medio del coeficiente de difusión simple. Esta es una medida para calificar la calidad y es utilizada por los productores y usuarios de las superficies

El procedimiento y las condiciones se explican a continuación.

#### Términos Relevantes

- **Superficie Plana De Referencia:** superficie rígida, plana 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:** obedece a la ley de Snell y es un rayo sonoro incidente que experimenta una reflexión especular.
- **Respuesta Polar:** semicírculo centrado en un punto de referencia y muestra los niveles de presión sonora esparcida en función del ángulo de medida sobre la referencia normal, generado bajo un campo libre o bajo condiciones de un pseudo campo libre.
- **Coeficiente de Difusión Direccional  $d_\theta$ :** medida de uniformidad de la difusión que produce una superficie sobre el sonido producido por una fuente. Este coeficiente tiene un rango entre 0 y 1, siendo 1 difusión total y completa el subíndice  $\theta$  indica el ángulo de incidencia relativo a la referencia normal de la superficie.
- **Coeficiente de Difusión  $d_{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n}$ :** Medida de 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.
- **Coeficiente de Difusión de Incidencia Aleatoria  $d$ :** Medida de difusión para la caracterización representativa de una superficie a medir sobre un semicírculo completo, para una difusión de un solo plano o una semiesfera completa par aun difusor semiesférico. La falta de un subíndice para  $d$  indica incidencia aleatoria.

#### Ambiente De Medición

Es necesario para evitar errores en la medición. Evitar superficies 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 anecóica. Las mediciones con superficies reflejantes en sus límites inferiores pueden prescindir de la necesidad de un espacio que sea anecóica en un plano.

## Campo de Medición

Generalmente un difusor se implementa 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, en especial la focalización. Por el contrario, las mediciones o pruebas en campo lejano muestran la cantidad de difusión alcanzada.

Las pruebas realizadas en campo lejano buscan capturar la respuesta polar semicircular o semiesférica. Es necesario que la fuente y el receptor, y el punto de referencia cumplan con la siguiente relación:

*Ecuación 14. Método de cálculo para la distancia fuente-receptor*

$$\begin{aligned}r &\gg D_{\max} \\r / D_{\max} &\gg D_{\max} / r \\-r &= 2r_1r_2 / (r_1 + r_2)\end{aligned}$$

donde:

$D_{\max}$  es a dimensión más larga del difusor.

$\lambda$  es la longitud de onda.

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

$r_2$  es la distancia del receptor hasta el punto de referencia.

Las mediciones deben tener una resolución de ángulo máxima de 5 grados para el receptor. Para obtener el coeficiente de difusión aleatoria, las posiciones de la fuente de ben ser con un máximo de 10 grados de separación angular, cubriendo así el hemisferio medio sobre la normal. Una condición real puede ser el tiempo limitado por condiciones de la medición, en este caso los coeficiente direccionales de difusión pueden ser obtenidos por incidencia normal y de 55°.

## Muestra Bajo Prueba

- Es aconsejable tener la misma muestra bajo prueba tanto en la medición de prueba como en el recinto real, así garantizar que la difracción debida a la aspereza y a los efectos de borde serán propiamente caracterizados.
- Cuando el difusor es de un solo plano, tendrá una superficie e impedancia acústica que es la constante en una dirección (d).

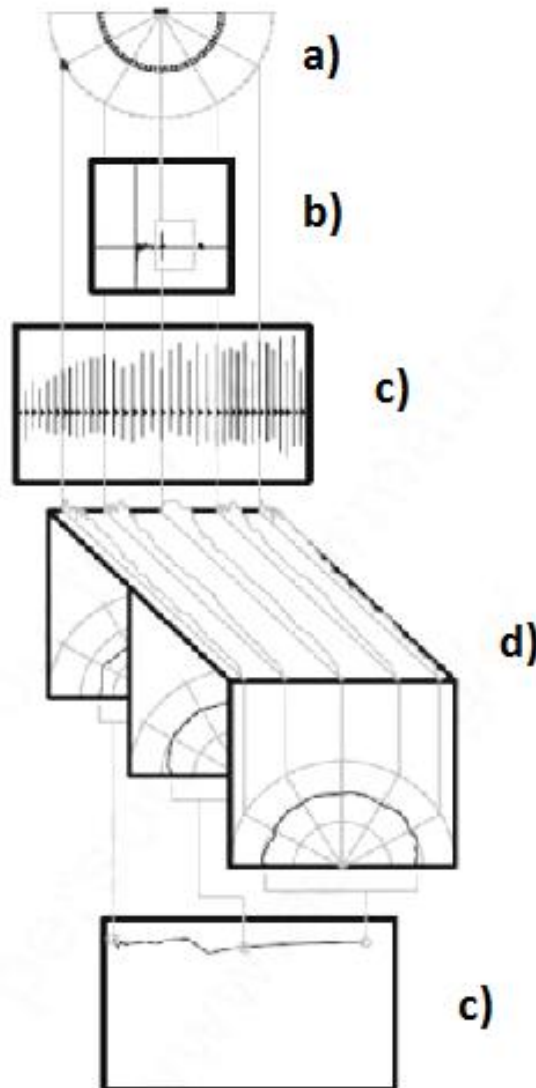
## Técnicas de Medición

- Métodos:** la magnitud de la respuesta polar se puede obtener mediante técnicas de función de transferencia, por ejemplo las mediciones de respuesta al impulso, transformada rápida de Fourier (FFT), espectrometría de retardos en el tiempo (TDS) o por medio de la secuencia máxima de longitud (MLS), esta última es la más fácil de repetir y la más rápida de aplicar.
- Fuente:** Es importante tener un altavoz que irradie todo el difusor como si este fuera omnidireccional. Se recomienda que se utilice una fuente omnidireccional.

- c) **Pruebas:** es necesario tener la respuesta al impulso con la superficie de prueba,  $h_1(t)$  y la respuesta al impulso sin la superficie de prueba  $h_2(t)$ , esto para cada fuente y receptor.

*El proceso de obtención de los datos se explica en la figura 26*

*Figura26. Proceso de obtención del coeficiente de difusión desde un impulso a) medición del difusor en cada punto cada 5 grados b) seleccionar el impulso reflejado y obviar el primer impulso c) se aplica la FFT por octavas d) se grafican los valores obtenidos por octava para el patrón polar c) gráfica coeficientes de difusión*



Para cada impulso se aplica una ventana rectangular en la respuesta al impulso, esta debe tener una ganancia unitaria donde las reflexiones de la superficie de prueba están presentes y es cero en cualquier otra parte, esto para remover las reflexiones residuales que se encuentran separadas claramente de las reflexiones de las superficies de prueba en el eje del tiempo



\* La ISO-17497-2 estandariza este método de la AES, esta información está registrada en el libro Master Handbook en la página 402.

### 3. METODOLOGÍA

La estrategia para desarrollar este proyecto, variables y posibles resultados se describe en este capítulo.

#### 3.1 Enfoque De La Investigación

También tiene un enfoque **empírico-analítico**, debido a que se comparan los datos obtenidos por los cálculos del diseño con los datos experimentales recopilados por las mediciones con el fin de darle validez al proyecto

#### 3.2 Línea De Investigación De USB / Sub-Línea De Facultad.

La línea de investigación de este proyecto es Tecnologías actuales y sociedad, y la sub-línea de la facultad procesamiento digital de señales, esto debido, al procesamiento de los datos adquiridos en las mediciones. El campo de investigación corresponde a la acústica, ya que trabajamos con la manipulación de propiedades físicas del sonido.

#### 3.3 Técnicas De Recolección De Información

todo el segmento de recolección de datos necesarios para el desarrollo de proyecto y se hizo mediante consulta de libros, trabajos de grado realizados por estudiantes de la san buenaventura, artículos de la A.E.S, internet y normatividad actual correspondiente como la ISO 354 (reflexión y absorción) y la AES 4id 2001(difusión) .

El siguiente paso fue la recolección de datos y parámetros acústicos como el tiempo de reverberación y la difusión del panel por medio de las mediciones realizadas en el software EASERA de medición de la universidad de san Buenaventura

#### 3.4 Hipótesis

El panel acústico variable permite tener un espacio versátil en la sala, donde se pueden obtener muchos entornos acústicos para los diferentes fines, además de ser muy práctico y ahorrar tiempo en el manejo manual de paneles a la hora de querer determinado ambiente acústico.

#### 3.5 variables

##### 3.5.1 Variables dependientes

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

##### 3.5.2 Variables independientes

- Coeficientes de absorción del panel
- coeficientes de difusión del panel.
- Coeficiente de reflexión del panel
- Patrón polar del panel.

## 4. DESARROLLO INGENIERIL

Este capítulo explica detalladamente el desarrollo de los objetivos propuestos anteriormente. Según el orden estipulado primero se expondrá las teorías en las que se utilizaron para la construcción del panel seguido por el proceso de diseño del mismo.

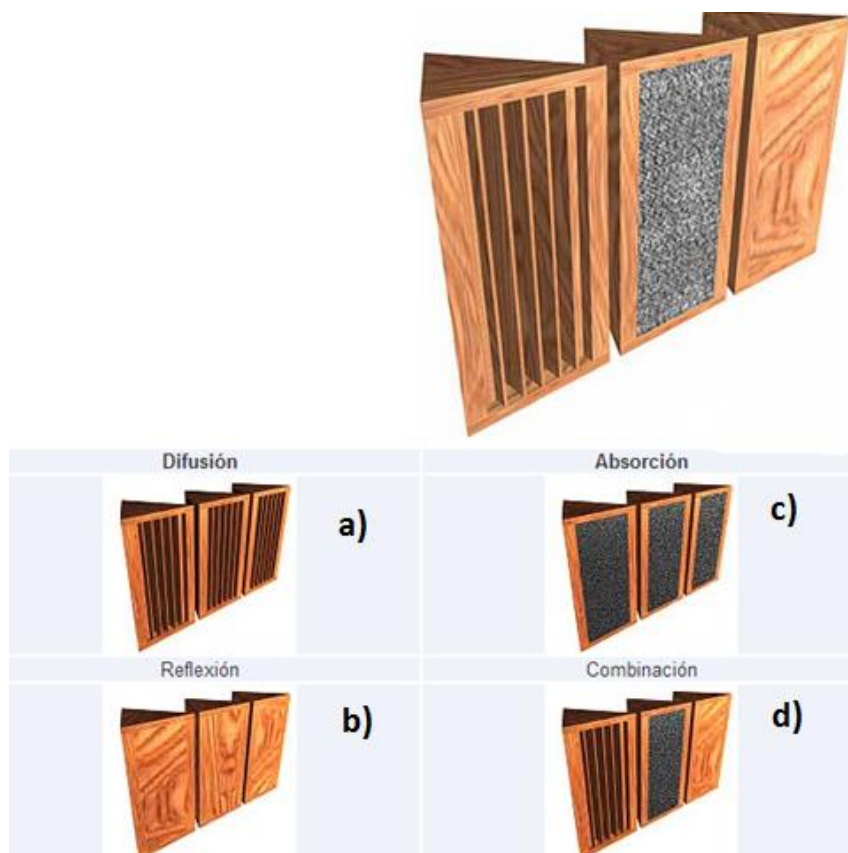
### 4.1 Etapa De Diseño Y Construcción

#### 4.1.1 Diseño Y Construcción Prototipo De Panel

Este prototipo está basado en el diseño de un Trifusor de la empresa Acoustic GRG Products Ltd más específicamente el trifusor RPG (RPG Difusor Systems, s.f.) Se decidió trabajar con este modelo de dispositivo acústico (como referencia) porque permite obtener diferentes arreglos o cambios de posición, cambios de texturas o densidades de material, no obstante se le agrego unas variaciones al diseño original presentado en la página de esta empresa. Estas modificaciones se explicarán más adelante.

La figura 27 muestra un trifusor común

*Figura 27. Panel trifusor y sus combinaciones, fuente (rpgeurope, s.f.) a) configuración cara difusora b) cara reflectora c) cara absorbente d) arreglo combinado (RPG Difusor Systems, s.f.)*



Para definir las dimensiones de este prototipo de panel se tuvo en cuenta diferentes variables, como, el peso, los materiales, el costo, la movilidad. Esto llevó a pensar que un tamaño conveniente para desarrollar los diseños de los paneles de este prototipo es una estructura que tenga un tamaño de 1 m (largo) por 1 m (alto). Esto quiere decir que la combinación de paneles o la suma de las dimensiones de estos, no debería sobrepasar esta área. La profundidad de este la determinaremos más adelante según los diseños de las caras

La construcción del prototipo del panel se divide en 3 etapas, la primera asociada con los paneles (absorción, reflexión y difusión), la segunda se relaciona con la estructura de apoyo (ejes) y la tercera involucra la automatización. A continuación se explicará el proceso de diseño y construcción de cada uno de estos.

## PRESENTACIÓN DEL DISEÑO

Lo primero a tener en cuenta es la dimensión definida para el prototipo de panel que en este caso es de 1 m de largo por 1 m de alto, se establecieron estas dimensiones por motivo de fácil manejo del prototipo y que cumple con la relación de dimensiones de la ISO 342

Para esto se divide 1 m en 3, esto da una longitud por cara del panel de 0.333m, para facilidad de construcción se toma el número entero, esto corresponde a una longitud por cara de 33 cm. El siguiente esquema muestra la distribución de las caras de los paneles y sus dimensiones

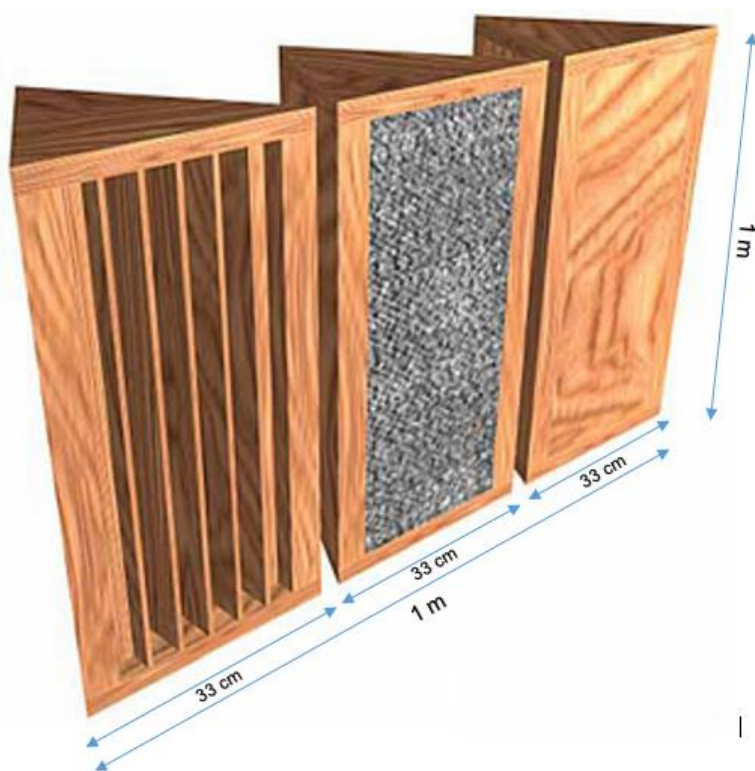
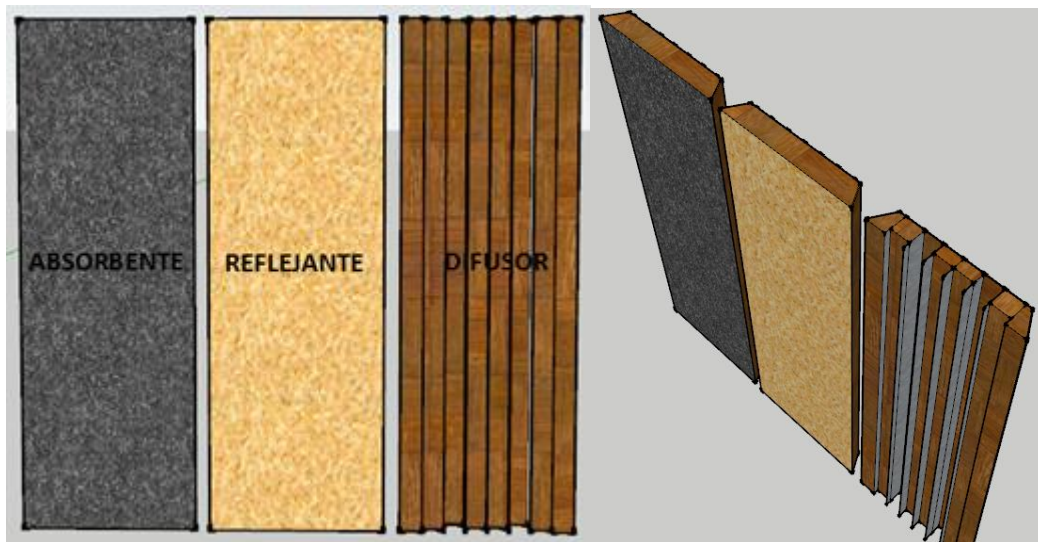


Figura 28. Esquemas con las dimensiones (RPG Diffusor Systems, s.f.)

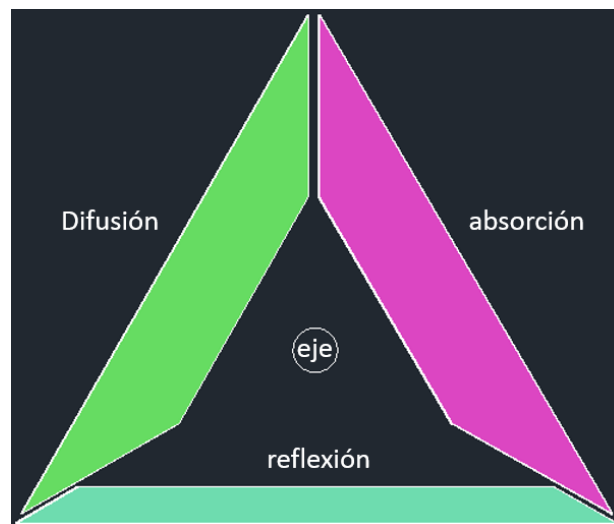
## Modificaciones Al Diseño Original Del Trifusor

La construcción de este prototipo de panel llevó a realizar algunas modificaciones al ensamblaje del trifusor referencia, logrando así, un nuevo panel trifusor el cual tiene una mejora en su versatilidad para generar distintas combinaciones. Este diseño de trifusor tiene la característica que cada una de sus caras es móvil y desmontable de esta manera se pueden intercambiar dependiendo de las necesidades y exigencias acústicas que se tengan en la sala. Al unir cada una de las caras del panel en la estructura de soporte, debido a sus ángulos y dimensiones, la figura resultante es el prisma trifusor., la figura 29 y 30 muestra los esquemas anteriores

*Figura 29. Caras del panel por separado de frente y perspectiva*



*Figura 30. Esquema de Distribución del panel ensamble de las caras*



Este panel en forma de prisma se une a un eje central diseñado en la estructura de apoyo y se explicará a continuación

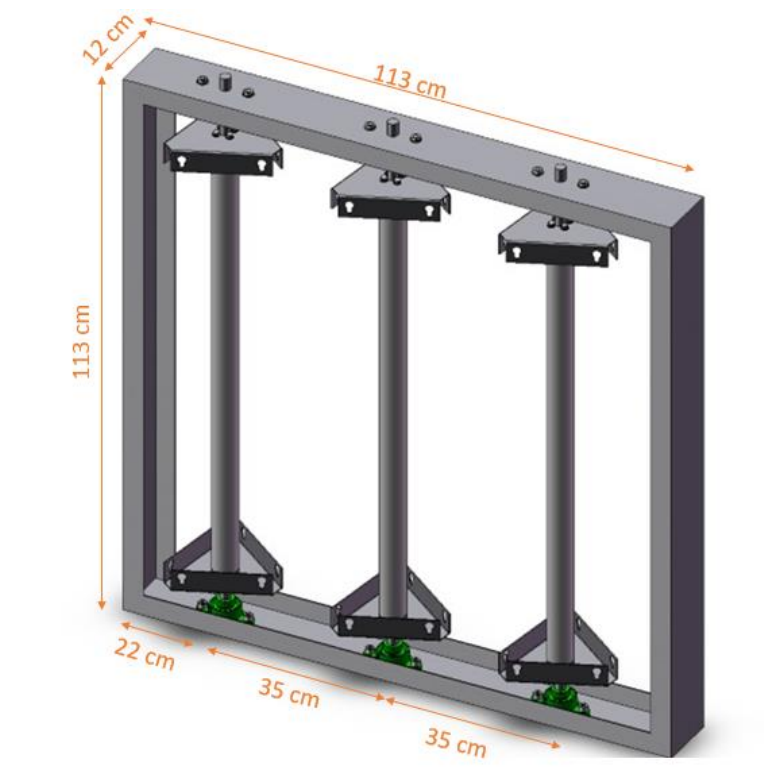
## CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOPORTE Y EJES PARA LOS PANELES

Esta estructura se construyó en aluminio y los ejes en plástico P.V.C que contienen unos rodamientos para la libre rotación de los paneles

### Estructura de apoyo (ejes)

La estructura principal de apoyo tienen las siguientes dimensiones, el largo es de 113 cm, el alto de 113 cm y el ancho de 12 cm. La distancia de los ejes al borde de la estructura es de 22 cm y con separación entre ejes de 36 cm. Como se puede observar en la figura 31

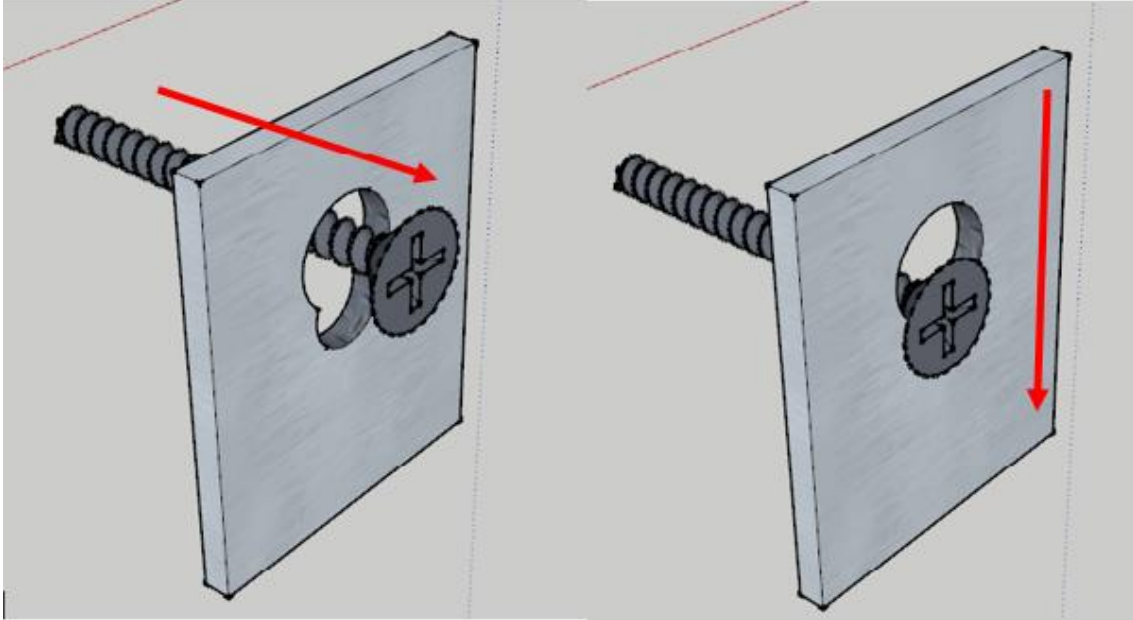
*Figura 31. Esquema de la estructura soporte de los paneles*



La estructura fue diseñada con un sistema de anclaje que permite quitar y poner nuevamente los paneles, a continuación se muestra el lugar de los anclajes y la forma de funcionamiento. La forma de ensamble de los paneles a los ejes de la estructura es mediante un sistema de seguro mecánico o anclaje, diseñados en la base y la cabecera del panel. El sistema cuenta en la placa del eje, orificios de dos diferentes diámetros y su función es asegurar los tornillos que tienen los paneles a la estructura base, la figura 32 muestra ilustra el sistema de anclaje

Figura 32. Sistema de seguro mecánico, diseñados en la base y la cabecera del panel, método para anclar los paneles a) esquema dispositivo b) foto del prototipo y el sistema de anclaje

a)



Los tornillos deben entrar por los orificios de diámetro más grande y con un movimiento hacia abajo quedar asegurados

b)





La figura 33 muestra el montaje completo de los paneles en la estructura de apoyo

*Figura 33. Montaje completo de los paneles en la estructura de apoyo en diferentes perspectivas a) estructura metálica de perfil b) estructura metálica vista frontal*



El montaje de los paneles en los ejes de la estructura, como se muestran en las figuras anteriores, da como resultado los prismas trifusores cada uno de estos puede girar en su propio eje, lo que nos permite colocarlos en la posición que deseemos.

#### **4.1.2 Diseño Y Construcción Del Difusor QRD**

Es importante en esta etapa de diseño definir una limitante que se presenta a la hora de construir el difusor, la cual es, el tamaño definido previamente del prototipo de panel el cual es de 1m por 1m. Esto quiere decir que el diseño que se proponga de difusor, debe estar dentro del margen de estas dimensiones.

Según el libro de Antoni Carrión Isbert, llamado Diseño acústico de espacios arquitectónicos en el apéndice 2 titulado **Estudio y diseño de difusores unidimensionales QRD** lo primero en el procedimiento es determinar los siguientes parámetros:

- **$F_{\max}$** : frecuencia máxima a la que se quiere aplicar difusión.
- Obtención de la mínima frecuencia de diseño  $f_0$  posible

Para esta selección tuvimos en cuenta las dimensiones de cada cara del difusor que es de 33 cm. Se decide hacer un arreglo de difusor QRD con esta dimensión a continuación están los valores seleccionados para que el difusor cumpla con estas medidas.

Se tomará  **$F_{\max}$**  con un valor de 4000 Hz esta frecuencia es en la mayoría de instrumentos y voces la responsable de proporcionar presencia y calidez.

#### **Ancho De Las Ranuras**

Es en esta etapa de diseño donde tenemos en cuenta las dimensiones límites del difusor. La siguiente ecuación nos permite determinar la anchura de cada ranura, aunque no la cantidad de ellas, la cual se deduce más adelante.

*Ecuación 15. Calculo anchura de cada ranura*

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

donde:

**W**= ancho de las ranuras en (mm)

**C**= la velocidad del sonido (en mm/s)

**T**= espesor de los divisores (mm)

**f<sub>max</sub>**= frecuencia máxima para la cual se espera difusión

Se puede decir que cuanto mayor sea la frecuencia máxima menor será el ancho de las ranuras de nuestro difusor. En cuanto al valor de T se recomienda que sea pequeño para no modificar las propiedades difusoras. En este caso se decidió tomar como T, una lámina de aluminio de 1,3 mm de espesor. Asignando valores se tiene que

$$W = \frac{340000 \left( \frac{mm}{s} \right)}{2 \times 4000 (Hz)} - 1.3 = 41.2 \text{ mm (ancho de las ranuras)}$$

### **Determinación Del Número De Ranuras Por Periodo**

Este método de diseño establece dos opciones para el número de ranuras por periodo, 7 o 23, para este diseño se seleccionó el valor de 7. La razón de escoger 7 es que cada ranura separadora es de aluminio si se diseñará con 23 ranuras por periodo el difusor quedará muy pesado.

f<sub>0</sub> es hallada de la siguiente expresión

*Ecuación 16. Ecuación para hallar f0 del difusor*

$$f_0 = \frac{s_n(\max)}{p} \frac{c}{2d_n(\max)}$$

Dado que el valor de **d<sub>n</sub>(max)** esta prefijado y será la distancia útil limite que se tiene de profundidad en el panel que es de 5 cm, lo que buscamos es cuál es el valor mínimo del cociente  $\frac{s_n(\max)}{p}$ , ya que de esta forma f<sub>0</sub> también será mínimo.

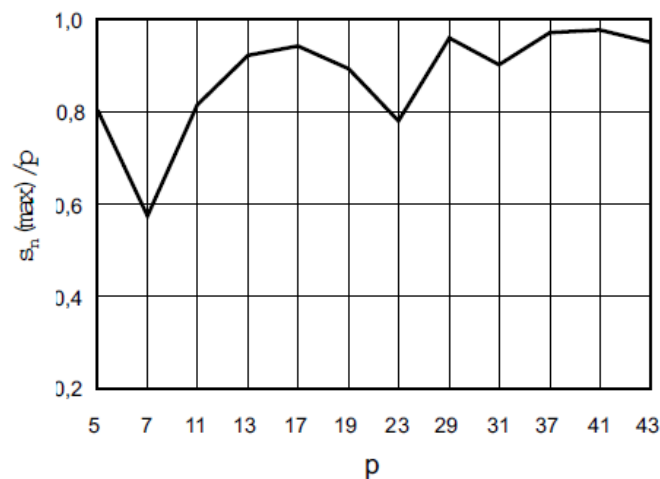
La tabla 6 muestra los valores de ese cociente para los diferentes valores de **P**

Tabla 6.  $S_n$  contra  $P$

$P/S_n$	0	1	2	3	4	5	6
7	0	1	4	2	2	4	1

Dado que el valor de  $d_n$  (máx.) está prefijado, se trata de ver para qué valor de  $p$  el cociente  $s_n(\max)/p$  es mínimo, ya que entonces  $f_0$  también será mínima. (Carrion, 1998) La figura 34 nos ilustra el anterior enunciado

Figura 34. Gráfica de valores de  $s_n(\max)/p$  para



**Fuente** (Carrion, 1998)

De la gráfica se puede deducir que el valor de  $p$  donde el cociente es mínimo se encuentra para el  $P = 7$  con un  $S_n \max = 4$

Por lo tanto la ecuación queda de la siguiente manera

$$f_0 = \frac{4}{7} \frac{34000}{2 \cdot 5} = 2002 \text{ Hz}$$

### Profundidad De Las Ranuras

Una vez fijados los valores anteriores como  $p$ ,  $w$ ,  $m$ ,  $f_0$ ,  $f_{\max}$ , se puede calcular la profundidad real de cada ranura con la siguiente expresión.

*Ecuación 17. Ecuación para calcular profundidad real de cada ranura*

$$d_n = \frac{s_n c}{2 p f_0}$$

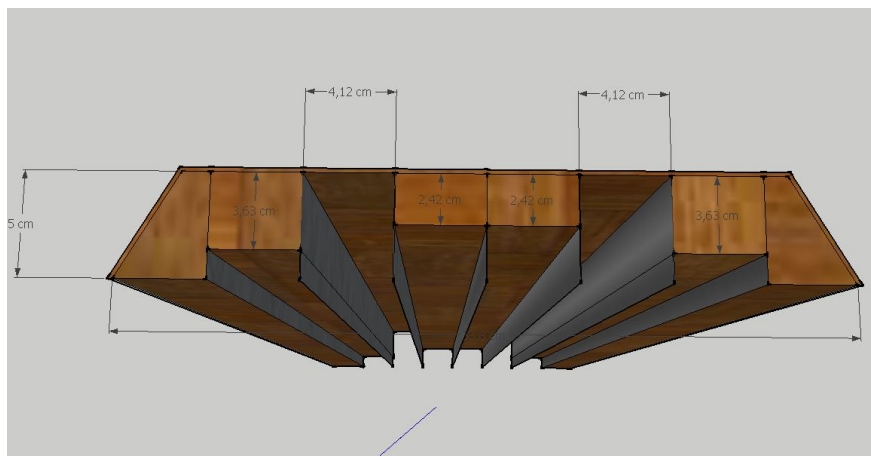
Los valores de profundidad para cada una de las ranuras se encuentran en la tabla 7

Tabla 7. Tabla relación entre  $n$ ,  $S_n$ ,  $d_n$

$n$	0	1	2	3	4	5	6
$S_n$	0	1	4	2	2	4	1
$d_n(\text{cm})$	0	1.21	4.84	2.42	2.42	4.84	1.21

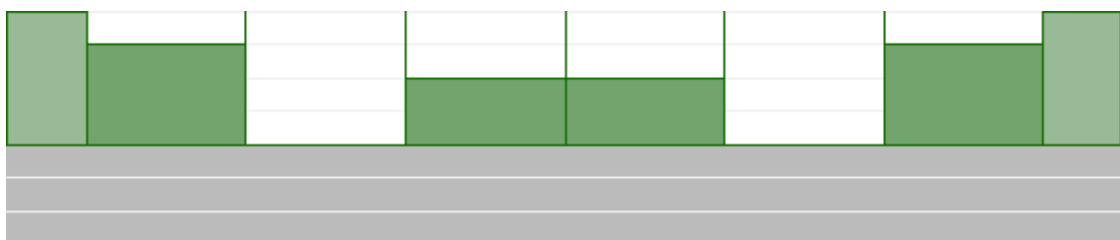
Estas medidas de profundidad son las referencias para las demás profundidades de las dos caras restantes. En otras palabras la profundidad máxima de cada cara será la máxima profundidad del difusor es decir 5 cm. La figura 35 y 36 son esquemas de cómo quedaría nuestro difusor.

Figura 35. Esquema cara difusora trifusor prototipo de panel



Por medio del software QRdude se pudo comprobar las separaciones y profundidades del difusor como lo muestra la figura 36

Figura 36. Vista superior profundidades y serie del difusor (software, 2014)



La construcción del panel se realizó con madera de media densidad y las divisiones con láminas de aluminio se seleccionaron estos materiales por su buen precio y porque son fáciles de encontrar en cualquier carpintería o almacenes de suministro de materiales de construcción.

Figura 37. Terminado del difusor uno por cara, 3 periodos



#### 4.1.2.1 AES 4id-2001. Medición de difusión.

(Norma completa anexo B del marco jurídico)

El análisis y caracterización del comportamiento del difusor hace parte del desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos propuestos.

Esta recomendación sugiere tomar pasos de medición cada 5 grado. Para esta medición se toma cada 5 grados pues se consideró que aún con estas distancias conservaríamos información necesaria para analizar directivita y niveles de presión sonora incidentes en el panel. Ahora este es un prototipo de panel aplicado a acústica variable por lo que se analiza su versatilidad estructural y su efectividad individual puede considerarse una variable independiente

##### **Ambiente de medición**

Según la recomendación es más útil utilizar una cámara anecóica. En caso tal de no contar con un recinto así, se puede utilizar un espacio al aire libre para simular un ambiente libre de reflexiones, por tal motivo se eligió la cancha de tenis de la Universidad de san buenaventura sede Bogotá

##### **Campo de medición**

Esta medición busca determinar cuanta difusión es alcanzada por el panel difusor del prototipo, para este fin se halla el coeficiente de difusión, esta medición solo se puede hacer en campo lejano, para cumplir con la recomendación se tomaron los siguientes valores:

$$D_{\text{máx.}} = 0.33 \text{ m}$$

$$\Lambda = 1.70 \text{ m}$$

$$r_1 = 4.5 \text{ m}$$

$$r_2 = 2.5 \text{ m}$$

Se comprobaron las respectivas relaciones que establece la recomendación

$$r = \frac{2 * 4.5 * 2.5}{(4.5 + 2.5)} = 3.214$$

$$(r)3.214 \gg 0.33(D_{\text{máx}})$$

$$(r/D_{\text{máx}})9.739 \gg 0.194(D_{\text{máx}}/\lambda)$$

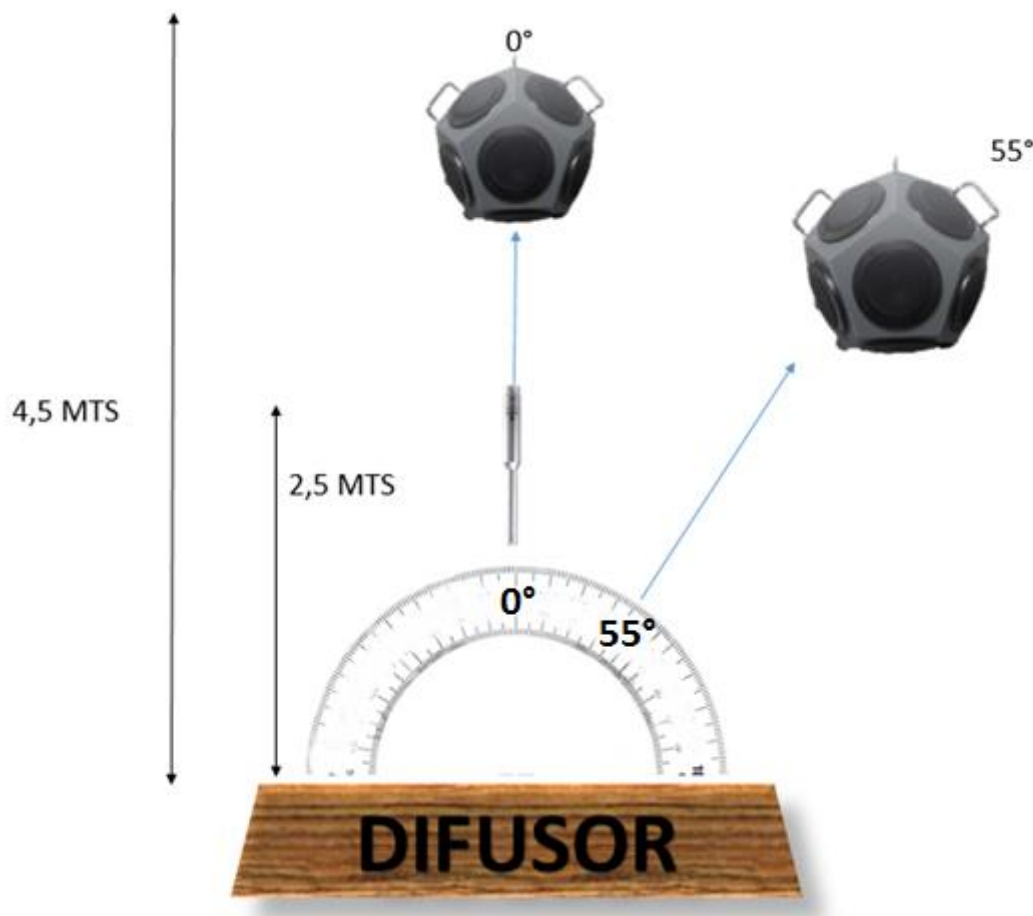
### Superficie de medida

Estas mediciones se realizaron según la recomendación primero por la parte plana del panel y esta será nuestra referencia ya que es rígida y tiene las mismas dimensiones del panel. La segunda medida es por la parte del difusor QRD unidimensional

### Posición micrófono-fuente

Se eligió dos posiciones de fuente una a 0° y otra a 55° como se muestra en la figura 38

Figura 38. Posiciones de fuente y micrófono mediciones difusor

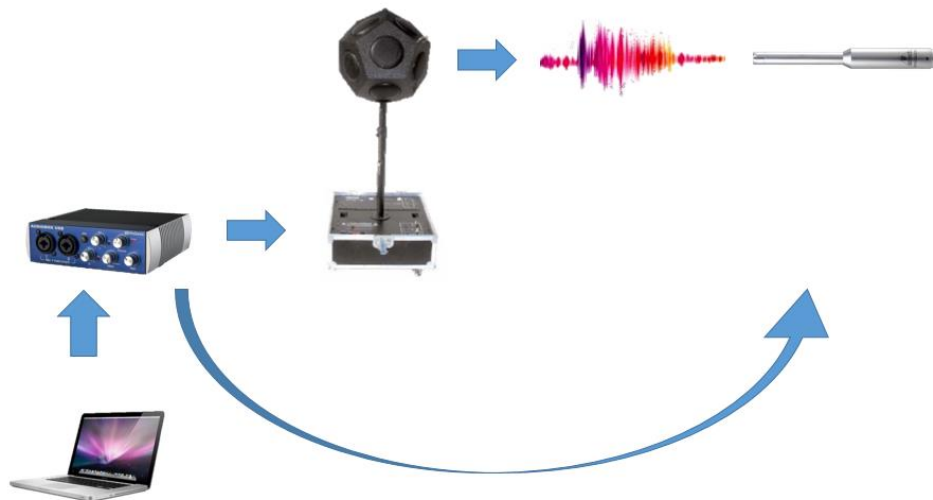


## PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

- a) Se realizó el montaje y conexión de cada uno de los equipos de medición para poder obtener los impulsos mediante el método de respuesta al impulso integrada, esta se llevó a cabo mediante un barrido de frecuencias que va desde los 100 Hz a 10 kHz con una duración de 10

La figura 39 muestra el flujo de conexión de los equipos de medición

*Figura 39. Esquema de conexión - fuente y micrófono mediciones difusor*



- b) el nivel de presión sonora equivalente ( $L_{Leq}$ ) fue medido sin una ponderación por 10 minutos, para determinar el ruido de fondo el cual fue de 54 dB, por esta razón las calibraciones del sistema se ajustaron aproximadamente a 40 dB por encima de este nivel de ruido.
- c) a cada una de las mediciones se realizó el proceso de convolución para obtener la respuesta al impulso integrada de las mediciones.
- d) de los impulsos capturados, se tomó el reflejado para el análisis, a este impulsos se le aplicó la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener los valores de los distintos niveles de presión sonora por tercios de octava
- e) se guardan los valores por octava de la FFT y se grafican

Las figuras 40 y 41 muestran la configuración fuente prototipo en el momento de medición

*Figura 40. Medición superficie referencia del panel difusor a 0°*



*Figura 41. Medición superficie difusora del panel difusor a 0°*



#### **4.1.2.2 Difusión Del Panel**

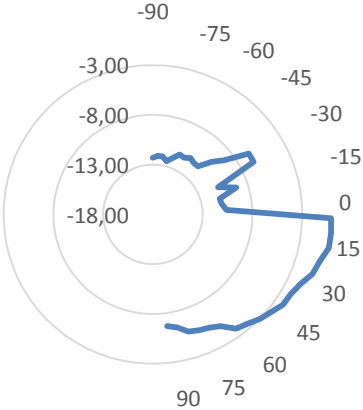
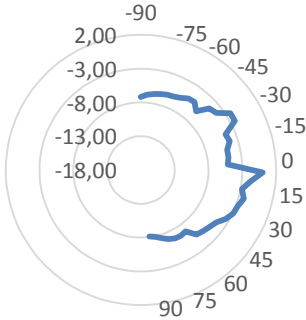
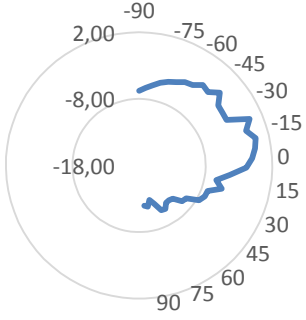
#### **5.2.1 Respuesta Polar**

Los nivel de presión sonora creados por la energía disipada desde la superficie como una función del ángulo respecto a la referencia normal se grafican como diagramas polares, estos se obtiene por medio de una resta de los niveles de presión sonora en cada posición y el nivel máximo encontrado en todas las posiciones, este procedimiento se debe hacer para cada banda

A continuación los diagramas polares por octavas de la difusión en incidencia normal (fuente a 0°)

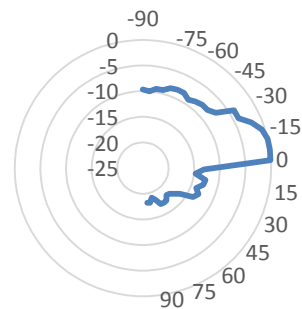


Figura 42. Diagramas polares fuente a 0 grados por bandas de octavas

<ul style="list-style-type: none"> <li>para esta frecuencia de 125 con incidencia normal se puede notar un fenómeno no propio de un difusor y es una difusión selectiva</li> </ul>	<p><b>125 Hz a 0° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>al incrementar la frecuencia en 250 Hz se nota una buena dispersión de la energía sonora pero un decaimiento en la intensidad sonora</li> </ul>	<p><b>250 Hz a 0° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>en la frecuencia de 500 Hz se puede observar la manera en que la reflexión tiende a angostar su ángulo de efectividad, cerrando un poco los laterales</li> </ul>	<p><b>500 Hz a 0° (dB)</b></p> 

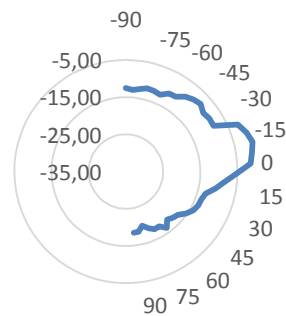
- para esta frecuencia de 1000 Hz se puede identificar una cierre muy marcado en el rango de difusión casi una reflexión especular

**1000 Hz a 0°  
(dB)**



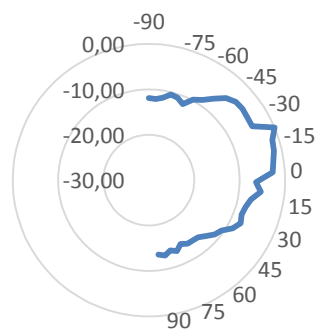
- para la frecuencia de 2000 Hz se puede observar que se amplía nuevamente el campo de difusión en los laterales, esto evidencia que el difusor funciona para la frecuencia mínima para la cual se diseño

**2000 Hz a 0°  
(dB)**



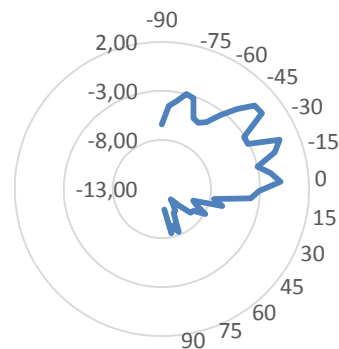
- en 4000 Hz la difusión se hace más presente, rompiendo la tendencia a reflexión especular como se puede observar desde la frecuencias de 125 Hz, 250 Hz, y 100 Hz esto significa que el difusor es óptimo para el rango de frecuencias para el cual se diseñó.

**4000 Hz a 0°  
(dB)**



- se empieza a cerrar nuevamente el campo de difusión, aunque aparecen lóbulos pronunciados de dirección de difusión

### 8000 Hz a 0° (dB)

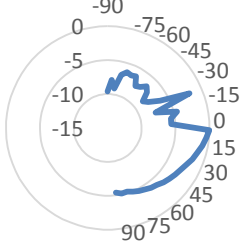
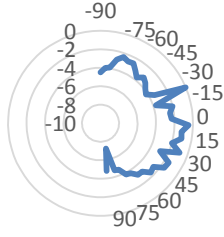
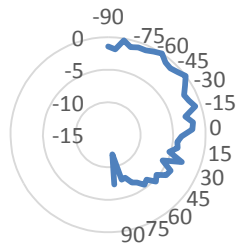
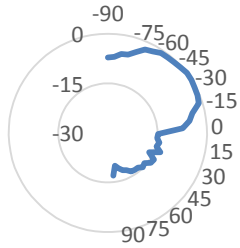


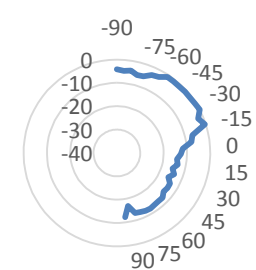
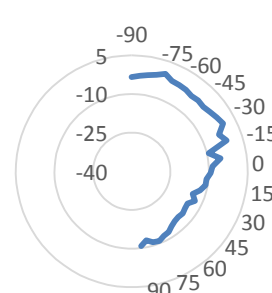
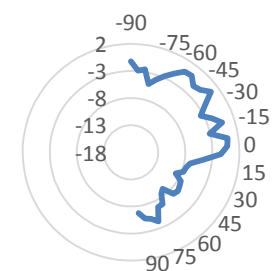
De las gráficas anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

- en las bandas de frecuencias bajas medias tales como las de 250Hz y 500 Hz se presenta buena uniformidad aunque en la de 125Hz existe poca uniformidad.
- Para las el rango de frecuencias para las que fue diseñado 2000Hz a 4000Hz se nota una mayor difusión.
- La banda con mejor uniformidad en todo el rango de frecuencias medido es la banda de 4000 Hz, evidenciable por la diferencia mínima existente entre los valores de un punto y otro.
- la frecuencia de 1000 Hz tiene tendencia a crear una reflexiones especulares.

A continuación los diagramas polares por octavas de la difusión en incidencia normal (fuente a 55°)

Figura 43. Diagramas polares fuente a 55 grados por bandas de octavas

<ul style="list-style-type: none"> <li>para esta frecuencia de 125 con incidencia normal se puede notar un fenómeno no propio de un difusor y es una difusión selectiva, de igual modo que en la gráfica de incidencia normal</li> </ul>	<p><b>125 Hz a 55° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>se puede notar una reflexión un poco difusa y con tendencia a especular</li> </ul>	<p><b>250 Hz a 55° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>se puede observar para esta frecuencia de 500 Hz que la reflexión especular se hace más pronunciada.</li> </ul>	<p><b>500 Hz a 55° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>al igual que la reflexión en ángulo normal para la frecuencia de 1000 Hz existe una reflexión especular más notable y disminuye la difusión con respecto a la dirección incidente</li> </ul>	<p><b>1000 Hz a 55° (dB)</b></p> 

<ul style="list-style-type: none"> <li>• en 2000Hz se puede notar una ampliación y dispersión más homogénea en especial hacia la dirección de la fuente</li> </ul>	<p><b>2000 Hz a 55° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>• para la frecuencia de 4000Hz se puede distinguir un campo de difusión más homogéneo lo cual nos confirma la efectividad del difusor para las frecuencias diseñadas</li> </ul>	<p><b>4000 Hz a 55° (dB)</b></p> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>• se empieza a cerrar nuevamente el campo de difusión, aunque aparecen lóbulos pronunciados de dirección de difusión</li> </ul>	<p><b>8000 Hz a 55° (dB)</b></p> 

De las gráficas anteriores se desprenden las siguientes observaciones:

- Para las el rango de frecuencias para las que fue diseñado 2000Hz a 4000Hz se nota una mayor difusión.
- Para la frecuencia de 1000Hz se puede notar un poco de reflexión especular.
- La banda con mejor uniformidad en todo el rango de frecuencias medido es la banda de 4000 Hz, evidenciable por la diferencia mínima existente entre los valores de un punto y otro.
- la banda de frecuencias bajas de 125Hz muestra muy poca reflexión especular y una difusión en el mismo ángulo de incidencia

### 4.1.2.3 Coeficiente de difusión direccional ( $d_\theta$ )

La información que proporciona este coeficiente refleja la uniformidad en la difusión producida por la superficie para una posición específica y está limitada en un rango de 0 a 1. Donde 1 se cataloga como una difusión completa del sonido, 0 cuando la difusión está concentrada en una localización. El sub índice  $\theta$  indica el ángulo de incidencia relativo a la referencia normal de la superficie.

El cálculo del coeficiente se realizó en cada banda de octava, a partir de los niveles de presión sonora  $L_i$  en decibeles, la ecuación empleada fue:

*Ecuación 18. Coeficiente de difusión direccional ( $d_\theta$ )*

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

Fuente: Recomendación AES 4id-2001.

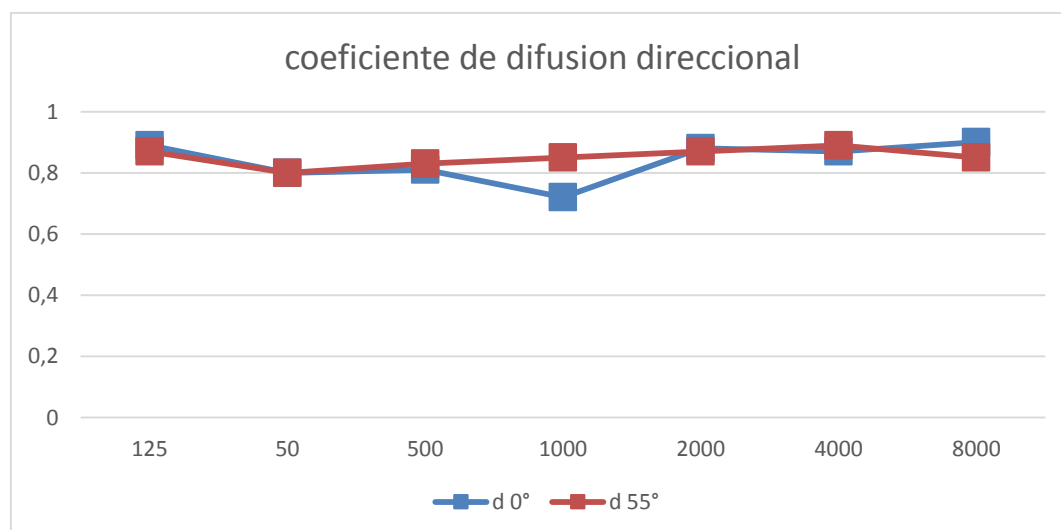
La siguiente tabla muestra los coeficientes de difusión direccional para una incidencia normal de  $0^\circ$  y un incidencia de  $55^\circ$

*Tabla 8. Coeficientes de difusión direccional del panel difusor.*

FRECUANCIA (HZ) / $\theta$	D $0^\circ$	D $55^\circ$
<b>125</b>	0.89	0.87
<b>250</b>	0.8	0.8
<b>500</b>	0.81	0.83
<b>1000</b>	0.72	0.85
<b>2000</b>	0.88	0.87
<b>4000</b>	0.87	0.89
<b>8000</b>	0.90	0.85

La siguiente gráfica relaciona la tabla anterior

*Figura 44. Coeficientes de difusión direccional del panel difusor.*



La curva de incidencia a  $0^\circ$  y a  $55^\circ$  son muy similares en todo el rango de frecuencia con excepción de las bandas de 1000 Hz, en donde la incidencia de  $55^\circ$  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.

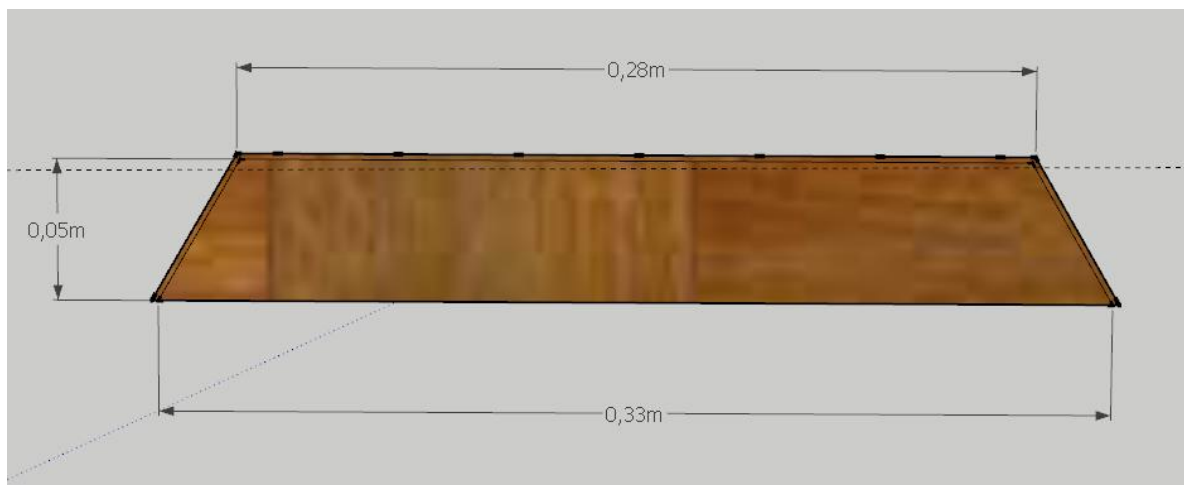
- Para ambas incidencias, el rango de frecuencias entre 2000Hz y 4000Hz (rango que abarca una octava) el coeficiente de difusión es bastante elevado, con valores entre 0,8 y 1 (valor máximo de difusión).
- Las bandas de frecuencia entre 2000 y 8000 Hz (rango que abarca dos octavas), presentan altos coeficientes de difusión. Todos los valores por encima de 0,8.

#### 4.1.3 Diseño Y Construcción De La Cara Absorbente Del Panel.

Para construir la cara absorbente, fue necesario construir un soporte en el cual descansara el material absorbente, en este caso el black theater, Ya que por lo general estos materiales tienden a ser un poco blandos y si son porosos, a desintegrarse con el paso del tiempo. El black theater es un compactado de Fibra de vidrio con un acabado para exteriores de una membrana lisa que impide el paso de fibra al exterior. La figura 45 muestra el esquema del soporte o cajón donde se incrusta el material absorbente

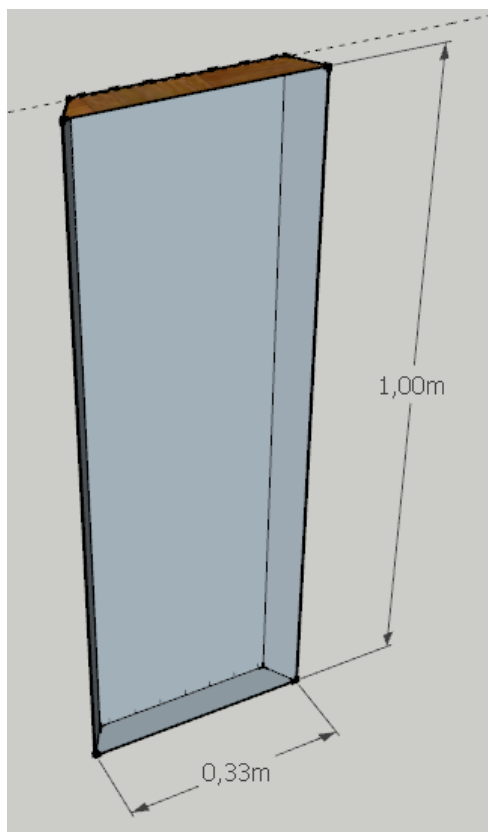
*Figura 45. Dimensiones de los módulos que contendrán el material absorbente*

a)





b)



El black teather de la empresa Fiber Glass de 2 pulgadas coincide con la profundidad del módulo, por lo tanto se corta de tal manera que llene el espacio del módulo. Este material viene referenciado por la empresa con una ficha técnica en la cual se hace referencia de los coeficientes de absorción por banda y otros parámetros acústicos.

A continuación la tabla de coeficientes de absorción por banda proporcionada por la empresa en este caso para una lámina de 2 pulgadas la que se utilizó en el panel

*Tabla 9 coeficientes de absorción del Black teather suministrados por Fiberglass*

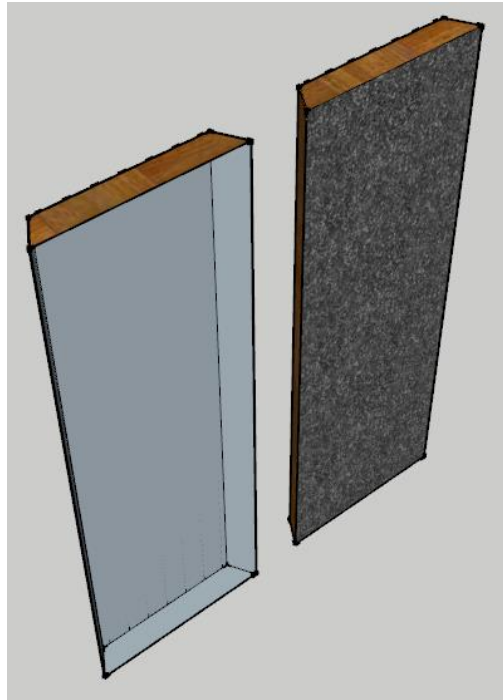
Ancho	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
2"	.18	.71	1.12	1.12	1.03	1.02	1.00

**Nota:** con referencia a los coeficientes de absorción superiores a 1, Antoni Carrión Isbert en su libro diseño acústico de espacios arquitectónicos aclara “cuando la absorción en una o más bandas de frecuencias es muy elevada, puede ocurrir que el coeficiente de absorción medido  $\alpha_{SAB}$  sea superior a 1. Ello no debe conducir a la interpretación totalmente errónea y carente de sentido desde un punto de vista físico de que la energía absorbida en dichas bandas es mayor que la energía incidente. La justificación proviene de la existencia de un efecto de difracción que hace que la superficie límite del recinto, así como su dependencia en función de la frecuencia, varían considerablemente de un material a otro. En consecuencia, La correcta elección de los mismos permitirá

*obtener, en cada caso, la absorción más adecuada en todas las bandas de frecuencias de interés.” (Carrion, 1998)*

Las figuras 46 y 47 muestran cómo se coloca el material absorbente en la estructura o cajón de soporte

*Figura 46. Módulo solo y modulo con membrana de black teather*



*Figura 47. Panel construido implementado en los tres trifusores*



### Predicción de la medición de absorción

Esta se realizó por medio del software de predicción EASE y su objetivo es analizar el posible comportamiento del dispositivo dentro del recinto de medición en el momento in situ. Principalmente se realizó un levantamiento del recinto en este caso el 308 del bloque D.S de la universidad de San Buenaventura y se le asignaron los mismos materiales de los cuales está construido con sus respectivos coeficientes de absorción, los cuales están especificados en la tabla 10.

El software entregó los siguientes datos

<b>Configuración / Frecuencia (Hz)</b>	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Rt Con Panel Abs. (S)</b>	1.06	1.10	1.20	1.37	1.32	0.67
<b>Rt Sala Vacía (S)</b>	1.18	1.23	1.35	1.49	1.46	0.71

Esto nos demuestra que la implementación en el recinto de un solo prototipo de panel puede llegar a tener una disminución en promedio de 0.2 s por banda de octava.

## Medición De Absorción

**ISO 354-** (Norma completa anexo A del marco jurídico)

En este procedimiento se caracteriza y se mide el recinto donde se implementara el prototipo de panel para poder obtener una referencia inicial, y de esta manera analizar los cambios en el comportamiento acústico generado por el prototipo de panel, el cual se caracterizara y medirá por este procedimiento del desarrollo ingenieril dando cumplimiento a los objetivos específicos propuestos.

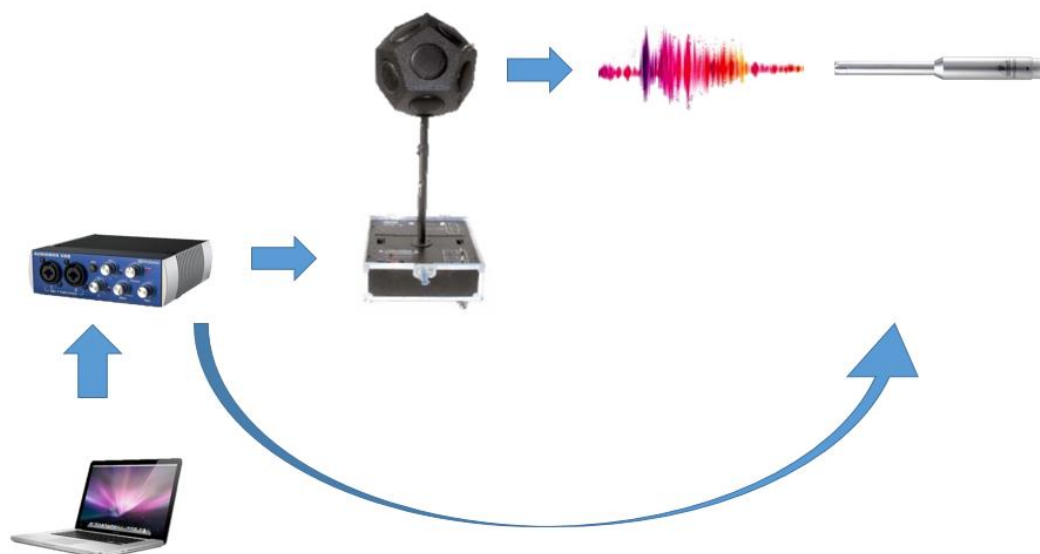
Esta norma establece que la medición se hace en un recinto con un volumen no mayor a 200 m<sup>3</sup> y con materiales que generen reflexión para de esta manera obtener altos tiempo de reverberación en el interior de la sala. En Colombia no existen salas reverberantes con altos índices de calidad en sus especificaciones de tal manera que se optó por realizarlas en un aula de la Universidad de San Buenaventura específicamente el auditorio 308 del edificio D.S

### Medición del tiempo de reverberación

A continuación se describe un paso a paso del procedimiento de medición

- I. Se estableció la ubicación de la fuente y los micrófonos
- II. Se midió el nivel de presión sonora continuo equivalente sin ponderar durante 10 minutos, del ruido de fondo cuyo valor fue de 47 dB.
- III. Se realizó el montaje y conexión de los equipos necesarios para la medición de tiempo de reverberación. A continuación se muestra un diagrama de conexión de los equipos

La figura 48 muestra el diagrama de flujo de la señal en el software de medición



*Figura 48. Diagrama de conexión instrumentación para medición de tiempo de reverberación*

- IV. De acuerdo con la calibración del sistema en cuanto a la relación S/N se debe superar 40 dB por lo tanto la emisión de la fuente fue de 90 dB
- V. Primero se midió el tiempo de reverberación sin la muestra de acuerdo con el método de medición correspondiente al diagrama de conexión anterior con respuesta al impulso integrada
- VI. Segundo se midió el tiempo de reverberación con la muestra de acuerdo con el método de medición correspondiente al diagrama de conexión anterior con respuesta al impulso integrada

La figura 49 muestra el montaje realizado para iniciar las mediciones

*Figura 49. Mediciones de tiempo de reverberación del prototipo de panel para acústica variable*



#### **Características de la muestra:**

Según la norma ISO 354 si el objeto de muestra es muy pesado se puede ubicar en el piso o recostado en una superficie límite de la sala, en este caso fue necesario acudir a esta recomendación ya que el prototipo tiene un peso elevado y se ubicó muy cercano a una pared

La muestra a probar debe tener una relación entre las medidas del largo y el ancho un rango de 0.7 a 1, en este caso el panel cumple con esta especificación pues es de 1 m x 1 m

## Temperatura y humedad:

La temperatura en el momento de la medición se mantuvo entre los 15°C y 18°C, la humedad relativa entre 45% y 55%. Según los datos suministrados en <http://clima.starmedia.com/sudamerica/colombia/bogota/> Por lo tanto cumplen con lo exigido por la norma.

## Características del salón

- Volumen : 66.024 m<sup>3</sup>
- Área superficial : 101.38m<sup>2</sup>
- Dimensiones de la sala : (ancho\* largo\*alto) (3.93m\*5.60m\*3.01m)
- Materiales que lo constituyen : concreto pintado, ladrillo, vidrio, perfileria metálica, madera enchapada

Coeficientes de absorción por bandas de octava para cada uno de los materiales nombrados

*Tabla 10. Coeficientes de absorción por bandas de octava para cada uno de los materiales nombrados*

<b>MATERIAL/FRECUENCIA</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
CONCRETO PINTADO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
LADRILLO PINTADO	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
VIDRIO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.07	0.04
PERFILERIA METALICA	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
MADERA ENCHAPADA	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07

Referencia:

Miyara, Federico “**Acústica y Sistemas de Sonido**”. Universidad Nacional de Rosario.2003. Página 47

Según la norma la sala debe cumplir con un área de absorción necesaria y estos valores están basados en una sala con un volumen de 200 m<sup>3</sup>. A continuación se encuentra la lista que contiene los valores del área de absorción equivalente para una sala ideal según la norma.

*Tabla 11. Valores del área de absorción equivalente para una sala ideal según la norma*

Área de absorción equivalente	frecuencia
6.5	100
6.5	125
6.5	160
6.5	200
6.5	250
6.5	315
6.5	400

Área de absorción equivalente	frecuencia
6.5	500
6.5	630
6.5	800
7.0	1000
7.5	1250
8.0	1600
9.5	2000

Área de absorción equivalente	frecuencia
10.5	2500
12.0	3150
13.0	4000
14.0	5000

De acuerdo con la ISO 354 los valores ideales se tienen que ajustar, para salas donde el volumen no es de 200 m<sup>3</sup>. Esta corrección se realiza multiplicando los valores mostrados en la tabla anterior por el siguiente factor  $(V/200)^{2/3}$ . Donde V sería el nuevo volumen de la sala.

Como la sala donde se realizó la medida tiene un volumen de 66.024 m<sup>3</sup> la nueva lista ajustada por bandas de octava utilizadas será la siguiente.

Tabla 12. Valores del área de absorción equivalente ajustados para una sala de un volumen diferente al indicado por la norma

#### ÁREA DE ABSORCIÓN EQUIVALENTE SALA IDEAL

Sala / Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Sala Ideal (m <sup>2</sup> )	3.1	3.1	3.1	3.3	4.5	6.2

#### Área De Absorción Equivalente

Para realizar los cálculos del área de absorción equivalente es necesario tomar valores que representen la absorción del recinto (vacío) donde se va a medir el espécimen, seguido por la toma de valores de la absorción del recinto con el prototipo o espécimen dentro de este. Y de esta manera por medio de comparación de tiempos en este caso, poder adquirir los coeficientes de absorción de la muestra

Recordando que **A1** (área de absorción equivalente sala vacía) y **A2** (área de absorción equivalente sala con el panel)

Tabla 13. RT sala vacía y con el prototipo en cara absorbente

#### RT SALA VACÍA Y CON EL PROTOTIPO EN CARA ABSORBENTE

Configuración / Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Rt Con Panel Abs. (S)	1.15	1.18	1.25	1.15	1.35	1.15
Rt Sala Vacía (S)	1.85	1.34	1.5	1.21	1.51	1.23

Obteniendo los valores del tiempo de reverberación con la sala vacía y con el panel en la sala, hallamos el área de absorción con ayuda de la ecuación

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

donde:

A= área de absorción equivalente

V= volumen de la sala

c= velocidad de propagación del sonido

T= tiempo de reverberación en segundos

m= coeficiente de atenuación y depende las condiciones climáticas en el momento de la medición o mediciones

y puede ser calculado por la siguiente ecuación

*Ecuación 19. Coeficiente de atenuación*

$$m = \frac{\alpha}{10 \log e}$$

Donde

c= (331 + 0.6 t /°C) m / s

Estos valores quedarán

*Tabla 14 Área de absorción equivalente de la sala vacía y con el prototipo cara absorbente*

<b>ÁREA DE ABSORCIÓN EQUIVALENTE</b>							
<b>Condición / Frecuencia (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
<b>A1 Recinto Vacío (M²)</b>	5.80	8.01	7.15	8.87	7.11	8.73	13
<b>A2 Con La Muestra(ABS) (M²)</b>	9.33	9.1	8.59	9.5	7.95	9.33	14.31

Para hallar el área total de absorción equivalente se realiza la siguiente operación A2-A1= A<sub>total</sub>, luego lo comparamos con la tabla suministrada por la norma.



Tabla 15 Tabla área de absorción total recinto vacío y con el prototipo de panel en cara absorbente

Condición / Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
At Recinto (ABS) (M²)	3.53	1.08	1.43	0.62	0.84	0.60
At Recinto (IDEAL) (M²)	3.1	3.1	3.1	3.3	4.5	6.2

Según la norma los valores del área de absorción equivalente del recinto donde se mide no debe superar los valores de la sala ideal propuesta en esta misma, como muestra la tabla anterior esto se cumple en gran medida con esta condición con una excepción en la frecuencia de 125 Hz.

Finalmente se halla el coeficiente de absorción de la muestra por medio de la siguiente ecuación.

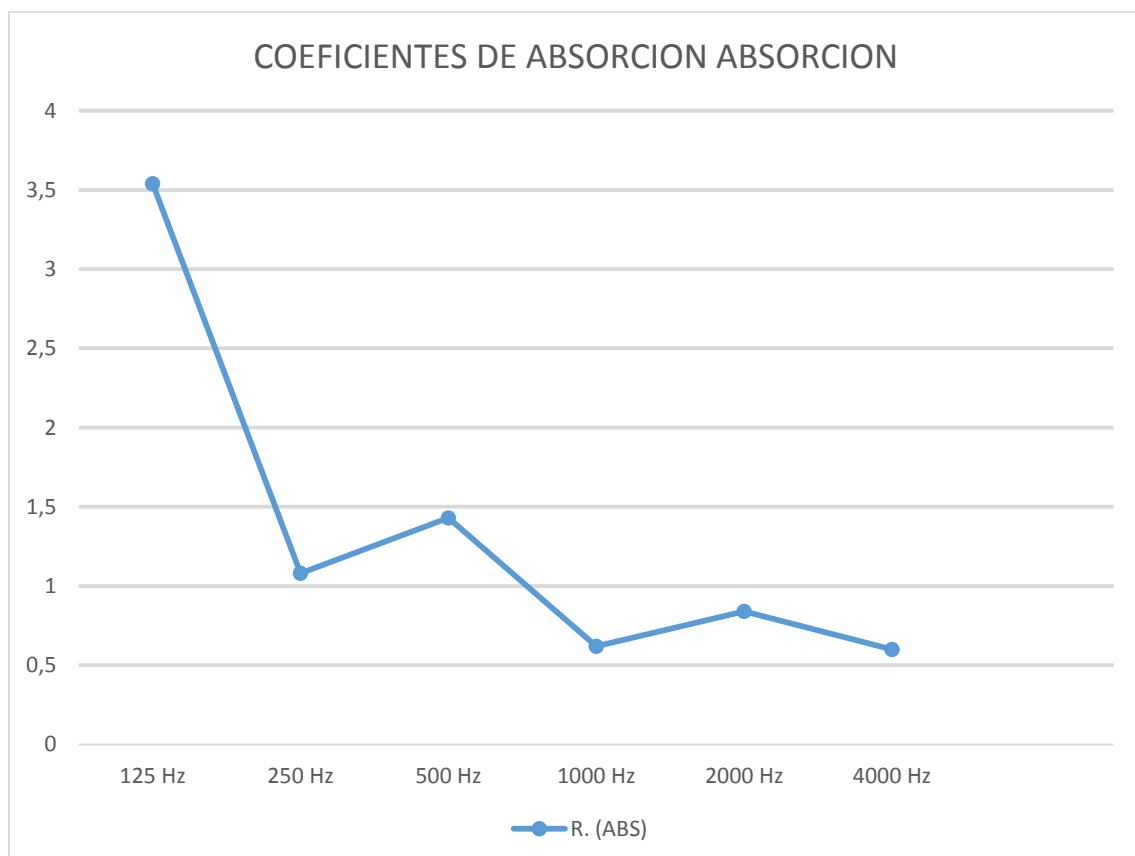
Ecuación 20. Coeficiente de absorción

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

Tabla 16. Coeficiente de absorción de la muestra, panel cara absorbente

Condición / frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
$\alpha$ muestra(ABS)	3.54	1.08	1.43	0.62	0.84	0.60

Figura 50. Coeficiente de absorción de la muestra, panel cara absorbente



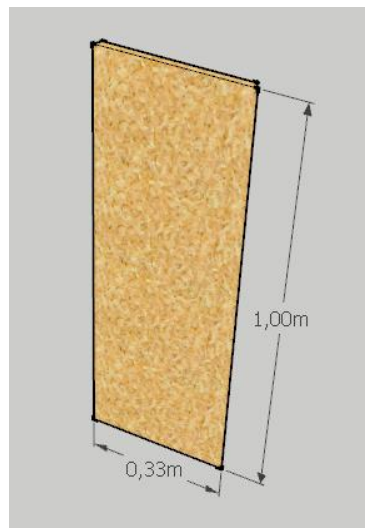
Con respecto a estos valores como se explicó, el cálculo de tiempo de reverberación por medio de Sabin puede dar valores elevados a 1 esto es por un fenómeno de difracción mencionado anteriormente. Según la norma ISO 354, por debajo de los 100 Hz es difícil obtener mediciones de tiempo de reverberación exactas, debido a la densidad modal en bajas frecuencias del tiempo de reverberación. Además las bajas frecuencias, una sala pequeña presenta una distribución de la energía desigual y la dirección de propagación del sonido está lejos de ser aleatoria.

Comparando la simulación previa realizada se puede valorar como optimo la implementación del panel dentro del recinto, ya que la medición in situ supero con un promedio de 0.36 s la atenuación calculada por software la cual fue un promedio por banda de 0.2 s.

#### **4.1.4 Diseño Y Construcción De La Cara Reflectora Del Panel.**

Para la construcción de la cara reflejante del panel se utilizó una lámina de madera con un enchape liso para generar una máxima reflexión sobre la onda de sonido incidente, para esta cara no se necesitó un módulo como lo necesitaron el difusor y el absorbente. Solo se tuvo en cuenta que los ángulos en los bordes fueran de 30 grados y de esta manera la lámina encajará con los demás paneles. La figura 51 muestra un esquema de la construcción de este panel con sus respectivas dimensiones.

*Figura 51. Esquema panel reflejante vista isométrica y dimensiones*



*Figura 52. Dimensiones panel reflejante corte horizontal*

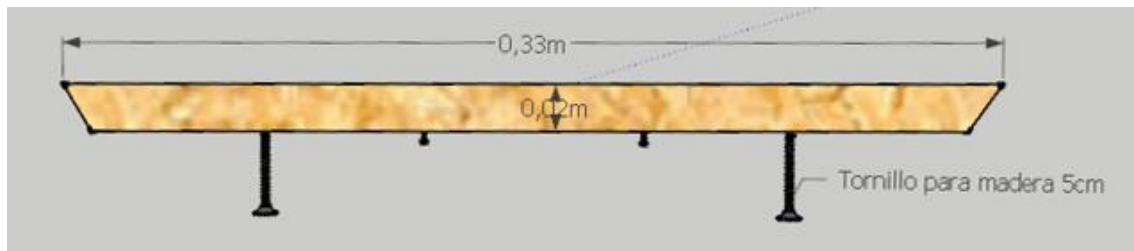


Figura 53. Montaje de la cara reflejante en los tres trifusores



Para la construcción de este panel se escogió una lámina de madera aglomerada con enchape liso para una mejor reflexión, también es un material económico y de fácil adquisición ya que es un material común de acabados. Los coeficientes de absorción por bandas de octava para la madera enchapada son

Tabla 17. Coeficientes de absorción por bandas de octava para la madera enchapada

<b>Material/Frecuencia</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>Madera Enchapada</b>	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07

Referencia:

Miyara, Federico “**Acústica y Sistemas de Sonido**”. Universidad Nacional de Rosario.2003. Página 47.

## Predicción de la medición de reflexión

Al igual que en la predicción del comportamiento acústico de la cara absorbente esta simulación tiene como objetivo analizar el posible comportamiento del dispositivo dentro del recinto de medición en el momento in situ. Principalmente se realizó un levantamiento del recinto en este caso el 308 del bloque D.S de la universidad de San Buenaventura y se le asignaron los mismos materiales de los cuales está construido con sus respectivos coeficientes de absorción, los cuales están especificados en la tabla 10.

El software entrego los siguientes datos

<b>Configuración / Frecuencia (Hz)</b>	125	250	500	1000	2000	4000
<b>Rt Con Panel Réflex. (S)</b>	1.16	1.20	1.23	1.31	1.30	0.71
<b>Rt Sala Vacía (S)</b>	1.18	1.23	1.35	1.49	1.46	0.71

Esto nos demuestra que la implementación en el recinto de un solo prototipo de panel puede llegar a tener una disminución en promedio de 0.17 s por banda de octava.

## Medición De Reflexión

El procedimiento para la medición de reflexión se realizó por medio de la **ISO 354**. - (Norma completa anexo A del marco jurídico) Los pasos de medición, conexión y cada paso de la medición están descritos en la sección: **diseño y construcción del panel absorbente** y hace parte del desarrollo y cumplimiento de los objetivos específicos propuestos para esta medición se tomó el mismo recinto que se empleó como referencia para la medición de la cara absorbente del prototipo del panel. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos mediante las mediciones aplicando la norma.

*Tabla 18 tiempos de reverberación para la cara reflejante del panel*

<b>Condición/ Frecuencia(Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
<b>Cara Reflejante (s)</b>	1.97	1.43	1.39	1.34	1.33	1.33	0.87
<b>Vacío (s)</b>	1.85	1.34	1.5	1.32	1.51	1.23	0.82

Una vez obtenidos los valores del tiempo de reverberación con y sin la muestra se despejaron los valores de absorción para encontrar el área de absorción equivalente del mismo modo como se hallaron en la cara absorbente.

Tabla 19. Área de absorción equivalente A1 (recinto vacío) y A2 (cara reflejante)

<b>Condición / Frecuencia (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>A1 Recinto Vacío</b>	5.73	7.92	7	9.47	7	8.62
<b>A2 Con La Muestra(RFLX)</b>	5.60	7.71	7.94	8.23	8.29	8.29

Para hallar el área total de absorción equivalente se realiza la siguiente operación  $A_2 - A_1 = A_{\text{total}}$ , luego se compara con la tabla suministrada por la norma.

Tabla 20. Área de absorción total recinto vacío y con la inclusión de las cara reflejantes

<b>Condición / Frecuencia (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>At Recinto (RFLX)</b>	0.13	0.20	0.85	1.2	1.2	0.33
<b>At Recinto (IDEAL)</b>	3.1	3.1	3.1	3.3	4.5	6.2

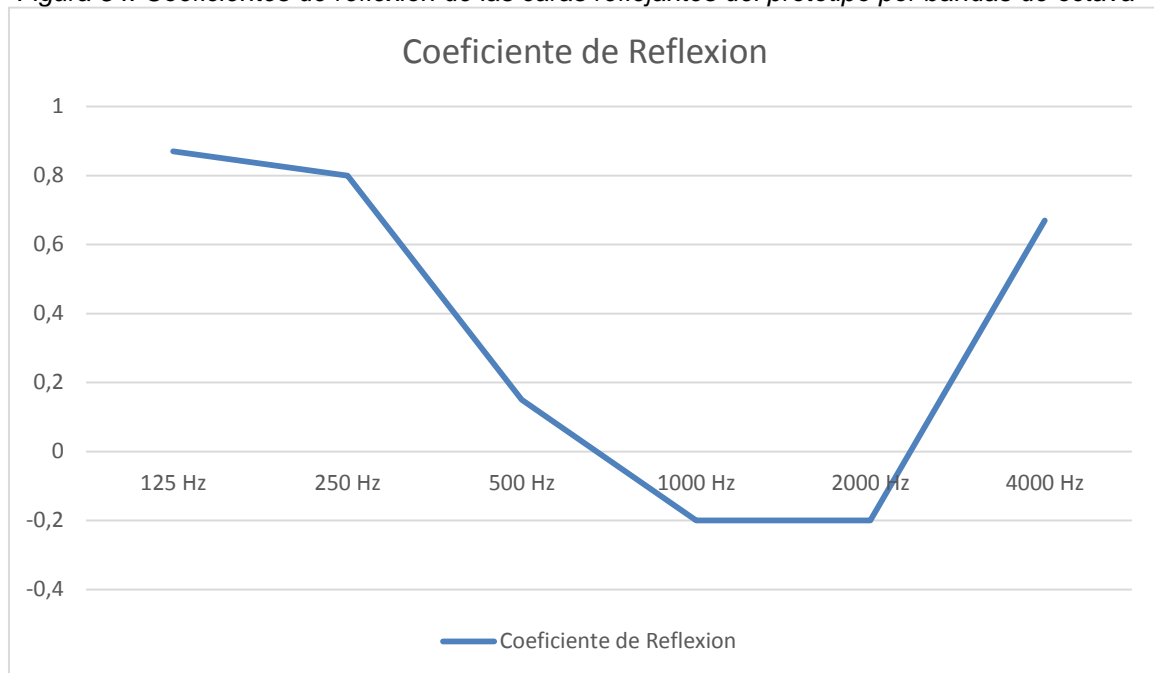
Según la norma los valores del área de absorción equivalentes del recinto donde se mide no debe superar los valores de la sala ideal propuesta en esta misma, como muestra la tabla anterior esto se cumple en gran medida con esta condición con una excepción en la frecuencia de 125 Hz. Finalmente se halla el coeficiente de absorción de la muestra por medio de la siguiente ecuación.

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

Tabla 21. Coeficiente de absorción y coeficientes de reflexión por bandas de octava de las caras reflejantes del prototipo

<b>Condición / Frecuencia (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>A Muestra(RFLX)</b>	0.13	0.20	0.85	1.2	1.2	0.33
<b>1-A Coeficiente De Reflexión</b>	0.87	0.80	0.15	-0.2	-0.2	0.67

Figura 54. Coeficientes de reflexión de las caras reflejantes del prototipo por bandas de octava



La comparación con la simulación de prediagnostico de la medición de reflexión del panel en el recinto también se considera optima como lo muestra la tabla 18 la cual los tiempos de reverberación en promedio por banda son; para la simulación 0.17 s y para la medición in situ es de 0.13 s lo que permite obtener una cercanía al material rígido original de construcción en este caso el concreto.

## Incertidumbre De Medición

Existen dificultades por los modos propios de la sala por lo general al caracterizar reverberación de salas pequeñas. Se han realizado estudios donde por medio de mediciones se ha podido demostrar que las frecuencias encontradas entre los modos representan una pendiente más pronunciada es decir, menor tiempo de reverberación. Mientras que las frecuencias modales representan tiempos de decaimiento más largos.

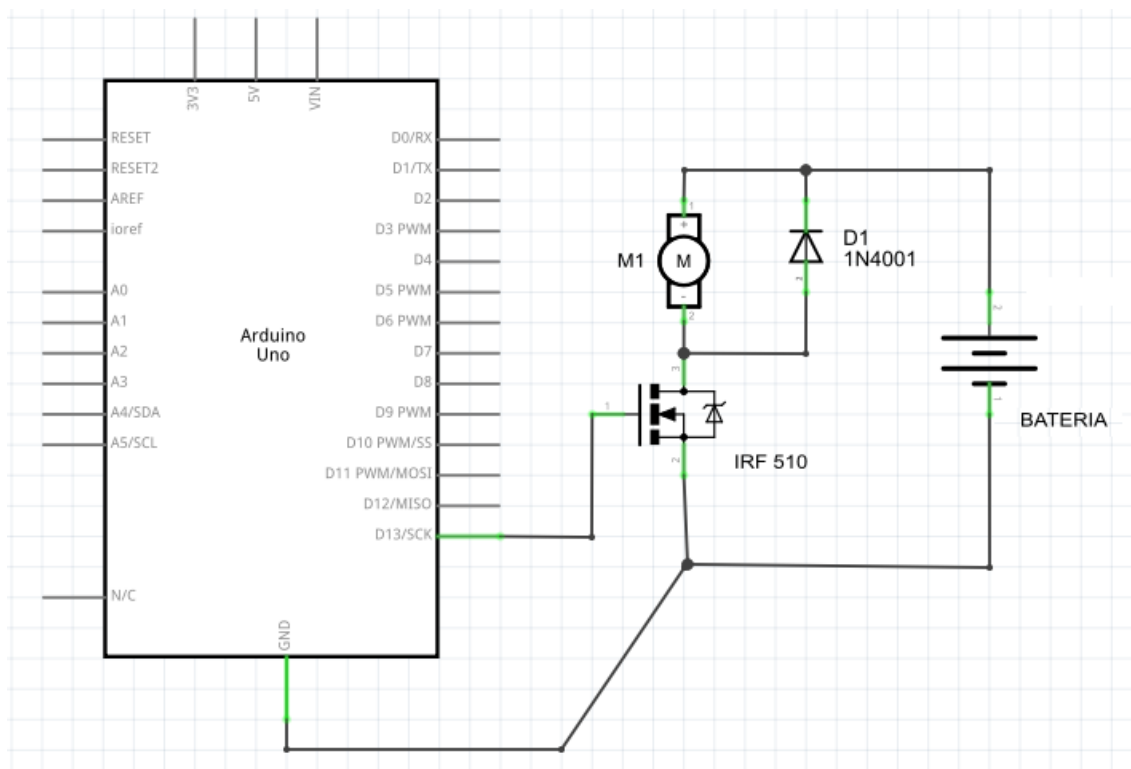
En salas pequeñas es muy difícil aplicar el concepto de tiempos de reverberación sobre todo con dimensiones comparables a las longitudes de onda, en una sala pequeña la distribución de energía en frecuencias bajas es desigual y la propagación del sonido está lejos de ser aleatoria.

Según la ISO 354, es difícil obtener mediciones de tiempos de reverberación exactas por debajo de los 100 Hz, por la densidad modal en bajas frecuencias, esta observación la norma la hace para recintos que cumplen con la recomendación de tener un volumen entre los 150 m<sup>3</sup> y los 200 m<sup>3</sup>

### 4.1.5 Diseño Etapa De Potencia

Los paneles cambian a partir de un control de rotación que es comandado por un motor DC que trabaja hasta 24 Voltios; ya que la velocidad de rotación es muy alta al trabajar con 24 voltios se decidió trabajar con una alimentación de 5 Voltios así que se diseñó un circuito que activado por un comando en Arduino para que le entregue la alimentación necesaria al motor y de esta manera trabaje eficientemente. La figura 55 ilustra la conexión Arduino - motor

Figura 55. Esquema de conexión sistema electrónico Arduino- motor

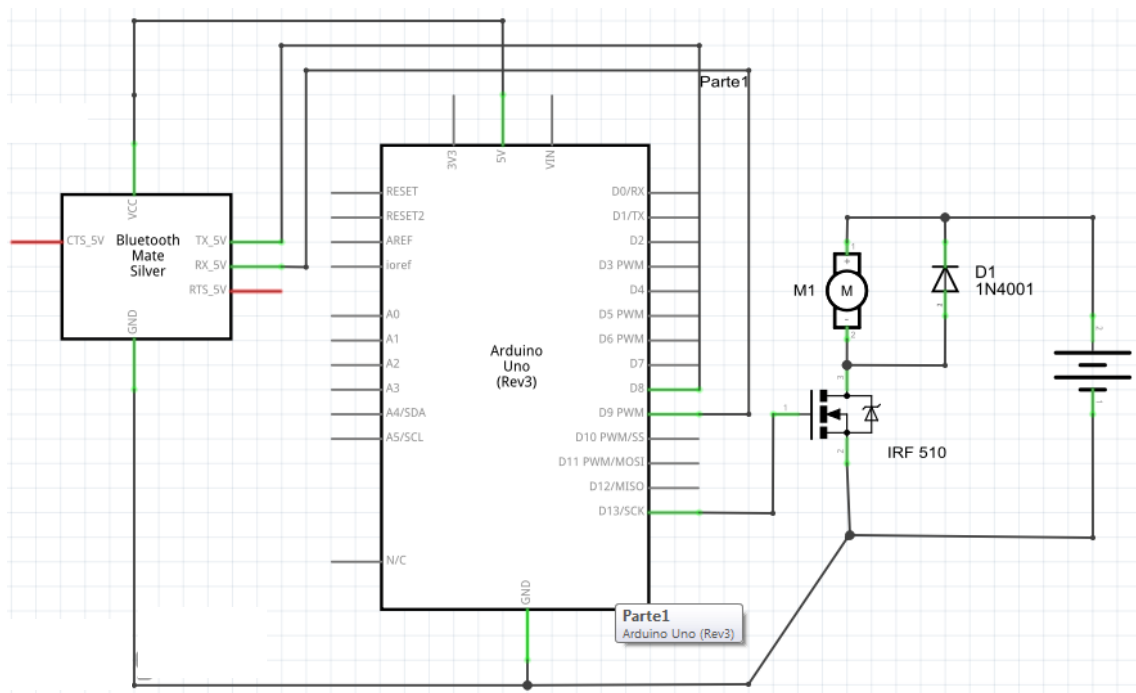


Por medio de la programación del controlador se ejecuta la orden de generar 5 voltios al Pin Digital 13 de Arduino lo que activa el circuito y da paso a la corriente de la batería para que supla las necesidades del Motor DC.

#### 4.1.6 Diseño Controlador Automático

El control automático se diseñó utilizando comandos seriales enviados desde un dispositivo móvil a un módulo Bluetooth que lee los comandos y los transfiere a Arduino para que sean utilizados a disposición, en este caso para que el motor se encienda y se apague a gusto del usuario. La figura 56 ilustra la conexión Arduino – motor - modulo bluetooth

*Figura 56. Esquema de conexión sistema electrónico Arduino- motor- modulo bluetooth*



Por este medio se programó en el compilador de Arduino los comandos necesarios para que por medio de un Bluetooth terminal en un Dispositivo móvil se controlarán las órdenes para el motor. La figura 57 muestra las líneas del código de programación de Arduino



Figura 57. Código de programación Arduino

```
#include <SoftwareSerial.h>
SoftwareSerial Genotronex(8, 9); // TX, RX

int BluetoothData;
int buttonState;
const int buttonPin = 2;
const int ledPin = 13;

void setup() {

    Genotronex.begin(9600);
    |
    BluetoothData=Genotronex.read();
    Genotronex.println(BluetoothData);

    pinMode(ledPin, OUTPUT);
    pinMode(buttonPin, INPUT);
}

void loop(){
    buttonState = digitalRead(buttonPin);
    BluetoothData=Genotronex.read();

    if (BluetoothData=='0') {
        digitalWrite(ledPin, HIGH);
    }
    if (BluetoothData=='1') {
        digitalWrite(ledPin, LOW);
    }
}
```

Las líneas del programa que pertenecen al void setup son la programación para la activación de las entradas y salidas del Arduino mientras que las líneas de programación del void loop son las encargadas de enviar las órdenes de activación y desactivación del dispositivo al motor.

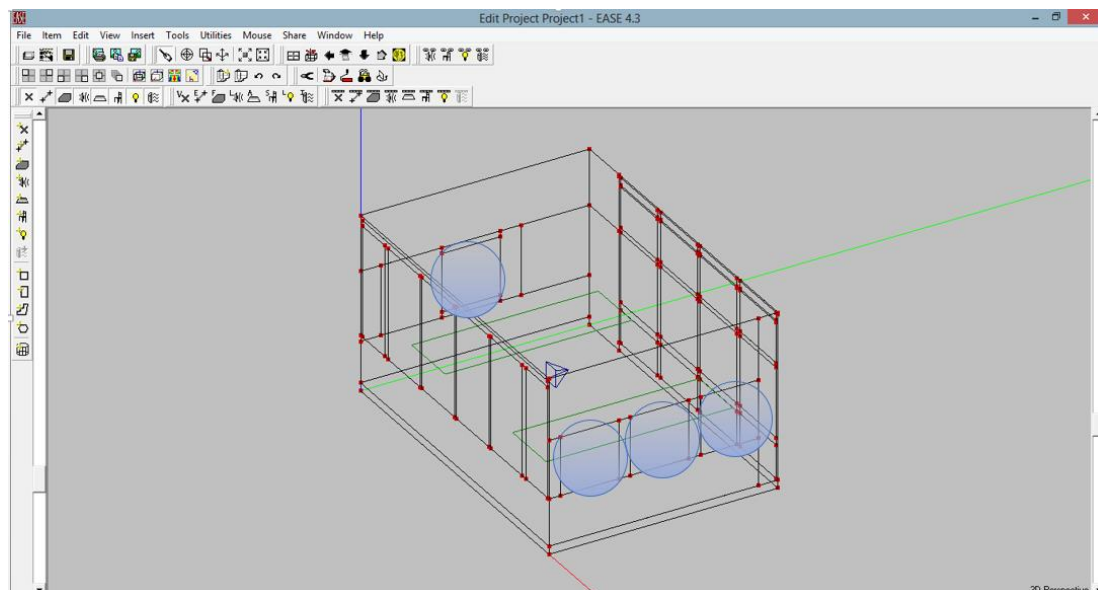
El control se hace mediante cualquier dispositivo móvil con una aplicación que funcione como terminal de control bluetooth que envía datos seriales.

#### 4.1.7 Simulación Y Comparación

Una vez obtenidos los valores del comportamiento en las caras del trifusor se procede a realizar una simulación, al implementar más de un prototipo de panel trifusor. El proceso de simulación se realizó mediante el software de simulación y predicción EASE a la Universidad de San Buenaventura. Esta simulación busca recrear un recinto con características similares en dimensiones y materiales al utilizado para las mediciones de absorción y reflexión, pero con la implementación no de uno, sino de 4 prototipos de paneles trifusores. Lo que se busca predecir con esta simulación es el cambio en el tiempo de reverberación de la sala.

La figura 58 muestra el levantamiento del recinto en software EASE

*Figura 58. Levantamiento del recinto en software EASE*



Los círculos azules resaltan las áreas donde estaría asignados los paneles. Estas áreas se analizan con los diferentes materiales propuestos para cada una de las caras del panel y sus respectivos coeficientes de absorción. A continuación se mostrarán las tablas de RT para el recinto vacío (concreto), absorción (black teather) y reflexión (madera aglomerada con enchape)

#### 4.4.3.1 análisis recinto vacío

En este caso las áreas destinadas para los paneles (señaladas en el punto anterior) estarán configuradas con el material, “concreto”. Para el análisis se utilizó los RT por octavas de banda mostrados en la tabla 22

*Tabla 22 RT del recinto vacío simulación*

##### **RT recinto vacío en segundo**

<b>125 Hz</b>	<b>250 Hz</b>	<b>500 Hz</b>	<b>1000 Hz</b>	<b>2000 Hz</b>	<b>4000 Hz</b>	<b>8000 Hz</b>
1.35	1.34	1.45	1.55	1.47	1.08	0.68

#### 4.4.3.2 análisis del recinto con áreas de absorción y reflexión

En este caso las áreas destinadas para los paneles (señaladas en el punto anterior) estarán configuradas con el material, “black teather” y madera aglomerada enchapada En este caso como el software no incluye estos materiales, se crean ingresando los coeficientes de absorción encontrados en la medición de absorción y reflexión realizada anteriormente. La tabla 23 muestra los RT de cada material para poder compararlos.

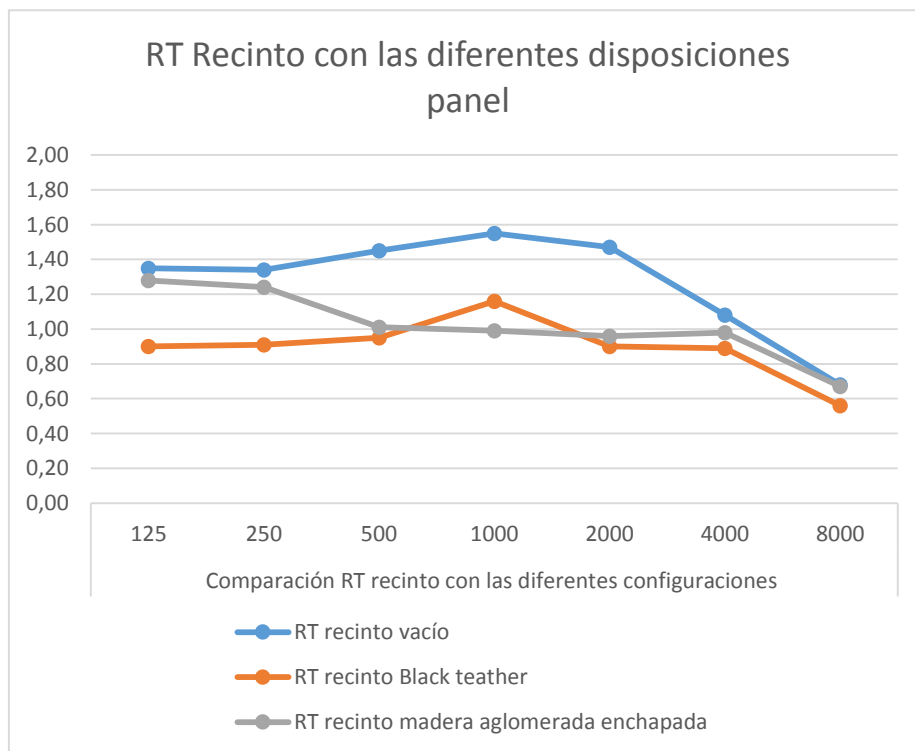
Tabla 23. RT del recinto vacío, con la cara absorbente y reflectora del prototipo

**Comparación RT recinto con las diferentes configuraciones**

<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>8000</b>
<b>RT recinto vacío (s)</b>	1.35	1.34	1.45	1.55	1.47	1.08	0.68
<b>RT recinto Black teather (s)</b>	0.90	0.91	0.95	1.16	0.90	0.89	0.56
<b>RT recinto madera aglomerada enchapada (s)</b>	1.28	1.24	1.01	0.99	0.96	0.98	0.67

La figura 59 es tomada de la tabla anterior y muestra la efectividad de las diferentes configuraciones.

Figura 59. RT Recinto con las diferentes disposiciones panel, simulación



Cada una de estas pruebas, mediciones y simulaciones, son el soporte para afirmar que el prototipo del panel de acústica variable rotatorio 360° con control automático, es un proyecto viable con la capacidad suficiente de satisfacer todos los objetivos y necesidades, por las cuales fue desarrollado. Es importante destacar las variaciones de los tiempos de reverberación al momento de implementar el prototipo de panel y cada una de sus configuraciones,

especialmente en el rango de frecuencias comprendido entre 500Hz y 1000 Hz esto le da una versatilidad enriquecedora al timbre y color de cualquier tipo de fuente sonora que se propague en el recinto.

La eficiencia del difusor del prototipo se demostró en las mediciones realizadas bajo la recomendación AES 4id 2004, las cuales mostraron un buen compromiso con la difusión en las frecuencias a las cuales se diseñó es decir a 2000 Hz y 4000Hz. Las mediciones del difusor se enfocaron en analizar su difusión en campo cercano es decir a aproximadamente 2.5 metros de cobertura semiesférica por lo tanto se puede afirmar que habrá una correcta difusión en el rango de frecuencias diseñado siempre y cuando el receptor esté dentro de esta distancia

Cada una de las mediciones reales y simulaciones hechas al prototipo del panel demuestra que es una solución efectiva para generar diferentes comportamientos acústicos a un mismo recinto y de esta manera llevarlo a la clasificación de recinto de acústica variable multipropósito esto lo podemos comprobar con las siguientes afirmaciones tomadas de analizar los resultados obtenidos

- Los tiempos de reverberación en la configuración de reflexión son muy cercanos a los que se podrían tener, con un material tan reflejante como el concreto
- se puede observar la versatilidad del arreglo trifusor al poder tener en un mismo recinto dos tiempos de reverberación tan diferentes.
- Es posible obtener tiempos de reverberación que oscilen entre la gráfica del arreglo reflejante y el arreglo absorbente si alternamos o combinamos las caras de los paneles
- Hay una diferencia más notable en el control de los tiempos de reverberación al realizar el cambio de configuración de paneles entre frecuencias bajas (inferiores a 500 Hz) y frecuencias altas (superiores a 2500 Hz) lo que puede influir en la coloración de la sala

## 5. CONCLUSIONES

Como resultado de la investigación presentada, es posible concluir que existe una variable importante a la hora de seleccionar un recinto para la realización de cualquier tipo de evento donde halla propagación de sonido, esta variable es el comportamiento acústico propio del recinto y viene determinada desde su propia concepción en el diseño ya sea por la geometría de la sala, los materiales seleccionados para su construcción o su refuerzo sonoro, todos estos parámetros controlan su carácter acústico.

Por otro lado al comparar los resultados entregados en este proyecto se observa que es posible a través de la implementación de dispositivos acústicos, generar variaciones en el comportamiento acústico de la sala la cual se observa por medio de la aplicación de distintos materiales, la variación de parámetros acústicos como el tiempo de reverberación que a su vez afectan la coloración de la sala, es decir, rangos de frecuencias que dan definición, claridad e identidad pues son característicos de cualquier fuente que esté generando sonido dentro del recinto.

Sin embargo la situación de generar versatilidad acústica en un recinto no es suficiente con la implementación de dispositivos acústicos fijos. Es debido a esto que se puede concluir que uno de los principales factores que debe existir en una sala que se considere acústicamente versátil es la posibilidad de variar de manera controlada en este caso electrónicamente cada dispositivo acústico. Este trabajo presentó el desarrollo, evolución y funcionamiento de un prototipo de panel rotatorio 360° con control automático cuyo objetivo es la variación de tiempos de reverberación, objetivo que se cumplió, sustentado en mediciones y simulaciones llevadas a cabo bajo normatividades internacionales, las cuales dan un fuerte apoyo a para seguir abriendo puertas a la investigación en este campo de la acústica variable.

Por estas razones el prototipo de panel rotatorio 360° con control automático diseñado en este proyecto es una respuesta y solución sólida a las necesidades de generar versatilidad acústica, versatilidad que fue demostrada en las mediciones in situ logrando una variación del tiempo de reverberación de 0.5 segundos aproximadamente implementando solo un prototipo y una variación aproximada de 0.75 en la implementación virtual de cuatro prototipos.

El desempeño de cada cara de este panel está asociado directamente a los materiales utilizados para su implementación. En el caso de la absorción existe una amplia gama de materiales que cumplen con características como densidad, porosidad que podría tener una mejor absorción, inclusive selectiva, dependiendo de las necesidades que el proyecto donde se implementara el panel las exija. De igual manera con la cara reflejante ya que es posible hacer una selección de diferentes materiales que respondan de manera eficiente las demandas de reflexión y direccionamiento del sonido en el recinto. En el caso de la difusión es posible implementar otra gama de difusores teniendo en cuenta las dimensiones de diseño permitido, existe la posibilidad de desarrollar difusores bidimensionales o la generación de difusión por medio de irregularidad de la superficie

Ante este panorama, es correcto cuestionarse sobre cuál será la importancia de crear recinto inteligentes que se adapten a cualquier necesidad no solo acústica, también tengan la capacidad de apartarse a factores térmicos, iluminación o cualquier otro factor que influya en el mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Para una aplicación real de este prototipo es necesario cumplir con las disposiciones y recomendaciones hechas por las normatividades empleadas, de esta manera poder tener unos resultado confiables, es necesario buscar ambientes similares a los recomendados en la norma para realizar las mediciones de absorción y difusión ya que en Colombia estos recintos no se encuentran tal cual como los especifican las normas.
- Es importante tener en cuenta el peso de los materiales a emplear, pues si el panel a construir es muy grande el peso se incrementara de igual manera y se complicara el transporte y su movilidad
- Existen programas y algoritmos que facilitan el cálculo de profundidades y medidas para el difusor
- La manera más eficiente de implementar este prototipo de panel para acústica variable en un recinto es incluirlo dentro del diseño original de la estructura, en caso tal que sea de concreto o arquitectura liviana.

## BIBLIOGRAFIA

- 4id, A. (2001). *Characterization and measurement of surface scattering uniformity*.
- ALTON, E. (2009). *Master Handbook of Acoustic*. Estados Unidos: The McGraw-Hill.
- ARDUINO. (s.f.). Obtenido de <http://www.arduino.cc/>
- CARRION, A. (1998). *Diseño de espacios arquitectonicos*. Catalunya, SL: Edicions UPC.
- CETTA, D. P. (2003). *Localización espacial del sonido*. FACM - UCA.
- Fotos de Difusores acusticos QRD 2. (s.f.). Obtenido de [http://images04.olx.cl/ui/2/57/09/1372867252\\_434954809\\_1-Fotos-de-Difusores-acusticos-QRD-2-dimensiones-Omnifusor.jpg](http://images04.olx.cl/ui/2/57/09/1372867252_434954809_1-Fotos-de-Difusores-acusticos-QRD-2-dimensiones-Omnifusor.jpg)
- ING. ORTEGA Carlos María (UBA). (s.f.). *VN211 Variable Acoustic Room System*. Obtenido de <http://www.vn-amps.com.ar/vn211.htm>
- KIOSKEA. (s.f.). *kioskea*. Obtenido de <http://es.kioskea.net/contents/69-como-funciona-bluetooth>
- producerempire. (2014). *producerempire*. Obtenido de <http://producerempire.com/wp-content/uploads/2013/07/qrd-diffuser.jpg>
- rajguruelectronics. (2014). *rajguruelectronics*. Obtenido de <http://www.rajguruelectronics.com/bluetooth-module.html>
- RPG Diffusor Systems, I. (s.f.). *RPG*. Obtenido de <http://www.rpginc.com/>
- rpgeurope. (s.f.). Obtenido de <http://www.rpgeurope.com/products/product/triffusor.html>
- SANCHEZ, D. M. (2012). *Diseño y construccion panel abfusor*. bogota, colombia: Universidad de San Buenaventura.
- software, Q. (2014). *QRDUDE software*.
- TREVOR J. Cox, P. D. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application*. New York, USA: Francis e-library.
- Wikipedia. (2014). Obtenido de <http://es.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>



## GLOSARIO

**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. Es determinante en la calidad acústica final del mismo. Dicha reducción de energía, en orden de mayor a menor importancia, es debida a una absorción producida por: el público y las sillas, los materiales absorbentes, superficies límites susceptibles de entrar en vibración, aire y materiales rígidos y no porosos.” (Carrion, 1998)

**Coeficiente de absorción:** es la relación que encontramos entre la energía incidente sobre un material y la energía absorbida por el mismo, nos sirve para hacer una representación del grado de absorción del sonido que tiene algún material. Si se incrementa, quiere decir que la capacidad de absorción de dicho material es mayor

**Absorbente:** Material utilizado para el acondicionamiento acústico, tiene como característica que el porcentaje de energía absorbido es mucho mayor que el reflejado, de lo cual se puede deducir que el tratamiento acústico por medio de absorción en un recinto nos mejora la inteligibilidad de la palabra, pues interviene directamente en la reducción de la reverberación, eliminando reflexiones indeseadas

Algunos ejemplos de absorbentes son: materiales porosos, materiales resonantes, absorbente en forma de membrana y resonadores de Helmholtz.

**Reflexión:** Es el estímulo sonoro asociado a las reflexiones que sufre una onda sonora por las distintas superficies de la sala.

“la energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado)” (Carrion, 1998)

**Coeficiente de reflexión:** es la relación que existe entre la energía sonora que incide y la que es disipada. Si se incrementa, quiere decir que la capacidad de reflexión de dicho material es mayor

**Reflejante:** Es un material cuyas características fundamentales son que no absorben sonido sino que lo reflejan y modifica la dirección de la onda incidente en el espacio.

Ejemplo de estos; superficies límites del recinto de alta densidad, macizo y no poroso.

**Difusión:** es la reflexión de una onda incidente en múltiples direcciones, provocada por las irregularidades de dimensiones las superficies con relación a la longitud de onda.

**Coeficiente de difusión:** “es la medida de la uniformidad del sonido reflejado. El propósito de este coeficiente es calificar el diseño de los difusores, y también

acústicamente permitir comparar el rendimiento de las superficies” (Trevor J. Cox, 2009)

**Automática:** Ciencia que trata de sustituir en un proceso al operador humano, por dispositivos mecánicos, eléctricos ó electrónicos.

**Sistema automático de control:** Conjunto de componentes físicos conectados o relacionados entre sí, de manera que regulen o dirijan su actuación por sí mismos, es decir, sin intervención de agentes exteriores, corrigiendo además los posibles errores que se presenten en su funcionamiento.

## ANEXOS

### Marco Jurídico

#### Sección A

### PROTOCOLO DE MEDICION 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<sup>3</sup>, valor recomendado por la norma. Es necesario adicionalmente comprobar que el recinto cumpla con la siguiente relación:

$$l_{max} < 1.9V^{1/3}$$

Donde:

**l<sub>max</sub>** es la longitud de la línea recta más larga dentro del recinto (en m).

**V** es el volumen del recinto (en m<sup>3</sup>).

- 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<sup>2</sup> a 12 m<sup>2</sup>, si el volumen es cercano a 200 m<sup>3</sup>.
  - 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 aplicados 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:

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

Donde:

**V** es el volumen de la sala (en m<sup>3</sup>).

**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 (At), la cual es la diferencia entre la absorción con la

Muestra (A2) y la absorción si la muestra (A1). Es decir:

$$At = A2 - A1$$

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

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

## **Sección B**

### **PROTOCOLO DE MEDICION 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 sea 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 qué 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:

$$r \gg D_{max}$$

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

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

Donde:

**Dmax** es la dimensión más larga del difusor.

$\lambda$  es la longitud de onda.

**r1** es la distancia de la fuente al punto de referencia.

**r2** 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.

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

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.