



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y APLICACIONES DE UN PROTOTIPO DE
DIFUSOR ACÚSTICO BASADO EN ACÚSTICA GEOMÉTRICA”**

**Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica**

**Profesor Guía:
Ing. Christiam Garzón**

**Autor:
Miguel Angel Molina Flores**

2012

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Christiam Garzón', written over a horizontal line.

Christiam Garzón

MSC

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”



Miguel Angel Molina Flores

171904219-2

106756

AGRADECIMIENTO

A mis padres quienes con esfuerzo, constancia y apoyo, permitieron finalizar mi carrera, a mi hija Mariafé Sabine quien ha sido el pilar fundamental para finalizar mi trabajo y poner metas para mi vida, así mismo a familiares y amigos que de algún modo me apoyaron para continuar estudiando. A Christiam Garzón quien apoyo con sus conocimientos y nunca se apartó de brindar su importante ayuda durante el desarrollo de este proyecto. A Luis Bravo que facilitó el proceso y se ha encontrado presente durante toda la carrera, a Guillermo Bolaños por aportar con sus conocimientos durante la corrección del proyecto.

DEDICATORIA

a Mónica, Angel y Mariafé Sabine.

RESUMEN

Durante el avance científico de la acústica se ha desarrollado ampliamente el campo de la acústica arquitectónica, de forma que se han creado nuevas e interesantes formas de controlar al sonido dentro de un recinto o una sala. La utilización de materiales atentamente estudiados en laboratorio proporciona al diseñador un mayor control de los parámetros acústicos deseados, entre estos materiales se encuentran los absorbentes, reflectantes y difusores. Estos últimos son el tema principal dentro de esta investigación, en la cual se desarrolla un nuevo diseño de difusor con especificaciones técnicas y con un detalle de sus aplicaciones en distintas salas, el difusor está basado principalmente en acústica geométrica, donde se estudia a fondo la forma utilizada para el diseño del prototipo, por medio del software de simulación acústica "AFMG Reflex" en una dimensión. Como primer paso se realizaron cuatro prototipos de difusores, con formas geométricas simples como triángulos, cuadrados o superficies cóncavas y convexas basados en la teoría acústica - geométrica, con la finalidad de poner a prueba sus características acústicas, para posteriormente compararlas y elegir un sistema a ser construido.

Finalmente se realiza y detallan instalación del sistema, arreglos del difusor, material y su construcción.

ABSTRACT

Since the historical and scientific advancement of acoustics, has further developed the field of architectural acoustics, Scientifics have created new and interesting ways to control the sound within a room or hall. The use of materials carefully studied gives the designer more control of acoustic parameters; some of these materials are absorbent, reflective and diffusers. The diffusers are the focus in this research, which develops a new design with special features, technical specifications and details of their applications in different rooms, the diffuser is mainly based on geometrical acoustics, and explain the process of design and construction of the prototype, using "AFMG Reflex" software. The first step was the creation of four different prototypes, with simple geometrical figures like: Triangles, arcs or cubes, all based in acoustic theory, finally these systems were studied and compared.

Later the prototype is constructed and shows all the features.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	VIII
1. CAPITULO I	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	1
1.3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4. HIPÓTESIS	2
2. CAPITULO II	4
2.1. MARCO TEÓRICO.	4
2.1.1. Definición del sonido.	4
2.1.1.1. Propagación del sonido.	4
2.1.1.2 Propagación del sonido al aire libre.	5
2.1.2. Frecuencia (Hz).	6
2.1.2.1. Espectro de Frecuencia (Hz).	6
2.1.2.2. Bandas de Frecuencia.	6
2.1.3. Tono Puro.	7
2.1.3.1 Sonido Periódico Complejo.	8
2.1.3.2 Sonido transitorio o impulsivo.	9
2.1.3.3. Sonidos aleatorios.	9
2.1.4. Velocidad del sonido (c).	10
2.1.5. Longitud de onda (λ).	10
2.1.6. Comportamiento del sonido en recintos.	11
2.1.7. Materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de salas.	12
2.1.8. Absorción del sonido.	12
2.1.9. Reflexión del sonido.	13
2.1.10. Difusión del sonido.	13
2.1.10.1. Difusores de Schroeder: MLS, QRD, PRD.	15
2.1.10.2. Difusores MLS.	16
2.1.10.3. Difusores QRD.	18
2.1.10.4. Difusores de raíces primitivas PRD.	24
2.1.10.5. Difusores Policilíndricos.	26
2.1.11. Acústica Geométrica.	26
2.1.11.1. Superficies planas.	29
2.1.11.2. Superficies Triangulares y pirámides.	30

2.1.11.3. Arreglos de triángulos.	32
2.1.11.4. Arcos Cóncavos.	32
2.1.11.5. Arcos Convexos	33
2.1.12. Parámetros de un difusor	34
2.1.12.1. Detalles Básicos	34
2.1.12.2. Detalles Técnicos acústicos	34
3. CAPÍTULO III.	36
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN PROPUESTA.	36
3.1. CRITERIOS Y BÚSQUEDA DE FORMA DEL DIFUSOR	36
3.3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE AFMG REFLEX.	39
3.3.2. Procedimiento de evaluación para los prototipos de difusores.	40
4. CAPÍTULO IV.	43
4.1. IMPLEMENTACIÓN DE LOS DISEÑOS EN AFMG REFLEX Y EVALUACIÓN DE LOS PROTOTIPOS.	43
4.1.1. Diseño A.	43
4.1.1.1. Descripción.	43
4.1.1.2. Respuesta espacial.	44
4.1.1.3. Gráfica de Coeficientes.	45
4.1.1.4. Observaciones.	46
4.1.2. Diseño B.	47
4.1.2.1. Descripción.	47
4.1.2.2. Respuesta Espacial.	48
4.1.2.3. Gráfica de Coeficientes.	49
4.1.2.4. Observaciones.	50
4.1.3. Diseño C.	51
4.1.3.1. Descripción.	51
4.1.3.2. Respuesta espacial.	52
4.1.3.3. Gráfica de Coeficientes.	54
4.1.3.4. Observaciones.	54
4.1.4. Diseño D.	55
4.1.4.1. Descripción.	55
4.1.4.2. Respuesta espacial.	56
4.1.4.3. Gráfica de Coeficientes.	57
4.1.4.4. Observaciones.	58
5. CAPÍTULO V.	59
5.1. DETALLE DEL DIFUSOR SELECCIONADO.	59

5.1.1. Vistas del Difusor.	60
5.1.2. Medidas de cada elemento del difusor.	63
5.1.3. Tabla de coeficientes del difusor	64
5.1.4. Respuesta espacial del difusor.	64
5.1.5. Graficas de coeficientes del difusor.	67
5.1.6. Plano Final.	69
5.1.7. Aplicaciones.	69
5.1.8. Material del difusor.	70
5.1.9. Instalación.	71
5.1.10. Arreglos de difusores.	73
5.1.11. Otras aplicaciones funcionales.	75
5.1.12. Tabla comparativa entre difusores del mercado actual.	76
6. CAPÍTULO VI	81
6.1 CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DEL DIFUSOR FINAL.	81
7. CAPÍTULO VII.	86
7.1. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO.	86
8. CAPÍTULO VIII.	88
8.1. CONCLUSIONES.	88
9.1. BIBLIOGRAFÍA	91

Índice de Figuras

Figura 2.1. Propagación del sonido.....	4
Figura 2.2. Propagación del sonido en aire libre.....	5
Figura 2.3. Ancho de banda de varios instrumentos.....	7
Figura 2.4. Tono Puro.	8
Figura 2.5. Sonido periódico complejo.	8
Figura 2.6. Sonido impulsivo.	9
Figura 2.7. Sonidos aleatorios.....	10
Figura 2.8. Longitud de onda.	11
Figura 2.9. Reflexiones sobre absorbente, reflector y difusor.	14
Figura 2.10. Difusores de Schroeder.	16
Figura 2.11. Difusor MLS.	16
Figura 2.12. Difusor de longitud máxima.	17
Figura 2.13. Difusor QRD unidimensional.....	18
Figura 2.14. Respuesta espacial de un difusor QRD y una superficie plana.	19
Figura 2.15. Difusores con distinto número primo.	21
Figura 2.16. Difusión en una dimensión.....	22
Figura 2.17. Difusor QRD bidimensional.....	22
Figura 2.18. Difusor PRD.	24
Figura 2.19. Secuencias de raíces primitivas.	25
Figura 2.20. Difusión generada por un PRD en incidencia normal.....	26
Figura 2.21. Difusor Policilíndrico.....	26
Figura 2.22. Nivel de presión sonora de primeras reflexiones y.....	27
Figura 2.23. Percepción del sonido de 0 a 30ms.....	28
Figura 2.24. Percepción del sonido a partir de 50ms.....	28
Figura 2.25. Incidencia del sonido sobre una superficie plana.	29
Figura 2.26. Respuesta espacial de un panel plano.	30
Figura 2.27. Analisis de pirámides por ray tracing.	30
Figura 2.28. Respuesta espacial de arreglos de pirámides.	31
Figura 2.29. Respuesta espacial de arreglos de pirámides.....	31
Figura 2.30. Respuesta espacial de un triangulo y un arreglo de triángulos.	32
Figura 2.31. Reflexiones sobre un arco cóncavo.	33
Figura 3.1. Diseño A.....	37
Figura 3.2. Diseño B.....	38

Figura 3.3. Diseño C.	38
Figura 3.4. Diseño D.	39
Figura 3.5. Interface gráfica de AFMG réflex software.	40
Figura 3.6. Disposición de 5 diferentes altavoces.....	41
Figura 3.7. Respuesta espacial de una superficie plana (sin difusor) / 200Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz respectivamente.....	41
Figura 3.8. Línea azul: Coeficiente de dispersión / Línea roja: Coeficiente de Difusión Normalizado. Desde 315Hz a 4kHz.	42
Figura 4.1. Disposición del difusor A y fuentes en la sala.	43
Figura 4.2. Medidas del difusor A en cm.....	44
Figura 4.3. Respuestas espaciales A.....	45
Figura 4.4. Gráfica de coeficientes A.	46
Figura 4.5. Disposición del difusor B y fuentes en la sala.	47
Figura 4.6. Medidas del difusor B en cm.....	48
Figura 4.7. Respuestas espaciales B.....	49
Figura 4.8. Gráfica de coeficientes B.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4.9. Disposición del difusor C y fuentes en la sala.	51
Figura 4.10. Medidas del difusor C en cm.	52
Figura 4.11. Respuestas espaciales C.	52
Figura 4.12. Gráfica de coeficientes C.....	54
Figura 4.13. Disposición del difusor D y fuentes en la sala.	55
Figura 4.14. Medidas del difusor D en cm.	56
Figura 4.15. Respuestas espaciales D.	56
Figura 4.16. Gráfica de coeficientes D.....	58
Figura 5.1. Vistas isométricas del prototipo final.....	60
Figura 5.2. Vista superior del prototipo final.....	61
Figura 5.3. Vista frontal del prototipo final.....	61
Figura 5.4. Vista posterior del prototipo final.....	62
Figura 5.5. Vistas izquierda y derecha del prototipo final.	62
Figura 5.6. Elementos del difusor.....	63
Figura 5.7. Detalle de elementos del difusor.....	63
Figura 5.8. Respuesta espacial del difusor final a 1kHz.	66
Figura 5.9. Gráficas de coeficientes del difusor final.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 5.10. Instalación con tornillos.....	72
Figura 5.11. Instalación con cinta doble fase.....	72

Figura 5.12. Instalación en cielo raso.	73
Figura 5.13. Arreglo de difusores 1.	74
Figura 5.14. Arreglo de difusores 2.	74
Figura 5.15. Arreglo de difusores 3.	74
Figura 5.16. Arreglo de difusores 4 y 5.	75
Figura 5.17. Arreglo de difusores y paneles 6.	75
Figura 5.18. Panel absorbente dentro de difusor.	76
Figura 5.19. RPG - Moddifusor.	77
Figura 5.20. Auralex – Minifusor.	78
Figura 5.21. Jocavy Group – Squary Difusor.	79
Figura 5.22. Acoustical Solutions – Alpha D.	78
Figura 5.23. Acoustics First – QuadraPyramid.	79
Figura 5.24. Vibrant Technologies – DC-22.	79
Figura 5.25. RPG – Skyline.	79
Figura 5.26. RPG – Harmonix.	80
Figura 5.27. Difusor B (Prototipo).	83
Figura 6.1. Elaboración de ángulos para construcción.	83
Figura 6.2. Medidas y cortes de acrílico.	83
Figura 6.3. Construcción de una dobladora doméstica para acrílico.	83
Figura 6.4. Doblaje del acrílico.	84
Figura 6.5. Primeros doblajes del acrílico.	84
Figura 6.6. Media plancha de acrílico con doblajes.	84
Figura 6.7. Doblaje de curvaturas.	85
Figura 6.8. Superficie final del prototipo.	85
Figura 6.9. Implementación de tapas y perfiles.	86

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Sn para distintos p.	20
Tabla 2.2. Secuencia de un difusor QRD.	23
Tabla 5.1. Medidas de cada elemento del difusor.	64
Tabla 5.2. Coeficientes de difusor final.	64
Tabla 5.3. Tabla comparativa entre difusores en el mercado.	77
Tabla 7.1. Análisis costo beneficio.	86

INTRODUCCIÓN

Inmiscuirse en el mundo de la acústica es volcarse a un universo lleno de transformaciones, sensaciones, personalidades, movimientos y colores, que se mezclan con la calidez de una pieza musical, una ópera o una simple conversación. Ver la acústica y el sonido desde un punto científico es interesante e intrigante, es apreciar un arte desde lo visual y sentirlo desde lo auditivo. Poder ver el desarrollo de las expresiones naturales producidas por una onda de sonido es lo que lleva al humano a desarrollarse y sentir el deleite, porque finalmente ese es el objetivo de apreciar una obra musical, y es que el sonido producido por una cuerda de guitarra es más impresionante de lo que se encuentra habitualmente, la forma de un teatro es tan importante como imponente. Y es que la acústica y el sonido siempre formaran parte de todo y el humano es parte de ello.

El oído del humano puede ser capaz de apreciar y deleitarse de esta manera, en parte gracias a la acústica arquitectónica, que es una rama derivada de cómo es el comportamiento del sonido en un recinto, donde la arquitectura plasma formas o sistemas que son agradables al ojo y la acústica al oído.

Con el avance de la tecnología, es posible crear y simular situaciones reales que pueden suceder en una sala o sobre una superficie y de esta manera obtener diseños acústicos/arquitectónicos más fiables y útiles.

La finalidad de este proyecto es obtener un nuevo difusor acústico, distinto a los ya existentes en el mercado en cuanto a su forma y novedoso al mercado de los amantes del sonido la acústica y la arquitectura.

1. CAPITULO I

1.1. Antecedentes

Es preciso conocer que durante la historia de la acústica y refiriéndose a los campos de aplicación como la acústica arquitectónica, se han ido creando nuevas e interesantes formas de controlar a las ondas en distintos recintos dependiendo de sus usos, por medio del uso de materiales estudiados en laboratorio se puede llegar a obtener parámetros acústicos deseados para una sala de conciertos, un teatro, un auditorio o un estudio de grabación. También se han creado sistemas que complementan o ayudan a la acústica de una sala como por ejemplo: Paneles absorbentes, resonadores y difusores. Estos últimos diseñados para dispersar la onda incidente en distintas direcciones.

Por esta razón se decide por medio del presente proyecto incursionar en la búsqueda de nuevos diseños de difusores con características visuales y auditivas novedosas. Es común encontrar en estudios de grabación y salas de conciertos, difusores, los mismos que además de apoyar a la mejora de la sonoridad de la sala brindan un diseño visual atractivo. Los difusores se basarán en acústica geométrica que estudia como las ondas y sus reflexiones se propagan en un recinto a través del tiempo basándose en demostraciones de carácter físico e hipótesis de reflexiones especulares que constituyen el pilar fundamental para la aproximación más cercana y real del comportamiento de ciertas ondas, donde también dependen de otros factores como los materiales utilizados.

1.2. Justificación

La realización de este proyecto se enfoca en conocer más a fondo el funcionamiento de los difusores acústicos y proponer por primera vez en el país un nuevo sistema de difusión, apto para el mercado internacional. Además el proyecto cuenta con una parte investigativa, lo cual indica, que este estudio servirá de aporte para posteriores trabajos donde se busque incursionar en el tema de la difusión del sonido y como controlarlo para el beneficio de la escucha. Es importante la investigación y el elaborar este proyecto ya que es

muy difícil encontrar como un difusor es diseñado y que procedimientos se utilizan para la creación de difusores con formas no comunes.

1.3. Objetivos del Proyecto

1.3.1 Objetivo General

- Diseñar y construir un prototipo de difusor basado en acústica geométrica, con sus respectivos aspectos técnicos, así como también ver sus distintas aplicaciones y como puede ser utilizado en el acondicionamiento acústico de salas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Utilizar a la acústica geométrica para el diseño de la forma que se implementará en el difusor.
- Experimentar con distintas formas y evaluar cuál de ellas es la de mejor desempeño.
- Examinar el comportamiento de los difusores por medio de acústica geométrica por medio del software *AFMG Reflex*.
- Evaluar los resultados obtenidos para el difusor.
- Realizar un detalle de especificaciones técnicas del difusor seleccionado, como coeficientes y gráficas polares.
- Analizar las posibles aplicaciones del difusor en distintas salas.
- Construir un prototipo del difusor planteado.

1.4. Hipótesis

El prototipo de difusor está enfocado a desempeñarse en un rango de frecuencias medias. Es importante mencionar que el uso de la difusión puede ser fundamental en salas vivas como salas de conciertos ya que el sonido no será absorbido quitando energía reverberante sino más bien se distribuirá aquella energía de forma homogénea en la sala para poder obtener la mayor sonoridad posible. Así también el uso de la difusión puede ser combinada con materiales absorbentes para poder controlar tiempos de reverberación, y de esta manera resolver los problemas más comunes en el acondicionamiento de

salas y mejorar la inteligibilidad de la palabra, estos puntos serán el enfoque principal del prototipo.

2. CAPITULO II

2.1. Marco teórico.

2.1.1. Definición del sonido.

El sonido puede ser definido como vibraciones que se propagan a través de un medio elástico, el más común el aire, y que de esta manera produce un estímulo físico el mismo que brinda una sensación auditiva.

2.1.1.1. Propagación del sonido.

Para que el sonido sea capaz de viajar por un medio específico, denso o elástico, debe existir un elemento que sea capaz de crear vibraciones, este elemento es llamado fuente sonora. Cuando una fuente sonora como por ejemplo: las cuerdas vocales, un tambor, una cuerda de guitarra; entran en vibración, las partículas de aire que se encuentran alrededor también lo hacen y aquella energía continua transmitiéndose a las partículas adyacentes. Las partículas que han sido perturbadas oscilan en su punto de equilibrio y forman lo que se conoce con el término de propagación de una onda sonora. La misma que posee una dirección específica con zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire.



Figura 2.1. Propagación del sonido.

Fuente: Autor.

Las partículas oscilan en la misma dirección que la de propagación de la onda, y se llaman ondas longitudinales. Por lo general la forma en que se expresa la

magnitud de un campo sonoro en particular es por medio de la presión sonora, la misma que cuantifica la fuerza que ejercen las partículas de gas por unidad de superficie. La evolución de esta presión sonora se da en función del tiempo, la presión es conocida como amplitud, puede también ser ilustrada como una analogía simple, un sistema masa resorte en plena oscilación, generando una amplitud mientras la masa oscila en determinado tiempo.

2.1.1.2 Propagación del sonido al aire libre.

En este caso se considera a la fuente sonora como omnidireccional, lo que indica que emite energía de manera uniforme y en forma esférica, donde el factor de directividad es de $Q=1$.

Mientras mayor sea la distancia fuente – receptor el nivel de presión sonora (NPS) disminuirá progresivamente, la ley del inverso al cuadrado dicta que cuando la distancia se dobla, existirá disminución de 6 dB o una disminución de la presión sonora.

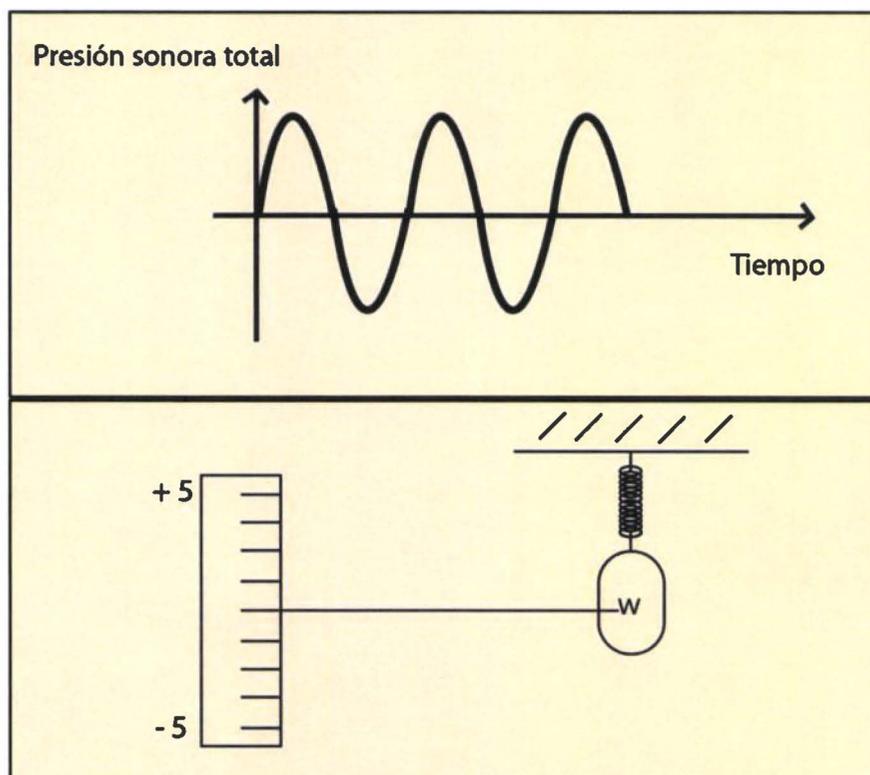


Figura 2.2. Propagación del sonido en aire libre.

Fuente: Bruneau, M. *Fundamental of acoustics*. ISTE ltd.

2.1.2. Frecuencia (Hz).

La frecuencia es el número de oscilaciones por segundo, y permite conocer características tonales. Es medido en Hz o ciclos por segundo. La vibración mecánica que genera un sonido posee la misma frecuencia del sonido que se percibe.

2.1.2.1. Espectro de Frecuencia (Hz).

Los sonidos existentes en la vida diaria no poseen únicamente una frecuencia, sino que están compuestos por varias frecuencias. Cada sonido posee frecuencias fundamentales y sus componentes armónicos lo cual genera superposiciones, creando sonidos complejos, para observar que frecuencias componen un sonido se puede observar un espectro de frecuencias, el mismo que muestra un rango audible con bandas de frecuencia.

2.1.2.2. Bandas de Frecuencia.

En el caso de un piano de 88 teclas, poseen frecuencias fundamentales a sus extremos de 27.5Hz y 4.4kHz, frecuencia bastante grave y otra muy alta respectivamente. Esta gama de frecuencias o rango se denomina banda de frecuencias, en este caso de un piano. Así también cada instrumento posee su propio margen de frecuencias.

El oído humano posee también una banda de frecuencias, todas las frecuencias que se encuentran dentro de este margen son audibles y psicoacústicamente reconocidas por el cerebro. Este margen va desde los 20Hz hasta los 20000Hz aproximadamente. Las frecuencias por debajo de este rango son conocidas como subsónicas o infrasonido y las superiores como ultrasónicas o ultrasonido.

A continuación se presenta una lista de varios instrumentos musicales con sus bandas de frecuencia:

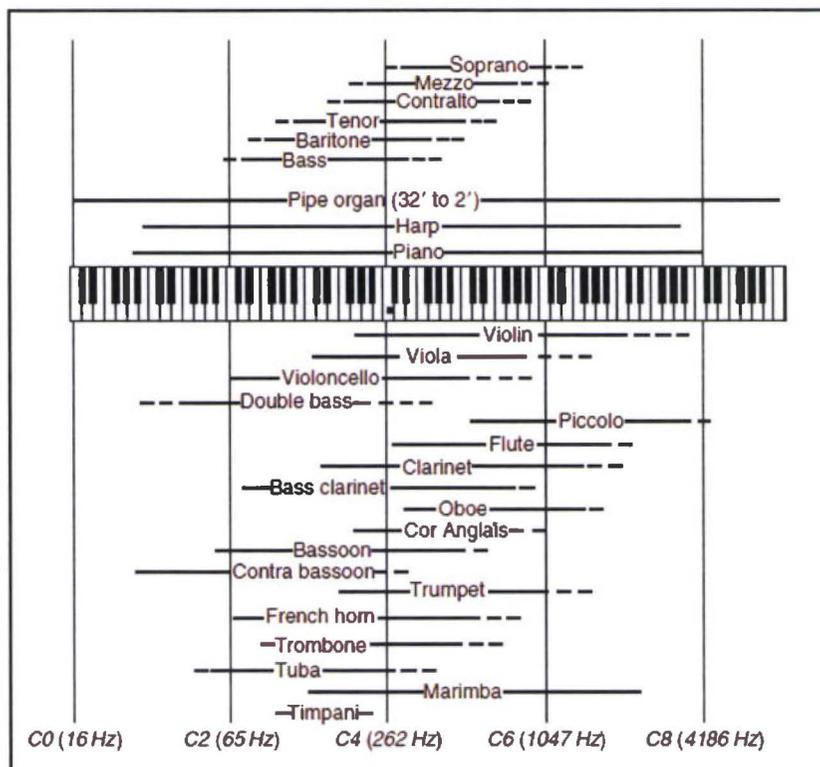
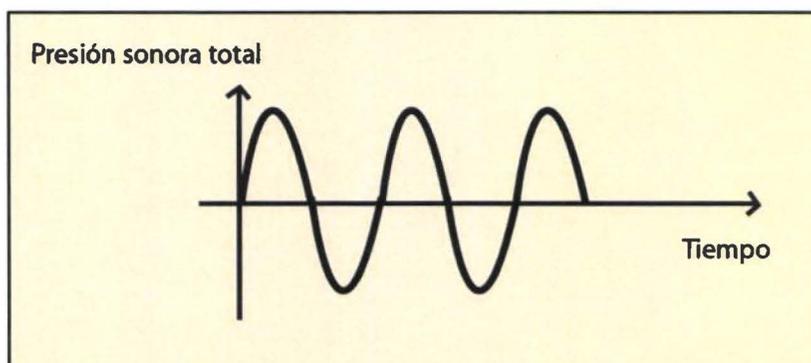


Figura 2.3. Ancho de banda de varios instrumentos.

Fuente: *Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos*, Antoni Carrion Isbert, 1998.

2.1.3. Tono Puro.

Está compuesto de una sola frecuencia que se mantiene constante durante el tiempo, su espectro es:



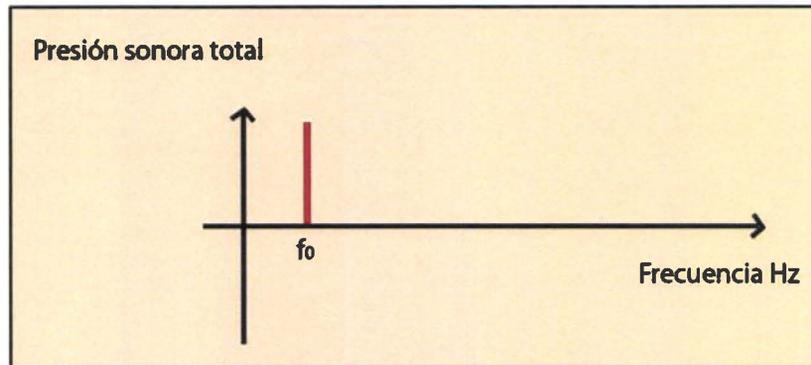


Figura 2.4 Tono Puro.

Donde f_0 es la frecuencia fundamental

Fuente: Autor.

2.1.3.1 Sonido Periódico Complejo.

Se compone por su frecuencia fundamental y sus armónicos, donde la frecuencia fundamental siempre posee la mayor amplitud en el espectro, los instrumentos musicales están mayoritariamente compuestos por este tipo de sonidos.

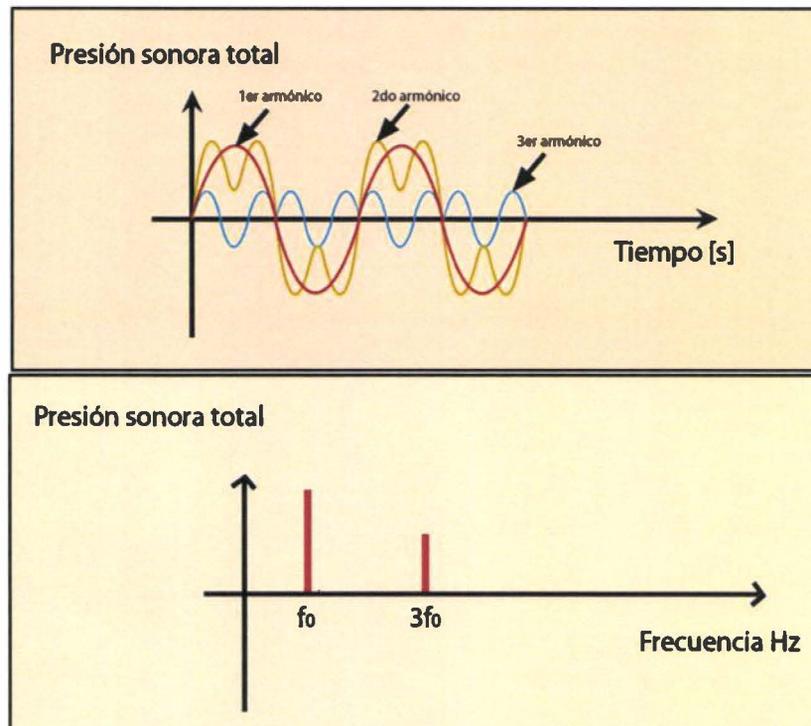


Figura 2.5. Sonido periódico complejo.

Fuente: Autor.

2.1.3.2 Sonido transitorio o impulsivo.

Es producido por una rápida liberación de energía. Es percibido como un sonido corto y de poca duración, su ancho de banda es amplio. Por ejemplo: un aplauso.

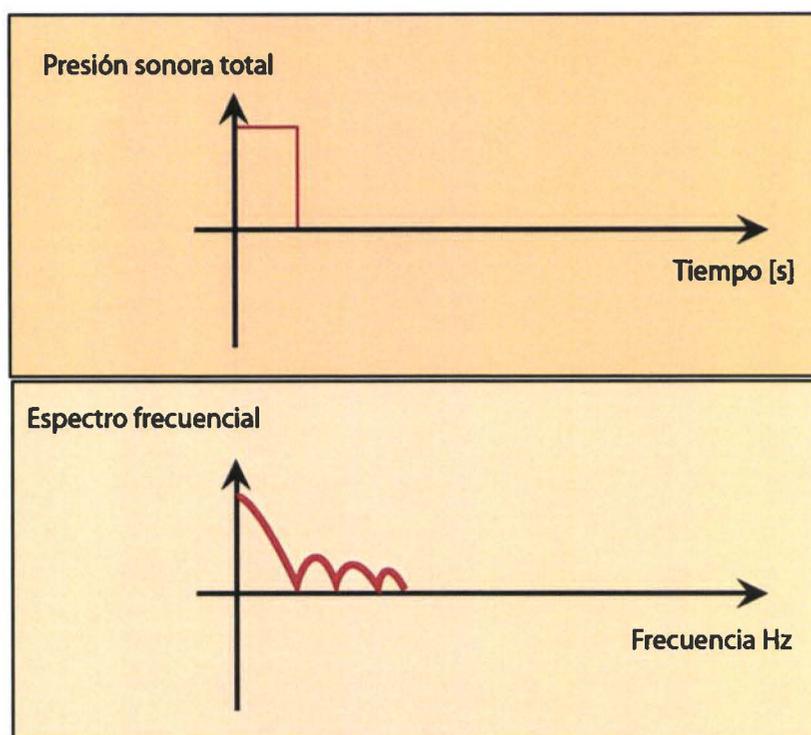


Figura 2.6. Sonido impulsivo.

Fuente: Autor.

2.1.3.3. Sonidos aleatorios.

Estos sonidos están formados por frecuencias aleatorias e imprescindibles, esta clase de sonido es comúnmente conocido como ruido. Para estudiarlo se utiliza la densidad espectral de potencia, que muestra la potencia sonora por unidad de frecuencia. Por ejemplo: el ruido del tránsito de una ciudad.

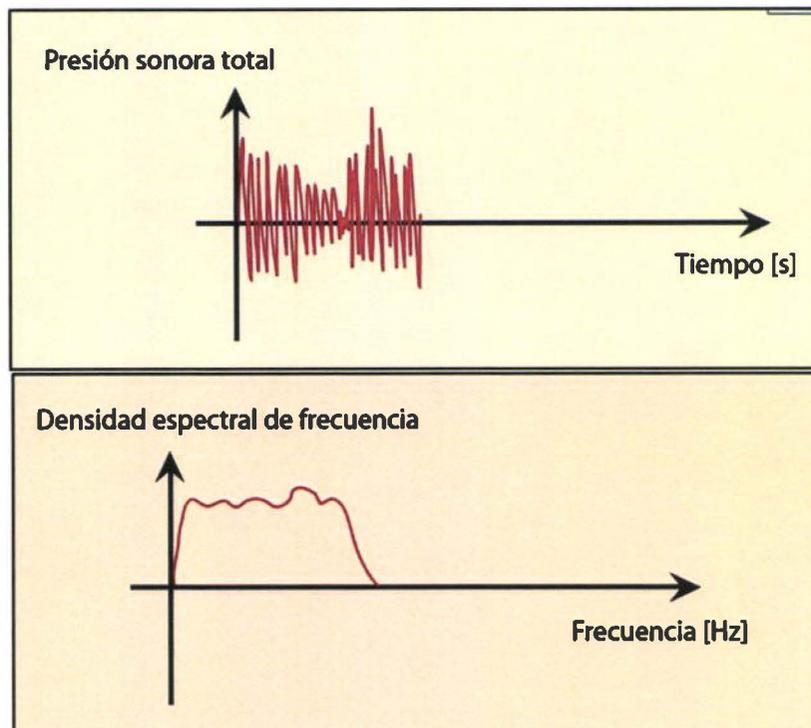


Figura 2.7. Sonidos aleatorios.

Fuente: Autor.

2.1.4. Velocidad del sonido (c).

La velocidad de propagación de una onda sonora depende directamente de la elasticidad y densidad del medio. Se toman como condiciones iniciales los valores de 1 atmósfera de presión y 22°C de temperatura. Lo cual da una velocidad del sonido de 345m/s aproximadamente.

El sonido también se propaga por cualquier otro medio elástico y denso. La velocidad del sonido será mayor cuando el medio sea más denso que elástico.

[Everest, 2001].

2.1.5. Longitud de onda (λ).

La distancia de uno a otro punto consecutivo que poseen y se encuentran en el mismo estado de vibración en un instante en el tiempo, se conoce como longitud de onda y es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, a mayor longitud de onda, la frecuencia será más baja y viceversa.

La longitud de onda esta en relación directa con la frecuencia y la velocidad de propagación y se puede notar en la siguiente expresión matemática:

$$\lambda = c/f$$

A continuación se muestra gráficamente la relación λ con f , tomando en cuenta el aire como medio de propagación:

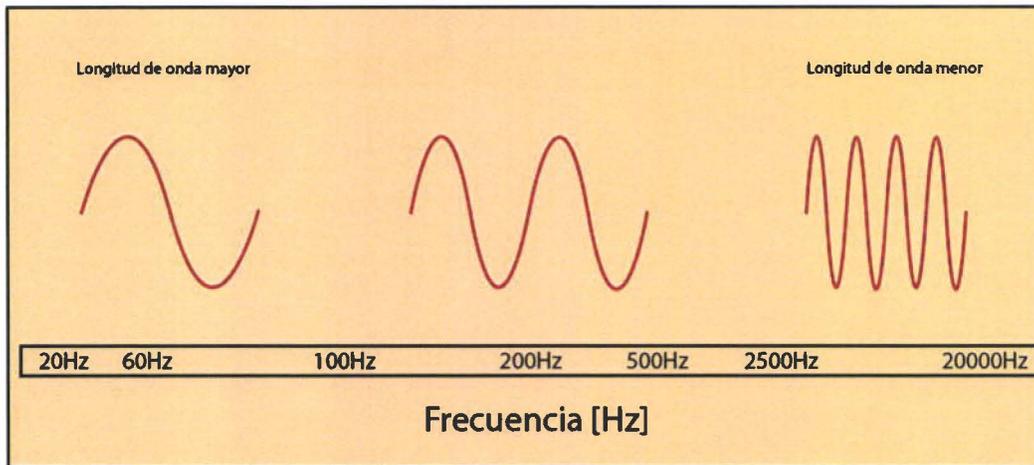


Figura 2.8. Longitud de onda.

Fuente: Autor.

Relación λ con f con el aire como medio de propagación

2.1.6. Comportamiento del sonido en recintos.

El comportamiento de las ondas sonoras dentro de un recinto o una sala es materia compleja, ya que no es posible establecer una regla general para conseguir la acústica deseada. La razón para que esto suceda es que cada sala presenta particularidades en su geometría, los materiales de construcción utilizados, los tiempos de reverberación, las focalizaciones entre otros, es por esto que cada sala necesita un análisis específico y posteriormente utilizar elementos o técnicas para obtener una buena acústica.

Con el paso de los años y la evolución de la física, la acústica se ha ido abriendo campo en conocimiento. A partir del avance de la electrónica aplicada al sonido, se puede hoy en día obtener datos más específicos acerca del comportamiento de una sala, por medio de DSPs (Digital Signal Processing).

Aun así la acústica es una ciencia utilizada y entrelazada con la música y el deseo de tener confort auditivo en un espacio.

Ahora bien, para obtener una acústica de calidad en un recinto intervienen una cantidad de factores enfocados en cual será el uso que la sala tendrá en el futuro, para posteriormente analizar materiales que pueden ser utilizados para el desarrollo de una sala en particular. Cada uno de estos materiales tendrá cualidades útiles en el diseño de salas como absorbentes, reflectantes, difusores, entre otros.

2.1.7. Materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de salas.

Los materiales y la forma del recinto son la parte más importante para poder obtener los parámetros acústicos deseados en la sala, así mismo es importante conocer y analizar las primeras reflexiones producidas dentro del recinto para poder conseguir una difusión homogénea para las zonas de audiencia o los puntos de escucha.

Los materiales utilizados se dividen en:

- Absorbentes
- Reflectantes
- Difusores

A continuación se explicará cada uno de los materiales y sus usos, enfocándose más detalladamente en los difusores.

2.1.8. Absorción del sonido.

Es reacción física que se produce cuando parte de una onda sonora se absorbe por una superficie específica. Durante la propagación de las ondas por el aire y cuando las mismas inciden con las superficies, la energía se convierte en energía absorbida transformándose en calor. Los materiales absorbentes existentes en una sala pueden ser:

- Fonoabsorbentes o absorbentes selectivos.
- Sillas y público
- Materiales utilizados en la construcción de la sala

- Todas las superficies capaces de entrar en vibración.

Todo material absorbe parte de la energía sonora, la diferencia está en que existen materiales con mayores o menores coeficientes de absorción. En este punto es imprescindible conocer que para tener un mejor control durante el diseño de una sala es óptimo conocer las características técnicas del material obtenidas en laboratorio o en salas similares.

El uso de materiales absorbentes dentro de una sala es amplio, y con varios propósitos entre ellos:

- Control del tiempo de reverberación.
- Control de reflexiones no deseadas en auditorios y salas para el habla.
- Control de ruido en ductos y silenciadores.
- Cerramientos y barreras.

2.1.9. Reflexión del sonido.

Son materiales que reflejan el sonido que incide sobre ellos generando reflexiones especulares, las mismas que concentran la energía sonora reflejada en una sola dirección. Dependiendo del material del que está hecho el reflector, el mismo puede brindar a una sala, por ejemplo, un mayor T60. Ya que dentro del recinto existirán mayores reflexiones y el sonido demorará en decaer más tiempo.

Los materiales reflectantes son útiles para direccionar las ondas sonoras hacia el aforo, y de esta manera obtener una mayor sonoridad.

Un material reflectante consta de una superficie lisa o poco porosa.

2.1.10. Difusión del sonido.

Un difusor es un sistema acústico que genera reflexiones difusas en salas y exteriores. Un difusor sirve para resolver este tipo de problemas existen los difusores los cuales al incidir una onda con su superficie irregular generan reflexiones difusas, que tienen como característica principal que las ondas reflejadas lo hacen de forma pareja y sin concentrarse en una sola dirección. De esta forma las reflexiones difusas aumentan la sensación de espacialidad y

generan un campo sonoro de reflexiones donde la intensidad del sonido ya no depende de la dirección.

A continuación se muestra una comparación de la reflexión producida por los tres materiales mencionados anteriormente:

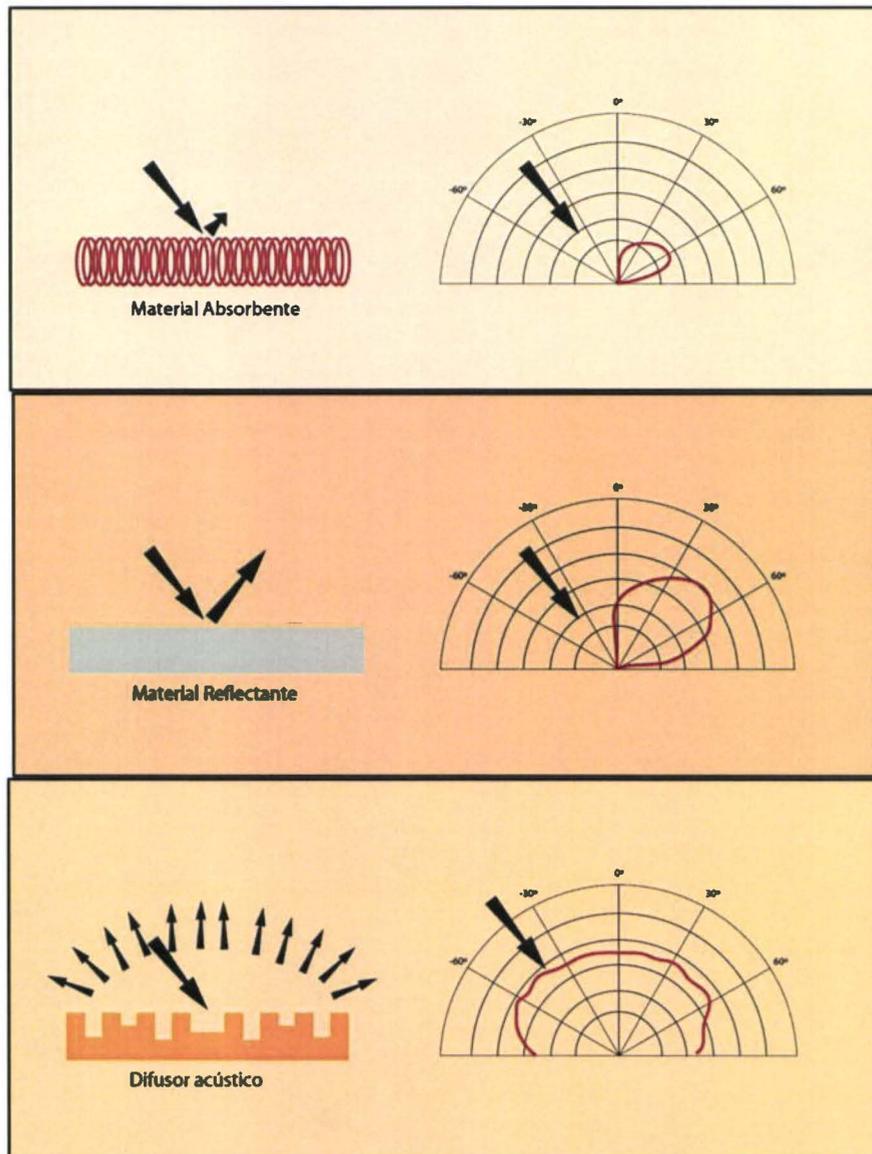


Figura 2.9. Reflexiones sobre absorbente, reflector y difusor.

Fuente: Autor.

Para obtener una mejor acústica en un recinto utilizando elementos de difusión, es necesario colocar difusores diseñados explícitamente para la sala a tratarse, aunque existen difusores comerciales que se encuentran pre-diseñados y se

ajustan a condiciones típicas de acústica de salas. O utilizar difusores que cuyo comportamiento sea aplicable a corregir los errores que posea la sala.

Existen varios modelos de difusores en el mercado actual entre ellos se pueden encontrar:

- Difusores de Schroeder
- Difusores Policilíndricos
- Difusores Geométricos

Cada diseño posee sus particularidades y brindan opciones diferentes para mejorar la acústica de salas.

2.1.10.1. Difusores de Schroeder: MLS, QRD, PRD.

Manfred R. Schroeder y *ATT&T Bell* Laboratorios, fueron los pioneros en escribir y detallar de mejor forma las páginas de la difusión del sonido. Schroeder brindo un aporte al entregar la teoría para realizar un arreglo de pared perforada que permita la difusión del sonido de un modo impensable en aquella época. El difusor de Schroeder ofrecía la posibilidad de producir una difusión óptima con apenas unas pequeñas ecuaciones de diseño, basadas en secuencias matemáticas definidas con anterioridad.

Un difusor de este tipo está diseñado para trabajar en un rango o espectro de frecuencias específico. Hoy en día son más conocidos con el nombre de RPG (Reflection Phase Grating), y pueden estar contruidos de variedad de materiales, el más común es la madera tratada.

Los difusores de Schroeder o RPG se dividen en:

- *Difusores MLS*
- *Difusores QRD*
- *Difusores PRD*

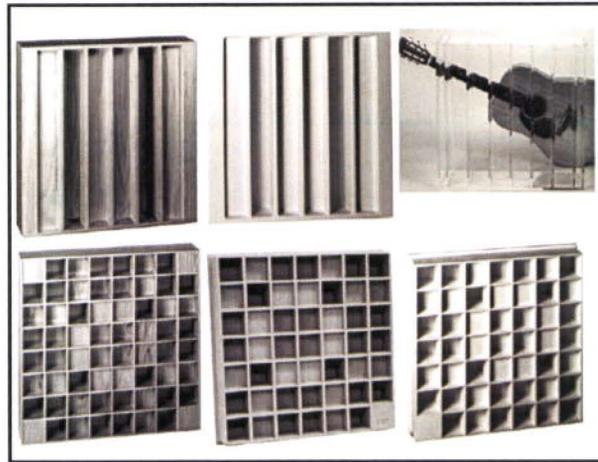


Figura 2.10. Difusores de Schroeder.
De izquierda a derecha: difusores QRD, difusor en translucido
y QRD bidimensionales en la segunda fila.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrión Isbert, 1998.

2.1.10.2. Difusores MLS.



Figura 2.11. Difusor MLS.

Fuente: RPG Inc Diffractal diffuser.

Llamados MLS debido a sus siglas que tienen el significado de “*Maximum Length Sequence*”, se basan en la principal teoría de Schroeder, la de utilizar secuencias aleatorias denominadas de “longitud máxima”, utilizando únicamente valores entre +1 y – 1. Similar al primer diseño implementado por Schroeder, este difusor consta de una superficie con variaciones creada a partir de una superficie reflectante lisa, con similares pozos en todos sus tramos.

Los difusores de Schroeder de una dimensión consisten en una serie de pozos que poseen el mismo ancho pero diferentes profundidades, que son

determinadas bajo una secuencia numérica matemática. Muchas veces estos pozos se encuentran separados uno de otro por medio de divisiones muy finas.

Un difusor MLS brinda un óptimo funcionamiento en un margen de frecuencias de una octava. Por lo que generalmente este tipo de difusor es muy poco utilizado.

Para definir la forma del difusor se toma en cuenta que: cuando el valor es -1 el siguiente tramo quedará sin alteración, mientras que, cuando el valor es +1 se creará una ranura en el siguiente espacio. Así mismo para definir el ancho de cada espacio (W) y la profundidad (d) de cada pozo se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$W = \lambda/2$$

$$d = \lambda/4$$

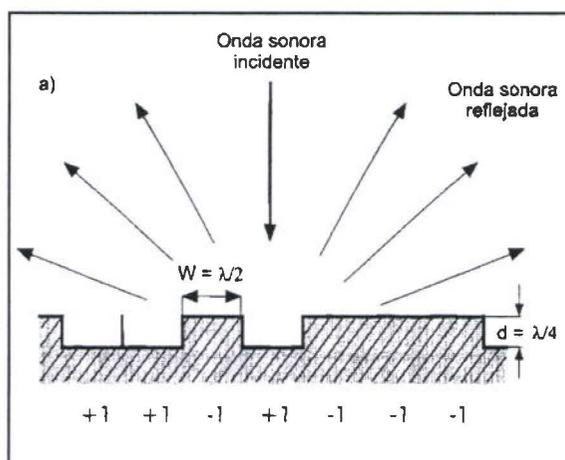


Figura 2.12. Difusor de longitud máxima.

Fuente: *Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos*,

Antoni Carrión Isbert, 1998.

Donde:

- λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño.

2.1.10.3. Difusores QRD.

Difusores QRD unidimensionales

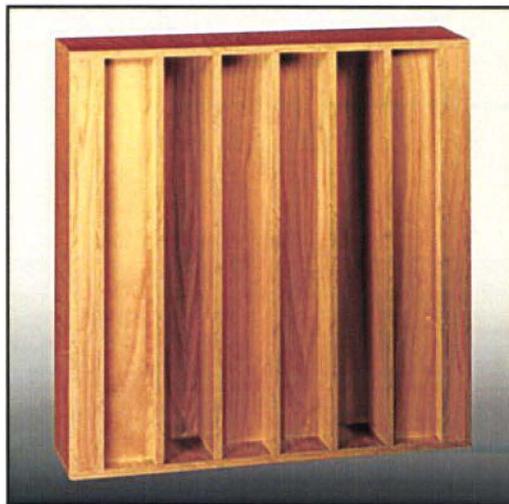


Figura 2.13. Difusor QRD unidimensional.

Fuente: RPG inc. QRD Diffuser.

Los difusores QRD "Quadratic Residue Diffuser", consisten en una serie de ranuras paralelas con forma rectangular con igual ancho y diferentes profundidades, muchas veces separadas entre sí por divisores delgados. Por medio de una secuencia numérica matemática periódica se define la forma del difusor, para que este produzca una dispersión de las ondas sonoras de manera uniforme y en un rango de frecuencias determinado.

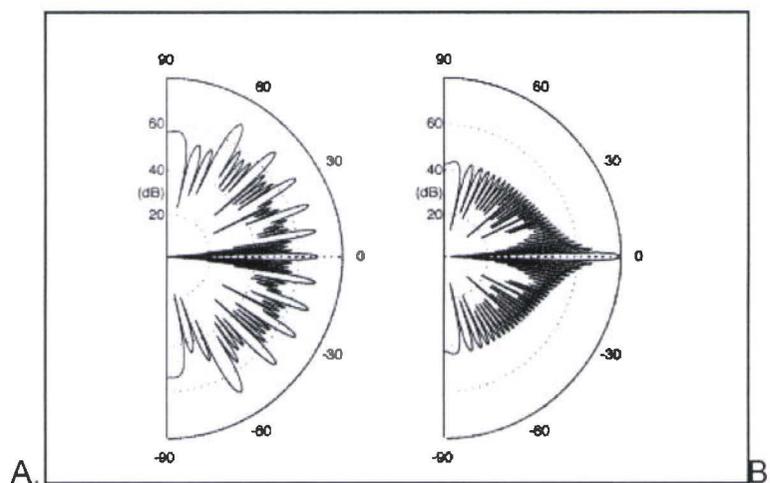


Figura 2.14. Respuesta espacial de un difusor QRD y una superficie plana.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrión Isbert, 1998.

Nivel de difusión producido por A. un difusor Schroeder y B. una pared plana respectivamente.

La energía reflejada por el difusor se dirige en varias direcciones, dependiendo de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras. Para que esta energía reflejada sea lo más uniformemente posible se utiliza la siguiente expresión para generar los valores:

$$S_n = n^2 \text{ mod } p$$

Donde:

- P es un número primo, por ejemplo: 3 5 7 11 23.
- n es un número entero que va desde 0 hasta p-1
- mod es la operación matemática módulo

**A continuación se muestran los valores de
Sn que corresponden al rango de**

p	N																						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3	0	1	1																				
5	0	1	4	4	1																		
7	0	1	4	2	2	4	1																
11	0	1	4	9	5	3	3	5	9	4	1												
13	0	1	4	9	3	12	10	10	12	3	9	4	1										
17	0	1	4	9	16	8	2	15	13	13	15	2	8	16	9	4	1						
19	0	1	4	9	16	6	17	11	7	5	5	7	11	17	6	16	9	4	1				
23	0	4	4	9	16	2	13	3	18	12	8	6	6	8	12	18	3	13	2	16	9	4	1

Tabla 2.1. Sn para distintos p

Fuente: Autor.

A continuación se muestra la vista de distintos difusores con diferentes números primos (p).

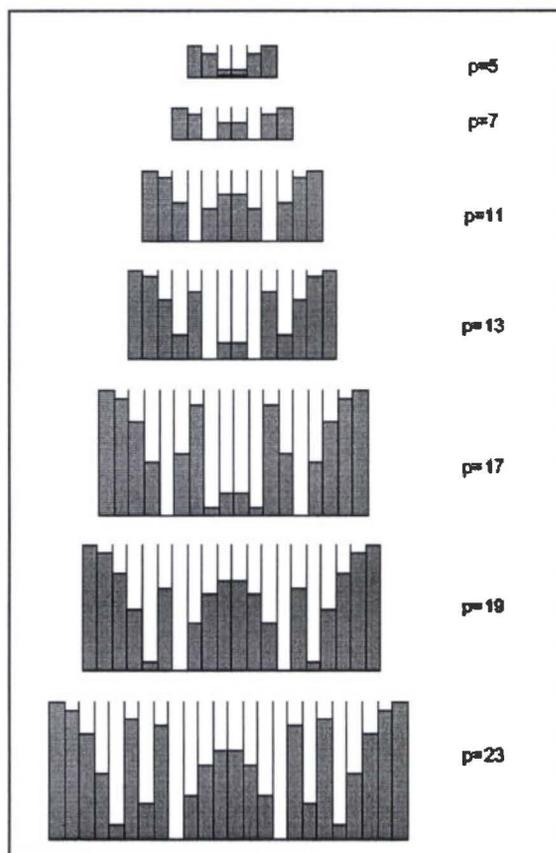


Figura 2.15. Difusores con distinto número primo.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos,

Antoni Carrión Isbert, 1998.

Como se puede notar, una de las características más importantes de los difusores QRD es su simetría.

Se considera a los difusores de Schroeder como un sistema de una dimensión ya que la dispersión de las ondas sonoras reflejadas sobre el ocurren en un plano, mientras que el plano opuesto trabaja como si fuese una superficie plana.

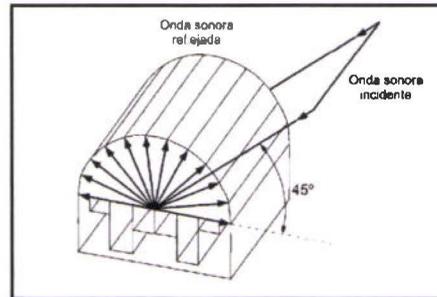


Figura 2.16. Difusión en una dimensión.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos,

Antoni Carrión Isbert, 1998.

Por esta razón se utilizaron divisiones para los dos planos del difusor y así obtener una máxima dispersión del sonido cuando este choque con las superficies del difusor. Es importante tomar en cuenta también que el concepto de un difusor es asumir que no existe pérdida de energía durante el proceso, pero en la realidad la fricción viscosa producida durante la acción no permite que el total de la energía sea reflejada.

Difusores Bidimensionales QRD

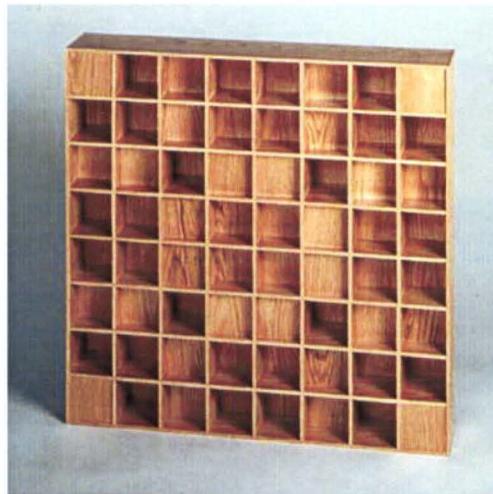


Figura 2.17. Difusor QRD bidimensional.

Fuente: RPG Inc. QRD Diffuser 2D

En una sala o recinto se puede elegir entre un difusor unidimensional o bidimensional, es decir un difusor que genera reflexiones en dos dimensiones. Por medio de un difusor de Schroeder de dos planos, es decir, que genere

reflexiones tanto en el eje x como en z, así como también lóbulos de forma semiesférica, se puede lograr este tipo de difusión. Siempre en estos difusores las divisiones forman pozos de forma cuadrada. El proceso y expresiones utilizadas en el diseño de un difusor bidimensional está basado en fórmulas ya conocidas de difusores unidimensionales, donde la profundidad de los pozos es generada por la expresión:

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

Donde:

- p es un número primo.
- M y n son números que van desde 0 hasta p-1

A continuación se muestra la secuencia para un difusor de 2D donde $p=7$, en este caso los valores n y m empiezan desde 4 para que el valor de profundidad del pozo sea cero en el centro, es un solo período.

Secuencia de un difusor QRD 2D con $p=7$.

4	6	3	2	3	6	4
6	1	5	4	5	1	6
3	5	2	1	2	5	3
2	4	1	0	1	4	2
3	5	2	1	2	5	3
6	1	5	4	5	1	6
4	6	3	2	3	6	4

Tabla 2.2. Secuencia de un difusor QRD

Fuente: Autor.

2.1.10.4. Difusores de raíces primitivas PRD.

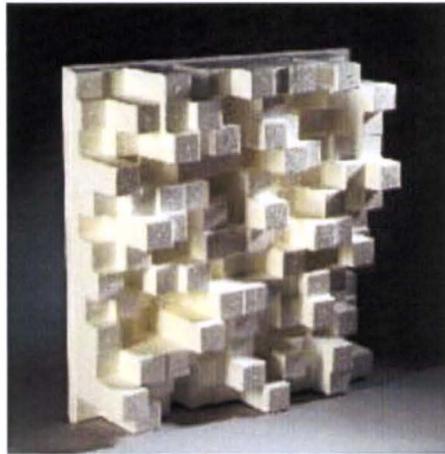


Figura 2.18. Difusor Skyline.

Fuente :RPG Inc. PRD Skyline Diffuser.

Este tipo de difusión utiliza una teoría distinta para la generación de la secuencia de números, de la siguiente forma:

$$S_n = g^2 \text{mod } p$$

Donde:

- P es un número primo
- G es la menor raíz primitiva de p

En la siguiente figura se incluyen diferentes secuencias de raíces primitivas para seis combinaciones entre p y g. Además se nota que terminado el diseño los difusores no mantienen una simetría al igual que los difusores de residuos cuadráticos. Usualmente se utilizan divisiones de metal para mantener la integridad de cada pozo.

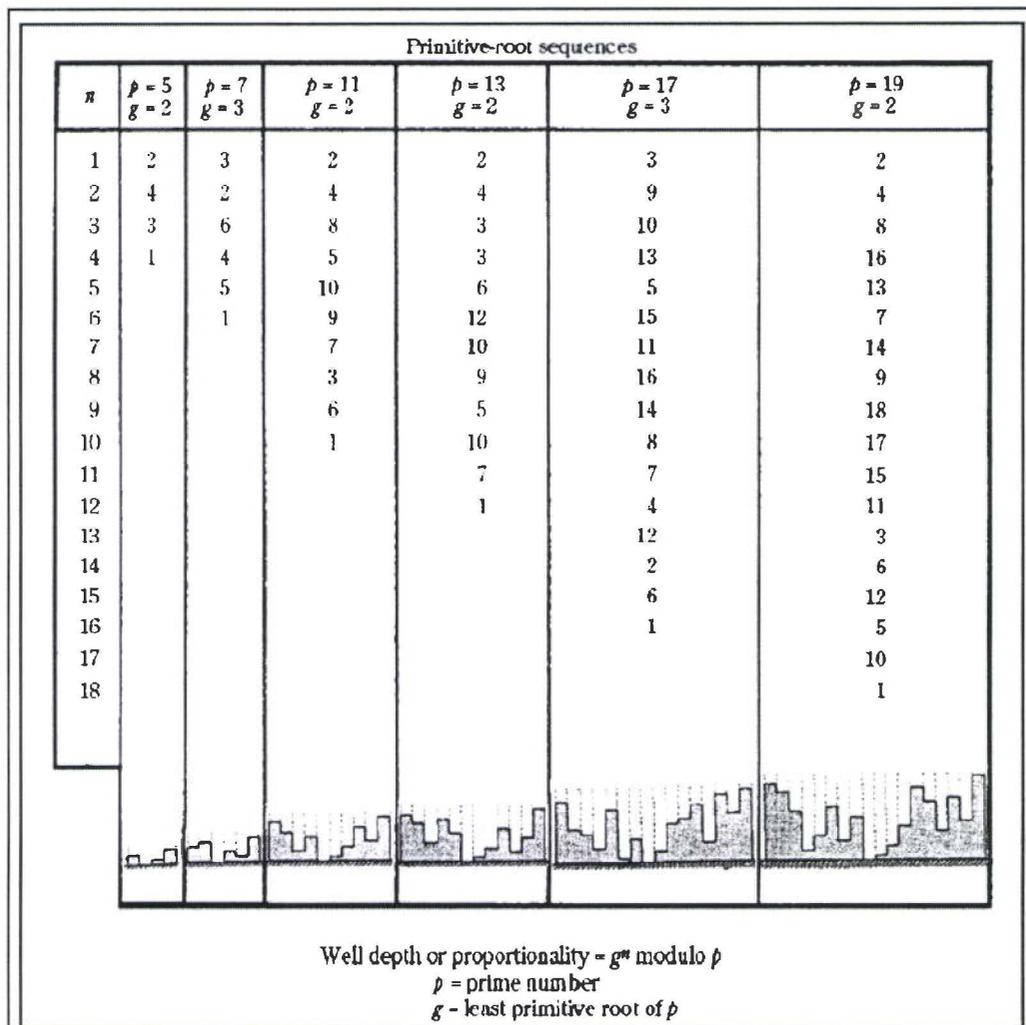


Figura 2.19. Secuencias de raíces primitivas.

Fuente: *Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos*, Antoni Carrión Isbert, 1998.

Secuencias generadas con diferentes p y g , nótese que los difusores no son simétricos.

Este tipo de difusor es utilizado para mejorar la calidad acústica, con ellos la reflexión especular se torna en cero, como se observa en el gráfico que corresponde a la incidencia de una onda de forma perpendicular, a continuación:

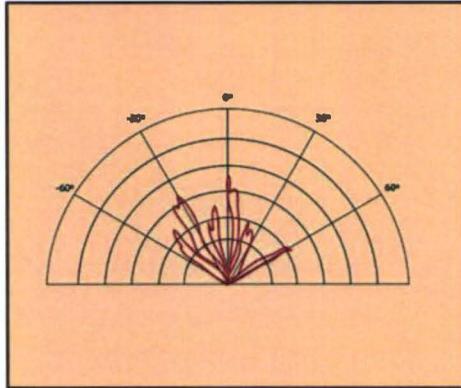


Figura 2.20. Difusión generada por un PRD en incidencia normal.

Fuente: Autor.

2.1.10.5. Difusores Policilíndricos.

Este tipo de difusores son superficies de materiales lisos, que funcionan como reflectores de un frente de onda. Su funcionamiento se basa en acústica geométrica, dependiendo de su curvatura pueden funcionar como reflectores o como difusores. Con valores del radio de curvatura menores a 5m la superficie se convierte en un difusor.

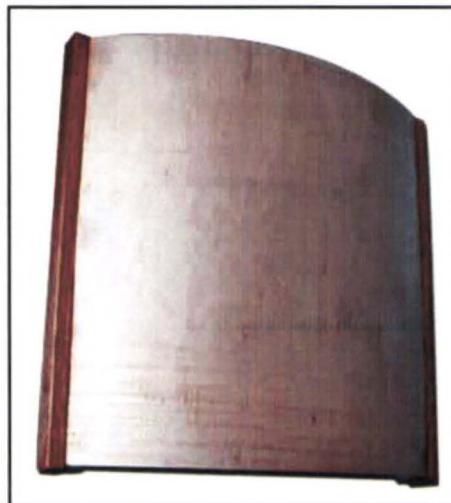


Figura 2.21. Difusor Policilíndrico.

Fuente: Acústica Integral difusor policilíndrico.

2.1.11. Acústica Geométrica.

Cuando las dimensiones de una sala o recinto son grandes se puede tratar al sonido de forma geométrica, tomando en cuenta que las ondas que se analizan

por medio de estas teorías son generalmente de frecuencias altas, o frecuencias con longitud de onda menor. Para frecuencias bajas es necesario analizar una sala o recinto por medio de modos normales de vibración, aunque es útil en salas pequeñas.

La geometría de una sala es importante para conocer de donde provienen las reflexiones, dentro de este campo es necesario saber los tipos de reflexiones producidas, a continuación se muestra gráficamente los tipos de reflexiones producidas durante el transcurso del tiempo.

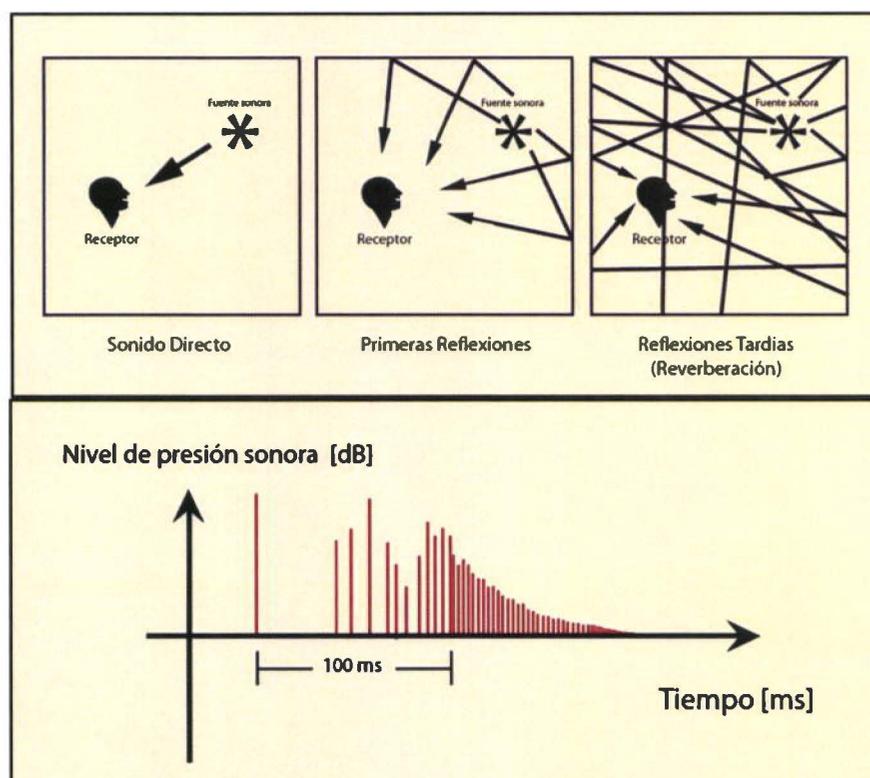


Figura 2.22. Nivel de presión sonora de primeras reflexiones y reflexiones tardías.

Fuente: Autor.

Las ondas que se analizan por medio de la acústica geométrica son todas las reflexiones, las mismas que pueden ser claramente visibles en un espectro, ya que poseen menor nivel energético que el primer frente de onda y mayor nivel energético que las reflexiones generadoras de reverberación.

Las reflexiones especulares, analizadas forman el pilar fundamental de la acústica geométrica, y asociándolas al comportamiento de rayos se puede decir que el resultado final de un análisis por acústica geométrica puede proporcionar información muy válida, es importante tomar en cuenta y considerar fuentes espejo y rayos sonoros.

La percepción de las primeras reflexiones es bastante difícil de ser concebida por el oído humano, a menos que existan grandes tiempos de arribo entre cada una de ellas. Después de conocer y entender el funcionamiento del oído se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- De 0 a 30 ms no se logra diferenciar entre dos o más sonidos, más bien se percibe como un solo sonido con un nivel más elevado.

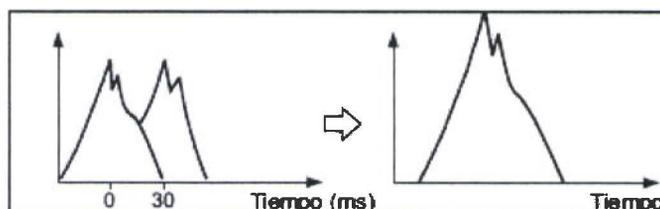


Figura 2.23. Percepción del sonido de 0 a 30ms.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrión Isbert, 1998.

- A partir de 50 ms el oído humano tiene la capacidad de diferenciar a dos sonidos y se comienza a percibir como un eco.

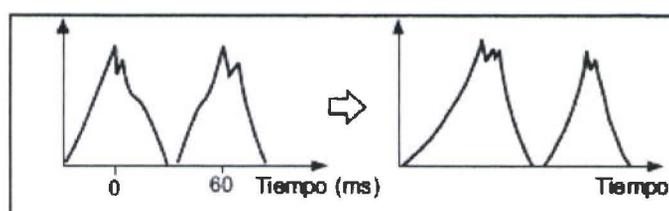


Figura 2.24. Percepción del sonido a partir de 50ms.

Fuente: Diseño acústico de Espacios Arquitectónicos, Antoni Carrión Isbert, 1998.

Hoy en día en una sala tratada acústicamente se pueden encontrar desde superficies planas, cuñas anecoicas, pirámides, cilindros etc.

A continuación se presentan diferentes tipos de superficies, y como su forma afecta a un frente de onda, pueden aparecer cambios como difracción del

sonido, difusión del sonido, redirección o reflexiones especulares. Los frentes de onda son activos mientras que las reflexiones son reactivas.

2.1.11.1. Superficies planas.

Este tipo de superficies se encuentran en la mayor parte de construcciones típicas, por lo que es la base de la cual se debe partir para posteriormente entender otro tipo de situaciones.

Tomando como ejemplo un panel plano, no absorbente o totalmente reflectante, se puede generar una reflexión de este tipo:

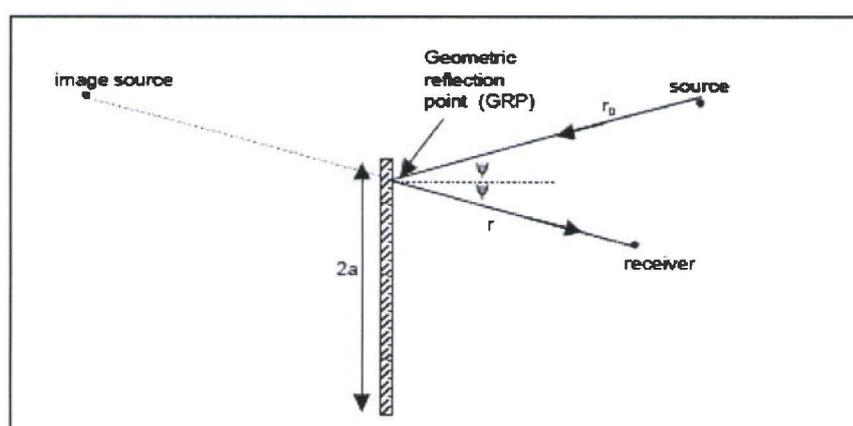


Figura 2.25. Incidencia del sonido sobre una superficie plana

Fuente: Acoustic Absorbers and Diffusers, Trevor J. Cox and Petter D'Antonio, 2009.

Se puede notar que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, así mismo la energía reflejada depende de la longitud de onda que choca con el panel. La dispersión del sonido producida por una superficie plana se puede mostrar en un diagrama polar de la siguiente forma, donde el frente de onda proviene desde la parte frontal central.

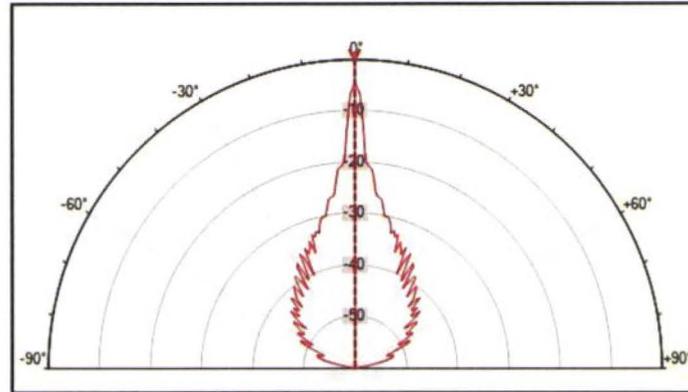


Figura 2.26. Respuesta espacial de un panel plano.

Fuente: Autor. AFMG Reflex software.

2.1.11.2. Superficies Triangulares y pirámides.

Superficies con formas triangulares y piramidales pueden brindar muchas posibilidades de dispersión al sonido, dependiendo de su geometría. Mediante teoría de rayos se puede observar su comportamiento, tomando en cuenta la frecuencia y el ángulo de incidencia del mismo.

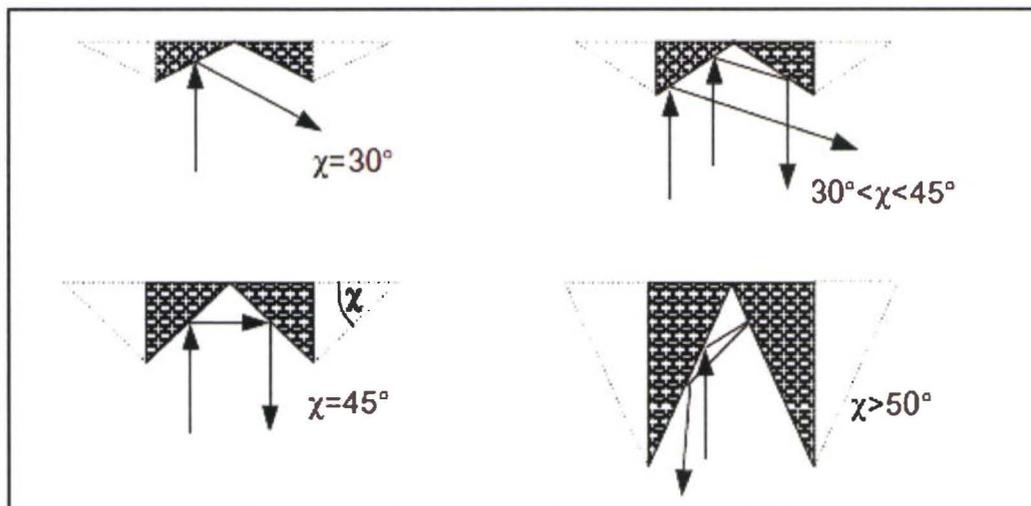


Figura 2.7. Analisis de pirámides por teoría de rayos.

Fuente: *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Trevor J. Cox and Peter D'Antonio, 2009.

La figura 2.27. muestra distintas características de dirección, efectuadas por las primeras reflexiones, las reflexiones difusas y su respuesta especular. Para poder predecir de mejor forma estas características es necesario utilizar modeladores BEM (Boundary Element method), o métodos de elementos finitos, de esta forma se puede obtener parámetros de arreglos de pirámides

más precisos. Así mismo el nivel de dispersión y sus direcciones se pueden notar en un grafico de respuesta polar donde se muestra Nivel de dispersión de un arreglo de dos triángulos desde 3 ángulos diferentes 30° , 40° y 45° . De izquierda a derecha.

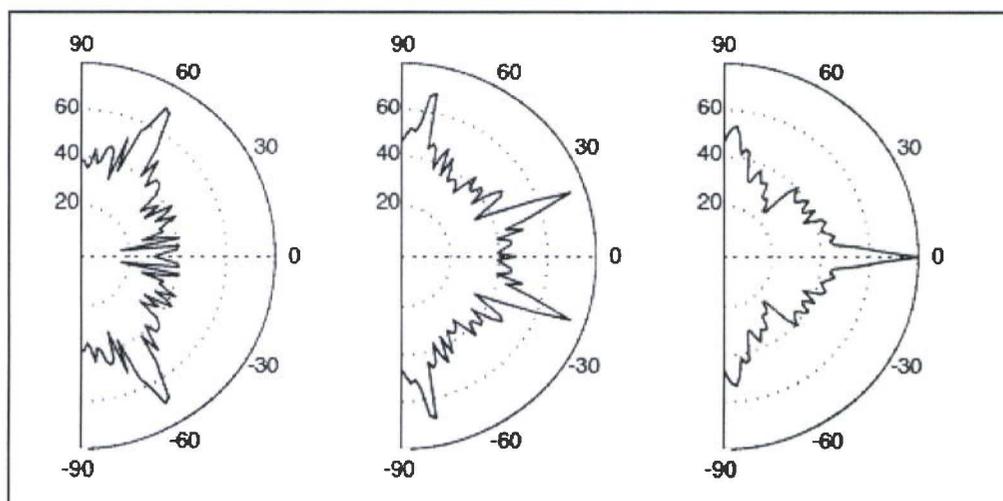


Figura 2.28. Respuesta espacial de arreglos de pirámides.

Fuente: Acoustic Absorbers and Diffusers, Trevor J. Cox and Petter D'Antonio, 2009.

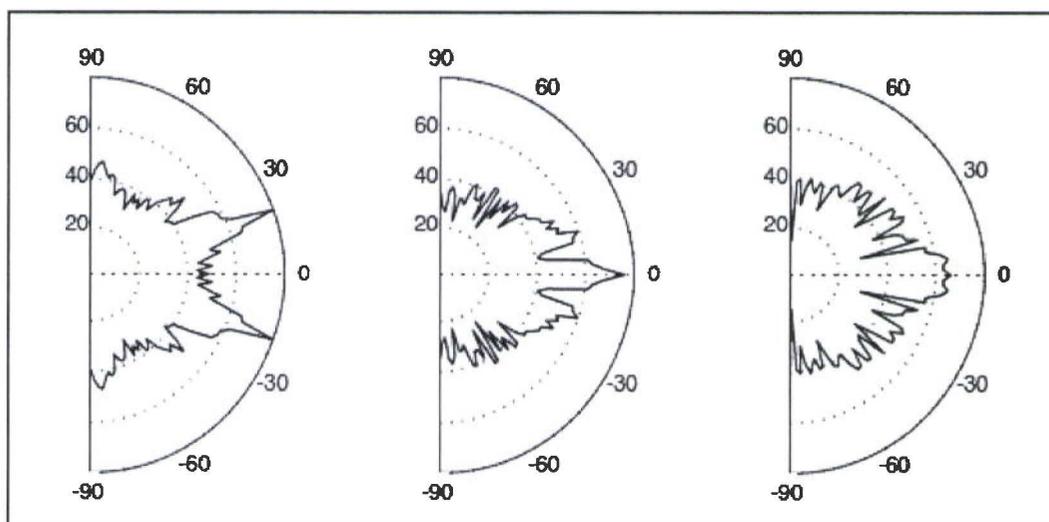


Figura 2.29. Respuesta espacial de arreglos de pirámides

con distintos ángulos de incidencia.

Fuente: Acoustic Absorbers and Diffusers, Trevor J. Cox and Petter D'Antonio, 2009.

Nivel de dispersión de un arreglo de dos triángulos desde 3 ángulos diferentes 50° , 80° y 85° . De izquierda a derecha.

2.1.11.3. Arreglos de triángulos.

Debido a que la utilización de un solo triángulo en una sala no es conveniente, por una baja superficie, se consideran arreglos de triángulos para cubrir grandes superficies. A continuación se muestra en los gráficos polares, el nivel de difusión provocado por distintas superficies de triángulos con un ángulo de 15° . Se pueden comparar, una superficie de un solo triángulo, un arreglo de cinco triángulos con paneles planos del mismo tamaño.

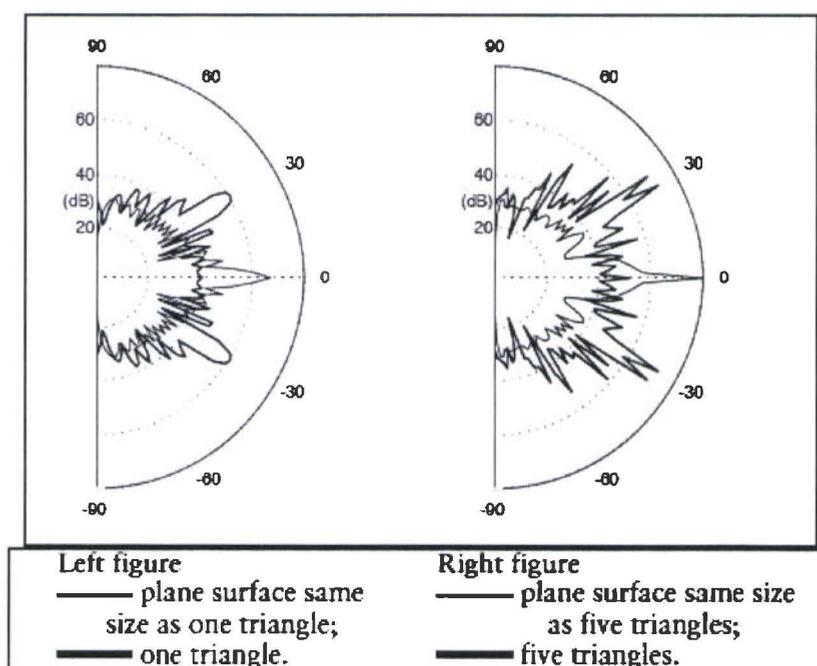


Figura 2.30. Respuesta espacial de un triángulo y un arreglo de triángulos.

Fuente: *Acoustic Absorbers and Diffusers*, Trevor J. Cox and Peter D'Antonio, 2009.

Nivel de dispersión de un triángulo, un arreglo de triángulos y superficies planas.

2.1.11.4. Arcos Cóncavos.

La utilización de elementos cóncavos en salas suele ser un problema, ya que las reflexiones generadas por este tipo de superficies se concentran en un foco central, es decir generan una focalización sonora. Aún así este comportamiento puede ser útil ya que se pueden utilizar arcos cóncavos a distancias más alejadas, como techos, lo cual genera una mejor dispersión del sonido. Como se muestra en la figura:

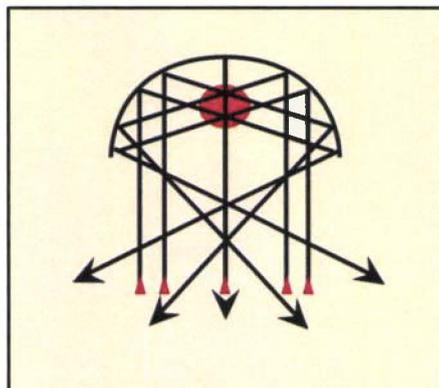


Figura 2.31. Reflexiones sobre un arco cóncavo.

Fuente: Autor.

Este tipo de arcos puede ser útil siempre que se tome en cuenta la posición de la fuente, el receptor y el radio del arco. Además para reducir el foco de concentración se pueden utilizar elementos absorbentes, pero así dejaría de ser un difusor y pasaría a ser una superficie mixta.

2.1.11.5. Arcos Convexos

Entre los tipos de arcos convexos que se pueden generar, los más importantes son los cilindros y las esferas que trabajan en dos planos, los cuales generan dispersión en un solo plano y una dispersión hemisférica respectivamente. A simple vista parecería que un cilindro puede ser el mejor diseño para un difusor, pero no es el caso, ya que sus medidas no suelen ser aceptadas por arquitectos ya que ocupan muchos espacios, por lo que como solución se pueden utilizar arreglos de varios cilindros, tomando en cuenta que la respuesta polar dependerá del arreglo de los mismos. Otra de las soluciones podría ser aplanar el cilindro pero esto produciría que la dispersión en ciertos ángulos se pierda en cierta cantidad, la misma que depende de los cambios.

Además de este tipo de complicaciones, existen problemas con la fidelidad del sonido, los cilindros largos y los semicilindros producen filtro peine similar al producido por superficies planas, donde existen sumas y cancelaciones en todo el espectro, que podrían generar una metalización de la voz humana.

2.1.12. Parámetros de un difusor

Para obtener el mejor provecho de un sistema acústico, en este caso de un difusor, es necesario conocer detalladamente sus parámetros. Estas especificaciones generalmente se encuentran detalladas en una ficha técnica. Los parámetros indispensables son los siguientes:

2.1.12.1. Detalles Básicos

- *Descripción:* Detalla el tipo de difusor y en que se basa su diseño.
- *Material:* Detalla la materia prima con la cual se construyó el sistema (madera, plástico, metal etc...)
- *Tipo de resistencia al fuego:* Detalla la capacidad de resistencia del sistema al fuego, bajo una norma determinada.
- *Aplicaciones:* Lugares y condiciones en las que el sistema puede funcionar correctamente.
- *Dimensiones en metros y/o pulgadas.*
- *Peso*
- *Colores*
- *Instalación*

2.1.12.2. Detalles Técnicos acústicos

Además de estos parámetros los más necesarios para el diseño acústico y un buen performance son los siguientes:

- ***Coefficiente de absorción:*** Muestra la cantidad de energía sonora que se pierde en la reflexión de una onda incidente sobre el material, depende de la frecuencia, el ángulo de incidencia y el coeficiente de absorción del material.
- ***Coefficiente de difusión:*** Este coeficiente muestra como de manera uniforme la onda que choca con el difusor se refleja en todas las direcciones, [Cox y D'Antonio]. Se pueden obtener valores entre 0 a 1, donde 0 indica que existe una "única" dirección del sonido reflejado y 1 cuando el sonido es reflejado simétricamente en todas las direcciones.
- ***Respuesta espacial:*** Este gráfico muestra el nivel de presión del sonido reflejado por el difusor en comparación con la onda incidente, así

también se puede ver las direcciones hacia donde se dirigen las reflexiones producidas por el sistema.

- **Coeficiente de dispersión:** Se calcula gracias a la teoría de Mommertz. Muestra una comparación entre la energía reflejada no especular con la energía total. Así cuando se tiene 0 indica que toda la energía incidente es reflejada especularmente mientras que cuando se tiene valores cercanos a 1 la energía está siendo reflejada de forma no especular. El coeficiente de dispersión depende de la frecuencia y no contiene información sobre cuán uniforme es reflejada la energía.

3. Capítulo III.

3.1. Descripción de la situación propuesta.

Durante el diseño o acondicionamiento acústico de locales se utilizan productos que ayudan a que una sala obtenga mejores parámetros como T60, difusión, inteligibilidad, claridad entre otros, los cuales son fundamentales para obtener una buena calidad del sonido. El problema es que al incidir el sonido con superficies lisas y reflectantes, como por ejemplo hormigón pintado se generan reflexiones especulares que concentran la energía reflejada en un solo punto. Para resolver este problema se acude a las reflexiones difusas que son causadas cuando el sonido choca con superficies irregulares y el es reflejado de forma más pareja, lo que hace que para el escucha obtenga una mejor calidad acústica, en salas de concierto esto es válido a partir de 700Hz.

Por esta razón se decide por medio del presente proyecto incursionar en la búsqueda de un nuevo diseño de difusor acústico distinto a los ya existentes visual y auditivamente. Es común encontrar en estudios de grabación y salas de conciertos, difusores, los mismos que además de apoyar a la mejora de la sonoridad de la sala brindan un diseño visual atractivo. Los difusores se basarán en acústica geométrica y teoría de rayos estudiando como las ondas y sus reflexiones se propagan en un recinto a través del tiempo, basándose en demostraciones de carácter físico e hipótesis de reflexiones especulares que constituyen el pilar fundamental para la aproximación más cercana y real del comportamiento de ciertas ondas. Para ello se estudiará desde los materiales a ser utilizados como también la forma, donde se utiliza el software AFMG Reflex de la empresa "Ahnert Feistel Media Group", el cual simula las reflexiones y arroja coeficientes de superficies de en 2 dimensiones.

3.1. Criterios y búsqueda de forma del difusor

Para definir una forma específica para el prototipo a ser construido se utiliza como herramienta primordial a la arquitectura de elementos, formas y sistemas. La acústica geométrica forma la base fundamental para la creación del difusor ya que por medio de la teoría de rayos se podrá predecir un comportamiento de

la superficie. La experimentación con formas irregulares o geométricas es también lo interesante del proyecto ya que se busca concebir un nuevo prototipo de difusor para ello se busca un atractivo estético y una excelente funcionalidad acústica. Se puede evaluar gran cantidad de formas que pueden terminar siendo difusores acústicos pero para este proyecto lo que se realizó como primer paso es el diseño cuatro distintas formas específicas, las que posteriormente serán analizadas y comparadas con parámetros acústicos, por medio del software AFMG reflex donde se mostraran los parámetros de manera más específica y detallada, para de esta manera tomar la decisión de construir solo uno de los cuatro el cual posea las características de: Buena difusión, facil montaje, diseño atractivo, bajo coste de producción.

A continuación se muestran los 4 diseños concebidos, a manera de boceto, realizados en el software sketch up pro 8, que es un software diseñado por los creadores de google donde se pueden realizar graficaciones en 3 dimensiones:

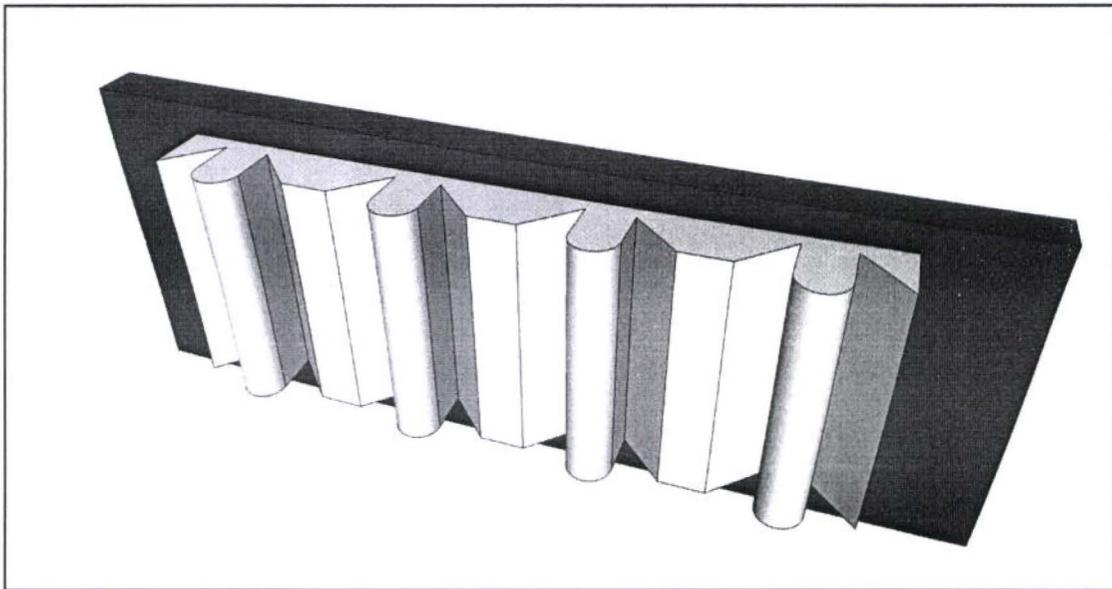


Figura 3.1. Diseño A.

Fuente: Autor, Sketch up 8 Pro.

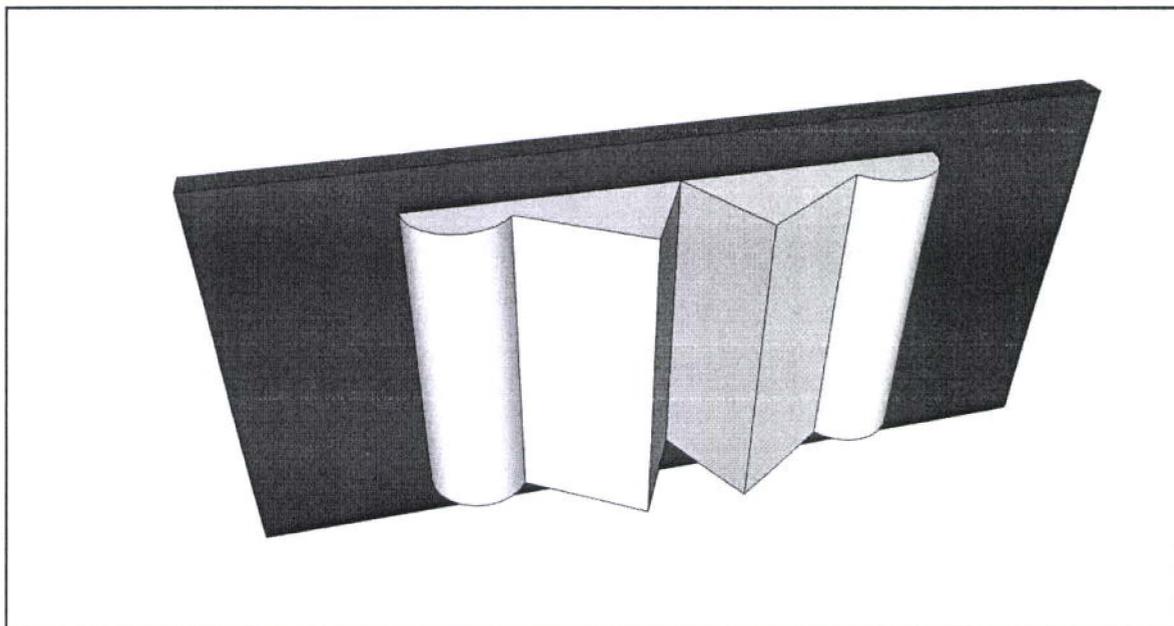


Figura 3.2. **Diseño B.**

Fuente: Autor, Sketch up 8 Pro.

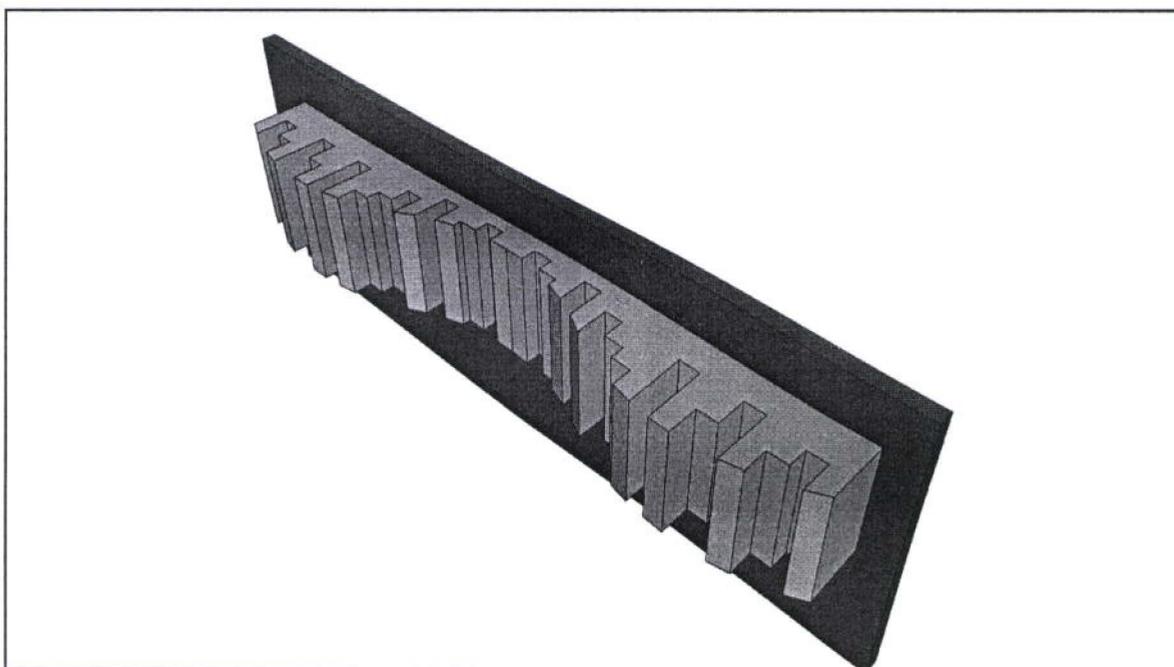


Figura 3.3. **Diseño C.**

Fuente: Autor, Sketch up 8 Pro.

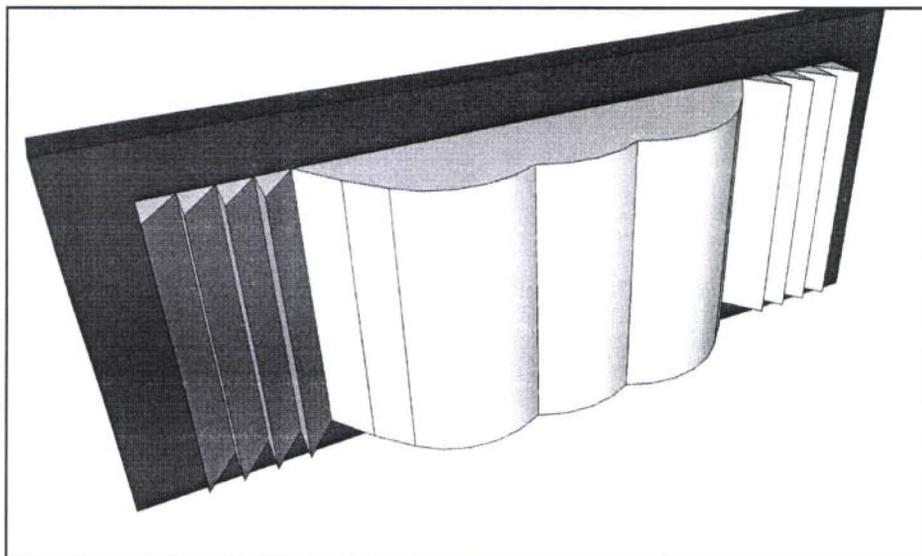


Figura 3.4. Diseño D.

Fuente: Autor, Sketch up 8 Pro.

3.3. Descripción del Software AFMG Reflex.

AFMG Reflex es un software de simulación acústica creado por la empresa alemana "Ahnert Feistel Media Group", líder mundial en software de simulación para los profesionales del audio y la acústica, permite evaluar superficies de distintas formas y medidas, ubicadas en una sala anecóica.

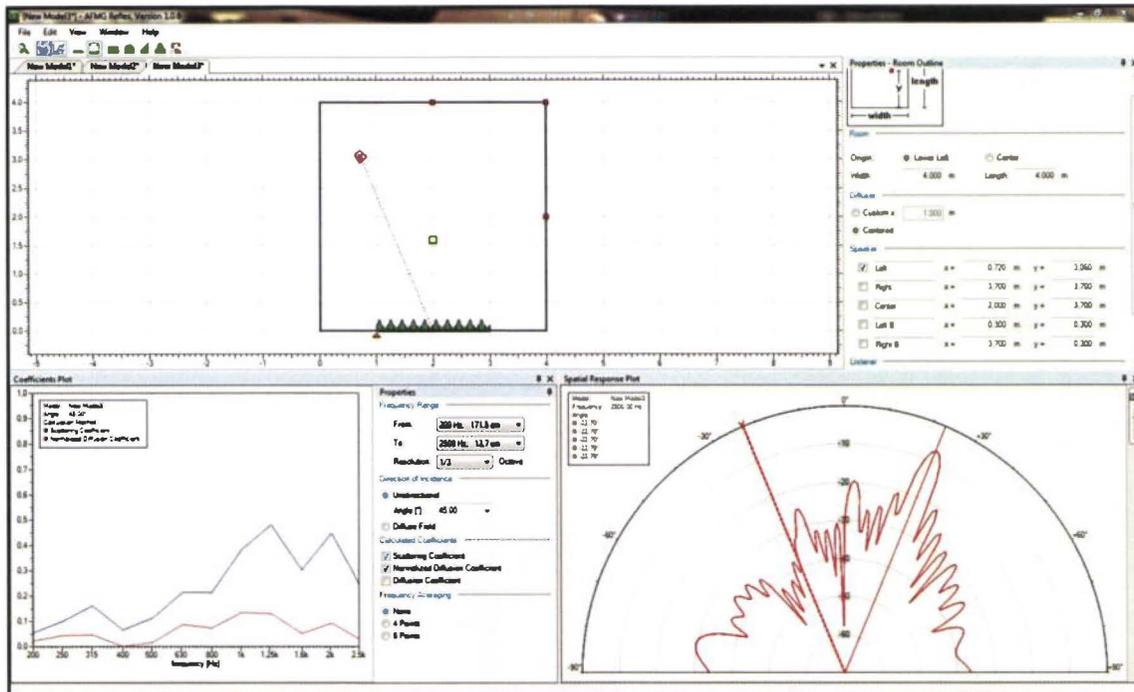


Figura 3.5. Interface gráfica de AFMG réflex software.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

El programa trabaja en dos dimensiones ((x:y) donde toma el eje de las z como infinito), el cual permite modelar el comportamiento de las reflexiones producidas por una superficie específica, posteriormente entrega datos importantes durante la etapa de diseño del difusor. Entre los parámetros que el software es capaz de calcular son: Coeficiente de dispersión, coeficientes de difusión, respuesta espacial. Los cuales son obtenidos por operaciones matemáticas, BEM (Boundary Element Method), teoría de Mommertz, Vlorlander, Cox y D'Antonio, normativa ISO 17497-1 y ISO 17497-2.

Finalmente las graficas se muestran en diferentes ángulos de incidencia así como también por frecuencias, lo cual ayuda al operador a entender de manera gráfica el desempeño de la superficie en estudio.

3.3.2. Procedimiento de evaluación para los prototipos de difusores.

Para obtener una visualización más amplia y concreta del desempeño de cada uno de los cuatro diseños, se han realizado graficas de respuesta espacial de cada diseño donde se muestra la incidencia de una onda desde 5 puntos

distintos los que obtienen los nombres de: Center, Left, Right, Left B, Right B. Esto considerando una sala de una sala de 2,5m x 5m.

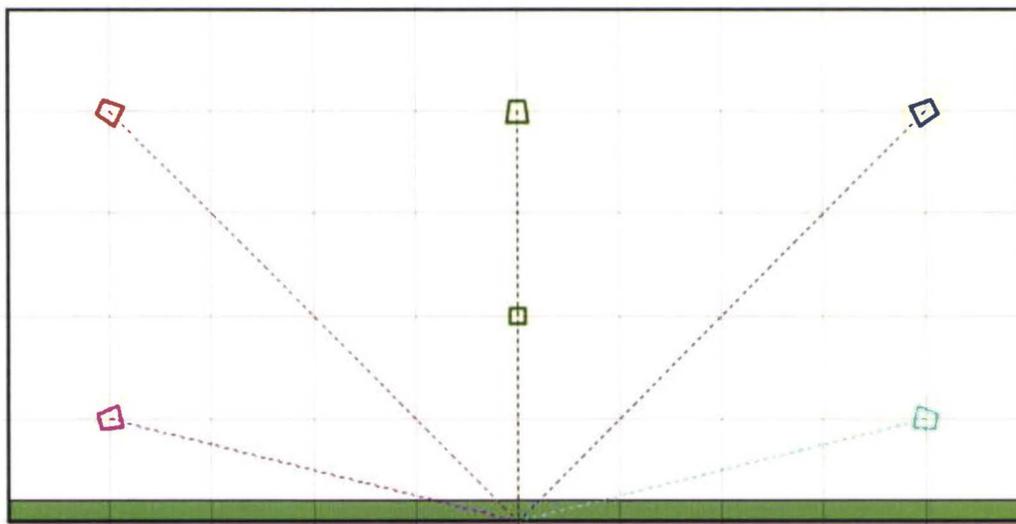


Figura 3.6. Disposición de 5 diferentes altavoces

L(rojo),R(azul),C(verde),LB(fucsia),RB(celeste).

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

De igual forma un color específico el mismo que coincide con las gráficas de la respuesta espacial, la misma que muestra las reflexiones producidas en diferentes ángulos de incidencia.

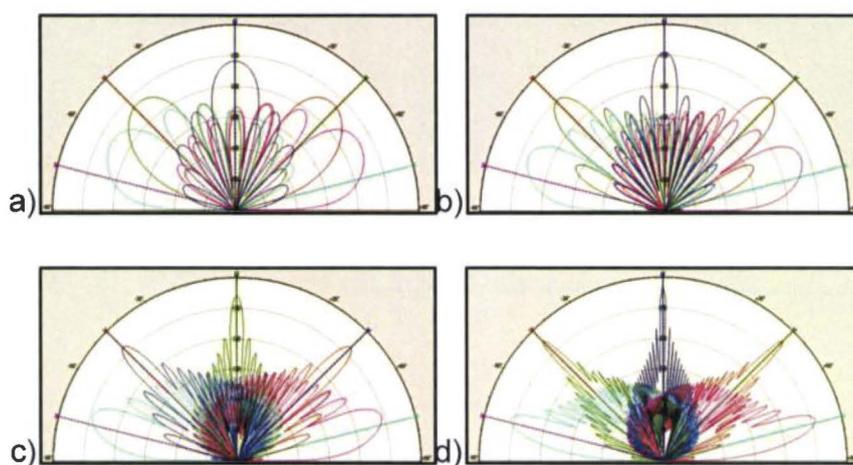


Figura 3.7. Respuesta espacial de una superficie plana (sin difusor)

/a) 200Hz,b) 500Hz,c) 1000Hz,d) 2000Hz.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

Finalmente se muestra una grafica donde se aprecia los coeficientes de dispersión y difusión para cada difusor en función de la frecuencia.

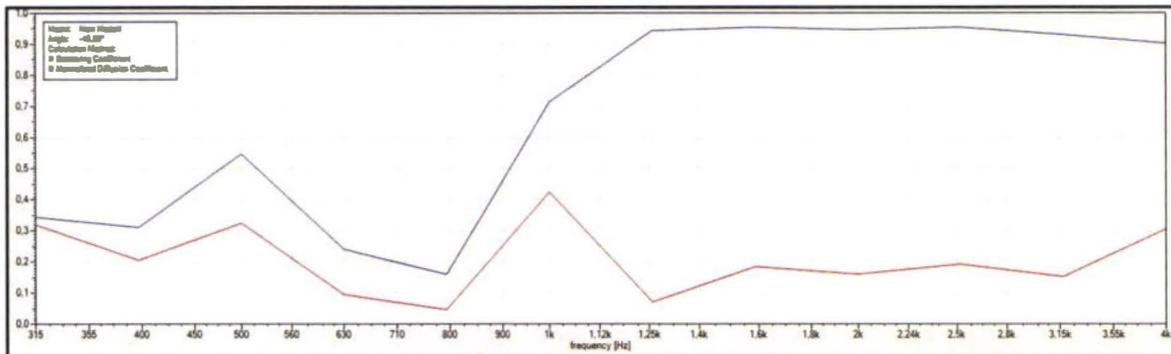


Figura 3.8. Línea azul: Coeficiente de dispersión / Línea roja: Coeficiente de Difusión Normalizado. Desde 315Hz a 4kHz.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4. Capítulo IV.

4.1. Implementación de los Diseños en AFMG Reflex y evaluación de los prototipos.

4.1.1. Diseño A.

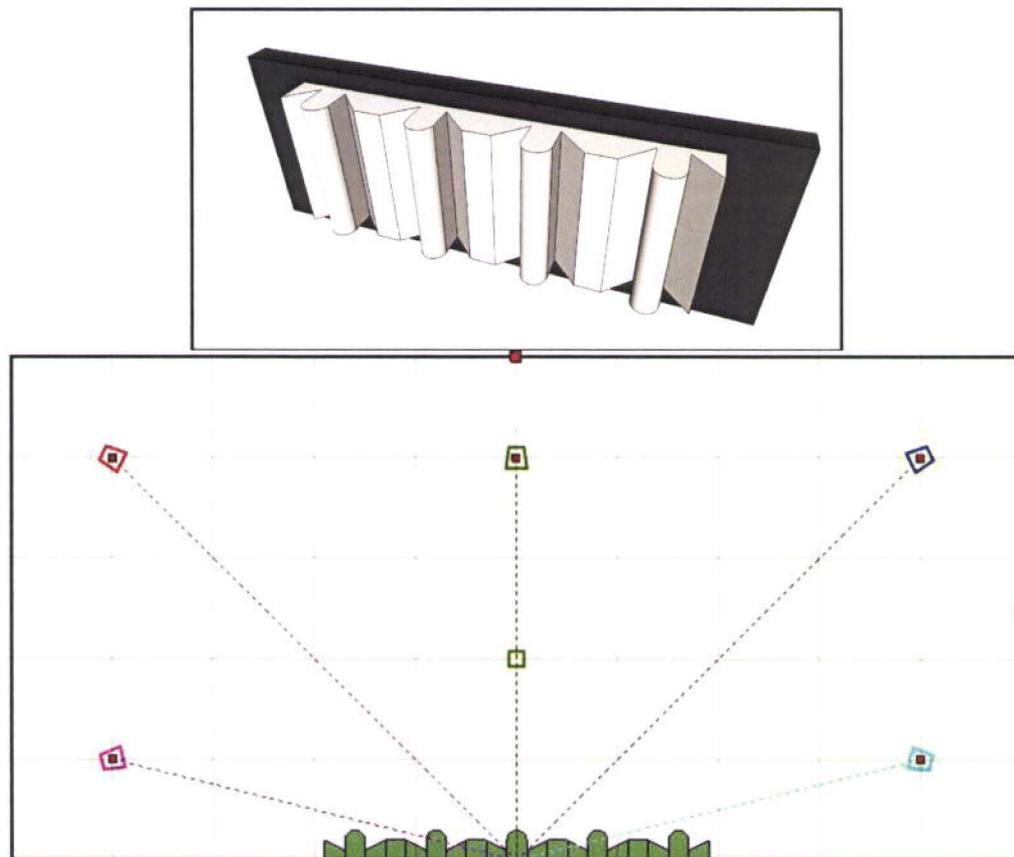


Figura 4.1. Disposición del difusor A y fuentes en la sala.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.1.1. Descripción.

Este diseño consta de una superficie irregular con pozos triangulares y salientes redondeados. Está dividido en 19 módulos con sus respectivas formas cada uno de un ancho de 10cm, lo que forma una superficie total de 1,90m en el eje x. Además posee variaciones de profundidad entre 5 a 15cm, como se muestra a continuación:

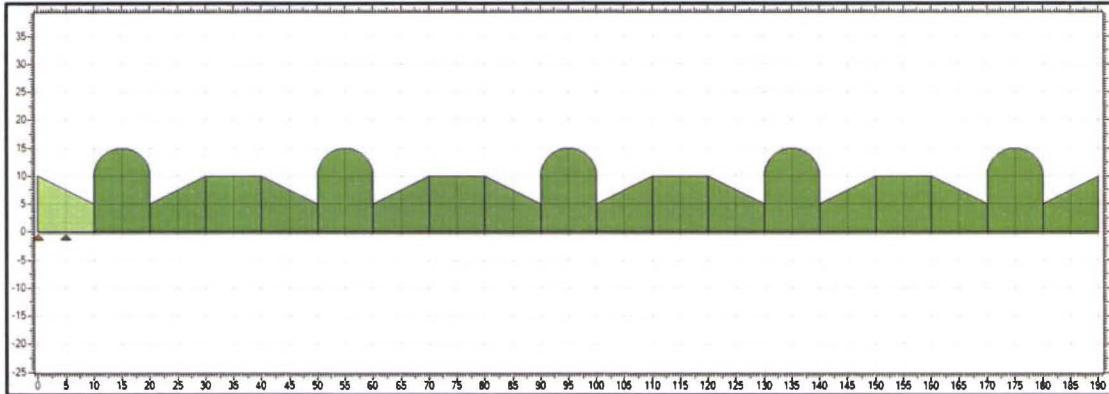
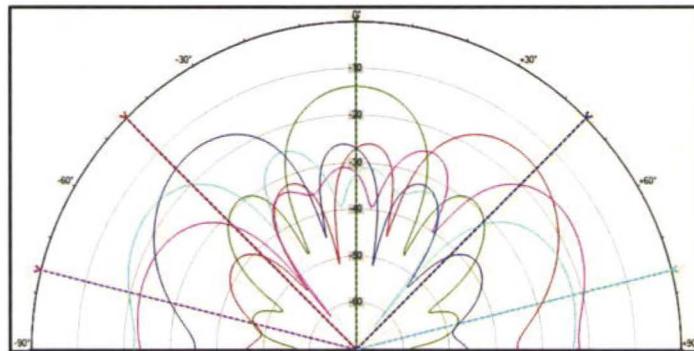


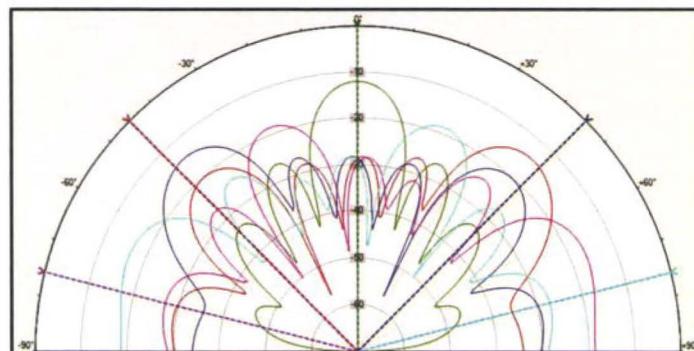
Figura 4.2. Medidas del difusor A en cm.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

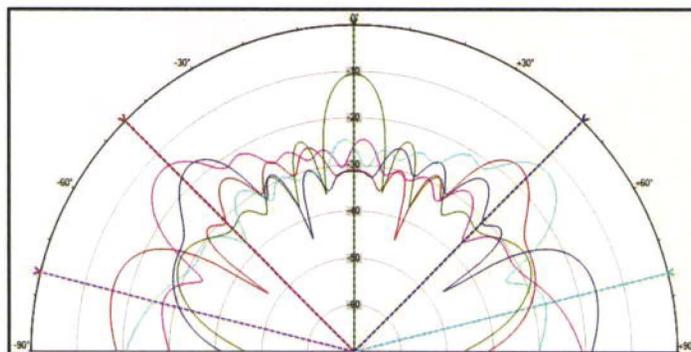
4.1.1.2. Respuesta espacial.



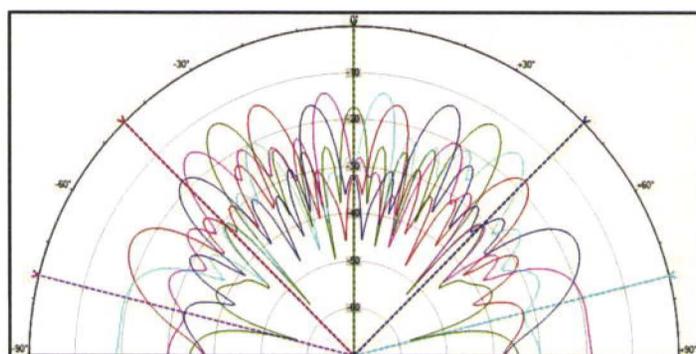
Frecuencia: 400Hz con distintos ángulos de incidencia.



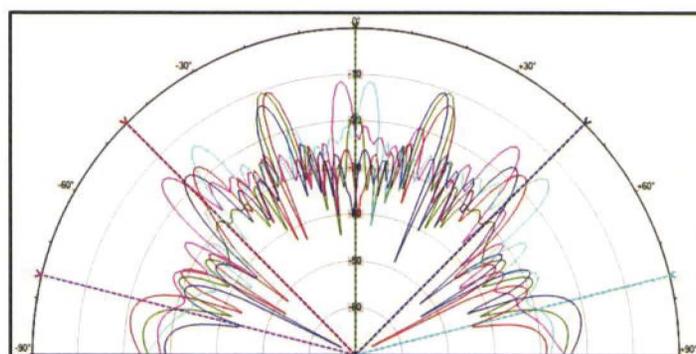
Frecuencia: 630Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1000Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1600Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 2500Hz con distintos ángulos de incidencia.

Figura 4.3. Respuestas espaciales A.

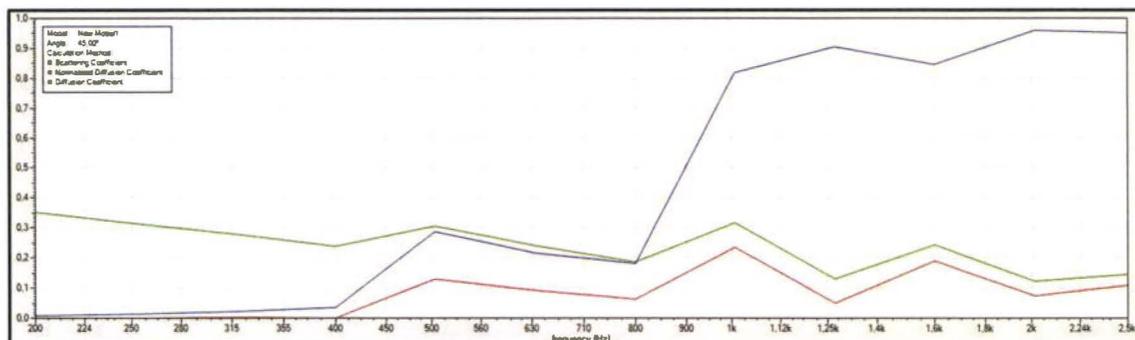
Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.1.3. Gráfica de Coeficientes.

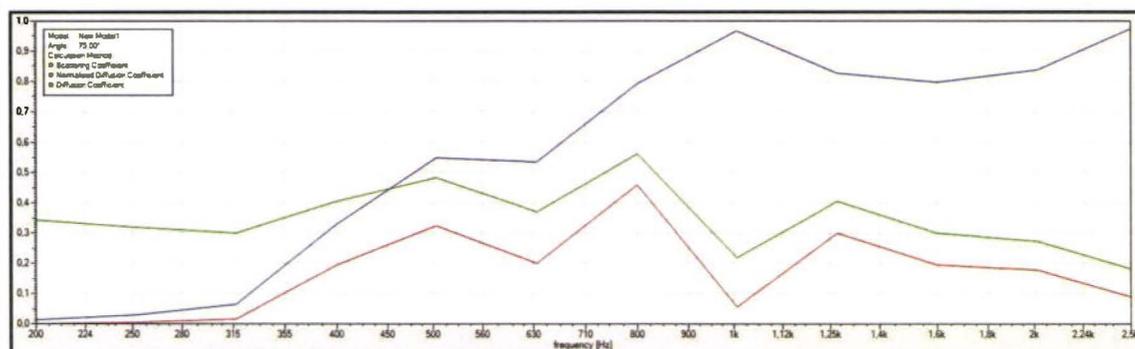
Línea Azul: Coeficiente de dispersión.

Línea Verde: Coeficiente de difusión

Línea Roja: Coeficiente normalizado de difusión.



Detalle de coeficientes a 45°



Detalle de coeficientes a 75°

Figura 4.4. Gráfica de coeficientes A.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.1.4. Observaciones.

En los diagramas polares se puede notar una muy buena dispersión del sonido desde bajas frecuencias, no obstante existe una caída bastante grande en 1000Hz en el coeficiente de difusión. Se puede decir que la curva de coeficiente de difusión normalizado es muy irregular y los coeficientes tienden a decaer en altas frecuencias, así mismo la difusión proporcionada con un ángulo de incidencia de 45° es extremadamente baja, lo cual no permite mejorar la sonoridad en los brillos de una sala o recinto. Aún así el difusor puede corregir ciertas fallas, como la eliminación de superficies paralelas en una sala,

realizando arreglos con varios difusores. No obstante el diseño no brinda las cualidades que se busca en cuanto a difusión óptima en altas frecuencias.

4.1.2. Diseño B.

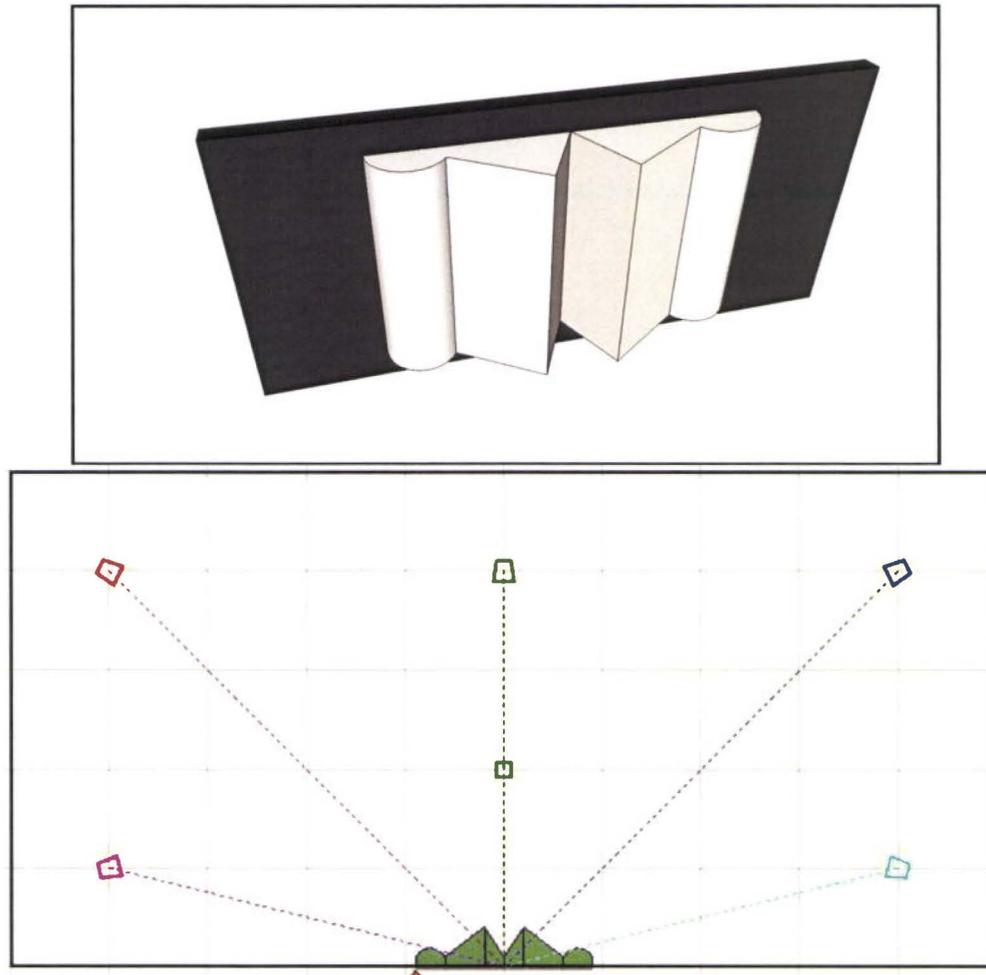


Figura 4.5. Disposición del difusor B y fuentes en la sala.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.2.1. Descripción.

Este diseño cuenta con dos superficies convexas en sus costados y dos triángulos unidos a ellas, los mismos que forman un pozo triangular en el centro del prototipo. Su medida es de 90cm como se muestra en la gráfica.

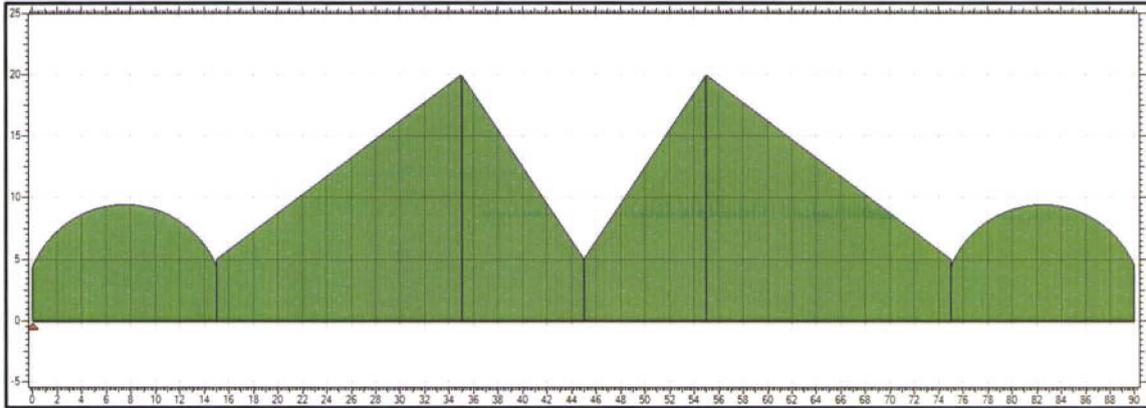
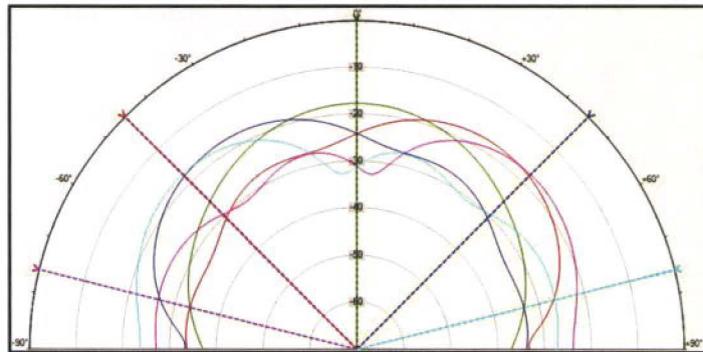


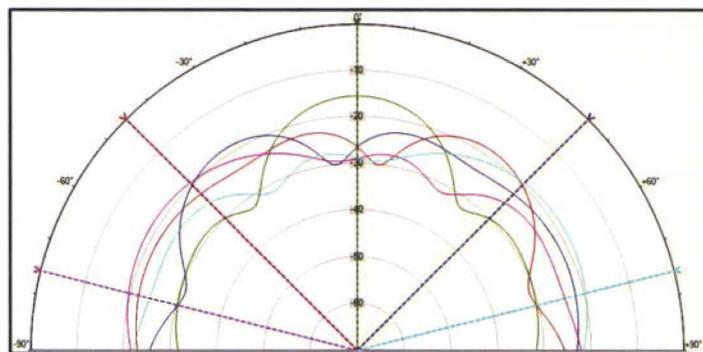
Figura 4.6. Medidas del difusor B en cm.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

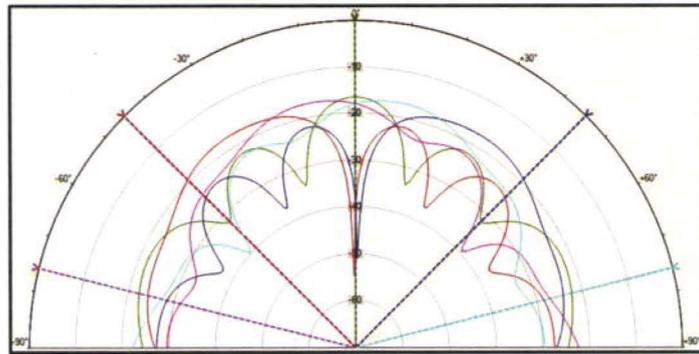
4.1.2.2. Respuesta Espacial.



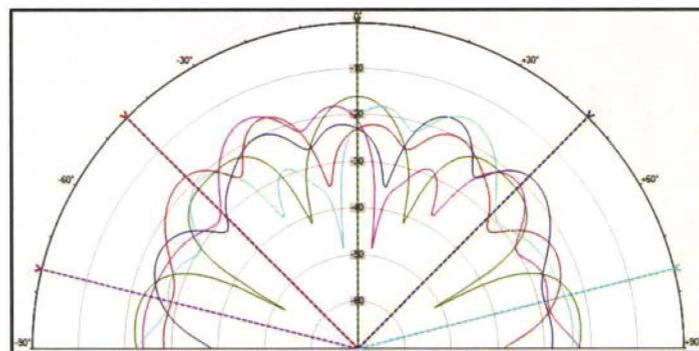
Frecuencia: 400Hz con distintos ángulos de incidencia.



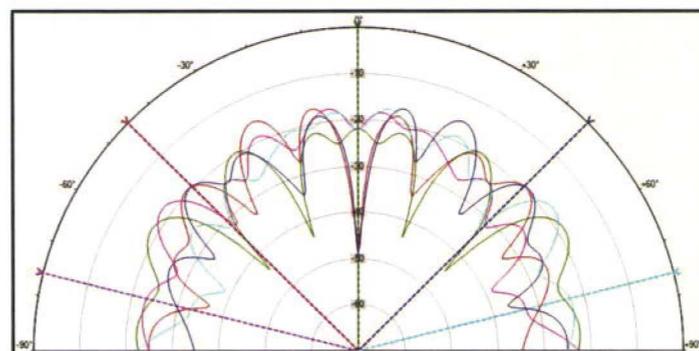
Frecuencia: 630Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1000Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1600Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 2500Hz con distintos ángulos de incidencia.

Figura 4.7. Respuestas espaciales B.

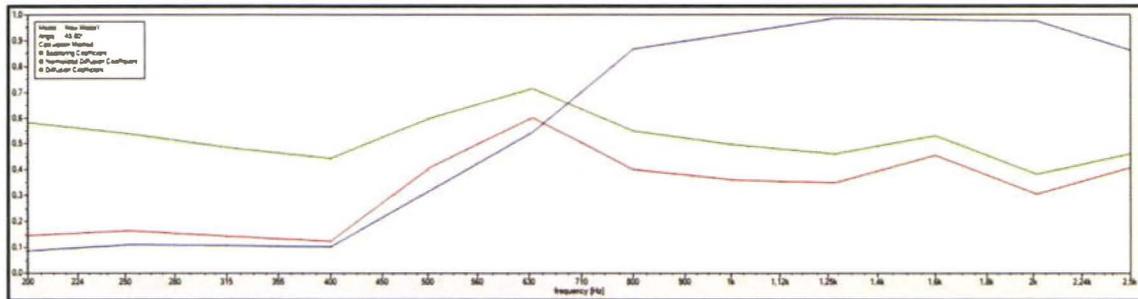
Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.2.3. Gráfica de Coeficientes.

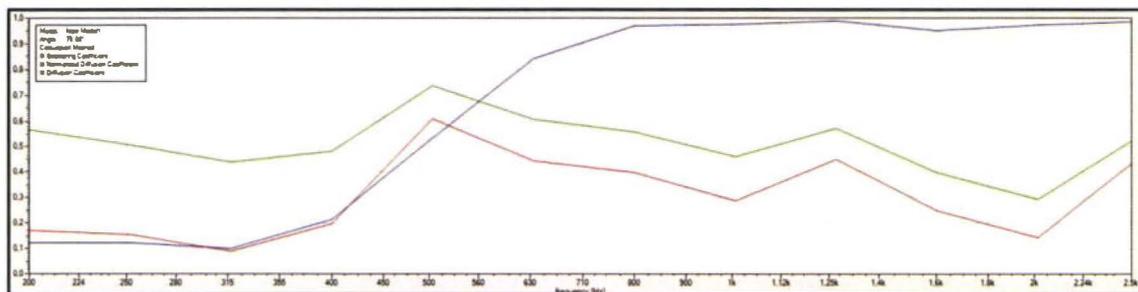
Línea Azul: Coeficiente de dispersión.

Línea Verde: Coeficiente de difusión

Línea Roja: Coeficiente normalizado de difusión.



Detalle de coeficientes a 45°



Detalle de coeficientes a 75°

Figura 4.8. Gráfica de coeficientes B.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.2.4. Observaciones.

Las reflexiones producidas en 400Hz son extremadamente bajas, pero a partir de esta frecuencia la curva de difusión empieza a mejorar brindando coeficientes de difusión alrededor de 0,5. Además la curva se mantiene en ese rango, lo cual es muy positivo ya que el difusor puede ser efectivo desde los 600Hz hacia adelante, ayudando a corregir problemas típicos en una sala como la inteligibilidad ya que mejora la difusión en el rango de la voz humana.

No obstante éste difusor también presenta deficiencias muy marcadas como una mala difusión en 1600Hz con caídas muy marcadas, es decir, demasiada energía regresando a la fuente. En la gráfica de 2500Hz existen excesivas focalizaciones y cancelaciones con diferencias de hasta 30dB lo cual causa una mala difusión en 2500Hz y en bandas continuas.

4.1.3. Diseño C.

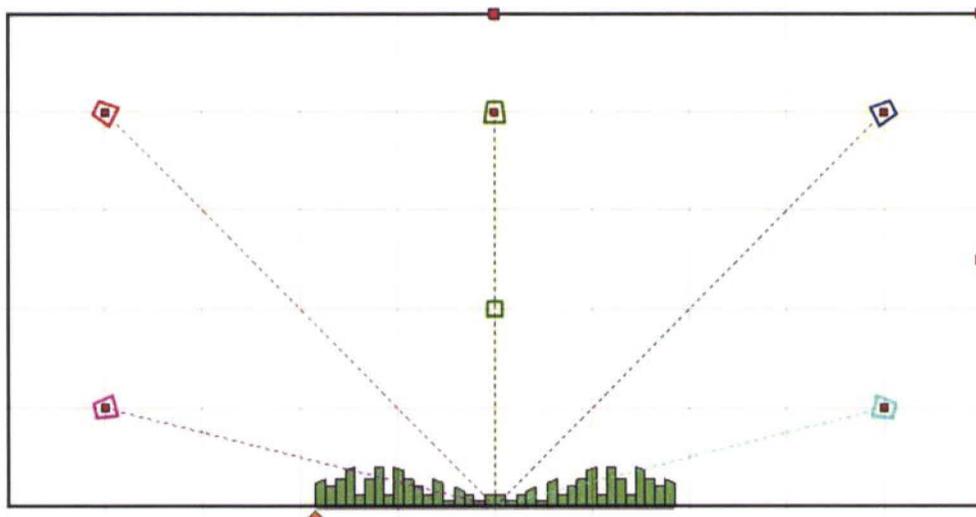
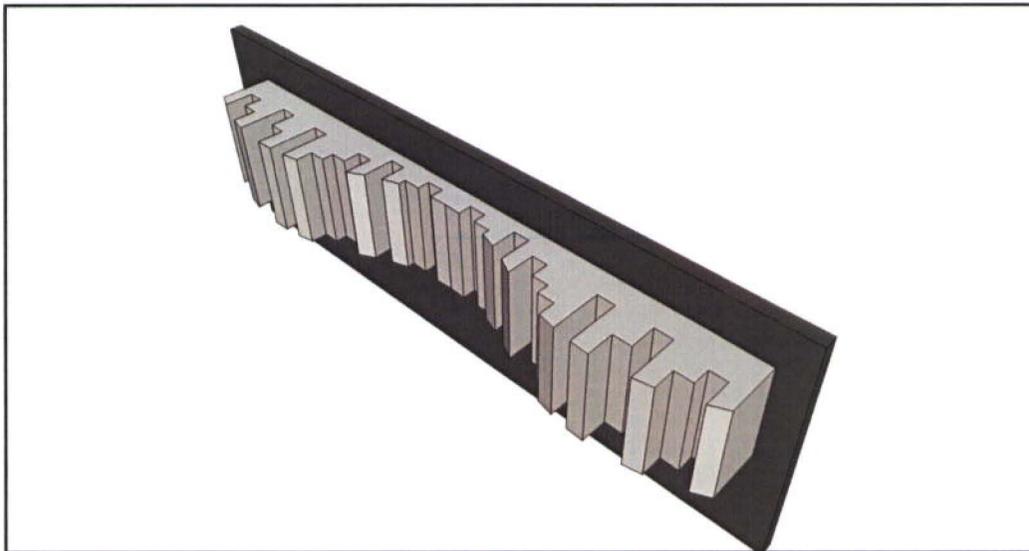


Figura 4.9. Disposición del difuso C y fuentes en la sala.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.3.1. Descripción.

El diseño C se puede catalogar como un pseudo difusor QRD, ya que su forma es bastante parecida y está basado en una secuencia de pozos con diferentes medidas, con un total de 36 módulos de 5 cm cada uno, con terminaciones cuadradas o triangulares, los mismos que forman dos arcos convexos a sus extremos y un arco cóncavo en el centro. Su medida es de 185cm como se muestra en la figura 49.

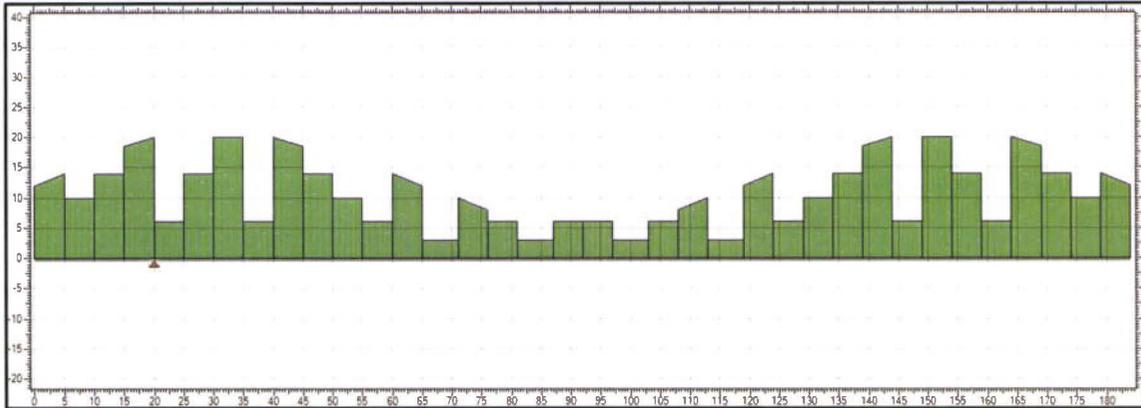
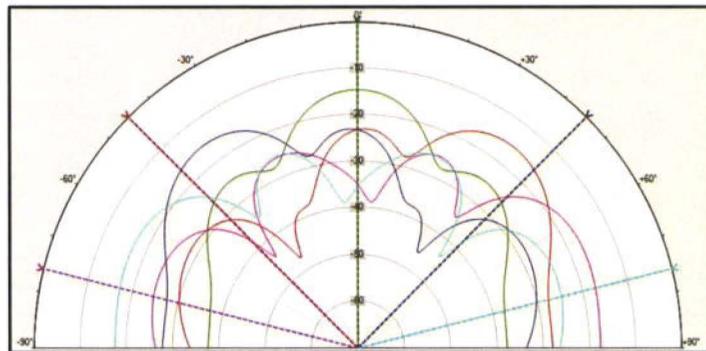


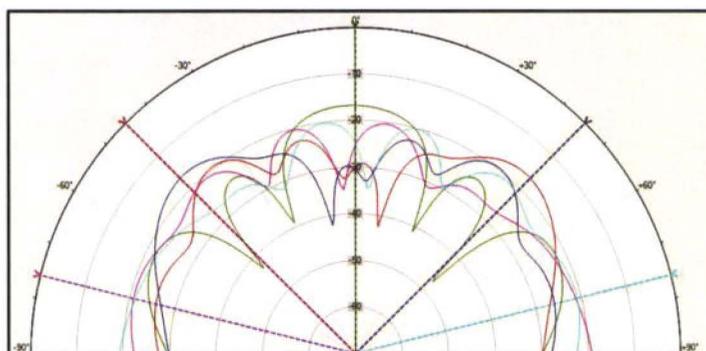
Figura 4.10. Medidas del difusor C en cm.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

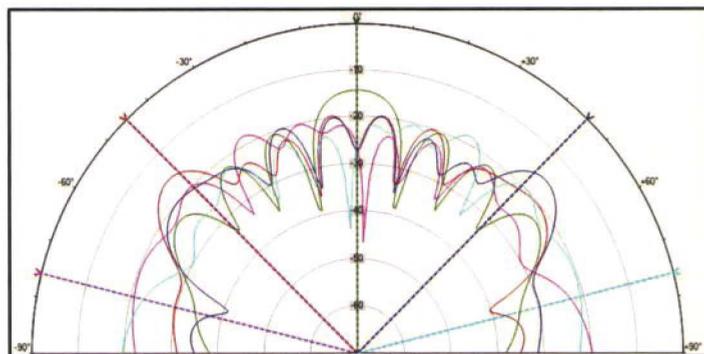
4.1.3.2. Respuesta espacial.



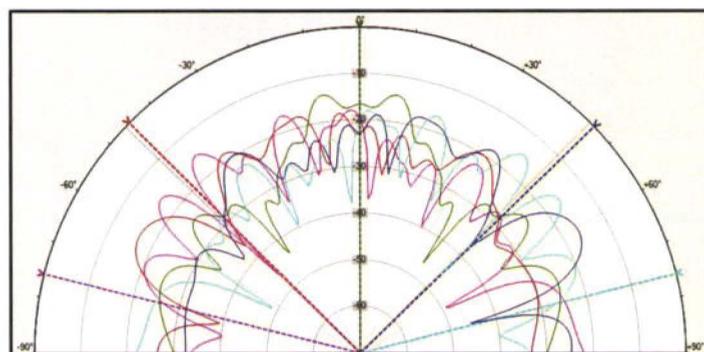
Frecuencia: 400Hz con distintos ángulos de incidencia.



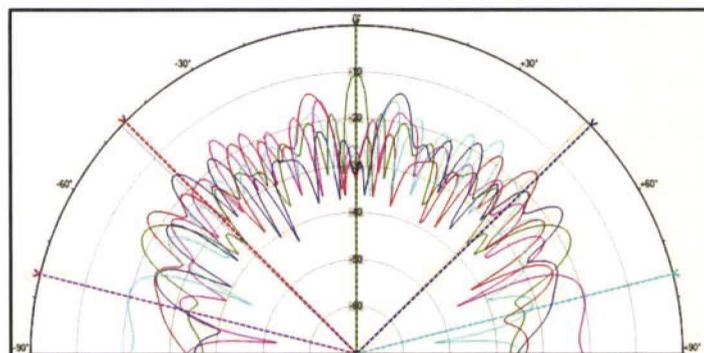
Frecuencia: 630Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1000Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1600Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 2500Hz con distintos ángulos de incidencia.

Figura 4.11. Respuestas espaciales C.

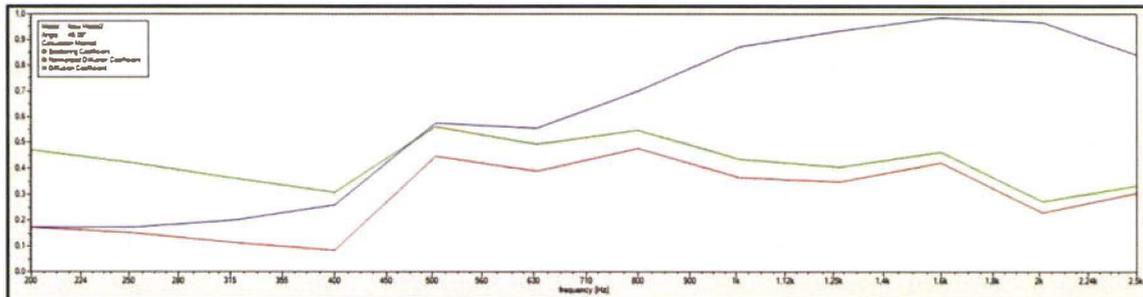
Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.3.3. Gráfica de Coeficientes.

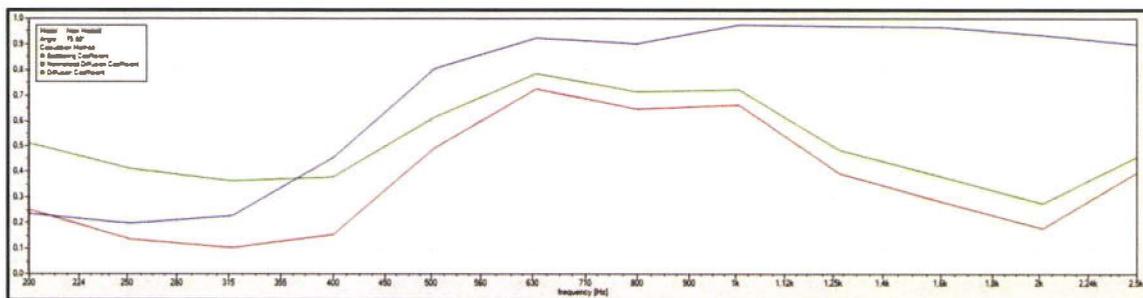
Línea Azul: Coeficiente de dispersión.

Línea Verde: Coeficiente de difusión

Línea Roja: Coeficiente normalizado de difusión.



Detalle de coeficientes a 45°



Detalle de coeficientes a 75°

Figura 4.12. Gráfica de coeficientes C.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.3.4. Observaciones.

En los diagramas polares se observa una excelente difusión del sonido, muy similar a diagramas de difusores como los QRD, pero también se puede notar una muy mala dispersión del sonido a los extremos de cada diagrama polar, los cuales se acentúan aun más en altas frecuencias, esto crea un ángulo de difusión muy reducido, pero oportuno en altas frecuencias y sin caídas ni cancelaciones preocupantes. Las curvas de coeficientes son muy buenas en un rango de frecuencias medias, pero disminuyen los coeficientes en frecuencias altas cuando la fuente se encuentra a 75° o ángulos mayores. Este prototipo entrega la mejor difusión de todos los prototipos con una frecuencia de corte

inferior de 500Hz, es importante tomar en cuenta que para un correcto funcionamiento del panel, el mismo deberá estar ubicado a $3f_0$ de distancia. Así mismo si se reduce la profundidad de los pozos la difusión mejoraría en altas frecuencias.

Finalmente este prototipo concuerda con los objetivos de la tesis.

4.1.4. Diseño D.

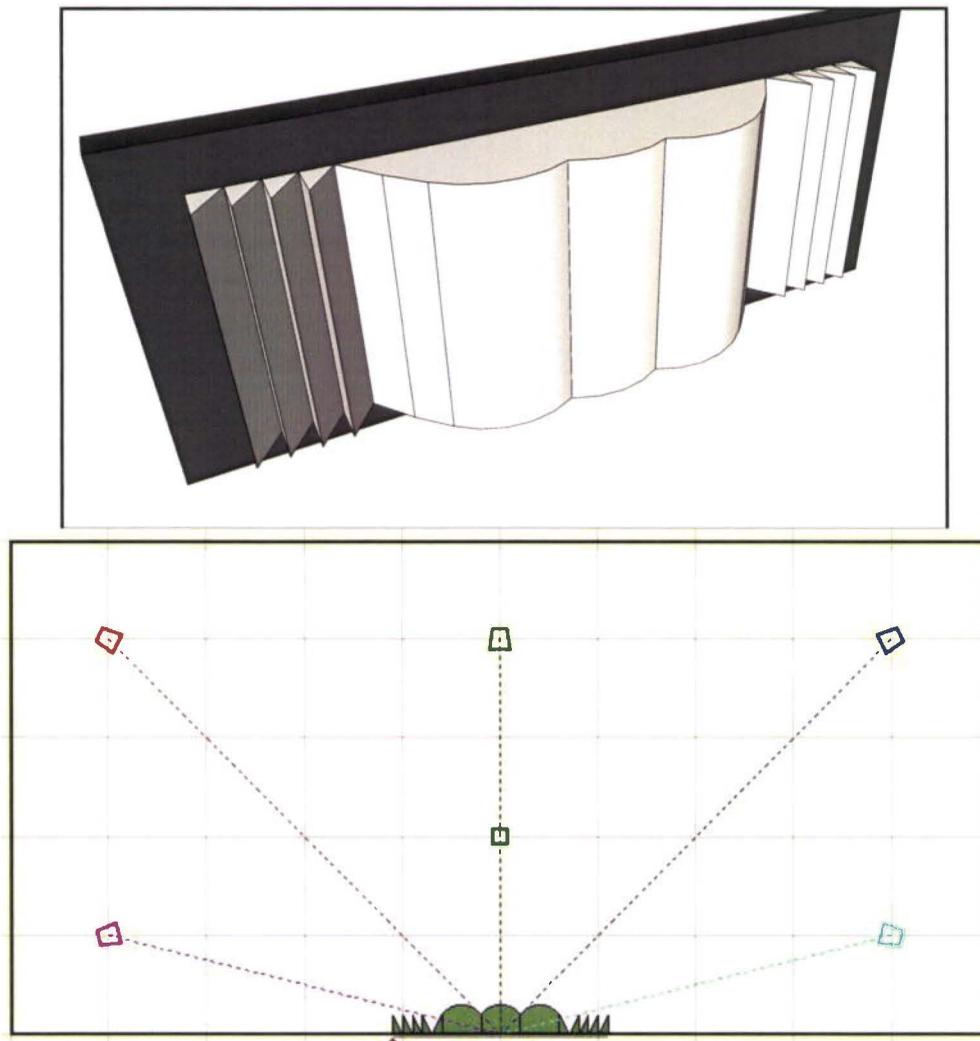


Figura 4.13. Disposición del difusor D y fuentes en la sala.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.4.1. Descripción.

El último de los prototipos estudiados posee formas triangulares de 5cm y 10cm de profundidad. En el centro se conforman tres arcos cóncavos de 20cm y 15 de profundidad, su medida total es de 110cm.

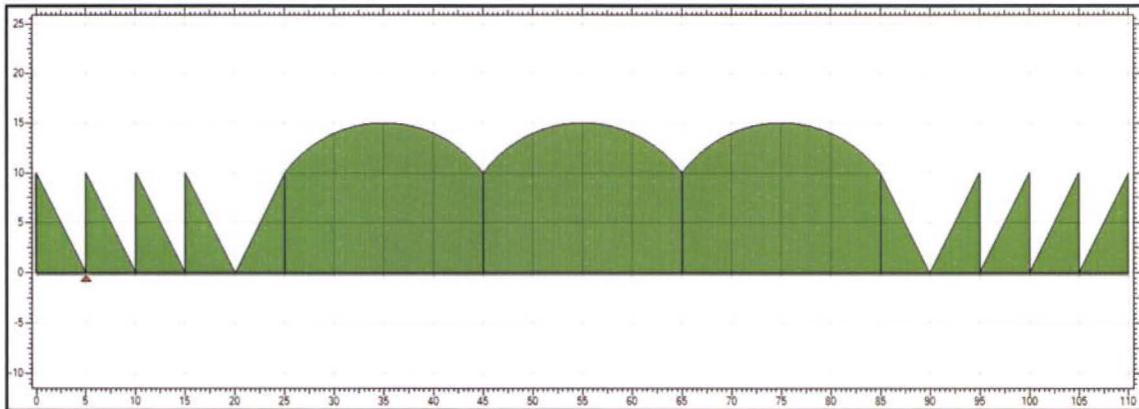
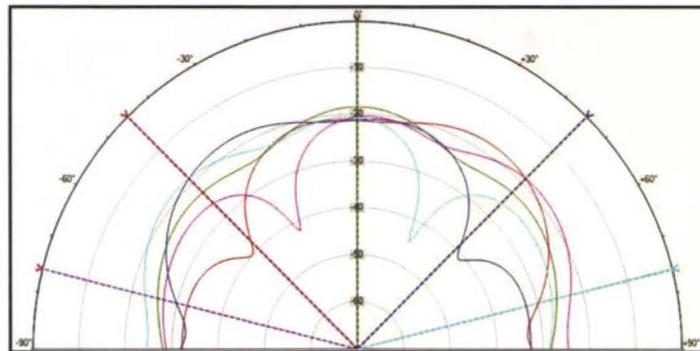


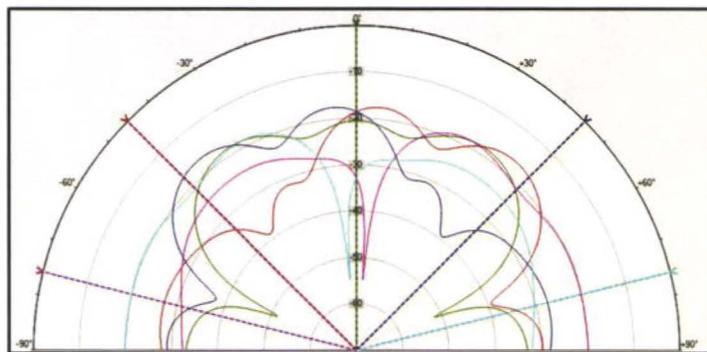
Figura 4.14. Medidas del difusor D en cm.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

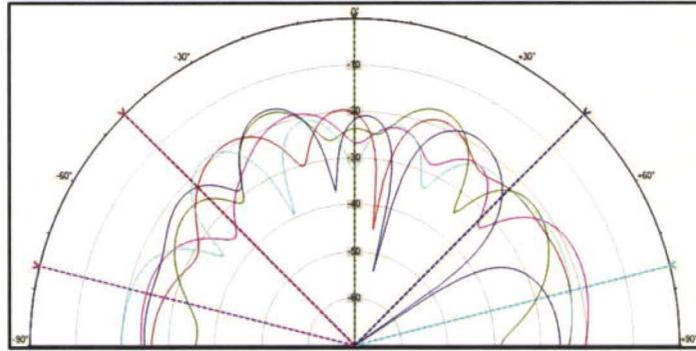
4.1.4.2. Respuesta espacial.



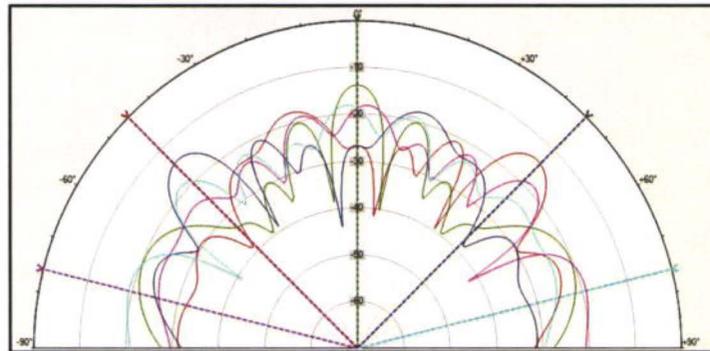
Frecuencia: 400Hz con distintos ángulos de incidencia.



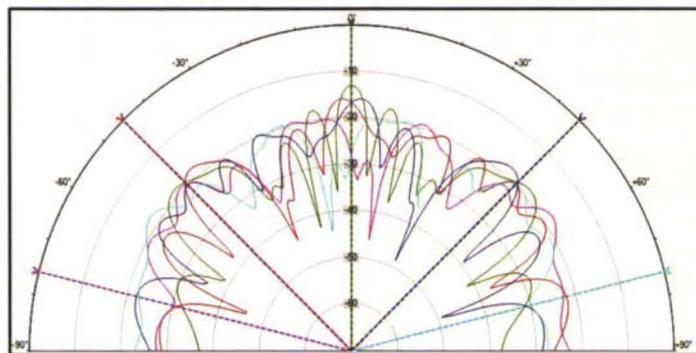
Frecuencia: 630Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1000Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 1600Hz con distintos ángulos de incidencia.



Frecuencia: 2500Hz con distintos ángulos de incidencia.

Figura 4.15. Respuestas espaciales D

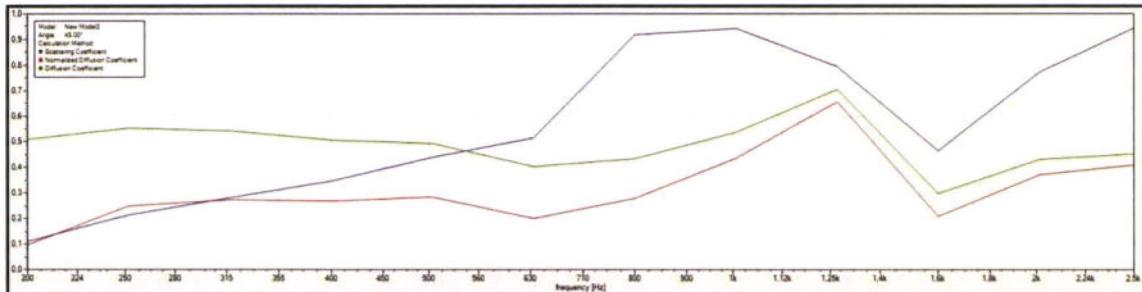
Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.4.3. Gráfica de Coeficientes.

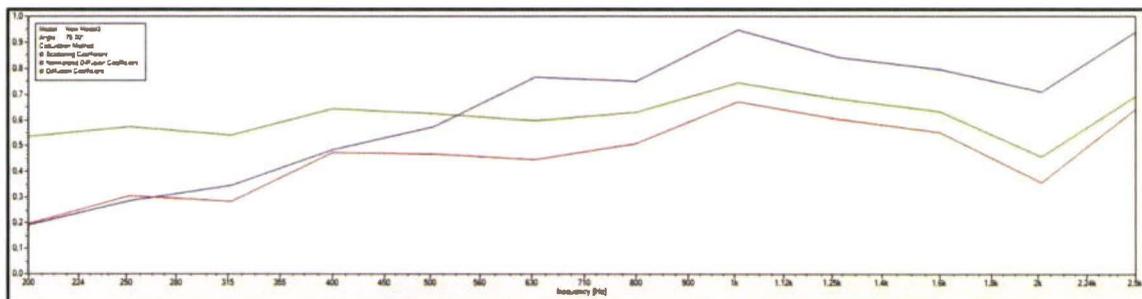
Línea Azul: Coeficiente de dispersión.

Línea Verde: Coeficiente de difusión

Línea Roja: Coeficiente normalizado de difusión.



Detalle de coeficientes a 45°



Detalle de coeficientes a 75°

Figura 4.16. Gráfica de coeficientes D.

Fuente: Autor, AFMG Reflex Software.

4.1.4.4. Observaciones.

Los diagramas polares se muestran positivos en frecuencias medias bajas, pero a partir los 630Hz los diagramas dejan de ser uniformes y existen cancelaciones muy marcadas lo cual no permite que el difusor proporcione una dispersión del sonido uniforme. Además los coeficientes de difusión son muy bajos con un ángulo de incidencia de 45° y aunque brinda un pico en 1,25kHz los usos de una superficie como esta son poco útiles, a menos que se requiera corregir en frecuencias específicas (1,25kHz), lo cual no es muy común. Las medidas del difusor son muy grandes para conseguir el objetivo acústico deseado.

5. Capítulo V.

5.1. Detalle del difusor seleccionado.

Debido al desempeño del diseño B, su forma y cualidades de difusión del sonido, ha sido seleccionado para realizar el prototipo físico y a su vez para estudiarlo más a fondo por medio de la acústica geométrica.

Así también se definen puntos específicos para el diseño final, los cuales son tomados más en cuenta ya con el diseño definido para mejorarlo. Su forma atractiva a la vista y su diseño novedoso útil en gran cantidad de espacios o recintos es favorable, ya que su uso no se limita al acondicionamiento acústico sino también, brinda un diseño exclusivo que da personalidad a la sala donde se lo utilice.

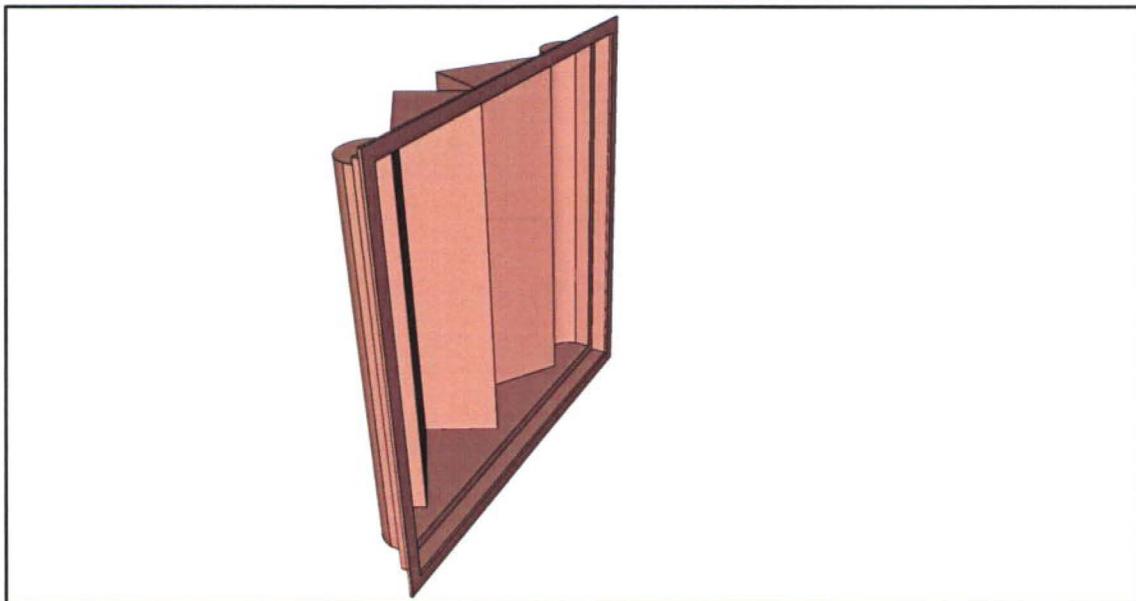
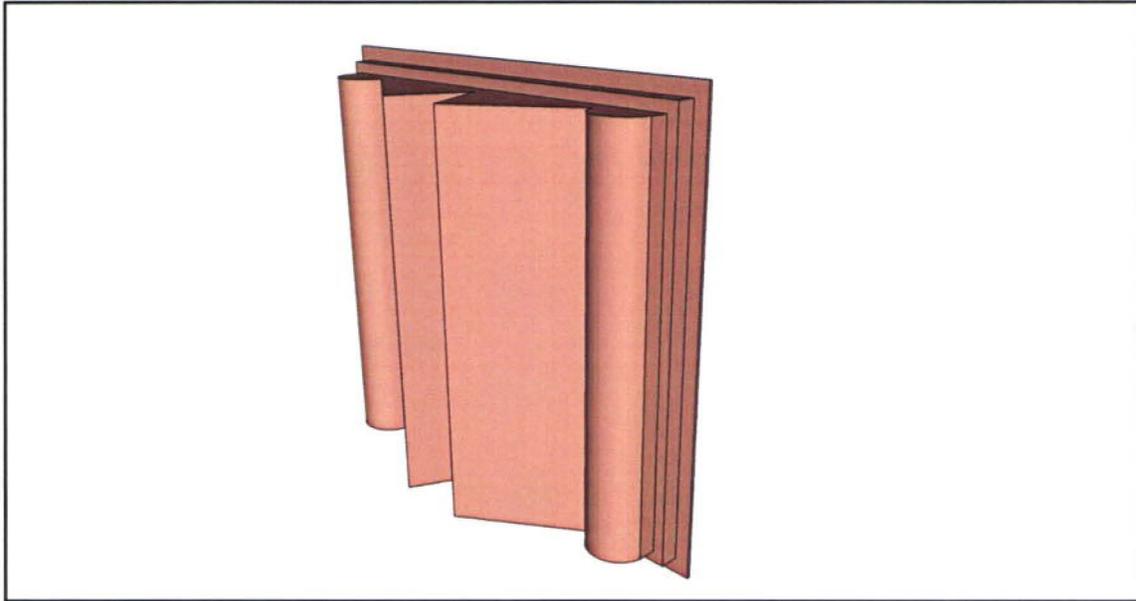
Además se decide reducir el tamaño del difusor a las medidas de 61x61 cm, esto ayuda a que el difusor pueda ser utilizado en gran cantidad de recintos sin preocuparse por su tamaño.

Otro punto muy importante es el poseer una ficha técnica, ya que es una de las bases para que el difusor pueda ser utilizado en el diseño acústico, de esta manera se desarrolla un panorama más claro de los parámetros finales que se puede obtener utilizándolo en el acondicionamiento de salas.

Los lugares donde el difusor puede ser utilizado son varios, pasando por estudios de grabación, teatros, auditorios, teatros en casa, estaciones de trabajo en radio televisión o cine. Así se abarca un mercado amplio donde se puede desarrollar su venta.

Finalmente, el sistema es completamente nuevo para el mercado ecuatoriano donde se está desarrollando proyectos acústicos innovadores.

A continuación se muestra una vista isométrica del diseño final del difusor:



Prototipo final

Figura 5.1. Vistas isométricas del prototipo final.

Fuente: Autor, Sketch up pro 8.

5.1.1. Vistas del Difusor.

A continuación se muestra las vistas del prototipo con la forma final, la medida del difusor es de 60x60 cm, a lo que se añade 1 cm repartido a cada lado para propósitos de instalación.

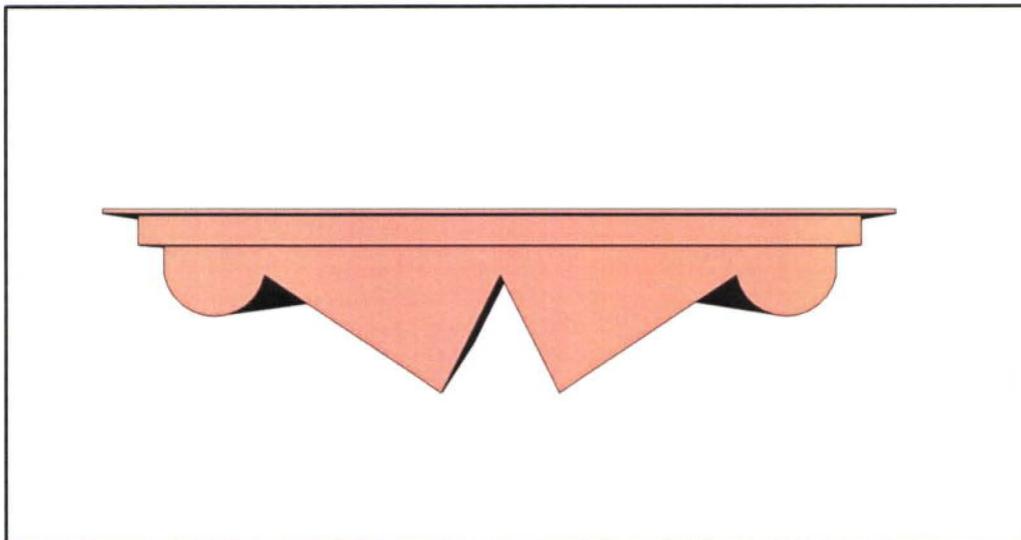


Figura 5.2. Vista superior del prototipo final.

Fuente: Autor, Sketch up pro 8.

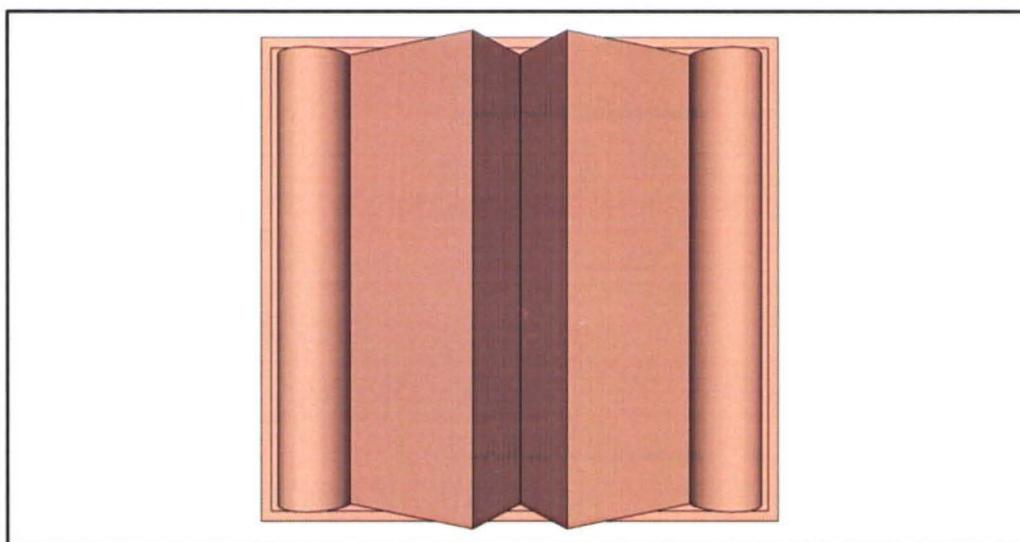


Figura 5.3. Vista frontal del prototipo final.

Fuente: Autor, Sketch up pro 8.

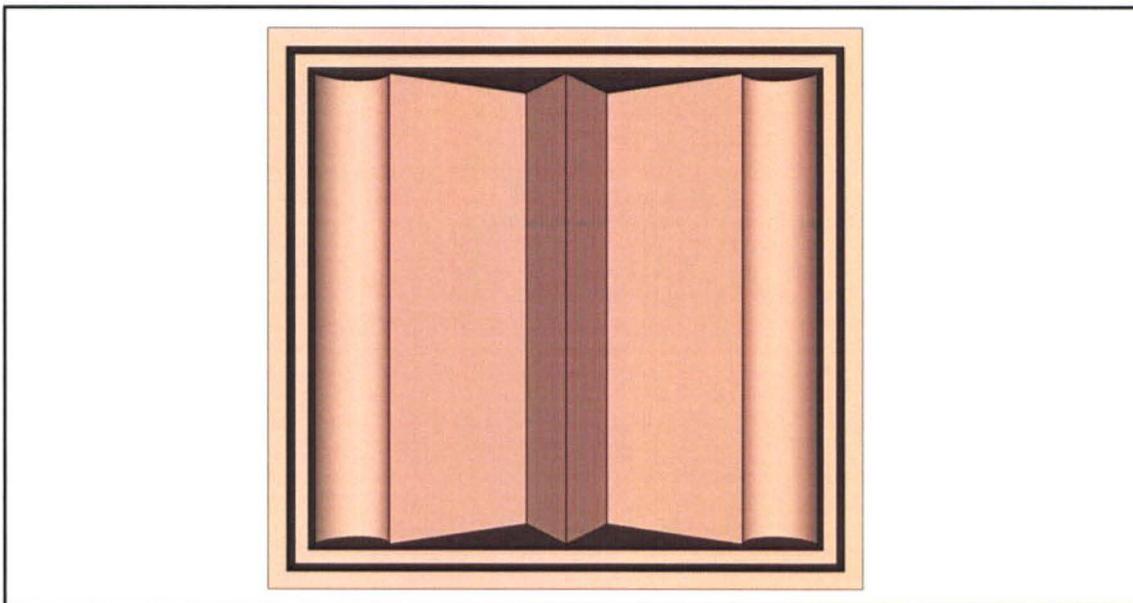


Figura 5.4. Vista posterior del prototipo final.

Fuente: Autor, Sketch up pro 8.

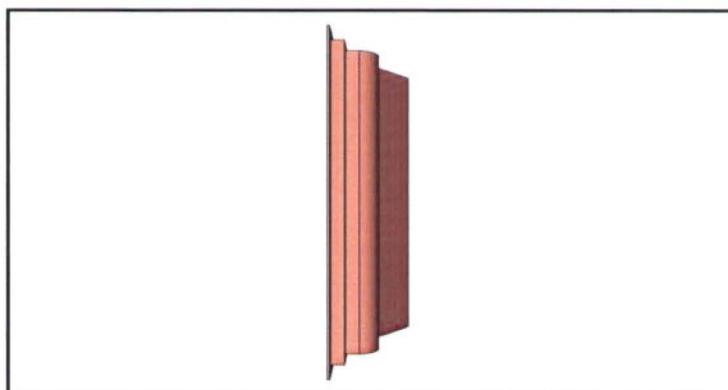
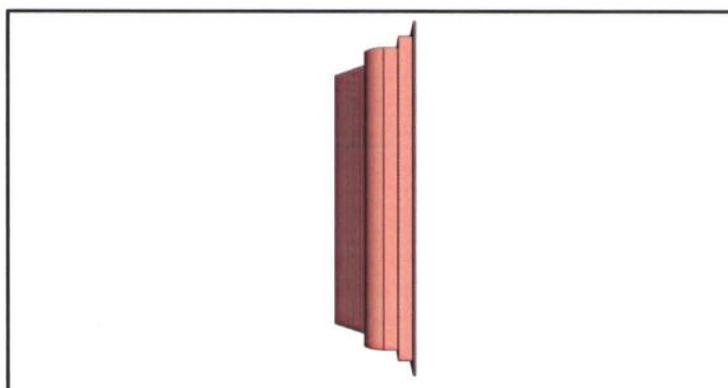


Figura 5.5. Vistas izquierda y derecha del prototipo final.

Fuente: Autor, Sketch up pro 8.

5.1.2. Medidas de cada elemento del difusor.

El tamaño final del difusor será de 61x61 cm, ya que es una medida estandarizada en este tipo de instalaciones.

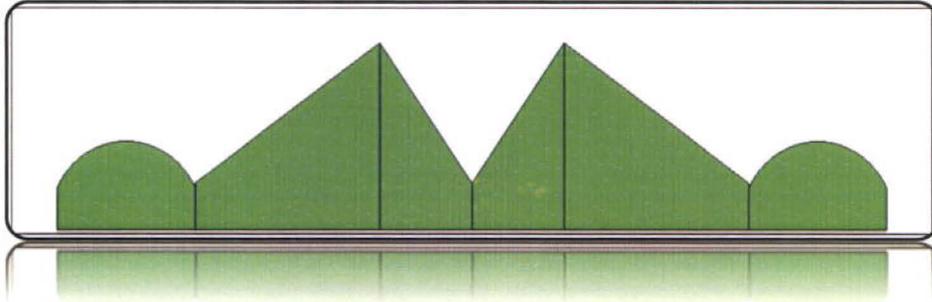


Figura 5.6. Elementos del difusor.

Cada elemento de los prototipos fue utilizado sabiendo que cada uno de ellos proporciona cierta cualidad acústica, posteriormente se examinaron los diseños plasmados. El difusor B, contiene los siguientes elementos:

- 2 Superficies convexas.
- 4 triángulos, de dos medidas distintas.

Las medidas de cada elemento son las siguientes:

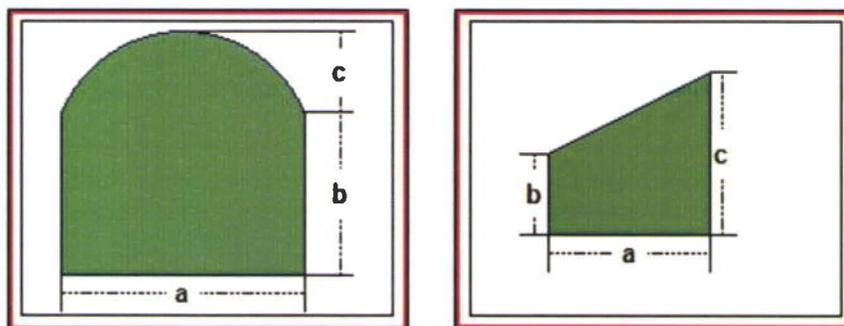


Figura 5.7. Detalle de elementos del difusor.

N° Elemento	Tipo	a [cm]	b [cm]	c [cm]
1	S. Convexa	8.5	5	3.5
2	Triangulo	15	5	15
3	Triangulo 2	5	15	5
4	Triangulo 2	5	15	5
5	Triangulo	15	5	15
6	S. Convexa	8.5	5	3.5

Tabla 5.1. Medidas de cada elemento del difusor

5.1.3. Tabla de coeficientes del difusor

Frecuencia Hz	Coficiente dispersión	Coficiente Difusión normalizado	Coficiente difusión
200	0,034	0,07	0,63
250	0,005	0,11	0,60
315	0,084	0,14	0,57
400	0,114	0,17	0,53
500	0,125	0,18	0,50
630	0,119	0,15	0,45
800	0,298	0,40	0,60
1000	0,603	0,60	0,71
1250	0,904	0,40	0,51
2000	0,016	0,30	0,42
2500	0,982	0,30	0,40
3150	0,992	0,32	0,41
4000	0,993	0,26	0,34
5000	0,953	0,29	0,35
6300	0,916	0,24	0,29
8000	0,921	0,26	0,30
10000	0,996	0,24	0,30

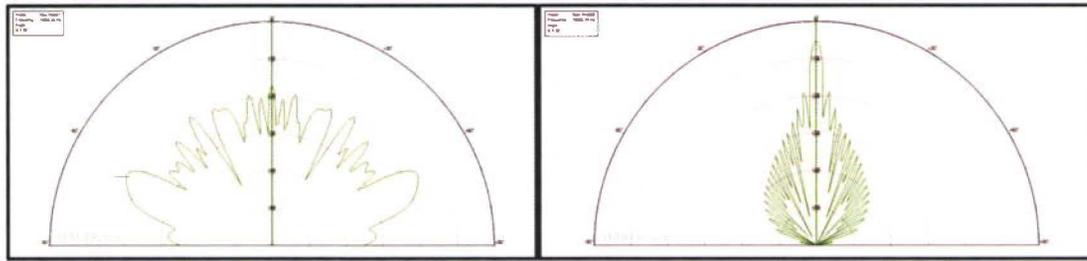
Mirando los resultados de la tabla se entiende que el panel dispersa energía en frecuencias altas, y difunde energía en frecuencias bajas y medias en un rango de 500Hz a 2kHz.

Tabla 5.2. Coeficientes de difusor final

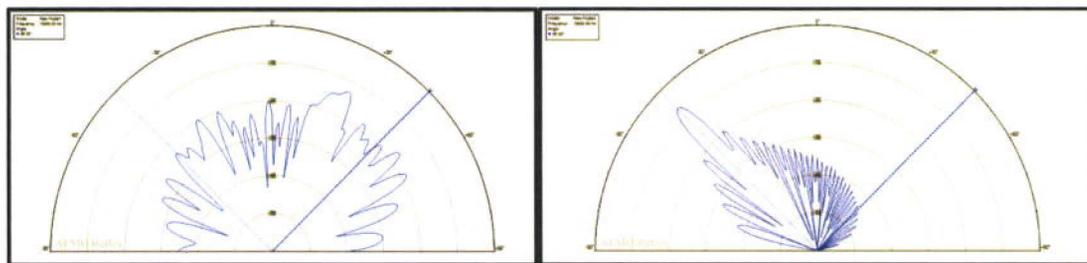
5.1.4. Respuesta espacial del difusor.

Las gráficas a continuación muestran la respuesta espacial del difusor final desde 5 ángulos distintos, donde se nota la dispersión en el espacio tomando

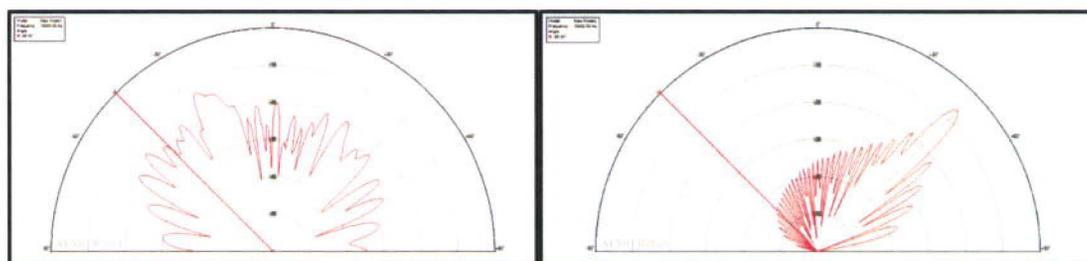
como referencia a una frecuencia de 1kHz, de esta manera se logra apreciar más detalladamente la respuesta espacial diferenciando los distintos ángulos de incidencia, junto a cada uno de ellos, a la derecha, se encuentra la respuesta espacial de una superficie plana de medidas iguales a las del difusor. Para poder realizar comparaciones visuales.



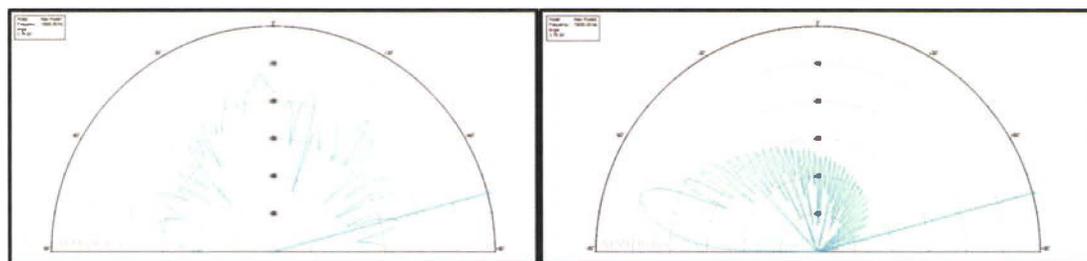
0 grados



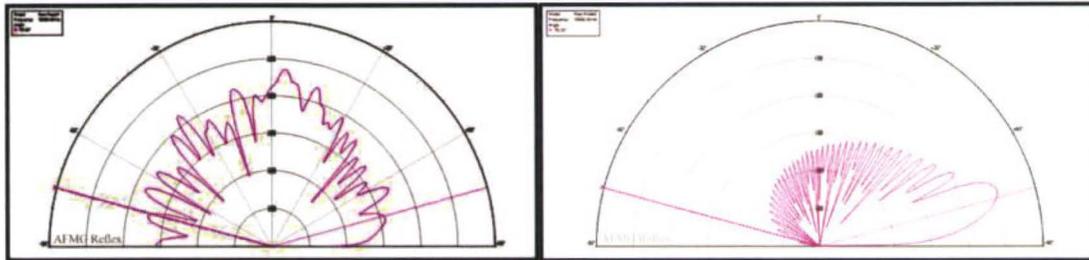
45 grados



-45 grados



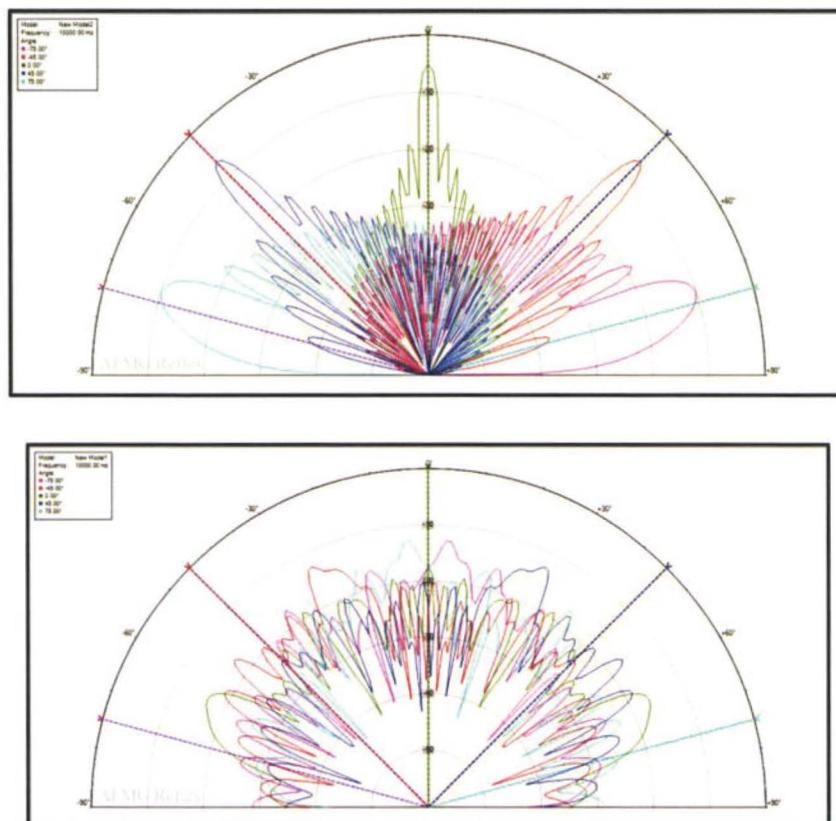
75 grados



-75 grados

Figura 5.8. Respuesta espacial del difusor final a 1kHz.

La suma de todos los ángulos de incidencia se visibilizan de forma global, así se logra obtener la respuesta espacial total. Aunque cabe recalcar que únicamente es únicamente la gráfica en 1kHz. Que es tomado como referencia para el diseño de difusores acústicos y sus respectivas mediciones. En primer lugar se muestra la gráfica de una superficie plana y en segundo lugar la respuesta espacial global del difusor.

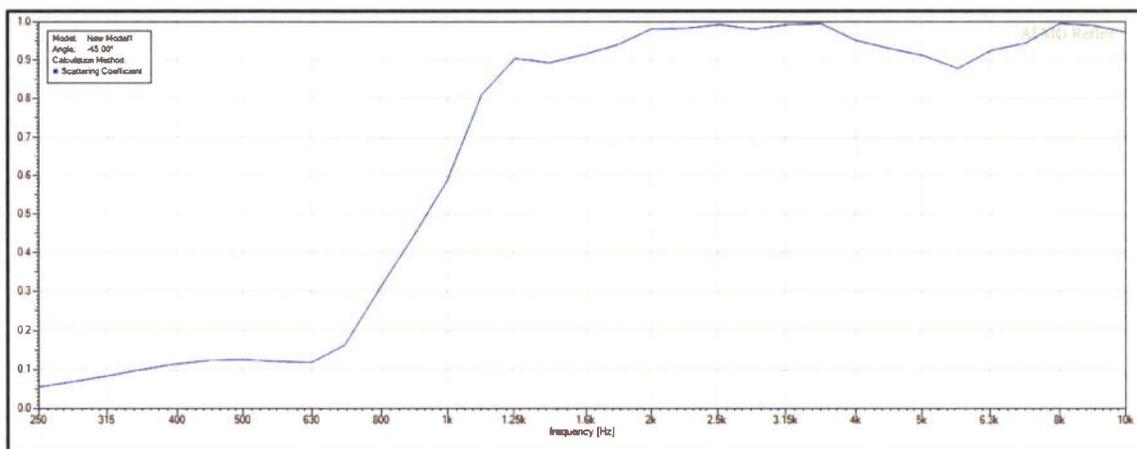


Todos los ángulos anteriores.

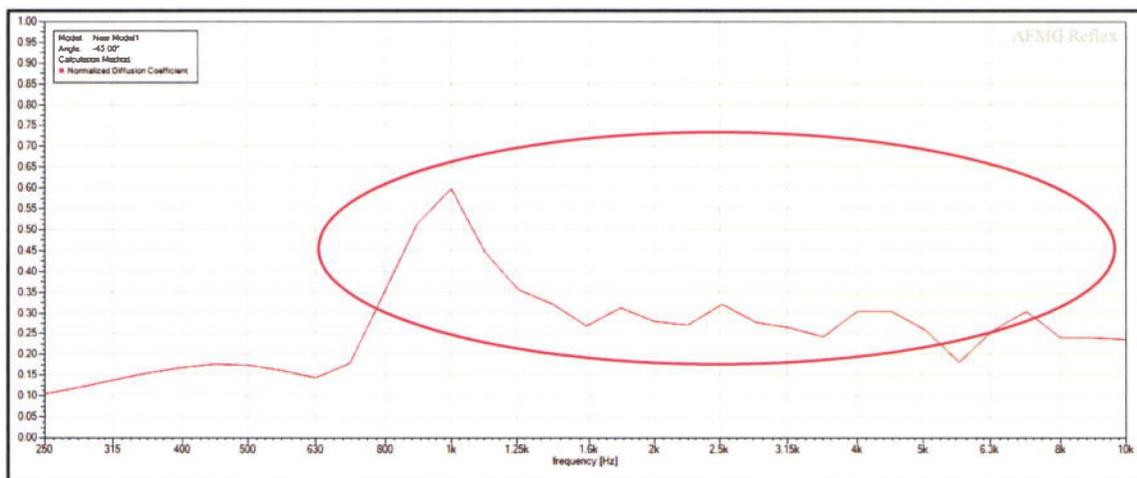
5.1.5. Graficas de coeficientes del difusor.

Por medio de las gráficas se visualiza que el rango de frecuencias efectivo del difusor es de **500Hz en adelante**, donde los coeficientes de difusión son más elevados. Esto tomando como referencia una incidencia de 45 grados con una frecuencia de 1kHz.

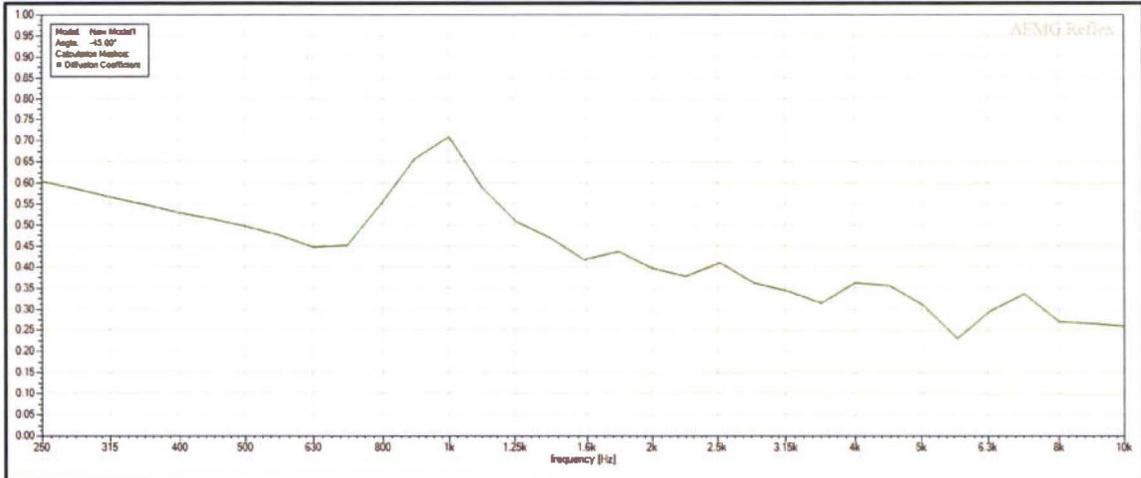
En la gráfica de coeficientes de difusión existen valores altos en bajas frecuencias, los cuales indican que el panel es útil para difusión en frecuencias bajas y medias, por otro lado, las frecuencias altas son mas dispersas y direccionales. El coeficiente de difusión normalizado muestra una respuesta con valores menos altos pero más aproximados a la realidad.



Coeficiente de dispersión



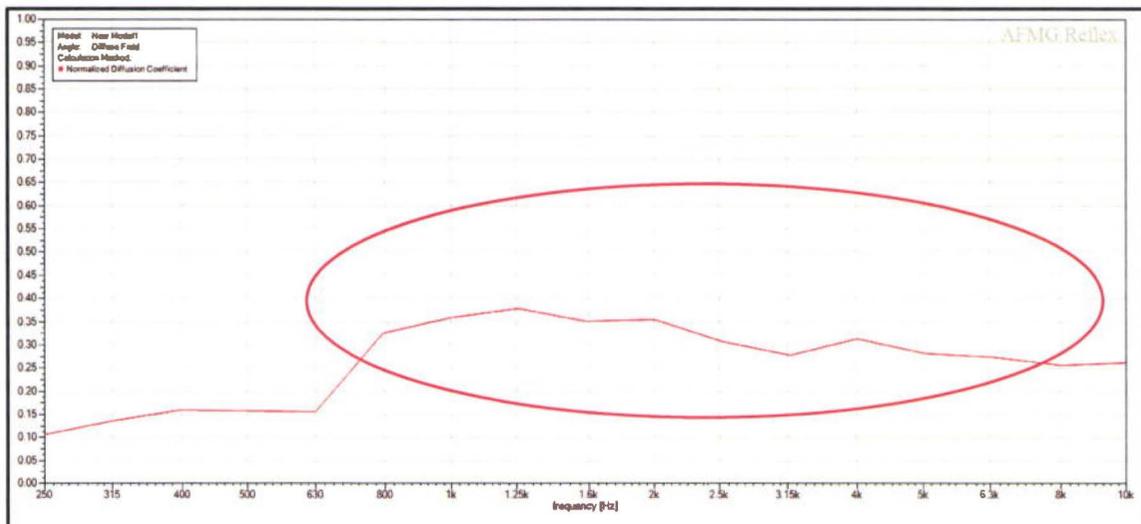
Coeficiente de Difusión Normalizado



Coeficiente de Difusión

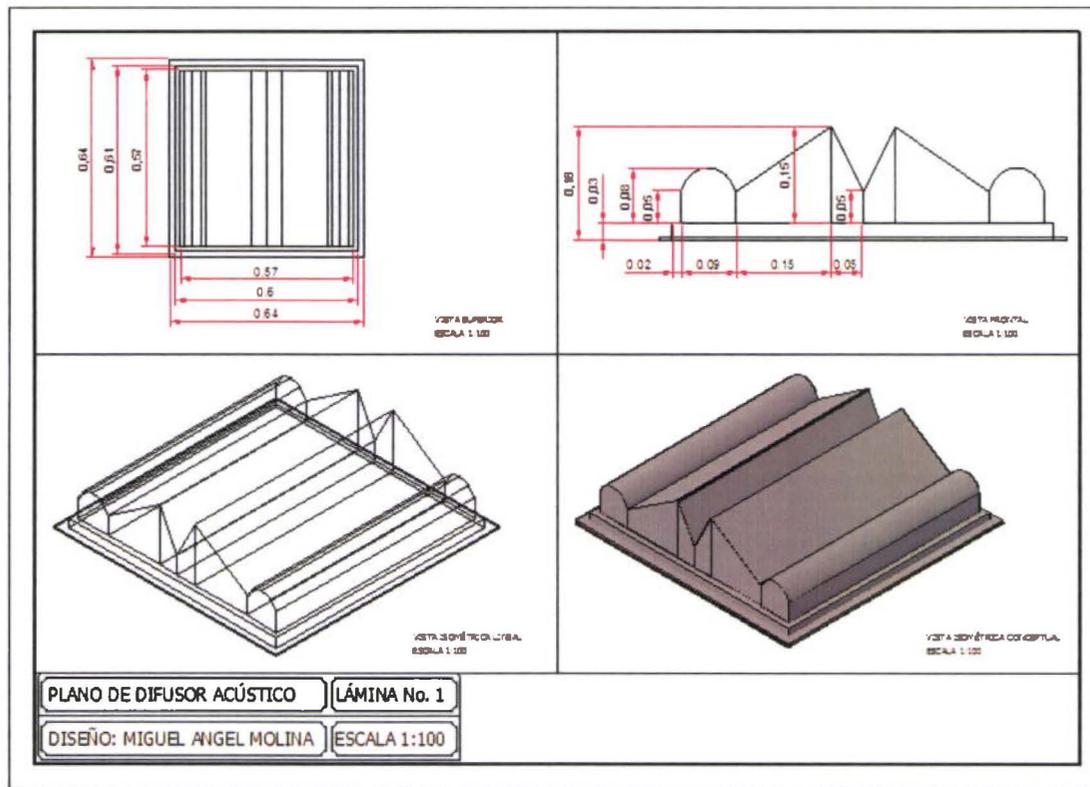
Figura 5.9. Gráficas de coeficientes del difusor final.

A continuación se muestra la gráfica del coeficiente de difusión con una mayor cantidad de ángulos generando una incidencia al azar, mostrando una curva más aproximada a la realidad:



Es interesante ver que a medida que se aumentan los ángulos de incidencia la difusión mejora en altas frecuencias, no obstante el panel no es útil para cuantificar brillo de una sala, más bien cumple funciones en frecuencias más bajas.

5.1.6. Plano Final.



5.1.7. Aplicaciones.

Un difusor tiene como finalidad distribuir espacialmente y temporalmente la energía acústica incidente en su superficie, de este modo las distintas aplicaciones de un difusor pueden ser:

- Salas de grabación: Útiles para realizar captaciones microfónicas en estéreo, los difusores apoyan a que no existan reflexiones bruscas que coloren al sonido de una forma no deseada. Además se pueden realizar captaciones cerca de un arreglo (a $3f_0$) de difusores para así obtener mayor espacialidad.
- Control Rooms: Los difusores son muy utilizados en diseño de estudios de tipo L.E.D.E. donde se requiere que la parte posterior del control room posea una acústica viva mientras la parte frontal acústica muerta o muy absorbente. Se puede aplicar difusión tanto en la pared posterior como en la mitad posterior del cielo raso.

- Radios: La sala de locución de una radio es exigente, ya que es donde se conversa, por así decirlo, el producto final por lo que estas ondas deben ser transmitidas libres de reflexiones no deseadas. Se puede recubrir la mitad del techo así como también de las paredes del estudio.
- Cines: La sensación de ambiencia y involucramiento necesaria para que los asistentes a una sala de cine se sientan conformes debe ser perfecta, por lo que el uso de difusores es imprescindible, recubriendo al menos las tres cuartas partes del techo de la sala y dos cuartas partes de las paredes laterales y posterior.
- Estudios de televisión: Difusores en al menos el 90% del cielo raso apoyarán a que se mejore la inteligibilidad de la palabra, tomando en cuenta que los difusores trabajen en el rango de la voz.
- Salas de uso múltiple: Por lo general son salas de gran aglomeración de personas donde todas necesitan claridad de la palabra, para ello se pueden colocar difusores tanto en paredes laterales, posterior y frontal como en el cielo raso cubriendo unas tres cuartas partes del recinto, recordando que el exceso de difusión puede generar energía poco útil.
- Fosos de Orquesta: La colocación de difusores en el 90% de las superficies, es necesario para evitar focalizaciones del sonido, o filtro peine generados por reflexiones muy tempranas, así como también mejorar la sensación de espacialidad para los músicos.

La utilización de difusión en un recinto brinda beneficios tanto para quienes ejecutan una obra como los músicos, para quienes trabajan con audio y finalmente para el mercado que los escucha. Distribuyendo de mejor manera las ondas sonoras en el espacio generando mayor espacialidad y una sensación de involucramiento. Todo proporcionado por difusores visualmente atractivos.

5.1.8. Material del difusor.

El material que ha sido seleccionado para la realización del difusor final es el acrílico, su nombre técnico es poli (metil-metacrilato) PMMA. Químicamente es un polímero sintético del metil-metacrilato. Fue implementado en el año 1928

por gran cantidad de laboratorios de Alemania, e insertado en el mercado en 1933 por la compañía "Rohm and Haas".

Entre sus características, ventajas y desventajas están:

- Posee una densidad de 1.150 a 1.190 kg/m³
- Posee una mayor fuerza de impacto, mejorando la del cristal pero ligeramente menor que polímeros del policarbonato.
- Puede rayarse con mayor facilidad debido a su suavidad (desventaja).
- Es una gran opción para ser utilizado al aire libre gracias a su estabilidad ambiental.
- El acrílico es considerado como uno de los mejores plásticos destinados a ser utilizados al aire libre.
- No se opaca ni se vuelve amarillo con el pasar del tiempo.
- El acrílico es un excelente aislante eléctrico.
- A una lámina de acrílico se la puede cortar, moldear, taladrar, doblar, esmerilar, pegar, pintar, pulir, lijar etc.

Con el fin de aumentar la vida útil del material es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Con temperaturas mayores a 60°C el material puede deformarse.
- Su exposición a solventes puede destruir el acrílico.
- No es recomendable realizar su limpieza con ningún solvente (acetona, alcohol, thinner, benceno etc.), su limpieza se realiza con agua y detergente.

Con respecto a su exposición al fuego, el acrílico tiene baja resistencia al fuego, es combustible pero a una velocidad de 1.2cm/min, por lo que no produce grandes llamas y llega a ser un producto formulado como retardante a la flama según normativas internacionales.

5.1.9. Instalación.

El montaje del difusor es prácticamente sencillo, su peso y tamaño hacen que su colocación sea rápida y práctica. Los principales métodos para la

implementación del difusor en una sala van a depender del diseño acústico realizado.

Para colocar el difusor en una pared es necesario atornillar el difusor a ella.

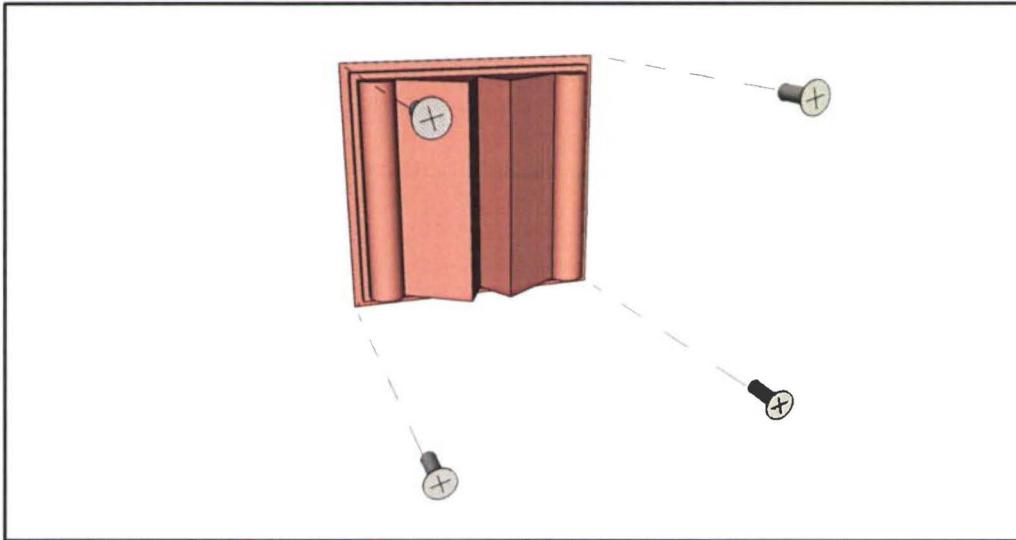


Figura 5.10. Instalación con tornillos.

Otra opción es utilizar cinta doble fase en todo el borde posterior del difusor, y colocarla en la pared, tomando en cuenta que existen materiales en los que no existe buen agarre de la cinta debido a que son superficies muy irregulares.

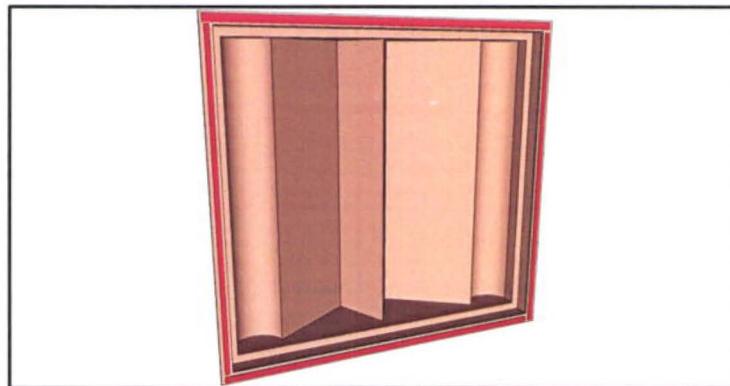


Figura 5.11. Instalación con cinta doble fase.

Muchas veces se requiere difusión en el techo, en caso de ser cielo raso el difusor posee una cuña para ser apoyado en el sistema de techo flotante, estandarizado de 61x61.

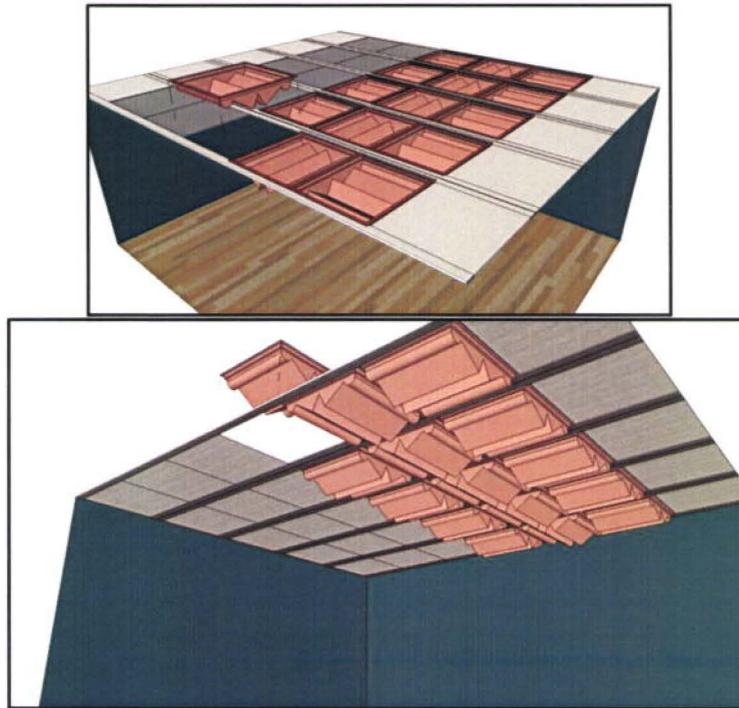


Figura 5.12. Instalación en cielo raso.

5.1.10. Arreglos de difusores.

Se puede optimizar el uso de la difusión por medio de arreglos de difusores, que provocan un desempeño variable según su disposición. Se puede conseguir de esta manera una difusión en una sola dimensión como también dos dimensiones.

- El siguiente arreglo muestra a varios difusores dispuestos de manera clásica, así se consigue que la difusión sea la más aproximada a los parámetros obtenidos durante el estudio técnico de difusor.

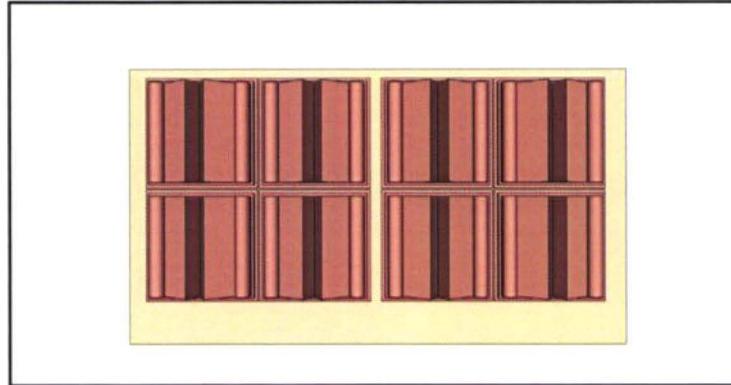


Figura 5.13. Arreglo de difusores 1.

- En este arreglo se muestra una disposición de los difusores en dos distintas formas así se logra obtener una difusión en dos dimensiones.

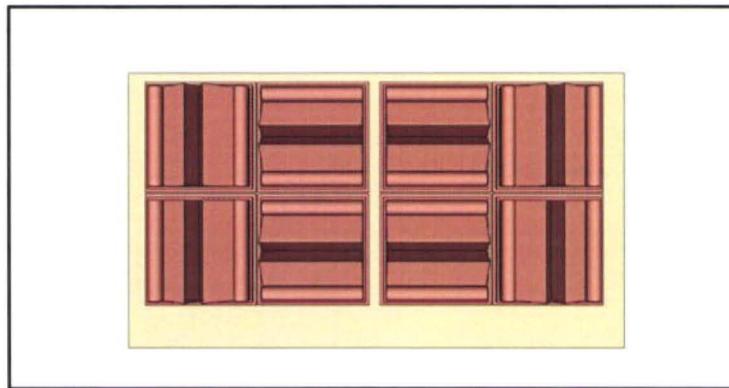


Figura 5.14. Arreglo de difusores 2.

- Con el siguiente arreglo el eje de difusión pasa de ser de las X a las Y.

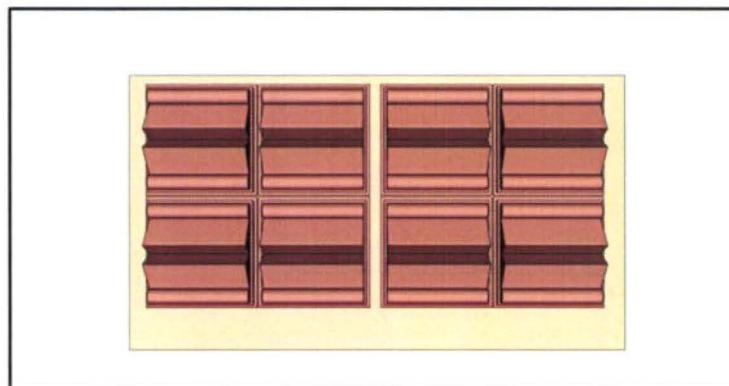


Figura 5.15. Arreglo de difusores 3.

- Los siguientes arreglos proporcionan una difusión "randomica" mezclando las dos dimensiones de difusión.

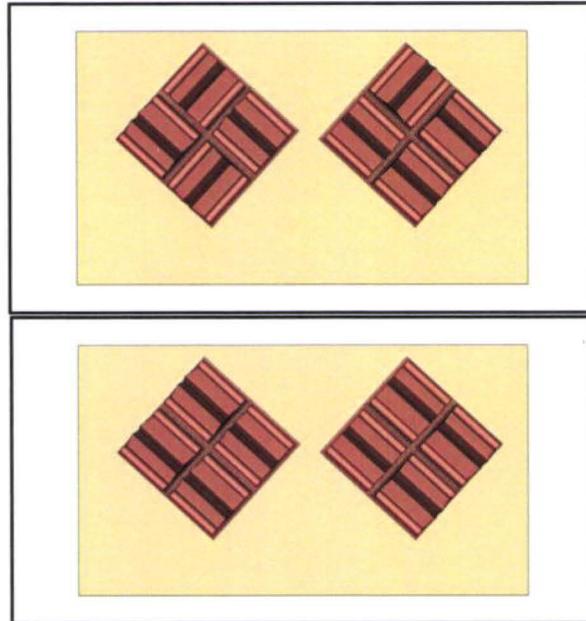


Figura 5.16. Arreglo de difusores 4 y 5.

5.1.11. Otras aplicaciones funcionales.

- La combinación de difusores con material absorbente como paneles es siempre una opción viable en el acondicionamiento acústico de recintos.

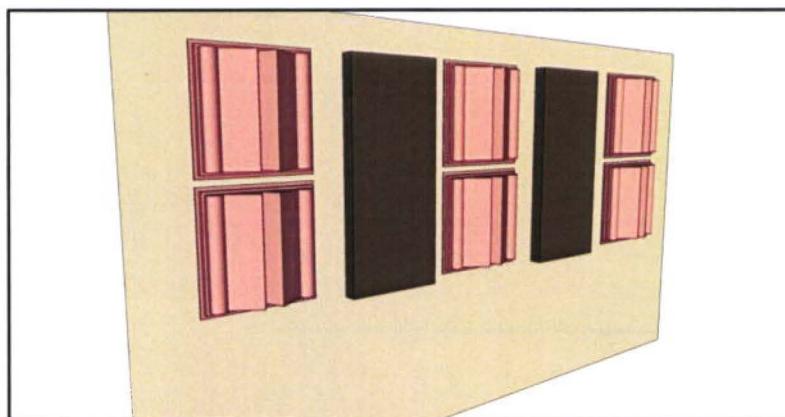


Figura 5.17. Arreglo de difusores y paneles 6.

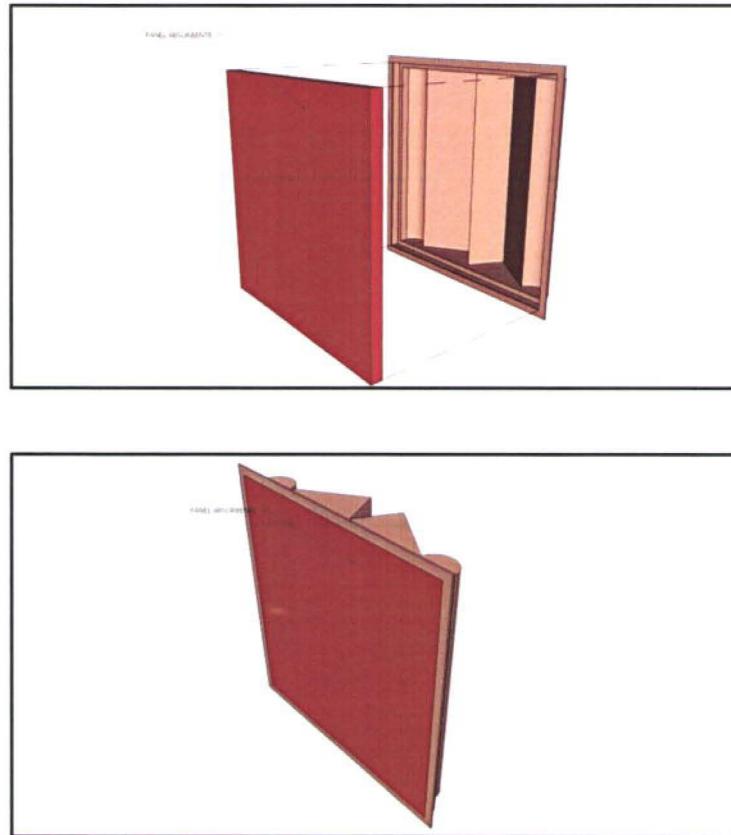


Figura 5.18. Panel absorbente dentro de difusor.

5.1.12. Tabla comparativa entre difusores del mercado actual.

La siguiente tabla muestra distintos difusores existentes en el mercado, creados por distintas empresas como: RPG, Auralex, Jocavy group, Acoustical Solutions, Acoustics First, Vibrant Technologies, comparadas con el difusor prototipo final desarrollado durante la tesis (Difusor C), para así conocer las ventajas, desventajas y beneficios del nuevo sistema de difusión. Se comparan aspectos económicos como el precio, técnico-acústicos como los coeficientes, de seguridad como la información acerca de su exposición al fuego. Así también se muestran fotografías de cada uno de los difusores para valorar su aspecto arquitectónico.

Empresa	Modelo	Precio	C.Abs.	C.Dif.	C. Dis.	Material	E.Fuego	Colores	1D	2D
RPG	Modffusor	\$ 280	x	x	x	Madera	x	(+)5	x	x
Auralex	Minifusor 16cm	\$ 35				Termof.	x	1	x	x
Jocavy	Squary D.	\$ 300	x	x		Ceramic.	x	(+)5		x
Acoustical S.	Alpha D.	\$ 99				Plastico		(+)5	x	x
Acoustics First	QuadraPyramid	\$ 80	x			Termof.	x	1	x	x
Vibrant Tech.	DC-22	\$ -				f.vidrio		1	x	x
RPG	Skyline	\$ 300	x	x	x	Madera	x	(+)5		x
RPG	Harmonix	\$ 150	x			Termof.	x	(+)5		x
TESIS	Difusor C	\$ 35		x	x	Acrílico.	x	(+)5	x	x

Tabla 3.3. Tabla comparativa entre difusores en el mercado

Se puede notar que en el mercado existe gran variedad de sistemas de difusión, que muestran desempeños distintos basándose en teorías similares, pero todos con la misma finalidad. El difusor planteado en este proyecto busca cubrir todos los aspectos que en el mercado se deberían proporcionar, para esto se definirá una ficha técnica bastante completa y detallada, cosa que no todos los proveedores muestran.



Figura 5.19. RPG - Modffusor

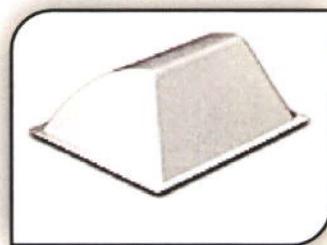


Figura 5.20. Auralex – Minifusor.



Figura 5.21. Jocavy Group – Squary Diffusor.



Figura 5.22. Acoustical Solutions – Alpha D.



Figura 5.23. Acoustics First – QuadraPyramid.

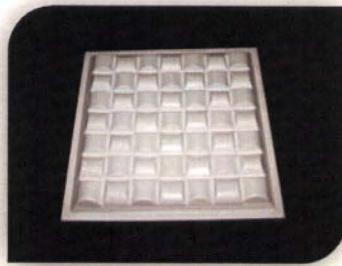


Figura 5.24. Vibrant Technologies – DC-22.



Figura 5.25. RPG – Skyline.



Figura 5.26. RPG – Harmonix.

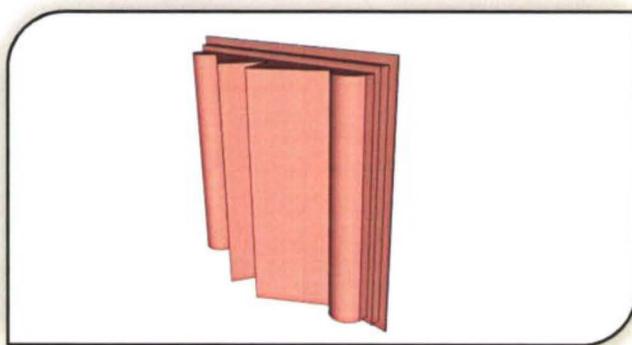


Figura 5.27. Difusor B (Prototipo).

6. Capítulo VI

6.1 Construcción de un prototipo del difusor final.

Antes de la elaboración final del difusor, utilizando maquinaria industrial como termo formadoras, se realizó un prototipo de manera manual. Por medio de este prototipo se obtiene un ejemplo muy cercano al producto final, que es útil para definir detalles y aspectos de carácter minucioso, así se obtendrá un trabajo final impecable y sin errores.

Los materiales utilizados para la elaboración fueron:

- Media plancha de acrílico blanco de 2mm.
- Estiletes para acrílico.
- Cintra (para elaborar ángulos como topes).
- Cinta métrica.
- Dobladora de acrílico casera.
- Flama.
- Guantes y gafas.
- Prensas.
- Caladora.

Como primer paso se adquirió el material (acrílico de 2mm), se selecciono el color blanco para así darle el terminado con pintura necesario. Posteriormente se empezó a calcular ángulos de doblaje y se tomaron medidas para realizar los cortes respectivos al material.

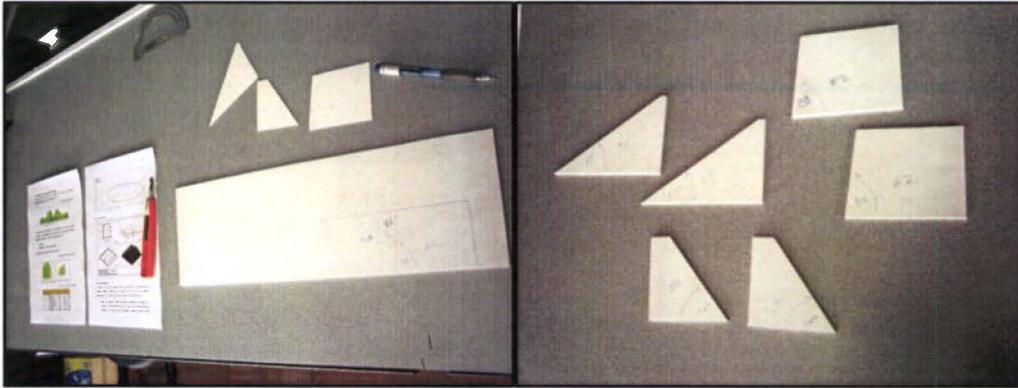


Figura 6.1. Elaboración de ángulos para construcción.

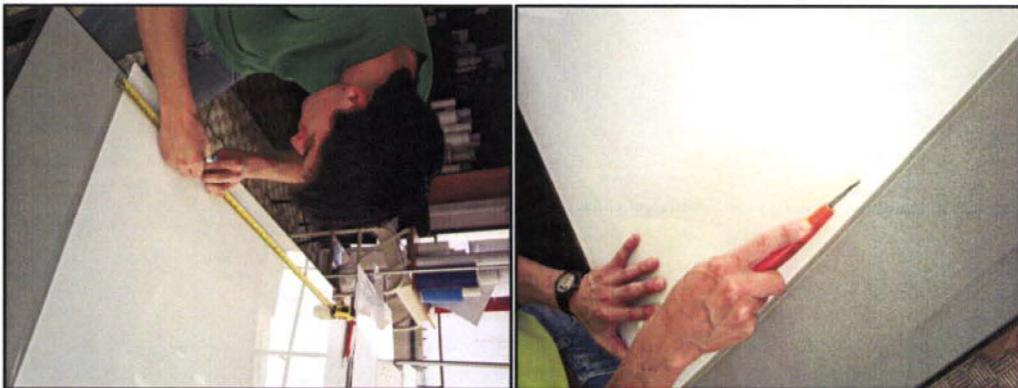


Figura 6.2. Medidas y corte de acrílico.

Debido a que el acrílico puede ser dado forma únicamente con calor, fue necesario construir una dobladora de acrílico casera, de esta manera se pudo realizar los doblajes de forma más precisa.



Figura 6.3. Construcción de una dobladora artesanal de acrílico.

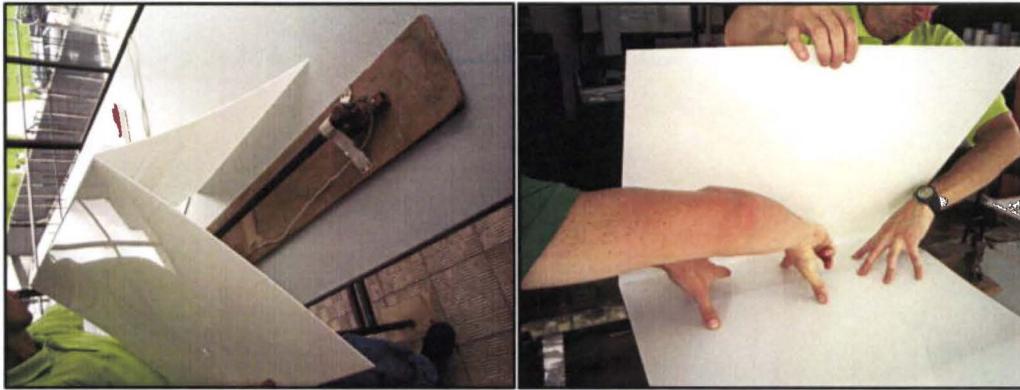


Figura 6.4 Doblaje del acrílico.

La plancha de acrílico empieza a fortalecerse con los doblajes, lo cual permite una mayor estabilidad.



Figura 6.5. Primeros doblajes del acrílico.

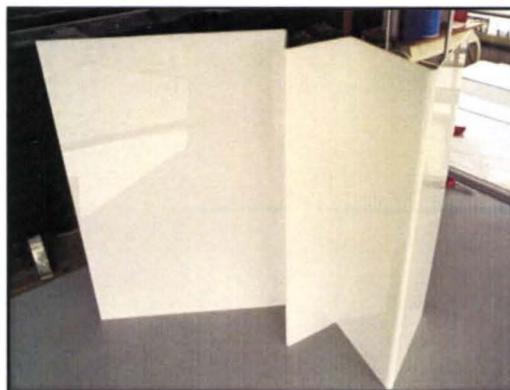


Figura 6.6. Media plancha de acrílico con doblajes.

Después de finalizados los doblajes rectos en el material, se procede a realizar las curvas, con la utilización de una flama para proporcionar calor y poder deformar el material.



Figura 6.7. Doblaje de curvaturas.

De esta manera se obtiene la superficie final más importante del sistema, para finalmente colocar sus tapas inferior y superior, así como también los perfiles a su alrededor.

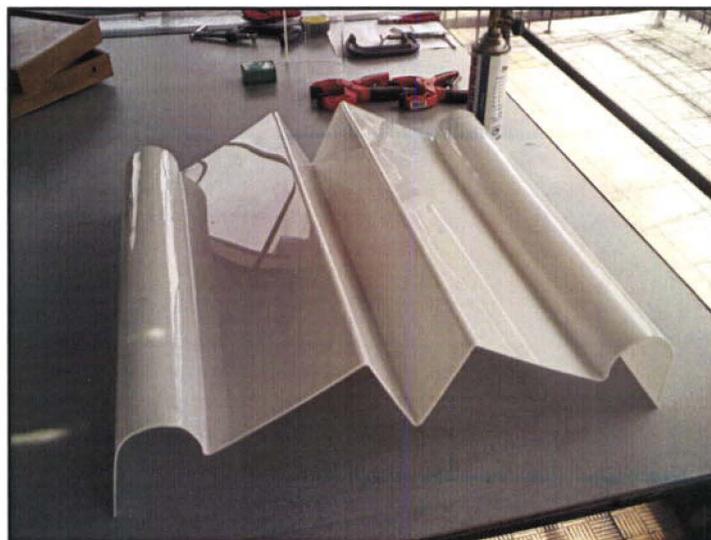


Figura 6.8. Superficie final del prototipo.

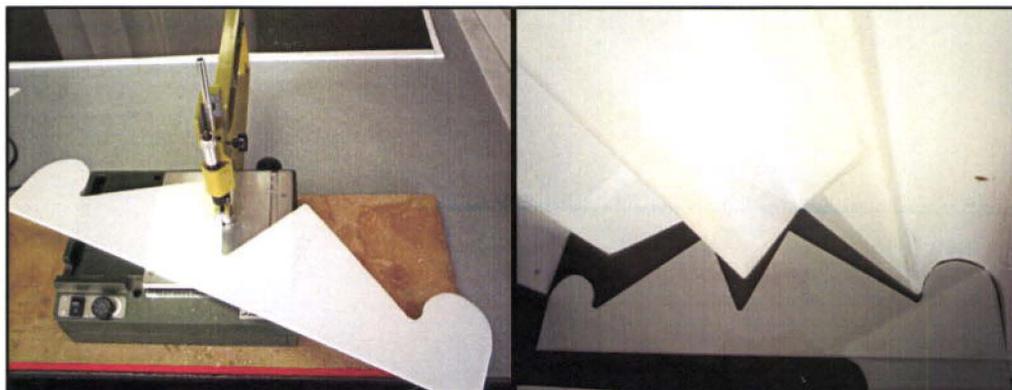


Figura 6.9. Implementación de tapas y perfiles.

7. Capítulo VII.

7.1. Análisis costo beneficio.

Descripción Elaboración	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Molde para prototipo	1	\$ 150	\$ 150
Plancha acililica para 4 difusore	1	\$ 60	\$ 60
Termoformado (4 difusores)	4	15	\$ 60
Ficha Técnica y manual	1	\$ 2,50	\$ 3
Empaque	1	\$ 2,50	\$ 3
		TOTAL	\$ 275
		TOTAL SIN MOLDE	\$ 125
Descripción Producto Final	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Difusor	4	\$ 45	\$ 180
Ficha Técnica y manual	1	\$ 5	\$ 5
Empaque	1	\$ 5	\$ 5
		TOTAL	\$ 190

Tabla 7.1. Análisis costo beneficio

En primer lugar se muestra los costos de elaboración del producto, el TOTAL SIN MOLDE se refiere a que la realización del mismo solo se lo hace una vez, por lo que los costos de producción para las veces posteriores a la primera serán más económicos. En estos costos solo se detalla los materiales necesarios, pero hay que tomar en cuenta que el proceso de diseño, investigación y utilización de software (400 USD) también conlleva un valor económico e intelectual. La inscripción del producto en el IEPI es de cerca de \$200, incluyendo todo el proceso.

En segundo lugar se muestra la descripción del producto final, es decir, el precio que el difusor tendrá en el mercado. El costo final de venta a distribuidores será de \$190 (sin impuestos), incluye un paquete con 4 difusores y sus especificaciones técnicas. A este valor se le deberá sumar los impuestos correspondientes y costos de envío tanto nacional como internacionalmente.

Con este valor se obtiene una utilidad de \$65 por paquete (\$190 valor en el mercado - \$125 Coste de producción). Teniendo en cuenta que el valor de producción hace referencia a una producción en pequeñas cantidades. A partir de dos docenas de termo formados, se consigue reducir el precio de

producción debido a que cada termo formado pasaría a costar \$8, por lo que se obtendría mayores utilidades con la producción de mayores cantidades.

8. Capítulo VIII.

8.1. Conclusiones.

El planteamiento del sistema en un simulador acústico permite evidenciar el desempeño del difusor sin necesidad de realizarlo en la realidad, lo cual tendría altos costos y no sería conveniente económicamente.

Existe gran variedad de este tipo de sistemas en el mercado, la falencia es que muchos proveedores no muestran claramente las especificaciones técnicas, y son necesarias para un ingeniero acústico a punto de diseñar. Por lo cual se buscó de alguna manera llenar esos vacíos no proporcionados por otras empresas, y crear un sistema de difusión con la misma finalidad pero con un valor agregado, e este caso una ficha técnica.

La primera herramienta para comenzar el proceso de diseño fue la imaginación, la creación de cuatro prototipos de forma para el difusor amplió las posibilidades de elegir solo una con las mejores características acústicas. El software utilizado llamado "AFMG Reflex" arrojó datos interesantes de cada uno de los prototipos, de esta manera se pudo comparar parámetros y elegir el diseño de mejor desempeño.

Poco a poco el sistema fue tomando forma, se realizaron variaciones como por ejemplo el tamaño, que terminó siendo de 61x61 cm para poder competir en un mercado estandarizado en esta medida. Esto implicó realizar nuevas simulaciones en "AFMG Reflex" teniendo en cuenta que no variarían grandemente con el tamaño del prototipo, los datos que se obtienen son únicamente de un solo sistema, otras marcas muestran las curvas de coeficientes de difusión de arreglos, por lo que obviamente sus especificaciones muestran mayores coeficientes comparados con el difusor de este proyecto.

En cuanto a la geometría utilizada, el diseño se rige a formas simples como triángulos o superficies convexas, el análisis de las reflexiones producidas puede ser visto en sus gráficas polares, notando sus deficiencias las ventajas por frecuencia y por ángulo de incidencia.

En la iniciación del proyecto se planteó como hipótesis el crear un sistema de difusión acústica basado en acústica geométrica, objetivo cumplido ya que la forma final del difusor está basado en teoría geométrica y como se comportan las reflexiones producidas por él, así mismo se planteó un rango de frecuencias medias altas, factor que se tomo en cuenta durante las simulaciones, variando la forma se pudo obtener difusión a partir de los 500Hz, donde empieza a decaer la curva de coeficientes desde los 2000Hz.

El panel muestra una difusión clara en frecuencias bajas y medias, además de cancelaciones de fase en frecuencias altas de hasta 30dB, lo que no es muy beneficioso para llegar a cuantificar el brillo y perjudica la difusión a partir de 1000Hz.

La construcción del prototipo fue satisfactoria, aunque se espera un resultado impecable en cuanto a forma cuando se realice el diseño de manera industrial y no manual, existen detalles donde se puede notar que el trabajo fue hecho manualmente pero es un excelente ejemplo y muy aproximado del panel final.

Durante todo este proceso siempre se tomo en cuenta el desarrollo del producto en un mercado de insumos y sistemas acústicos. Se puede decir que la parte técnica del difusor esta a un 70% ya que se puede cubrir aún más expectativas de los compradores en el mercado realizando más mediciones de laboratorio bajo normativa ó utilizando simulaciones de BEM (Boundary Element Method), métodos que no pueden ser implementados en nuestro medio aún, debido al alto coste de sus laboratorios. Aún sin estos paramentos, importantes, se sabe que el sistema está listo para ser comercializado y que puede llegar a tener una gran acogida en el mercado debido a que es un producto innovador a nivel nacional y con parámetros técnicos más detallados a nivel internacional, en comparación a otros sistemas.

El Diseño C presenta una excelente difusión en frecuencias altas, y puede ser también un excelente diseño con el cual se puede profundizar en la investigación.

Finalmente el panel es efectivo desde los 500Hz hacia adelante, ayudando a corregir problemas típicos en una sala como la inteligibilidad ya que mejora la difusión en el rango de la voz humana.

No obstante éste difusor también presenta deficiencias muy marcadas como una mala difusión en 1600Hz con caídas muy marcadas, es decir, demasiada energía regresando a la fuente. En la gráfica de 2500Hz existen excesivas focalizaciones y cancelaciones con diferencias de hasta 30dB lo cual causa una mala difusión en 2500Hz y en bandas continuas.

8.2. Recomendaciones.

Durante el proceso de diseño del difusor se pueden tomar en cuenta varias recomendaciones, entre las más importantes como experiencia están, la recopilación de información del tema, para obtener un panorama más amplio del medio en el que se desarrolla la investigación y aplicar varias teorías para complementar la hipótesis planteada. Otra recomendación es la búsqueda de software existente en el mercado, útil durante el diseño, ya que el mismo puede aportar grandemente a la mejora del producto final, obteniendo la mayor cantidad de parámetros útiles para comercializarlo.

Para finalizar, se debe conocer que en Ecuador existen limitaciones tecnológicas y muchas veces hasta de mano de obra para la elaboración de nuevos productos como este. Aún así el conocimiento es la herramienta principal para desarrollar una idea e ingeniarse la forma de conseguir, diseñar y crear sistemas de cualquier tipo, sin dejarse decaer por la falta de recursos sino mas bien es recomendable buscar la forma de lograr diseñar y crear algo con las herramientas existentes en el medio como software o la utilización de fórmulas matemáticas y teoría acústica.

Bibliografía

- Bruneau, M. (2006). *Fundamental of acoustics*. ISTE Ltd.
- Carrión, A. I. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona.
- D'Antonio, T. J. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers*. Abingdon.
- Everest, F. A. (2001). *Master handbook of acoustics*. Mc Graw Hill.