

PROYECTO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DIFUSOR ANIDADO, CON AMPLIO
ANCHO DE BANDA DE FRECUENCIAS.

MAURICIO J VERGARA A

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA INGENIERIA DE SONIDO
BOGOTA D.C, 2005

PROYECTO DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DIFUSOR ANIDADO, CON AMPLIO
ANCHO DE BANDA DE FRECUENCIAS.

MAURICIO J VERGARA A

Proyecto de Grado como Requisito para obtener el titulo
De ingeniero de sonido

Asesores

Físico. Fernandez Herrera Luis Jorge.

Asesor temático.

Lic. Magister. Arias Olga Lucia

Asesora Metodológica

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA INGENIERIA DE SONIDO

BOGOTA D.C, 2005

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Ciudad y fecha (día, mes, año)

AGRADECIMIENTOS.

A Dios por la vida y tantas bendiciones, a mis padres Cira y José Vergara por todos estos años de esfuerzo y sacrificio, a mis hermanos y Cuñados por su apoyo incondicional.

A Olga Lucia y Luís Jorge Herrera por su colaboración y consejos.

A los ingenieros Francisco Ruffa, Pedro Valleta, Camilo Cubides por compartir sus conocimientos.

A mis amigos y compañeros por su amistad y compañía.

CONTENIDO.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1 ANTECEDENTE.

1.2 DESCRIPCION Y FORMULACION DEL PROBLEMA.

1.3 JUSTIFICACION.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION.

1.4.1 Objetivo General.

1.4.2 Objetivos Específicos.

1.5 ALACANCES Y LIMITACIONES.

1.5.1 Alcances.

1.5.2 Limitaciones.

2. MARCO DE REFERENCIAS.

2.1 MARCO CONCEPTUAL.

2.2 MARCO CONCEPTUAL.

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO.

2.3 MARCO TEORICO

2.3.1 Difusión.

2.3.1.1 Superficies Difusoras.

2.3.2 Tipos De Difusores.

2.3.2.1 Difusores Policilíndrico.

2.3.2.2 Difusores de Schoreder.

2.3.2.3 Principales Tipos De Difusores.

2.3.2.3.1 Los Difusores MLS.

2.3.2.3.2 Los Difusores QRD

2.3.2.3.2.1 Difusores Unidimensionales.

2.3.2.3.2.2 Difusores Bidimensionales.

2.3.2.3.3 Los Difusores PRD.

2.3.2.3.4 Difusor Anidado.

2.3.2.4 Otros Difusores.

2.3.2.4.1 difusores Basados En Raíces Primitivas.

2.3.2.4.2 Difusores Basados En Residuos Cuadráticos.

2.3.2.4.3 Difusores Bidimensionales Basados En El Teorema Del Resto chino.

2.3.2.4.4 Difusor Fractal Basados En Residuos Cuadráticos.

3. METODOLOGIA.

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACION.

3.2 LINEA DE INVESTIGACION DE U.S.B / SUBLINEA DE FACULTAD /CAMPO TEMATICO DEL PROGRAMA.

3.3 TECNICAS DE RECOLECCION DE INFORMACION.

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.

4.1 Evaluación Y Elección De Los Materiales.

4.1.1 Acrílico

4.1.2 Icopor (Poliestireno Expandible)

4.1.3 Madera Ordinaria.

4.1.4 Aglomerado Mdf

4.1.5 Comportamiento Acústico De Los Materiales

4.2 Diseño Y Construcción Del Difusor Anidado.

4.2.1 Diseño Del Difusor Anidado.

4.2.2 Construcción Del Difusor

4.2.2.1 Elaboraciones De Los Cortes Del Material.

4.2.2.2 Elaboraciones De Difusores Secundarios Para Media Y Altas Frecuencias.

4.2.2.3 Construcciones Del Difusor Secundario Para Bajas Frecuencias

4.3 Mediciones Y Pruebas Acústica Del Difusor Anidado.

4.4. Proceso De Medición Y Captación De Respuesta Al Impulso.

4.5 Procesamiento Y Análisis De Datos.

4.6 Diagramas Polares De Dispersión Sonora.

4.6.1 Diagramas Polares De Superficie Plana

4.6.2 Diagramas Polares De Dispersión Sonora Del Difusor Anidado.

Lista De Tablas

Tabla 1. Coeficientes De Absorción De Materiales.

Tabla 2. Coeficiente De Absorción Del Mdf.

Tabla 3. Profundidades En Cada Ranura Del Difusor Primario.

Tabla 4. Profundidades En Cada Ranura Del Difusor Secundario.

Tabla 5. Dimensiones De Los Cortes Del Material, Para El Difusor Secundario.

Tabla 6. Dimensiones De Los Cortes Para El Difusor Primario.

Tabla 7. Coeficiente de Difusión Normal.

LISTAS DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1. Reflexión, Absorción Vs. Difusión.

Ilustración 2. Cinerama, Seattle, USA, Sala De Cine.

Ilustración 3. Sistema De Medición De Difusores De Plano Sencillo.

Ilustración 4. Difusión Vs. Reflexiones Especulares.

Ilustración 5 Decays Irregulares.

Ilustración 6 Superficies Difusoras.

Ilustración 7 Estructura Básica De Un Difusor De Schroeder.

Ilustración 8 Laminas De Metal De

Ilustración 9 Dispersión Polar Del Primer Experimento De Schroeder.

Ilustración 10 Modelo QRD 734.

Ilustración 11 Modelo Omnidifusor Tm

Ilustración 12 Difusor Anidado.

Ilustración 13 Difusor De Raíces Primitivas Y Su Distribución Polar.

Ilustración 14 Difusor De Sonido De Residuos Cuadráticos Y Su Dispersión Polar.

Ilustración 15 Plano Del Corte Transversal Del Difusor Primario.

Ilustración 16 Plano De Corte Transversal Del Divisor Secundario.

Ilustración 17 Plano Del Corte Transversal Del Difusor Anidado Final.

Ilustración 18 Construcción Del Difusor Secundario.

Ilustración 19 Construcción Del Difusor Primario.

Ilustración 20 Medición De Ruido De Fondo.

Ilustración 21 Ubicación De La Fuente, 0 Grados.

Ilustración 22 Ubicación De La Fuente -55/55 Grados.

Ilustración 23 Difusor Anidado.

Ilustración 24 Respuesta Al Impulso.

Ilustración 25 Análisis Frecuencial Del Espectro Sonoro.

Ilustración 26 Diagramas Polares De Dispersión De Superficie Plana, Incidencia Normal 0 Y-55 Grados.

Ilustración 27 Incidencia Normal, 0 Grados Del Difusor Anidado.

Ilustración 28 Incidencia Aleatoria -55 Grados.

Ilustración 29 Incidencia Aleatoria 55 Grados.

Ilustración 30 Coeficientes de Difusión.

GLOSARIO

ABSORCIÓN: relación entre la energía sonora absorbida por la superficie de un material dado, y la energía que llega a esta superficie desde la fuente sonora.

AMPLITUD: la variación máxima de una onda de su valor medio. El aumento de la amplitud de honda sonora aumenta el volumen.

ANÁLISIS DE FOURIER: aplicación de la transformada de Fourier a una señal para determinar su espectro.

ANCHO DE BANDA: límites superior e inferior de frecuencia útil de un dispositivo.

ARMÓNICO: cualquier múltiplo de una frecuencia. Es responsable del carácter o textura de la nota.

ATENUACIÓN: reducción de la intensidad o volumen de una señal.

CAMARA ANECÓICA: recinto cuyas superficies están cubiertas de materiales absorbentes de forma que no existan reflexiones, para así simular el campo libre.

CAMPO ACÚSTICO: forma de representar la acción de una magnitud física sobre una región del espacio.

CAMPO DIFUSO: campo acústico en donde llegan diferentes reflexiones provenientes de todas las direcciones del espacio.

CAMPO LIBRE: campo acústico en donde las ondas sonoras se propagan libremente y se cumple para las ondas esféricas la ley del inverso cuadrado de la distancia.

CAMPO REACTIVO: campo acústico donde existe almacenamiento de energía, tanto cinética en el movimiento relativo del medio, como potencial elástico en la densidad del medio.

CAMPO REVERBERANTE: es el campo generado por todas las reflexiones de un recinto, para el cual se asume teóricamente que es homogéneo.

CORRELACION CRUZADA INTERAURAL (IACC): correlación cruzada entre las respuestas impulsionales calculadas en ambos oídos. Es indicativa del grado de similitud existente entre ambas señales.

DECIBEL (DB): unidad que expresa la diferencia en nivel de sonido. El nivel dB es una cantidad logarítmica. Décima parte de un Belio.

DIAGRAMA POLAR: representación de la magnitud de una cualidad empleando coordenadas polares.

DIFUSOR DE PLANO SENCILLO O UNIDIMENSIONAL: superficie que muestra un claro comportamiento aproximadamente isotropito, para la que se hace necesaria una evaluación hemisférica con el fin de determinar la calidad de difusión.

DIVISOR DE FRECUENCIA: dispositivo que divide una señal en diferentes bandas de frecuencia.

FAST FOURIER TRANSFORM (FFT): transformada rápida de Fourier. Sistema que permite la aplicación de la Transformada de Fourier en un periodo corto de tiempo.

IMPEDANCIA ACÚSTICA (Z_A): la impedancia acústica de un medio fluido actuando sobre o a través de una superficie S dada, es el cociente complejo entre la presión sonora eficaz promediada sobre la superficie y la velocidad eficaz de volumen a través de la superficie.

IMPEDANCIA ACÚSTICA ESPECÍFICA (Z_S): tomada en un punto, será la relación compleja entre la presión sonora eficaz y la velocidad eficaz de las partículas en dicho punto.

IMPEDANCIA CARACTERÍSTICA (Z_C): Es la relación entre la presión sonora eficaz en un punto y la velocidad eficaz de las partículas en ese mismo punto, para una onda libre progresiva plana.

ÍNDICE DE DIRECTIVIDAD: unidad de dirección angular de la radiación sonora de un altavoz, se presenta en nivel dB más alto o más bajo que si el sonido fuese producido por una fuente esférica.

INTERFERENCIA: En acústica, mezcla del sonido directo con las diferentes reflexiones.

LONGITUD DE ONDA: la distancia que viaja una frecuencia en el tiempo que tarda en completar un ciclo.

NIVEL DE PRESIÓN SONORA (NPS): 20 veces el logaritmo de la relación entre el valor eficaz de la presión sonora y el valor eficaz de la presión umbral de audición, a 1KHz.

OCTAVA: un intervalo de frecuencia tal que la mayor frecuencia es dos veces la frecuencia menor.

OMNIDIRECCIONAL: tipo de patrón de directividad en la que la sensibilidad es igual en todas las direcciones. 2. Micrófono que posee esta característica direccional.

ONDA ESFÉRICA: onda cuyos frentes son esferas concéntricas.

ONDA PLANA: onda cuyos frentes son planos paralelos perpendiculares a la dirección de propagación.

REFRACCIÓN: cambio en la dirección de una onda sonora, causado por la naturaleza del medio.

RESPUESTA AL IMPULSO: Es aquella información que ofrece un sistema al ser excitado con un impulso unitario.

REVERBERACIÓN: sonido que generan las múltiples reflexiones del sonido que emite una fuente, en las paredes y superficies de una sala.

SEÑAL: Es la variación de un parámetro físico en el dominio del tiempo.

SISTEMA: Todo dispositivo capaz de procesar un mensaje o señal.

TEOREMA DE FOURIER: el teorema de Fourier predice que una función periódica puede desarrollarse en una serie de senos y cósenos.

TIEMPO DE REVERBERACIÓN (RT): tiempo que tarda el sonido dentro de una sala una vez apagada la fuente en decaer la millonésima parte de su energía, lo que equivale a 60 dB.

INTRODUCCION

Un difusor anidado es un dispositivo basado en difusores a escala de manera que cada uno de ellos cubra un rango específico de frecuencias y obtenga así un rango de cobertura más amplio, evitando además los efectos de "solapamiento" lo que significa que este tipo de difusores no presenta enmascaramiento sonoro de una frecuencia sobre otra; Cada difusor nos proporciona una difracción uniforme sobre un rango específico de frecuencias de manera que el ancho de banda efectivo se amplía.

Los difusores son dispositivos capaces, gracias a su forma y construcción, de provocar reflexiones difusas de las ondas acústicas que inciden sobre ellos aumentando el grado de difusión de una sala.

El abordar su estudio y diseño, significa una evaluación de los difusores en general, por lo cual se realizan mediciones y pruebas científicas de materiales que se adaptan al requerimiento planteado, además de estudiar y comparar las propiedades de otros difusores ya aplicados como los ORD., entre otros.

Este proyecto de investigación nace con la necesidad de la implementar modelos físico - matemáticos que describan las características de un dispositivo difusor acústico; diversos factores han contribuido a su estudio, uno de ellos es la necesidad de crear campos sonoros especiales y realmente agradables.

Esta investigación consiste en el diseño y construcción de un difusor anidado capaz de generar un campo difuso que cubra un rango específico de

frecuencias bastante amplio, en comparación con los difusores actualmente aplicados en las distintas salas de nuestro país.

Los campos sonoros son los distintos espacios sonoros que de acuerdo a factores como materiales, forma, dimensión y demás atributos de un recinto, son capaces de posibilitar condiciones especiales en cuanto a la generación, transmisión y percepción del sonido; adicionalmente dentro de estos campos se cumplen ciertas leyes físicas con respecto al sonido, como son que en un campo libre se cumple la ley del cuadrado inverso, mientras que en un campo difuso esta ley no se cumple sino que la energía acústica se mantiene constante.

Uno de los problemas más importantes a resolver en las salas de música consiste en la creación de un campo sonoro muy difuso, esto es, que el sonido sea envolvente. Para lo cual es necesario evitar, en lo posible las reflexiones especulares en algunos lugares.

El difusor acústico producto de este proyecto de grado, es el resultado de una delicada investigación y experimentación con procedimientos científicos, logrando que este dispositivo sirva como aporte en la solución de problemas en el diseño acústico, específicamente en diseño de recintos que requieren de una acústica muy especial, como son los estudios de grabación, salas de conciertos, cinemas entre otros.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.1. ANTECEDENTES

En Colombia la aplicabilidad de materiales y dispositivos acústicos es incipiente como consecuencia de la ausencia de profesionales especializados en el tema, sumado a la falta de interés por parte de diseñadores y demás profesionales anteriormente involucrados en este campo de la acústica.

La privación o poca utilización de difusores en las distintas salas, acaece mala calidad sonora, lo que genera ambientes sonoros poco agradables. En muchos sitios se aprecia, la inexistencia de estos elementos, y así gran parte de lugares la sensación sonora percibida es muy deprimida, debido a que el sonido no se transmite ni se percibe de la mejor forma, por la excesiva presencia de reflexiones especulares o peor aun son ambientes muertos por que la energía sonora se extingue muy rápidamente.

Los difusores anidados son unos de los dispositivos acústicos mas importantes en lo referente al diseño acústico, por su características de difusión sonora (amplio ancho de banda) son indispensables en aquellos recintos donde las reflexiones se hacen difíciles de controlar.

Sea por falta de recursos económicos, disposición de tiempo o por que este tema es novedoso, en nuestro país los diseñadores entre otros profesionales involucrados en el diseño acústico, no han profundizado en dicho tema, lo que significa aplicación de materiales y elementos que no responden con las características de un difusor de sonido, generando así mala calidad sonora.

1.2. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Al diseñar y construir un difusor de sonido es indispensable tener en cuenta muchos factores científicos, estudiar las propiedades de los posibles materiales de su construcción como son durabilidad, costos, aplicabilidad: como también los fenómenos acústicos a que se exponen estos materiales reflexión y absorción, dichos factores se hacen indispensables al momento de seleccionar el material en que se va a construir el difusor.

En la actualidad en Colombia estos criterios de diseño no son tenidos en cuenta o su análisis es muy superficial; el estudio y los métodos de medición de absorción y reflexión son incipientes o pocos conocidos lo que genera una mala selección de los materiales para la construcción de un difusor de sonido.

Con esta situación es fundamental un estudio serio para el diseño de difusores lo que hace necesario plantearse un interrogante:

¿Cómo diseñar y construir un difusor acústico anidado que responda con las necesidades en cuanto al diseño acústico?

1.3 JUSTIFICACION.

Este proyecto de investigación se centra en estudiar y crear estrategias de diseño de un difusor anidado, cuyo objetivo final es lograr construirlo en un material que además de económico y práctico, responda con eficiencia frente a fenómenos sonoros como reflexiones indeseadas las cuales pasan de ser un problema molesto a convertirse en una sensación sonora agradable. Algunos diseños de difusores, actualmente cuentan con un estudio serio y científico para su construcción; sin embargo su rango de difusión en frecuencia no es lo suficientemente amplio, están contruidos con materiales costosos y son difusores de grandes dimensiones que los convierte en dispositivos poco práctico para aplicarlo en recintos con poco espacio

Impulsar el diseño y construcción de un difusor anidado con un previo análisis y estudio científico, crea conciencia en los futuros diseñadores acústicos a crear recintos con acústica excelente, y a introducir difusores anidados en los próximos diseños acústicos, con el fin de logra posicionar este tipo de difusores como una herramienta para lograr ambientes sonoros con alta calida.

Con la aplicación de difusores, todo se oirá apropiadamente, debido a que el sonido está correctamente distribuido dentro de un recinto y se minimizará el estrés o cansancio auditivo, principalmente por no tener que utilizar altos niveles sonoros y por no sentirse en un ambiente “sordo”.

En el desarrolló de este proyecto se consigue en nuestro país un avance en la elaboración de productos o dispositivos acústicos, liberando cierta dependencia que presenta actualmente Colombia con los demás países que tiene larga experiencia en al elaboración de difusores acústicos

Con esta investigación se suministra a diseñadores, profesionales y estudiantes las herramientas y metodologías para diseños y construcción de

difusores, significando un avance en el desarrollo de las ciencias acústicas en Colombia, con un impacto socioeconómico favorable, por que crea independencia de países como USA, España, Argentina o México que tienen larga tradición en fabricación de difusores acústicos.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un difusor anidado, con fundamentos científicos y basados en aspectos acústicos y económicos para su construcción.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el o los difusores que se relacionan con la necesidad planteada.
- Evaluar distintos materiales para el desarrollo de un difusor anidado.
- Seleccionar un material práctico, económico y funcional para construcción de difusor
- Diseñar un difusor anidado con amplio ancho de banda de frecuencia.
- construir el difusor anidado.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

1.5.1 ALCANCES.

Se desarrolla un difusor anidado con amplio ancho de banda en la difusión de frecuencias, capaz de generar la funcionalidad y que cumpla las expectativas en cuanto a la acústica de salas, con bajo costo y con un análisis y experimentación previa, para su posterior implementación en el país.

Se obtiene un difusor anidado para ser aplicado en distintas salas donde se necesita que las condiciones acústicas sean realmente especiales, y donde la percepción sonora en la audiencia sea realmente agradable; por citar un ejemplo, si se ubica un difusor anidado dentro de un estudio de grabación, el ingeniero de grabación logrará percibir un sonido puro sin ecos o reflexiones molestas, mientras que el músico o locutor juzgará que el sonido que emite es realmente atractivo.

Este tipo de difusor acústico, ofrece además de su amplio ancho de banda de difusión, una adición estética adaptándose a cualquier espacio. Su uso se extiende desde estudios de grabación, pasando por cuartos para ensayos musicales, donde los músicos necesitan que el sonido que emiten sus instrumentos sea el más fiel y nítido; por otra parte, es usado en auditorios o sala de conciertos donde se necesita un tiempo de reverberación específico, de acuerdo al uso que se le da al recinto; este requerimiento es posible con la aplicación del difusor anidados, puesto que va a eliminar los ecos, pero no la reverberación.

1.6.2 LIMITACIONES

Este proyecto generó costos considerables, como son los materiales, transporte entre otros; por otro lado su estudio presentó limitaciones técnicas como la ausencia de laboratorios y otros instrumentos de medición acústica; dichas herramientas son necesarios para el desarrollo, diseño y construcción del difusor anidado.

Para el desarrollo de esta investigación es necesario el apoyo logístico, instrumental y tutorías por parte del grupo de docente de la universidad y se generen nuevas alternativas de solución frente a limitaciones que posee actualmente, como la dificultad de realizar mediciones acústicas en un sitio

adecuado o lograr acuerdos con la población afectada por estas mediciones acústicas.

Este proyecto se desarrollo con las herramientas actualmente disponibles, por ejemplo la ausencia de cámara anecoica creo la necesidad de realizar las mediciones en campo libre. Con base en la norma AES-4i/2001 que describe la forma de medición y análisis de un difusor acústico en campo libre, se utiliza una señal sonora ya sea MLS o Long Sine Swep, que contienen un barrido de frecuencia senoseidal, y con un micrófono ECM8000 omnidireccional se captura la respuesta al impulso del difusor, para después procesar los datos con un software acústico y finalmente determinar la funcionalidad del difusor.

2. MARCO DE REFERENCIA.

2.1 MARCO CONCEPTUAL.

Siendo la difusión sonora un tema tan importante dentro del diseño de recintos de audición crítica, donde el sonido juega un papel muy importante, es necesario conocer algunos conceptos que participan de este tema completamente novedoso.

La difusión sonora es la correcta distribución de la energía sonora dentro de un espacio determinado, en donde los difusores actúan sobre las ondas sonoras que inciden sobre este dispositivo, controlando las reflexiones especulares molestas, y ayudan a crear una sensación sonora de envolvimiento.

La creación de un campo difuso es una de las características por la que se aplican los difusores, solo se logra si existe una superficie con una forma geométrica capaz de reflejar una onda incidente en todas las direcciones, para lo cual supongamos que tenemos una estructura de forma irregular, como estatuas y demás ornamentos que se aplicaba en los teatros antiguos.

En la actualidad no resulta viable la construcción de recintos con estatuas y demás adornos, las pautas estéticas actuales no están acordes con estos tipos de teatros. Las salas actuales suelen construirse para una gran variedad de espectáculos, no solo para música clásica sino que, por razones económicas, deben servir para teatros, ballet, reuniones políticas, congresos, conferencia, óperas, musicales modernos, rock, jazz, elecciones de reinas de belleza, etc., y para todo esto hace falta un espacio muy amplio, tanto acústico como visual, que no tienen las salas antiguas.

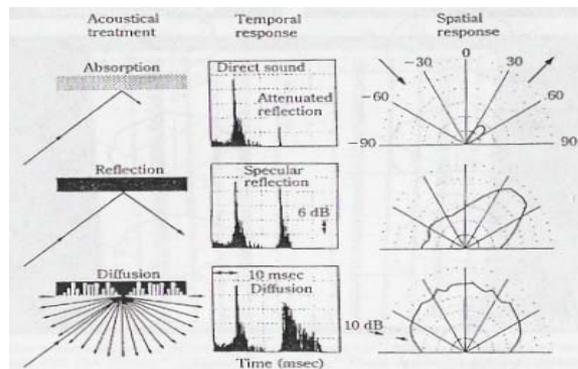
Es en este aspecto donde los difusores se involucran como elementos indispensables tanto como para la creación de campos sonoros especiales, compatibles con los cánones actuales de diseño arquitectónico, sumado su aspecto económico que en comparación con estatuas y demás adornos, resultan muchos más económicos.

Un difusor anidado por sus características de difusión se hace fundamental para el tratamiento de recintos con muchas reflexiones especulares, y de difícil control, este tipo de difusor por su amplio ancho de banda de difusión, es recomendado y versátil en todo tipo de recintos como teatros, cines, salas de conciertos entre otros.

Son muchos los recintos en los que se hace indispensable la generación de campos difusos ya sea por conservar tiempos de reverberación necesaria y acuerdo a cada recinto, o también por controlar los molestos ecos producto de la reflexiones especulares que se producen en la superficies planas y rígidas que forma algunos de estos recintos.

Se entiende por reflexión especular, aquella que según la ley de Snell, una onda que incide con un Angulo determinado sobre una superficie, esta será reflejada con el mismo Angulo en que incidió la onda pero en sentido contrario; es decir si una onda sonora incide con un Angulo de 45 grados la onda reflejada será en 45 grados en sentido contrario. (Ver Ilustración 1).

Ilustración 1. Reflexión vs. Absorción, difusión.



Master Book of Acoustic. Cuarta Edición. Pág. 301

Por otro lado con el fenómeno de la difusión la ondas sonoras se comportan de forma completamente distinta, cuando una onda sonora incide sobre este la onda se dispersa en distintas direcciones y con distintos ángulos de apertura; la forma de cualificar la difusión es mediante el coeficiente de difusión, el nivel de difusión se mide en niveles entre 1 y 0, uno para valores cuando hay total difusión, es decir cuando se mide una superficie en cámara anecoica o campo libre en un semicírculo con el micrófono en distintos grados se recibe la misma presión sonora reflejada y cero cuando en una sola posición se obtiene un nivel diferente de cero.

Uno de los efectos que se presentan en estudios de grabación y demás recintos involucrados con el sonido son la coloración en frecuencias, es decir cuando en un espacio la audiencia no percibe exactamente lo que esta emitiendo la fuente sonora, se aprecian ciertos tonos o frecuencia mas marcados o con mayor intensidad que otros, lo que genera una desagradable sensación sonora; es por esto que los diseñadores han tomado conciencia en la urgencia de introducir los difusores en los diseño de acústica actuales.

En este aparte se muestra algunos de los uso del difusor anidado en este caso el difusor diffractal como medida para controlar y generar buena acústica en los

espacios. Estudios de grabación, cuartos de escuchar, teatros caseros, salas de conferencias han introducidos los difusores anidados o difractal para mejorar su acústica como se ilustra en la imagen es un cinema con difusores anidados; la renovación del Cinema presentó un desafío interesante para diseñar un cine en el cual las superficies del cuarto complementaron los altavoces para proporcionar una envoltura que rodee la experiencia sana.

Ilustración 2. Cinerama, Seattle, USA, Sala de Cine.



www.Cinerama.com

Tradicionalmente, los cines se han diseñado para ser sobre todo absorbentes. En este acercamiento, el cuarto no contribuye a la experiencia del rodear. La meta es utilizar la difusión y la absorción sana. En las superficies de la pared se utilizó un amplio difusor Difractal de la anchura de banda de RPG, el resultado es una arquitectura con una acústica verdaderamente estética.

Se hace indispensable entender, que para que exista buena acústica en un recinto, no es suficiente introducir materiales absorbentes y reflectantes, sino que una buena acústica se logra con la correcta distribución de distintos coeficiente de absorción y difusores y demás elementos acústicos.

2.2 MARCO LEGAL O NORMATIVO.

Se estudia las características de diferentes materiales, para seleccionar los que se adapten a las necesidades y requerimientos necesarios para el diseño y construcción del difusor anidado; por mencionar unas de estas características, el material debe ser resistente, que soporte los estragos del tiempo y transporte; además de rígido, debe ser reflectivo para evitar alta absorción sonora, con lo cual se garantiza que no exista pérdida de energía.

Con una exposición de los materiales, a señales sonoras LSS (Long sine wave); se obtiene la respuesta al impulso, y con esto los datos acústicos de coeficiente de absorción del material, estos datos determinan la elección del material en que se va a construir el difusor; considerando los costos económicos que representa el material elegido.

Se aplicaran técnicas de medición para difusores acústicos de acuerdo con la norma AES-4id/2001 (AES Information Document For Room Acoustic and Sound reinforcement systems Characterization and measurement of surface scattering uniformity) para lograr comprobar los niveles de dispersión o difusión sonora del difusor anidado.

Además este documento indica que en ausencia de cámara anecoica las mediciones de un difusor acústico pueden realizarse en campo libre sobre una superficie muy reflectante.

Con respecto a los campos de medición, según la norma base de esta investigación, hace referencia a que el difusor puede ser medido en campo cercano y campo lejano, ya que los difusores se pueden emplear en cualquiera de las dos situaciones. Al medir el difusor en campo cercano se hace para establecer si existe concentración de energía en ciertos puntos, esto quiere decir si en ciertos lugares el nivel de presión sonora es mayor que otros; por otra parte las mediciones en campo lejano determinan que tanta difusión genera el difusor puesto a medición, en donde se comprueban los siguientes criterios acústicos:

$$r \gg D_{max}$$
$$r / D_{max} \gg D_{max} / \lambda$$
$$r = 2r_1r_2 / (r_1+r_2)$$

Donde:

D_{max} es la máxima dimensión del difusor.

λ longitud de onda

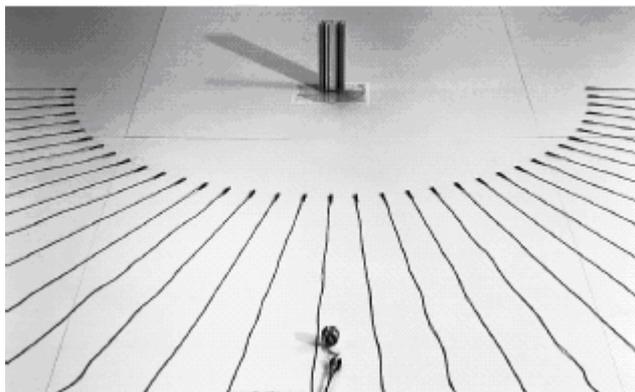
r_1 es la distancia de la fuente al punto de referencia.

r_2 es la distancia del receptor al punto de referencia.

Para una medición de un difusor unidimensional (plano sencillo) como es el caso del difusor difractal, objetivo de este proyecto; se debe delinear un semicírculo en frente de la superficie sometida a prueba y tomar datos con una resolución angular de 5 grados, por lo cual es necesario tomar 37 puntos por cada posición de la fuente.

Esta norma indica que las mediciones realizadas en un campo lejano con las condiciones necesarias, la distancia entre la fuente y el punto referencia debe ser 10 m y el semicírculo y el micrófono debe tener un radio de 5m.

Ilustración 3. Sistema de Medición de difusores de plano Sencillo.



Norma AES-4id-2001, Pág. 8

El micrófono ubicado en el semicírculo se varia en su posición, cada 5 grados frente a difusor puesto a prueba, y para un coeficiente de difusión para incidencia aleatoria las posiciones de la fuente deben ser tomadas con una resolución angular máxima de 10 grados, si el tiempo es corto el coeficiente de difusión direccional se obtienen en incidencia normal y par ángulos de 55 grados.

Para este tipo de mediciones se utilizan señales como MLS (Maximum-Length Sequence) o LLS (Long Sine Sweep) que permitan obtener la respuesta al impulso, con esta información se obtiene mediante programación en Excel Microsoft los diagramas polares de difusión.

En lo referente al cálculo de los coeficientes de difusión, este significado depende de la frecuencia, calculado por banda de octavas o 1/3 de octavas. Se debe obtener los valores de nivel de presión sonora en cada punto o grado de medición y así calcular los coeficientes de difusión, reemplazando esta información en la siguiente expresión:

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

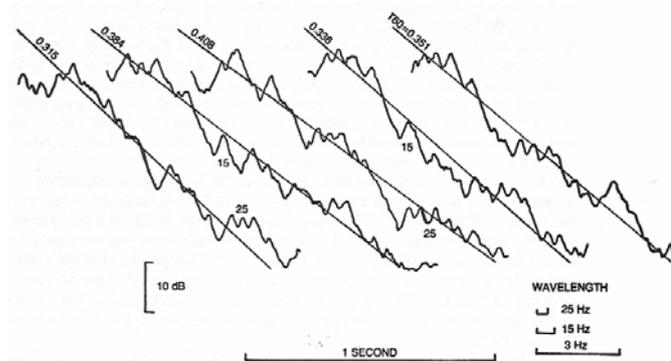
Con todo este análisis se describe el comportamiento y grado de funcionalidad del difusor anidado que se desarrolló en esta investigación, y queda demostrada su importancia como un elemento clave en el diseño acústico.

2.3 MARCO TEORICO.

2.3.1 Difusión.

Los campos difusos son incorrectamente conocidos como campos reverberantes pero según estudios recientes, se diferencian de estos, en el

Ilustración 5. Decays Irregulares. Se observa como varia los decays de acuerdo a cada frecuencia.



Diplomado de acústica, Difusores1, U.S.B, Alejandro Bidondo.

Para aumentar la diferencia binaural en las salas modernas podría pensarse en la absorción de las señales que inciden en el techo pero esto, en salas de 1000 o más asientos constituirían un enorme despilfarro de energía acústica. La solución ingenieria correcta es la de redireccionar la energía sonora de manera que llegue directa o indirectamente en forma lateral al escucha.

En los teatros antiguos la difusión se lograba mediante balcones, estatuas, adornos, etc. pero esto resultaría muy costoso y poco estético para los patrones actuales. Por ello se han diseñado dispositivos o difusores de dispersión controlada, los cuales se basan en paneles de ciertas geometrías. Es este uno de los aspectos por los cuales los difusores se hacen de suma importancia al momento de diseñar y construir un recinto con excelente acústica.

2.3.1.1 Superficies Difusoras.

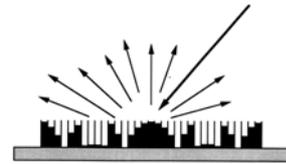
De acuerdo a estudios recientes, existirá difusión siempre y cuando en el se compruebe diferente trayectos de recorridos de las ondas sonoras y una

armonía entre los distintos coeficientes de absorción del recinto, con distintas superficies irregulares.

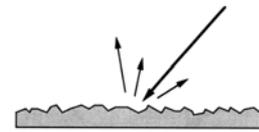
Una superficie tiene propiedad difusora² si posee características físicas como la distribución espacial y temporal de la energía acústica, y con esto un control de la especialidad y envolvimiento sonoro. Con la transformada de Fourier de una superficie (tendiendo en cuenta las alteraciones de fase que la misma genera) da como resultado las intensidades de las ondas reflejadas en función del ángulo de salida. Véase algunas superficies difusoras en detalle.

Ilustración 6. Superficies Dispensoras.

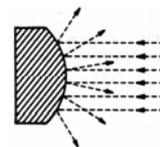
- Numéricos: (MLS, QRD, PR).



- Superficies aleatorias.



- Policilíndrico y derivados



Diplomado acústica, difusores 1, USB, Alejandro Bidondo.

Es posible percibir una sensación de difusividad³, cuando en la percepción sonora se distinguen tres características importantes como son:

- Decorrelación de las reflexiones, es decir, al oyente le llega con igual similitud binaural en tiempo y magnitud los rayos sonoros, esta sensación es conocida como sensación estero.

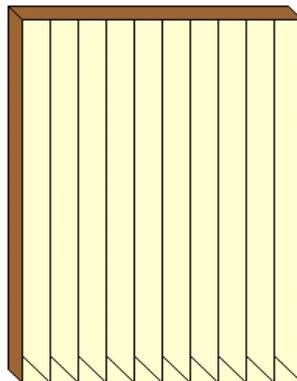
² Alejandro Bidondo, Diplomado Acústica, Difusores1,Pág. 8,USB,2003

³ Alejandro Bidondo, Diplomado Acústica, Difusores1,Pág. 9,USB,2003

- Escasa coloración de la fuente, se refiere, al sentido en que la fuente no presenta acentuaciones tonales o frecuenciales, por ejemplo, en un concierto de música instrumental, todos los instrumentos tendrán un nivel similar, sin que se presente mayor intensidad de uno sobre otro.
- Sensación de naturalidad, la fuente sonora se escucha en forma nítida y fiel, sin distorsión o desafinada.

A partir de estos requerimientos el Profesor M. R. Schroeder desarrolló una estructura cuya superficie produce una excelente difusión del sonido en un gran intervalo de frecuencias. (Ver ilustración 7.) Cada rendija se comporta como una fuente sonora pero con un retardo igual al doble de su profundidad, luego el problema se limita a encontrar cual debe ser la secuencia de profundidades para que el patrón de difracción de la estructura sea lo más uniforme posible.

Ilustración 7. Estructura básica de un difusor de Schroeder



www.RPGING.com/difusores.

En general tenemos:

$$r(x) = e^{2i\pi \frac{2d(x)}{\lambda}} \quad [1]$$

Donde:

$r(x)$ = factor de reflexión.

$d(x)$ = profundidad de la rendija en la posición x .

Utilizando la teoría de Fraunhofer de campo lejano tenemos que la amplitud de la dispersión $a(s)$ es igual a:

$$a(s) = \frac{1}{L} \int_0^L e^{-4i\pi \frac{d(x)}{\lambda}} e^{isx} dx \quad [2]$$

$$a(s) = \frac{1}{L} \int_0^L e^{\left(isx - 4i\pi \frac{d(x)}{\lambda} \right)} dx \quad [3]$$

Donde la magnitud del vector de dispersión s está relacionada con el ángulo incidente y el de difracción por:

$$s = 2\pi \frac{\text{sen}\alpha}{\lambda} d - 2\pi \frac{\text{sen}\alpha_i}{\lambda} \quad [4]$$

Si aproximamos la integral de la ecuación [1] con una sumatoria tenemos:

$$|s(x)| = \frac{1}{Nx} \sqrt{\left[\left[\sum_{k=1}^{NX} \cos \left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda} \right) \right]^2 + \left[\sum_{k=1}^{NX} \text{sen} \left(sx - 4\pi \frac{d_k(x)}{\lambda} \right) \right]^2 \right]} \quad [5]$$

Donde:

$d_k(x)$ = Profundidad

NX = Número total de muestras de profundidad

Se mostrara de forma sucinta los principales parámetros de diseño, las dos familias de difusores actuales y los diferentes tipos de difusores que se construyen.

Existen dos familias de difusores en los que se encuentran los poli cilíndricos y los difusores de Schroeder, frecuentemente llamados RPG.

2.3.2 Tipos de Difusores.

2.3.2.1 Difusores Poli cilíndricos

Este tipo difusores están conformados por un conjunto de superficies lisas de forma convexa organizadas secuencialmente con un radio de curvatura inferior de alrededor de los 5 m.

Por lo general el material empleado para su construcción es madera.

Teniendo en cuenta que las superficies convexas con un radio de curvatura mayor de 5 m actúan como reflectores del sonido, es decir como si fuesen superficies planas; la diferencia entre ambas radica en que la zona de cobertura es mayor, de este modo el nivel asociado a cada reflexión es menor. Caso contrario ocurre, si este radio de curvatura es reducido (menor a 5 m), se obtendrá una zona de curvatura mayor tal que el sonido reflejado ya no puede ser concentrado sobre la zona del público. El reflector se convierte en difusor.

2.3.2.2 Difusores de Schroeder o RPG.

Los difusores R.P.G. son dispositivos que consisten en un grupo periódico de hendiduras de igual amplitud pero de diferentes profundidades, separadas por paredes rígidas pero muy estrechas.

Las profundidades de las rendijas se determinan a partir de secuencias matemáticas que tienen la propiedad de que la transformada de Fourier del factor de reflexión es constante.

El principio de funcionamiento de éste tipo de difusores está basado en el fenómeno de interferencia entre ondas sonoras. Cuando dos ondas se

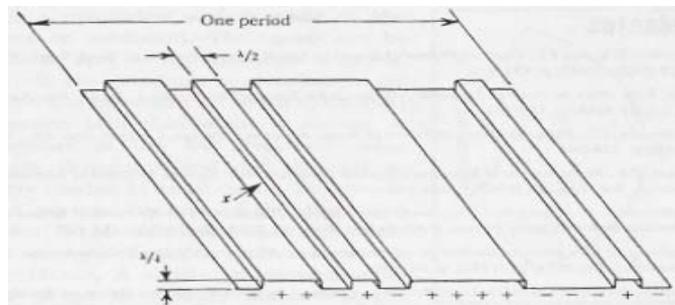
superponen, las presiones sonoras instantáneas respectivas se suman, si las ondas son iguales (misma amplitud) y están en el mismo estado de vibración en cada instante de tiempo, la presión sonora se dobla, pero si ambas ondas tienen misma amplitud y signo diferente se cancelan, produciéndose una interferencia destructiva.

Cuando una onda incide sobre una de las ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes de la ranura hasta alcanzar el fondo de la misma, en dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente el extremo superior. La fase de dicha onda depende del camino total recorrido por la misma en el interior de la ranura. Debido a que las ranuras tienen distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la reradiación será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de interferencia entre todas las ondas que intervienen.

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio dependerá del tipo de interferencia que tenga lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras. Uno de los primeros experimentos del profesor Schroeder, fue crear una superficie de metal doblada, revelada en la ilustración, donde la secuencia binaria de máxima longitud y período de longitud¹⁵ esta dada por:

-++-+-++++---+-

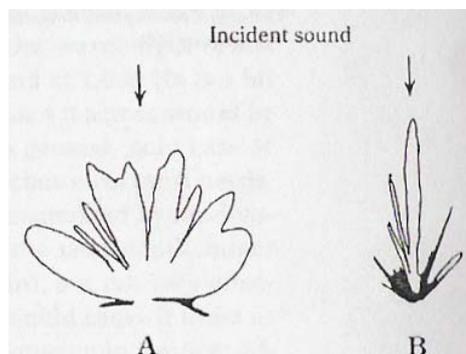
Ilustración 8. Lamina de Metal de Schoeder, se observa que las profundidades de las ranuras es de $1/4$ de la longitud de onda estudiada.



Master Hand Book of Acoustic. Cuarta Edición, Pág. 209.

Con este experimento, schroeder observo que la lamina se comportaba como una lamina común con reflexiones especular, por la cual concluyo que la ranuras no poseían las profundidades que el había considerado, es decir no tenían un $1/4$ de la longitud de onda, por lo contrario estaba en un $1/2$ de la longitud de onda de la profundidad, lo que lo llevo a realizar nuevamente el experimento con la lamina corregida. Al final obtuvo el patrón de reflexión esperado, (ver ilustración 8a.) descubriéndose una nueva forma de generar buena acústica, mediante la difusión sonora.⁴

Ilustración 9. Dispersión Polar del primer Experimento de Schroeder con Secuencias Numéricas.



Master Hand Book. Cuarta Edición, Pág. 291.

⁴ Everest. Op. Cit., Pág. 290

2.3.2.3 Principales tipos de difusores R.P.G.

Los tipos de difusores R.P.G. más relevantes son los siguientes:

- ▲ Difusores MLS.
- ▲ Difusores QRD.
- ▲ Difusores PRD.
- ▲ Difusores anidados.
- ▲ Otros difusores.

2.3.2.3.1 Los difusores MLS.

Basados en unas secuencias pseudos aleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1.

Se crea partiendo de una superficie lisa y reflectante, la cual se subdivide en tramos de igual anchura. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudos aleatorias, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Si el valor es -1, el tramo queda inalterado.

Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el tramo.

$W = \lambda/2 \rightarrow$ Anchura de cada tramo

$D = \lambda/4 \rightarrow$ Profundidad de cada tramo

Donde " λ " es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

El margen de frecuencias para la cual la difusión es óptima es únicamente del orden de una octava. Este tipo de difusores presenta una menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD.

2.3.2.3.2 Los difusores QRD.

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadrados, los unidimensionales y los bidimensionales.

2.3.2.3.2.1 Unidimensionales

Son los más utilizados a nivel práctico, (ver ilustración 4.) consiste en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Por lo general, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos.

Ilustración 10. Modelo QRD 734 Diseñado por la Empresa RPGINC, USA



WWW.RPGING.com

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas), que producen en un determinado margen de frecuencias una dispersión del sonido o difusión en planos perpendiculares a dicha ranura.

2.3.2.3.2 Bidimensionales

Aparecen con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio, este tipo de elementos difusores hacen su aparición como una generalización de los QRD unidimensionales con el fin de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. En estos difusores las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de profundidad variable y de forma usualmente cuadrada.

Los ángulos de difusión dejan marcar direcciones de máxima energía reflejada en un mismo plano para indicar direcciones de máxima energía localizadas sobre una superficie esférica.

Ilustración 11. Modelo Omnidifusor TM. Diseñado por la Empresa RPGINC.USA



WWW.RPGING.com

Para el diseño de estos se usan las mismas expresiones utilizadas para el diseño de los unidimensionales, la única diferencia es que la secuencia adimensional de profundidades de los pozos se obtiene a partir de la siguiente expresión generadora:

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

Donde:

p = número primo (3, 7, 11,...)

m y n = números enteros que van desde 0 hasta $p-1$

Mediante la multiplicación de los valores de la secuencia adimensional por el mismo factor de los difusores unidimensionales se obtiene la profundidad real de las ranuras, sin embargo estos son poco utilizados.

2.3.2.3.3 Los difusores PRD.

Son análogos a los difusores unidimensionales PRD, pero a diferencia con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo.

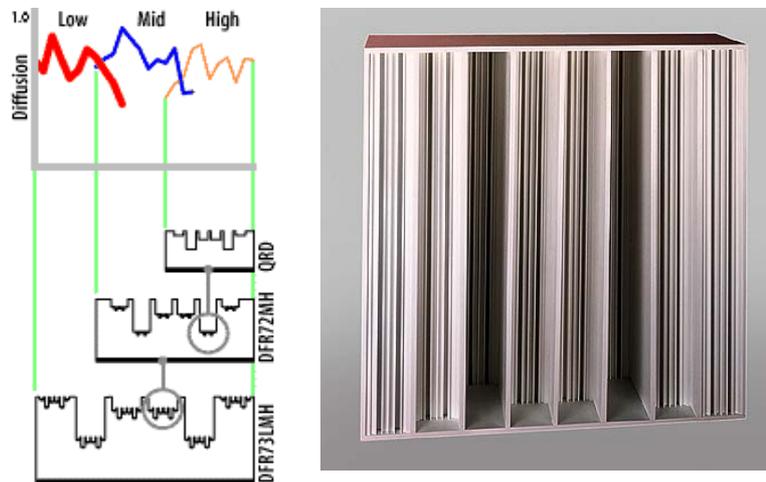
La reflexión especular que producen es prácticamente nula, por lo que los hace aconsejables como canceladores de ruido.

2.3.2.3.4 Difusores anidados.

El ancho de banda de los difusores QRD como hemos visto, está limitado en las altas frecuencias, por la anchura de las hendiduras practicadas y en las bajas frecuencias por la profundidad máxima de las mismas. Por lo que un difusor que nos pudiese ofrecer una cobertura espectral verdaderamente amplia se hace necesario. La solución es el uso de difusores anidados.

En los difusores anidados se observa cómo en el interior de cada una de las hendiduras que forman el difusor se encuentran a escala otros difusores, cada uno de ellos diseñado para cubrir una determinada frecuencia. Se ilustra a continuación la filosofía de este tipo de difusores, donde se observa que existen tres difusores semejantes de si mismo, uno dentro de cada ranura del difusor principal.

Ilustración 12. Difusor Anidado. En el diagrama se observa tres difusores en uno.



WWW.RPGING.com

La anchura de banda de un QRD es limitada en los de alta frecuencia por la anchura bien y en las frecuencias bajas por la profundidad máxima. Además, la cobertura amplia del área con órdenes periódicos enfoca energía en ciertas direcciones de la difracción.

El Difractal es el primer difusor fractal. Consiste en los difusores escalados similares jerarquizados del uno mismo, cada uno de los cuales cubren una gama de frecuencia específica y ofrece cobertura amplia del área sin efectos de lobing. Un Difractal contiene dos QRD jerarquizado, así forman un difusor dentro de un difusor⁵.

Cada difusor proporciona uniformemente una dispersión sobre una gama específica de frecuencias, de modo que la anchura de banda eficaz se extiende. El difusor anidado Ofrece una difusión baja, media y de alta

⁵ www.rpging.com/difusores, pag 1, Sept/ 2005.

frecuencia sobre una anchura de banda extendida, limitada solamente por la profundidad disponible.

Los Difusores generalmente dispersan sanamente, pero la absorción sonora puede ocurrir por resonancias de la onda dentro de las profundidades, es decir Cuando en las cavidades las pérdidas viscosas, debido a las partículas de aire inducidas por gradiente de presión fluyen entre los pozos adyacentes. El Difractal proporciona la difusión de alta frecuencia sin la adición de la absorción adicional.

Los difusores jerarquizados que abarcan el Difractal amplían el funcionamiento difusivo de alta frecuencia más allá del QRD. El coeficiente de difusión también se compara a un panel reflexivo plano que exhiba difusividad que disminuye con el aumento de frecuencia.

Para el diseño de este difusor anidado, se tendrán en cuenta los parámetros de diseño de un difusor QRD⁶, con la diferencia que en este difusor anidado, son dos difusores QRD en uno, es decir uno difusor para las frecuencias altas, dentro de un difusor para frecuencia bajas; en detalle estos parámetros se describen así:

- f_{\max} = frecuencia máxima para la cual se desea una optima difusión.
- f_0 = frecuencia de diseño (frecuencia mínima para la cual se desea una buena difusión)
- m_{\max} = orden o grado de difusión a la frecuencia f_0 (número entero)

m_{\max} Admite obtener el número de ángulos de difusión ($2m_{\max} + 1$), es decir las direcciones para las cuales la energía reflejada es máxima.

⁶ CARRIÓN, Op. cit., p. 389-393

La anchura de las ranuras se obtiene a través de la siguiente ecuación:

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

O de otra forma:

$$W + T = \frac{c}{2f_{\max}} = \frac{\lambda_{\min}}{2}$$

Donde:

W = anchura de las ranuras (en mm)

c = velocidad de propagación del sonido (en mm/s)

T = espesor de los divisores (en mm)

Debe procurarse que el espesor de los divisores (T) sea el mínimo posible, para evitar que afecten en el funcionamiento del difusor.

Pero la anterior ecuación, solo funciona para incidencia normal, por lo que para incidencia rasante, es decir en direcciones casi paralelas a la superficie, debe hacerse la siguiente corrección:

$$W + T = \frac{\lambda_{\min}}{4}$$

Con la siguiente ecuación, permitirá saber el número de ranuras que habrá en cada periodo.

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

p Será un número primo, por lo cual si el valor obtenido en el cálculo no corresponde a un número primo, este debe sustituirse por el número primo superior más cercano (Ej. Si el valor de p calculado es 6, debe cambiarse por $p = 7$).

Ya con el valor de p es posible calcular la profundidad de las ranuras.

$$d_n = \frac{S_n c}{2pf_0} \text{ (En cm.)}$$

Donde:

d_n = profundidad de cada ranura

S_n = secuencia adimensional de valores, obtenida, con la expresión matemática $n^2 \bmod p$, donde para un periodo completo, n toma el valor de todos los números enteros comprendidos entre 0 y $p - 1$. Todos los valores de S_n se multiplican por el factor $\frac{c}{2pf_0}$, para hallar la profundidad de cada ranura.

La máxima profundidad puede obtenerse reemplazando en la ecuación el valor más alto de S_n :

$$d_n(\text{max}) = \frac{S_n(\text{max})c}{2pf_0} \quad (\text{En cm.})$$

Con lo anterior es posible diseñar un difusor anidado, el cual se compone de dos difusores QRD normales, uno diseñado para frecuencias bajas, el cual se llamara primario y otro secundario para trabajar un rango de frecuencias medias y altas.

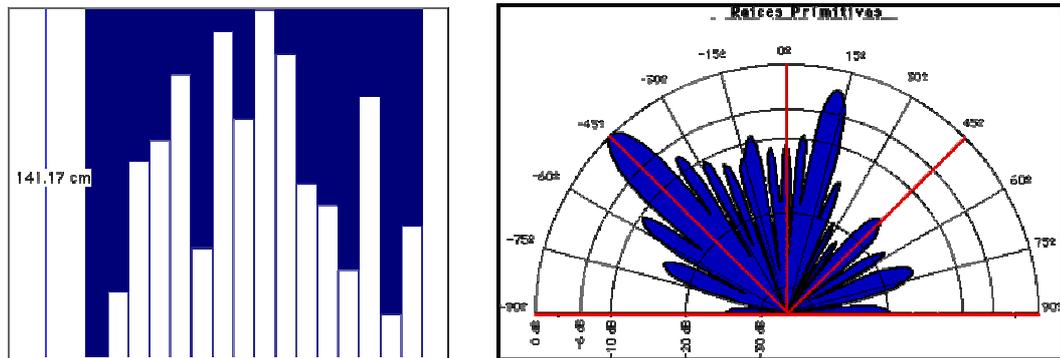
2.3.2.4 OTROS DISFUSORES

Este trabajo se complementa con el aporte de información de otros difusores poco conocidos, pero que al igual que los difusores anidados son de gran importancia en el tratamiento acústico de recintos. A continuación se revela otros tipos de difusores juntos con algunas de sus características principales.

2.3.2.3.5.1 Difusores de Sonido basados en raíces primitivas.

Los difusores de residuos cuadráticos tienen entre sus características la de incluir entre los lóbulos de difracción al reflejo especular.

Ilustración 13. Difusor de Raíces Primitivas y su Distribución polar



www.rpging.com/difusores.

En algunos casos sería interesante colocar un sistema difusor que no incluyera el reflejo especular, por eso el Prof. Schroeder desarrolló un tipo de secuencia con esa característica: El Difusor basado en raíces primitivas.

La secuencia, en este caso, es:

$$S_n = g^n \text{ mod } (N)$$

Donde:

N = Número primo

n = entero menor que N

g = raíz primitiva de N.

Para que g sea raíz primitiva de N debe cumplirse que, para n entre 1 y N-1 no debe repetirse ningún resultado de $g^n \text{ mod } (N)$.

2.3.2.3.5.2 Difusores de Sonido basados en residuos cuadráticos

Una solución interesante se tiene si hacemos que las profundidades sigan una secuencia dada por:

$$d_n = \frac{S_n \lambda_0}{2N} \quad [1]$$

Donde $S_n = n^2 \text{ mod. } (N)$

N es un número primo y n entero menor de N

El diseño del difusor se limita al siguiente procedimiento:

- Se selecciona la frecuencia de operación f_0 . Este factor incidirá directamente en la profundidad máxima del difusor, ya que esta será un poco menor que media longitud de onda de la frecuencia f_0 .
- La frecuencia máxima de operación será

$$f_{\max} = \frac{c}{2W} \quad [2]$$

Donde W es el ancho de cada rendija y c es la velocidad del sonido, en otras palabras w es igual a la media longitud de onda de la frecuencia máxima.

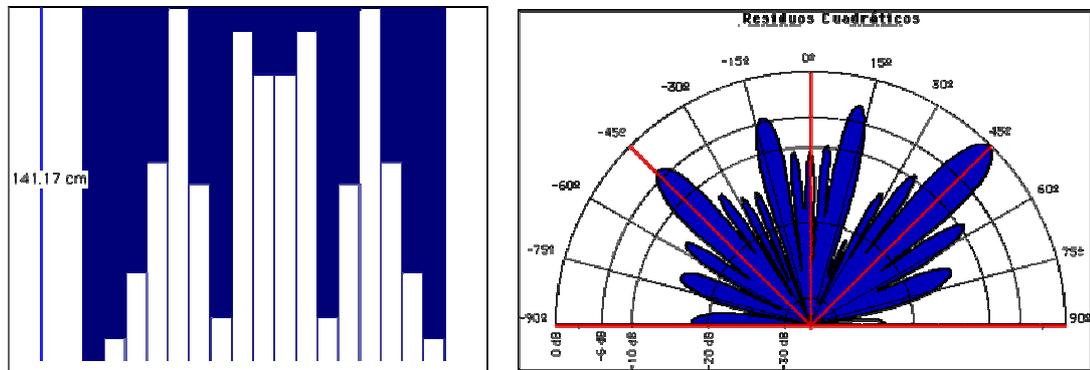
- Si se desea tomar en cuenta el ancho de las láminas separadoras de las rendijas debe utilizarse la siguiente expresión:

$$f_{\max} = \frac{c}{2(W+T)} \quad [3]$$

Donde T es el espesor de las láminas.

- Se selecciona el número primo considerando que mientras mayor sea se tendrá más lóbulos de difracción, pero se complicará su construcción. En general se utilizan números primos comprendidos entre 17 y 31. Si el lugar donde debe colocarse el difusor es muy grande, se pueden repetir varios períodos del mismo.
- Se calculan las profundidades de las rendijas con la ecuación [1].

Ilustración 14. Difusor de Sonido de Residuos Cuadráticos y su Dispersión Polar.



www.rpging.com

2.3.2.3.5.3 Difusores de Sonido Bidimensionales basados en el teorema del resto chino.

Para tener una versión similar a la de raíces primitivas pero bidimensional se utiliza una secuencia basada en el teorema del Resto Chino. esto es:

- 1.- Se elije un número primo N.
- 2.- Se calculan los factores co-primos de N (N1 y N2), esto es, dos números no divisibles entre sí que multiplicados dan N-1.
- 3.- Se diseña una matriz de 0 a N1-1 columnas y de 0 a N2-1 filas
- 3.- Se hace variar un número entero h a partir de 0.
- 4.- Se asigna el valor de profundidad:

$$d_n = \frac{h\lambda}{2N} [1]$$

La coordenada dada por:

Columna	H mod N1
Fila	H mod N2

2.3.2.3.5.4 Difusores de Sonido Bidimensionales Fractal basados en residuos cuadráticos.

Por último se tiene una versión bidimensional fractal con residuos cuadráticos

$$d_{h,k} = \left(\text{trunc} \left[\frac{h}{N} \right]^2 + \text{trunc} \left[\frac{k}{N} \right]^2 \right)_{\text{mod } M} \frac{\lambda_M}{2M} + \left\{ (h_{\text{mod } M})_{\text{mod } N}^2 + (k_{\text{mod } M})_{\text{mod } N}^2 \right\} \frac{\lambda_N}{2N} \quad [1]$$

Donde:

M = número primo para la difusión en baja frecuencia.

N = número primo para la difusión en alta frecuencia.

h,k = coordenada del sector.

\square_M = longitud de onda de diseño para baja frecuencia

\square_N = longitud de onda de diseño para alta frecuencia

$d_{h,k}$ = profundidad del sector h,k

REFLEXIONES-ABSORCIÓN VS DIFUSIÓN.

En este capítulo de la investigación se revela de forma más detallada los fenómenos sonoros, que afectan de diversa forma las ondas sonoras, además muestra un paralelo con el fenómeno de difusión sonora, base de este trabajo de investigación.

Las ondas sonoras son una perturbación periódica del medio en que se mueven, transportan energía sin transportar materia, por este motivo son llamadas ondas mecánicas, por que necesitan un medio para poder propagarse. Este tipo de ondas son afectadas tanto por el medio en que se propagan como por las superficies en donde inciden.

Estos dos fenómenos se encuentran relacionados entre sí, cuando una onda sonora incide sobre una superficie, parte de su energía es reflejada, mientras que otra parte es absorbida por la superficie y convertida en calor, una última parte es transmitida a través del material que compone la superficie dependiendo de su densidad, forma y composición. Por esta razón se concluye que el coeficiente de absorción de un material está relacionado con la cantidad de energía sonora reflejada, es decir cuanto mayor sea la energía reflejada menor será el coeficiente de absorción del material. Esta relación se expresa en forma matemática de la siguiente forma:

$$\text{Energía incidente} = \text{Energía Absorbida} + \text{Energía Reflejada} + \text{Energía Transmitida}$$

Teniendo en cuenta esta ley se define el coeficiente de absorción del sonido (α) de un material dentro de un recinto como:

$$\alpha = \frac{\text{Intensidad _ absorbida}}{\text{Intensidad _ incidente}}$$

Este coeficiente de absorción se expresa en valores de 0 a 1 donde 1 representa el nivel de absorción más alto; se entiende que si un material posee un coeficiente de absorción cercano a 1, quiere decir que ese material es capaz de absorber mucha energía acústica para transformarla en calor.

Como se ha descrito, la absorción sonora es uno de los fenómenos a considerar para el diseño acústico, existen dos fenómenos de los cuales ya se hizo referencia en este documento como son la reflexión y difusión sonora. La correcta distribución y armonía entre estos tres fenómenos determinan una calidad sonora.

Con los materiales reflectivos se busca aprovechar la energía acústica contenida en las ondas sonoras y concentrarla hacia una dirección específica por ejemplo en la tarima de un auditorio, se debe ubicar paneles reflectivos con el fin, de que toda la energía sea focalizada hacia los espectadores.

Por otra parte los materiales absorbentes contribuyen con la atenuación en los niveles altos de tiempo de reverberación y en disminuir con niveles altos de intensidad sonora; mas sin embargo algunos recintos como estudios de mezcla y masterización, son diseñados para crear una zona libre de reflexiones(Reflection Free Zone) por lo que es necesario la introducción de materiales absorbentes y elementos difusores; pero estudios psicoacústicos demuestran que el uso excesivo de paneles absorbentes, crea una sensación de fuente sonora débil o pequeña, mientras que con la implementación de difusores se genera una sensación de envolvimiento como una fuente de grandes dimensiones y sonoridad nítida⁷.

Otro problema que puede ser resuelto con la implementación de difusores, son los ecos, estos son reflexiones que llegan al oyente con mucho retardo

⁷ Cox y D'Antonio.Op cit., Pág. 33.

temporal, son causados por materiales rígidos y lisos que reflejan gran parte de la energía sonora; en la gran mayoría de los recintos este fenómeno es inapropiado, es aquí donde los difusores juegan un papel importante, por que al recibir la energía no la refleja en forma especular, sino que la distribuyen uniformemente en todas la direcciones del espacio.

Como hemos visto los difusores son unas de la herramientas mas importantes dentro del diseño acústico de recintos, por que permiten resolver algunos problemas de fenómenos sonoros como reflexiones especulares, ecos y coloraciones en la fuente.

La calidad de la audición sonora, o el ambiente acústico necesario para facilitar una escucha determinada, depende de la función del recinto en cuestión; por ejemplo, en teatros, auditorios, estudios de grabación y doblaje, la audición es más crítica que en cines, viviendas, oficinas, entre otros. Es necesario un grado de difusión acústica uniforme en todos los puntos del recinto, fijándose en que el tiempo de reverberación sea el adecuado en cada caso. Por ello, hay que tener muy presente la finalidad del local al calcular y diseñar el modelo acústico a seguir, ya que sería un gran fracaso dotar de una grandísima absorción a una sala de conciertos, por ejemplo, donde lo que se busca es que el sonido llegue a todos los rincones, y sin embargo, dejar con gran reverberación un cine, pues se haría imposible entender una sola palabra.

3. METODOLOGIA.

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACION.

Este proyecto se enfoca en una metodología empírico/analítica, porque con la bibliografía y estudio realizados anteriormente por distintos profesionales en la materia, se busca analizar todo lo referente con difusores de sonido, estudio de materiales, técnicas de medición, manejo de software acústicos entre otros, y

así poder diseñar y construir un difusor anidado 100% Colombiano, optimizado en su funcionamiento, y que responda con las características adecuadas con la difusión sonora.

Para este trabajo se utilizarán técnicas de medición reglamentadas, fundamentadas en las normas de medición acústicas, obviamente teniendo en cuenta las herramientas de medición disponibles y las limitaciones anteriormente mencionadas.

3.2 LINEA DE INVESTIGACION DE USB/SUBLINEA DE FACULTAD /CAMPO TEMATICO DEL PROGRAMA.

Este proyecto se ubica dentro de la línea de investigación de Tecnologías Actuales Y de Sociedad como se realizaron estudios de los distintos fenómenos físicos de las ondas sonoras como son propagación de ondas, reflexiones, estudios de campo sonoro difuso entre otros; pretende analizar como es el comportamiento de las ondas sonoras frente a un difusor anidado específicamente.

La investigación tiene una relación directa con la acústica arquitectónica; como es sabido, la aplicación de difusores en espacios como teatros, auditorios, estudios de grabación y demás, la respuesta sonora de dichos recintos mejora ampliamente en relación con recintos con ausencia de difusores.

El desarrollo de esta tesis se dio dentro del marco empírico analítico, por que a raíz de la documentación teórica existente y mediante pruebas acústicas, basadas en normas reglamentadas por organizaciones internacionales de acústica; se diseñó y construyó un difusor anidado con amplio ancho de banda de difusión eficaz, con materiales colombianos de buena calidad y a bajo costo.

PROCESAMIENTO DE SEÑALES ANALOGAS Y DIGITALES.

3.3 TECNICAS DE RECOLECCION DE INFORMACION.

Se estudia las características de diferentes materiales que pueden ser empleados para la construcción del difusor, donde se encontrara que reflexión y absorción que presentan, estos materiales con una investigación exhaustiva y sometidos a señales sonoras como long sine swet, y con software acústico obtener los datos esperados.

Obtener los coeficientes de difusión por bandas de octava: por medio de las expresiones matemática presentadas en el documento AES-4id-2001 y con los datos de SPL por octava, se calcularon los coeficientes de difusión direccionales y de incidencia aleatoria, y se presentaron en tablas y en gráficos de Coeficiente vs. Frecuencia.

Con la bibliografía recopilada obtener los parámetros de diseño para la construcción del difusor anidados, se estudia planos y dibujos para desarrollar una estrategia para el diseño y construcción del difusor.

Instrumental Y Herramientas De Diseño Y Construcción.

- Sonómetro o decibelímetros.
- Micrófonos de medición acústica.
- Software de análisis acústico.
- Computador, cámara anecoica o campo libre
- Recopilación bibliografica, Internet.

3.4 HIPOTESIS. La elección de un adecuado material, la alteración de la forma de la superficie y el diseño cuidadoso según ciertos parámetros de

optimización, llevan a construir un difusor anidado con un rango de frecuencias amplio desde los 250 Hz hasta los 10000Hz.

3.5 VARIABLES.

3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

La carencia de diseños y construcciones de difusores anidados en Colombia, o contruidos sin criterios científicos y con bases acústicas, representa en consideración variables independientes como:

- De acuerdo con el diseño del difusor anidado, así será su comportamiento frente a las ondas sonora que incidan en el, por ende su función en la creación de un campo difuso.

3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES

:

La investigación y análisis respecto al diseño de difusores acústicos, determinan variables dependientes descritas a continuación:

- El ancho de las ranuras presentan una limitación técnica, como es la de conservar ciertas medidas para que el difusor funcione con la expectativas inicialmente planteadas; en detalle, el ancho del separador de las ranuras del difusor debe conservar una medida en relación con la longitud de onda, si este es muy delgado se comportara como un resonador para frecuencias bajas, produciendo perdidas de energía acústica.

4. PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.

4.1 Evaluación Y Elección De Materiales.

Con el fin de lograr primeros objetivos propuestos en este trabajo, la evaluación de los materiales se realizó teniendo en cuenta las características y propiedades de cada material, como son su aspecto económico, versatilidad, resistencia y su propiedad acústicas de absorción sonora.

Los materiales seleccionados para una evaluación son acrílicos, icopor, madera ordinaria, y aglomerados de MDF; estos materiales poseen una alta aplicación dentro de la construcción en general y son asequibles dentro del mercado; a continuación se describe brevemente algunas de su propiedades.

4.1.1 Acrílico.

Fabricado con Monómero de Metacrilato de Metilo virgen por el sistema de colada en celda, se puede fabricar cristal, blanco y color con Distintos acabados y texturas, es un material apto que puede estar en contacto con alimentos. Posee una densidad aproximada de $2000 \text{ Kg} / \text{m}^3$

En lo referente a su durabilidad, posee buena resistencia mecánica y rigidez, posee una excelente resistencia a los agentes atmosféricos, como también al calor, lo que lo hace un material resistente y muy durable; se puede lograr darle brillo o cualquier otra textura que le da un atractivo estético, sin embargo a altas temperaturas puede llegar a ser muy peligroso y nocivo para la salud.

Dentro de sus aplicaciones esta la de divisiones de ambientes, mamparas para baños, equipamiento medico hospitalario entre otros.

Es un material versátil y fácil de trabajar si se cuenta con la herramientas y equipos capacitados para moldearlo y darle una estructura requerida; es asequible en el mercado sin embargo su valor económico ronda los \$20000 por metro cuadrado, no es muy cómodo con respecto a otros materiales.

Su impacto ambiental es favorable por siendo un material reciclable, no atenta contra el medio ambiente.

4.1.2 Icopor (poli estireno expandible)

Posee una densidad aproximada de 500 a 700 Kg/m^3 , aunque se puede encontrar con distintas densidades de acuerdo con su aplicación; posee una resistencia mecánica baja y rigidez media, que lo hace quebradizo y frágil si se ve expuesto a golpes o pequeños accidentes.

Es material maleable y versátil para aplicaciones en general, se puede darle forma o estructura de acuerdo con los requerimientos necesarios, y para esto no se necesita de herramientas sofisticadas o especializadas.

Su costo económico oscila entre los \$10.000 y \$15.000 por lamina, lo que lo ubica en un costo económico bajo en comparación con otros materiales, se encuentra fácilmente en el mercado de la construcción, por que es aplicado en cielos rasos, y como aislante térmico.

4.1.3 Madera ordinaria. (Pino Común)

Una de las maderas que aplica dentro de las llamadas ordinarias es el pino común (*Pinus Radiata* Don), por que es una de las maderas mas económica con mayor demanda y aplicación en el mercado, su densidad es de 3125 Kg/m^3 aproximadamente, lo que lo hace una madera rígida con buena

resistencia mecánica y por ende resistente a pequeños accidentes y golpes; sin embargo puede ser afectada por insectos o ambientes atmosférico húmedos.

Una madera maleable y de fácil manejo para construcciones de muebles y demás aplicaciones en la construcción, tiene un precio justo en relación con gran aplicabilidad y versatilidad, pues su precio oscila entre los \$15.000 y \$20.000 pesos por bloques de $3m \times 15cm \times 25cm$ o laminas de 1 y 2cm de espesor de 2m x 1.22m.

4.1.4 Aglomerados MDF.

En comparación con la madera sólida u otros materiales no posee defectos físicos como nudos u orificios, lo que convierte al MDF en un material más uniforme y pulido. Su densidad es aproximadamente de 0.6-0.7 gr. /cm³ y su gran homogeneidad en la fabricación y el control de los procesos productivos y de calidad ofrecen una insuperable resistencia mecánica.

El MDF, por su naturaleza y composición, es resistente a un gran espectro de insectos. Sin embargo, se recomienda mantener un ambiente limpio y adecuado para aumentar el grado de inmunidad de los tableros. Su grado de humedad depende de la humedad ambiente y del tiempo de climatización. Las condiciones ambientales normales de humedad en ningún caso afectan al tablero. Los tableros ofrecen una inigualable resistencia y estabilidad a la humedad en comparación con otros tipos de tableros. A menos que se trate de tableros resistentes a la humedad o para uso exterior, debe evitarse el contacto directo con la lluvia, también debe evitarse usarlo en sitios como muros de lavaderos, duchas, etc.

El MDF puede trabajarse con herramientas típicas de carpintería, cortar en cualquier sentido, cepillar cantos, perforar, calar y atornillar, al igual que la

madera aserrada; a diferencia de otros materiales, retiene los clavos, tornillos y otros herrajes con firmeza y sin producirse rajaduras, lo que ofrece una ventaja notoria frente a otro tipo de material.

Su costo económico es bajo debido a que es un material reciclado, es aplicado en la construcción de muebles y demás campo de la construcción en general, posee un precio de \$6000-\$8000 pesos por láminas de 1m² por 4-9mm de espesor.

4.1.5 Comportamiento acústico de los materiales.

En este aparte se revela el coeficiente de absorción de los materiales evaluado en este trabajo de investigación, este ultimo aspecto servirá como soporte en la elección del material para construir el difusor anidado, se debe elegir un material con un coeficiente de absorción bajo con el fin de evitar pérdidas de energía acústica en el difusor. En las siguientes tablas se pueden observar los coeficientes de absorción por banda de octavas de los materiales evaluados y su valor comercial por metro cuadrado.

TABLA 1. COEFICIENTES DE ABSORCION DE MATERIALES

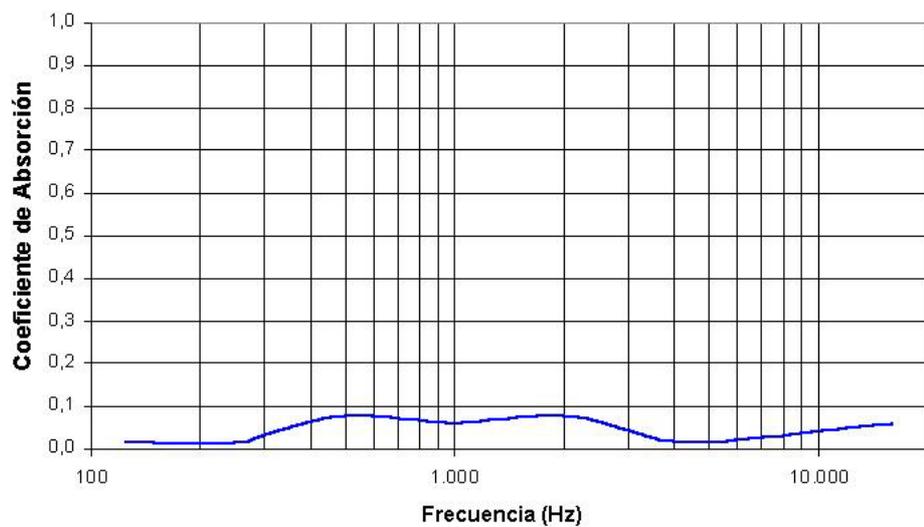
MATERIAL	ESPESOR	Coeficiente de Absorción por Banda de frecuencias (Hz).						Precio x m ²
		125	250	500	1K	2K	4K	
ACRILICO	1Cm	0.04	0.04	0.08	0.12	0.03	0.10	\$20000
ICOPOR	1Cm	0.21	0.52	0.64	0.64	0.60	0.62	\$ 4000
MADERA. PINO	2Cm	0.1	0.32	0.55	0.66	0.79	0.77	\$8000- 10000
MDF	9mm	0.1	0.09	0.08	0.09	0.10	0.10	\$6000- 10000

www.us.es/decaletsa/dca1/documentos/asignaturas/acondicionamiento1/coeficientes.pdf

De acuerdo con las propiedades investigadas y documentadas en esta investigación, se procedió a la elección del material para la construcción del difusor anidado. Se tuvo en cuenta la relación costo beneficio que brinda cada material, y su propiedad acústica de absorción sonora.

Se eligió el MDF por que es un material con una buena resistencia mecánica que lo hace durable, es maleable y fácil de trabajar, su valor comercial es inferior al de la madera y el acrílico; por otro lado posee una baja absorción sonora lo que permite aplicarlo en difusores acústicos, para corroborar estos datos acústicos se puede observar el coeficiente de absorción de una lamina de MDF en la grafica siguiente:

Tabla 2. Coeficiente de absorción, MDF 9mm



Eduardo Cote-Jairo Ruge, Estructura Modular para Acústica Multifuncional, Pág. 114, USB, 2004.

Se observa en la anterior grafica una baja absorción dentro de un rango de frecuencias desde los 150 a los 10000Hz lo que convierte al MDF en un material útil para la construcción del difusor anidado, por que con estos niveles de absorción sonora esta garantizado poca perdida de energía sonora; si se cumple todos los parámetros de diseño se logra también una optima difusión

sonora con amplio rango de frecuencia; con estos se alcanzan el segundo y tercer objetivo de esta investigación.

4.2 Diseño y construcción del difusor anidado.

4.2.1 Diseño del Difusor Anidado

Una vez elegido el material para la construcción del difusor, se procede al diseño de este, se tuvo en cuenta las diferentes teorías e investigaciones referenciadas en este documento, como también los conocimientos adquiridos.

- ▲ Como primera medida se calculo el difusor primario de incidencia rasante, calculado para frecuencias bajas desde los 250Hz hasta los 1850 Hz.

Para lo anterior se utilizaron las siguientes formulas matemáticas para el calculo de difusores QRD.

- Para el ancho de las ranuras se aplico la formula $W + T = \frac{\lambda_{\min}}{4}$.

Donde w es el ancho de la ranura y T el ancho de los divisores que separa cada ranura del difusor. Con la $f_{\max} = 1850$ se obtuvo el ancho de las ranuras con el divisor de 8.6mm este valor fue aproximado a 9mm, de acuerdo a la comercialización en que se realiza el material para su construcción.

El ancho de los divisores fue elegido, de acuerdo a las dimensiones en que se encuentra en el mercado, este es de 4mm de espesor; es necesario mencionar la dificultad de encontrar un espesor más delgado o un poco más ancho, este valor se adapta a los requerimientos para la construcción del difusor.

Para una frecuencia mínima $f_0 = 250Hz$, se eligió trabajar con un $m_{\max} = 1$ lo que genera un número de lóbulos de 3, es decir en la dispersión para este rango de frecuencias será de tres lóbulos envolventes, lo cuales se pueden observar en la graficación polar de difusión. Con este rango de frecuencia, se calculó el número de ranuras (p) que componen el difusor, cuyo resultado es de $p=7$ ranuras.

Hasta este punto, se obtuvo el número de lóbulos, cantidad de ranuras y el ancho de estas; y para obtener las profundidades de este difusor principal, se programó en Excel de acuerdo a criterios de diseño como:

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

Donde para valores enteros entre 0 y $p - 1$ se multiplica cada secuencia por $\frac{c}{2pf_0}$ donde c , es la velocidad del sonido y p el número de ranuras.

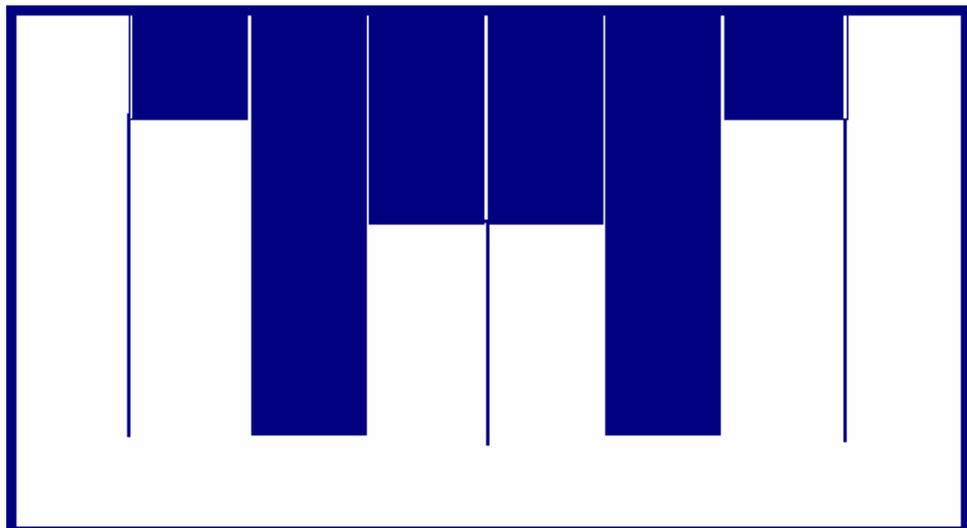
Con lo anterior se consiguió las profundidades para el difusor primario para frecuencias bajas, estas profundidades son:

Tabla 3. Profundidad en cada ranura del Difusor primario.

RANURA	PROFUNDIDAD (cm)
1	0
2	9.8
3	39.4
4	19.7
5	19.7
6	39.4
7	9.8
8	0

Para una mejor orientación del proceso de diseño hasta esta parte, se realizó un plano de corte transversal de este difusor primario para bajas frecuencias, donde se observa en la siguiente ilustración el valor de cada profundidad correspondiente para este difusor.

Ilustración 15. Plano del Corte Transversal del Difusor primario.



Una vez diseñado este difusor primario, el desafío era el diseño del difusor secundario para medias y altas frecuencias que fue insertado dentro del difusor primario con el fin de completar todo el rango de frecuencias propuesto inicialmente. Basado en la comercialización en que se realiza el MDF, las láminas de 9mm de espesor eran las más efectivas para el diseño del difusor secundario para medias y altas frecuencias, y de acuerdo con la forma de comercialización del material, esto determinó la altura del difusor la cual se estableció en un metro de altura.

Después de ensayar algunas alternativas de diseño se eligió, trabajar con una frecuencia mínima de diseño de 2000 hasta los 10000Hz, para esto se utilizaron los mismos parámetros de diseño que en el difusor primario; la diferencia radica que en este difusor no se tuvo en cuenta los divisores, debido a que los del primario garantizan direccionar las ondas sonoras hacia el interior de cada ranura, para lograr su dispersión sonora.

Para el diseño del segundo difusor con una frecuencia mínima de 2000Hz y frecuencia máxima de 8000Hz, se eligió trabajar con $m_{\max} = 3$, por lo cual el número de lóbulos es de 5; mediante las mismas técnicas de diseño que en el difusor primario se obtuvieron el número de ranuras de:

$$p = \frac{2m_{\max} f_{\max}}{f_0} = 11$$

Mientras que en la programación en Excel con los criterios matemáticos

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

Se obtuvo las profundidades de este difusor secundario, relacionadas en el siguiente cuadro:

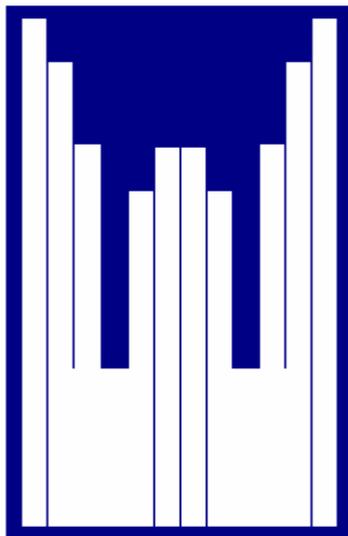
Tabla 4. Profundidad en cada ranura del Difusor Secundario.

RANURA	PROFUNDIDAD (cm)
1	0
2	0.85
3	3.43
4	7.73
5	4.29
6	2.57
7	2.57
8	4,29
9	3,43
10	0.85
11	0

De igual manera se complementa esta información en el corte transversal del segundo difusor para medias y altas frecuencias (ver la ilustración)

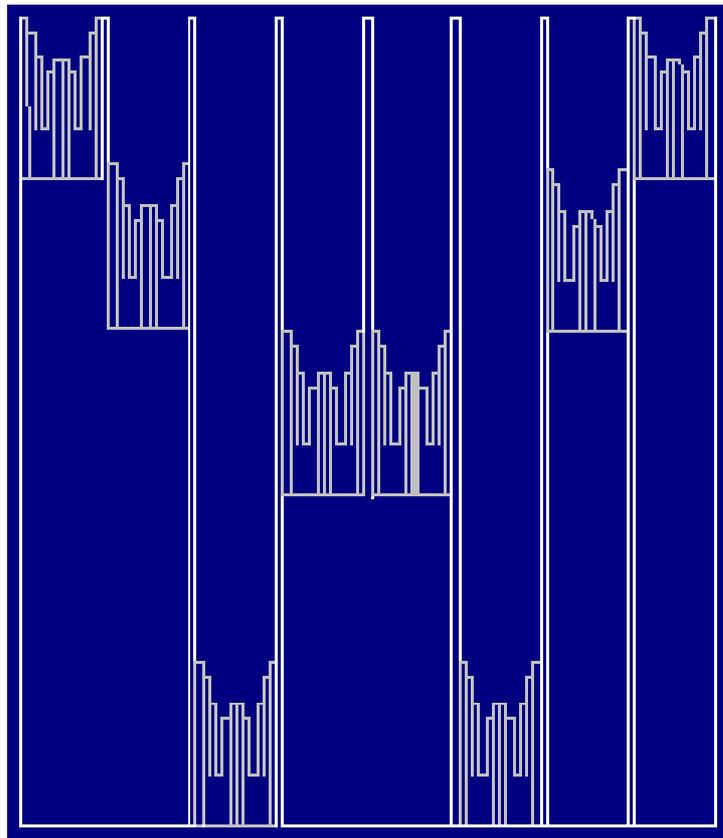


Ilustración16. Plano del Corte Transversal de Difusores Secundarios.



Hasta este punto se ha logrado obtener todas las dimensiones y planos requeridos para la construcción del difusor anidado, con todos los requerimientos planteados para su óptimo funcionamiento, como es, el construir un difusor con amplio rango de frecuencias en un material económico. Ver plano final del difusor anidado.

Ilustración17.Plano del Corte Transversal del Difusor Anidado Final.



4.2.2 CONSTRUCCION DEL DIFUSOR ANIDADO.

4.2.2.1 Elaboración de los cortes del material.

Para la construcción del difusor fue necesaria una serie de pasos que se desarrollaron con sumo cuidado, con el fin de llegar al objetivo propuesto con el menor número de errores y contratiempos.

Con las dimensiones obtenidas en los cálculos anteriores y con base en los planos, La primera medida fue, el encargo de los cortes del material para la construcción del difusor con las dimensiones estipuladas en la tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de los cortes del material.

Largo	Alto	Espesor	Cantidad Laminas.
8 cm.	1m	0.9 cm.	16
7.2 cm.	1m	0.9 cm.	16
4.6 cm.	1m	0.9 cm.	16
3.8 cm.	1m	0.9 cm.	16
5.5 cm.	1m	0.9 cm.	16

Conjuntamente con los anteriores cortes que compondrán la estructura del difusor secundario, fueron necesarios los cortes para la construcción del difusor primario o cajón de soporte, además de los divisores de cada ranura los cuales fueron establecidos en un espesor de 4mm, esta medida se describen en la tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones de los cortes para difusor primario.

Superficie	Largo	Alto	Espesor	Cantidad Laminas.
Inferior.Superior	78.4cm	1m	0,9 cm.	2
Lateral izq.-Der.	50 cm.	1m	0,9 cm.	2
Posterior	51,2cm	1m	0,9cm	1
Divisores	50cm	1m	0,4cm	7
Bases	10,8cm.	1m	0,9cm.	7

La segunda etapa fue la de construir los difusores secundarios para medias y altas frecuencias; se procedió a organizar y unir los cortes necesarios para dar forma y estructura de acuerdo a los planos elaborados para este difusor.

4.2.2.2 ELABORACION DEL DIFUSOR ANIDADADO.

De acuerdo a las medidas realizadas mediante cálculos matemáticos y con base en los planos realizados, se procedió con la construcción del difusor el cual se desarrollo en las siguientes etapas:

4.2.2.2.1 Construcción de difusores secundarios para medias y altas frecuencias.

Como primera medida se organizaron los corte relacionado en la tabla, y por medió de puntillas de 2 pulgadas y pegante para madera, se unieron los cortes de acuerdo al plano de este difusor; en total fueron 10 laminas de 1m x 9mm, ubicadas con una profundidad precisa de acuerdo a los cálculos para forma un difusor secundario para medias y altas frecuencias. En total se elaboraron 8 difusores iguales para su posterior inmersión dentro del difusor para bajas frecuencias.

Ilustración 18 Construcción de Difusores Secundarios.



4.2.2.2.2 Construcción de difusor primario para bajas frecuencias.

El proceso de elaboración de este difusor primario, fue similar al difusor secundario, pero para este, se tuvo en cuenta la correcta disposición de los divisores de 4mm x 1m, los cuales son los encargados de separar cada ranura de este difusor con el fin de hacer llegar las ondas sonoras hacia el interior de la superficie de cada ranura, en este caso, esta superficie será el difusor secundario para una difusión en medias y altas frecuencias.

A continuación se tomaron los cortes relacionados en la tabla 8765, para formar una caja que será la que contenga todos los difusores secundarios dentro de ocho ranuras y así formar el difusor anidado.

Ilustración 19. Construcción del Difusor Primario.



Una vez elaborada esta caja, se procedió a introducir los ochos difusores secundarios dentro de cada ranura, con el cuidado de conservar el valor de la profundidad obtenida en los cálculos, para garantizar que el difusor no sufriera imperfecciones en su respuesta en frecuencia o afecte su funcionamiento final.

Una vez introducidos los difusores secundarios, fueron unidos con puntillas de 21/2 pulgadas y con el pegante para madera fueron sellados imperfecciones o aberturas entre ranuras que forman el difusor.

El siguiente paso fue el sellamiento de la caja con una tapa posterior, esto con el fin de dar soporte y resistencia al difusor; como medida final en la elaboración, el difusor fue lacado con el fin de sellar poros y demás imperfecciones del material y también para lograr su atractivo estético.

4.3 MEDICIONES Y PRUEBAS ACUSTICAS CON EL DIFUSOR.

Como se ha referenciado en este documento, las mediciones fueron realizada en base al norma AES-4id-2001, la cual describe la forma en que debe realizarse las mediciones para este tipo de difusores.

El lugar escogido para las mediciones y pruebas fue la cancha de tenis ubicada en la universidad de San Buenaventura, sede Bogotá; debido a la inexistencia en Colombia de una cámara anecoica, la norma establece realizar las pruebas en campo libre de reflexiones tempranas, el piso o plano debe ser uniforme, rígido y reflectante; por lo cual este espacio se ajusta a los requerimientos para las mediciones a realizar.

Como primera medida, con el sonómetro se midió el nivel de ruido presente en este espacio, esto con el fin de obtener una buena relación señal/ruido; con el nivel de ruido presente de 64dB, fue necesario ajustar los niveles de la fuente 40 dB por encima del valor de ruido de fondo, así la respuesta al impulso se vera menos afectada por los ruidos producidos por transeúntes, carros entre otros.

Ilustración 20. Medición de Ruido de Fondo.



La norma establece las medidas para ubicar el micrófono receptor y la fuente frente a la muestra; el micrófono debe ser ubicado en un semicírculo con una resolución angular de 5 grados, por lo que es necesario realizar 37 puntos de medición desde -90 hasta 90 grados, estas medidas se deben realizar por cada nueva ubicación de la fuente.

Ilustración 21. Ubicación de la Fuente 0 Grados.



La fuente debe ser ubicada de frente a 0 grados y a -55 y 55 grados, con el fin de analizar el comportamiento del difusor cuando las ondas inciden de frente y aleatoriamente o por los lados. En total son 111 puntos de medición, que deben ser realizados, para lograr encontrar la respuesta difusa que será descrita finalmente en un plano polar.

Ilustración 22. Ubicación de la Fuente -55/55 Grados.



Como hace referencia la norma, este tipo de difusores debe ser medido en campo lejano y de acuerdo a criterios de medición como:

- 1) $r \gg D_{\max}$
- 2) $r / D_{\max} \gg D_{\max} / \lambda$
- 3) $r = 2r_1r_2 / (r_1+r_2)$

Es D_{\max} es la mayor dimensión del difusor;

λ , es la longitud de onda;

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

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

De acuerdo a los anteriores parámetros, la distancia del micrófono frente a la muestra es de 2.55m, mientras que la distancia de la fuente es de 3.25m. Una vez hallada las medidas para ubicar el micrófono y la fuente, se procedió a delinear el semicírculo con los 37 puntos de medición frente a la muestra y proceder con la medición respectiva.

4.4 PROCESO DE MEDICION Y CAPTACION DE RESPUESTA AL IMPULSO.

Se adopto como instrumentos de captación a respuesta al impulso, un computador con software de análisis y procesamiento acústico, con este software fue generado una señal de LLS (Long Sine Sweep) el cual es un barrido frecuencial, controlado en defectos como distorsión armónica total (TDH, Total Harmonic Distortion) y alinealidades temporales de la fuente y que en este caso se ajusto desde los 125Hz hasta los 12000Hz con el fin de estudiar todo el rango de frecuencias para el que fue diseñado este difusor.

Para captar la respuesta al impulso en cada punto de medición, se utilizó un micrófono Behringer ECM 8000 con patrón polar omnidireccional y respuesta plana en frecuencia y con un mezclador Behringer UB 802 que cumple la función de captar la señal del micrófono hacia el computador.

Ilustración 23. Difusor Anidado.



De acuerdo con su especificación técnica, la fuente JBL EON 15, cumple condiciones para esta medición, como la capacidad de generar altos niveles de presión sonora con ángulos de apertura sonora amplios capaz de rodear y excitar el difusor puesto a prueba.

Con la correcta conexión y disposición de los instrumentos, el difusor fue sometido a las respectivas pruebas, con el software se almacenaron las respuestas al impulso de cada uno de los 37 puntos de medición por cada ubicación de la fuente, aunque fue necesario la realización de varias pruebas y registrar solo los puntos de medición que no estaban afectados por algunos ruidos que sobrepasaban los niveles de presión sonora de la fuente.

4.5 PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE DATOS.

Con las mediciones realizadas, se pudieron obtener los datos necesarios para un análisis de la respuesta al impulso del difusor, esta información se encuentran organizada por cada posición en que se ubico la fuente, donde se podrá observar la dispersión sonora realizada por el difusor, en un diagrama polar por bandas de octavas de 125Hz hasta los 8000Hz.

Con los diagramas polares de dispersión sonora se revela el valor de la reflexión en cada uno de los puntos de medición. Este análisis se realiza separando la respuesta al impulso del sonido directo y aplicando la FFT (Fast Fourier Transform.) a la respuesta impulsiva del sonido reflejado por una superficie plana de referencia realizada con anterioridad por otros investigadores, en las mismas condiciones físicas y espaciales que en las pruebas realizadas en este difusor.

Ilustración 24. Respuesta al Impulso. Se observa la Difusión en la Región Sombreada

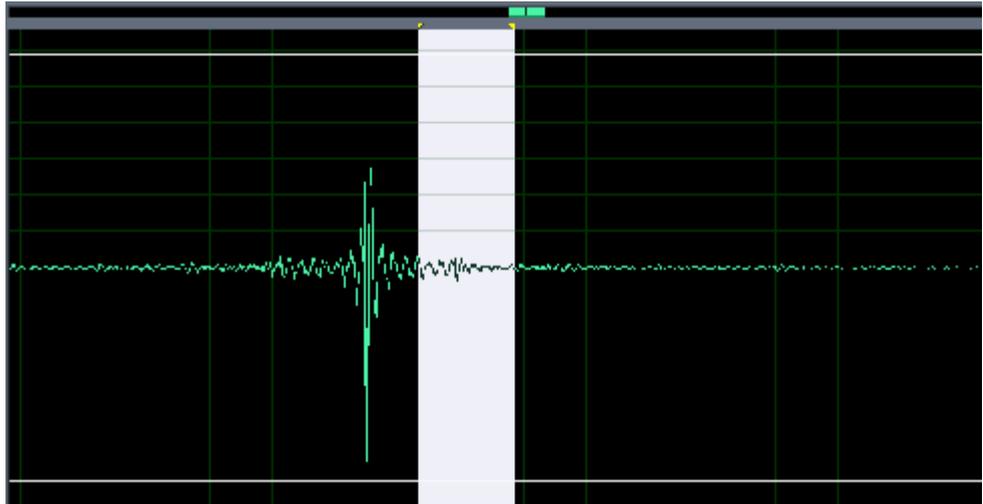
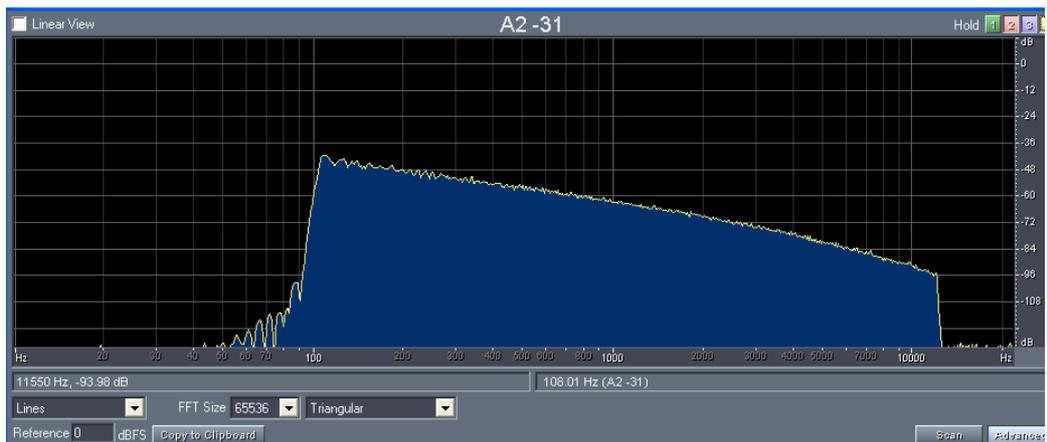


Ilustración 25. Análisis frecuencial de Espectro Sonoro. Se Observa La Difusión de 100 a 10000 HZ.



Con base en fundamentos matemáticos como:

$$R = 1 - \left(\frac{10^{\frac{Lp_referencia}{10}} - 10^{\frac{Lp_reflejado}{10}}}{10^{\frac{Lp_referencia}{10}}} \right)$$

Se obtiene el valor del coeficiente de reflexión en cada uno de los puntos medidos, con estos datos se grafican los diagramas de polares de dispersión sonora, introduciendo en Microsoft Excel todos estos valores

por banda de tercio de octavas, por cada uno de los 37 puntos de medición por cada posición de la fuente.

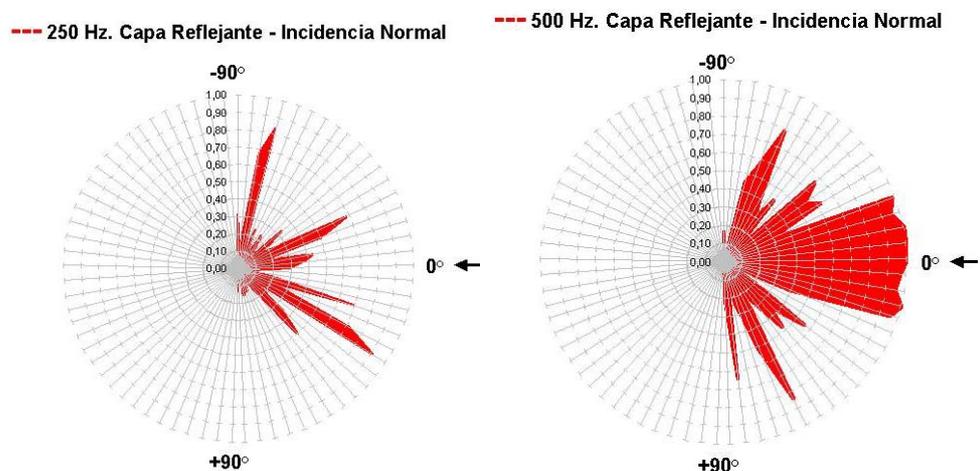
Al obtener los diagramas polares se debe analizar que el valor de reflexión esta dada en valores entre 0 y 1, siendo 0 el valor mínimo y 1la máxima reflexión del difusor; los valores de 0 están ubicados en el centro de la grafica polar, mientras que 1 se halla en el limite del semicírculo de la grafica.

Diagramas polares de Dispersión Sonora.

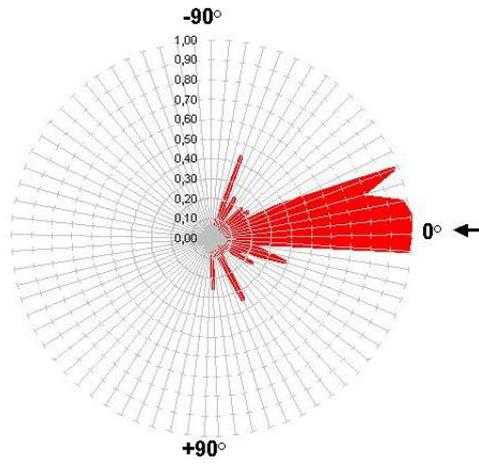
A continuación se revelan los diferentes diagramas polares del difusor en confrontación con la respuesta de dispersión de una superficie plana de referencia. Estos diagramas corresponde a una investigación realizadas en el 2005 por Eduardo Cote y Jairo Ruge, en su trabajo Estructura Modular Para Acústica Variable.

Diagramas polares de dispersión de superficie plana de referencia, incidencia normal a 0 grados

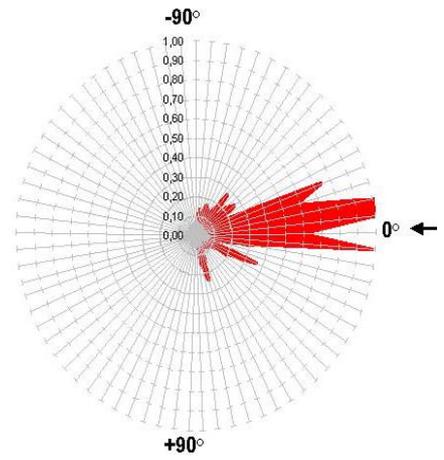
Ilustración 26. Diagramas Polares De Dispersión De Superficie Plana, Incidencia Normal 0 Grados.



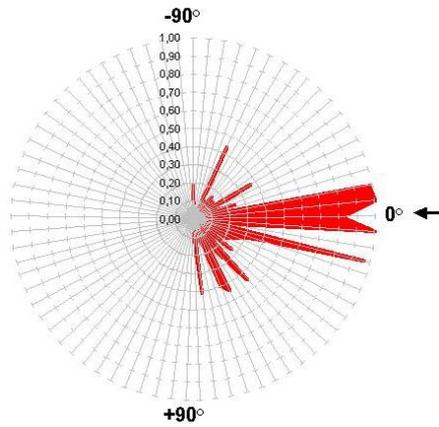
--- 1 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Normal



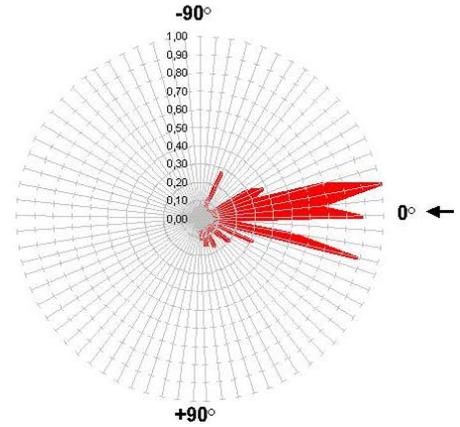
--- 2 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Normal



--- 4 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Normal

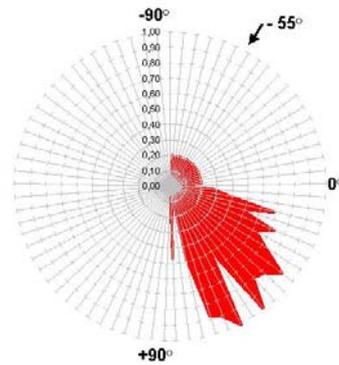


--- 8 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Normal

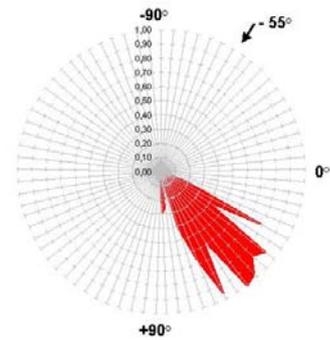


Dispersión sonora de superficie plana de referencia, incidencia aleatoria.

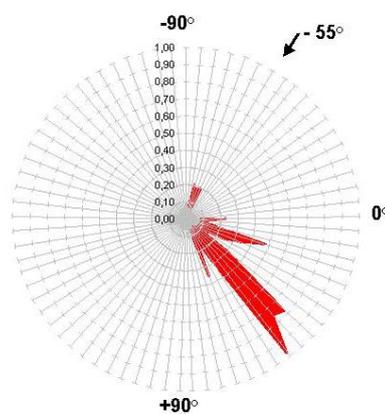
--- 500 Hz. Capa Reflejante - Incidencia Aleatoria



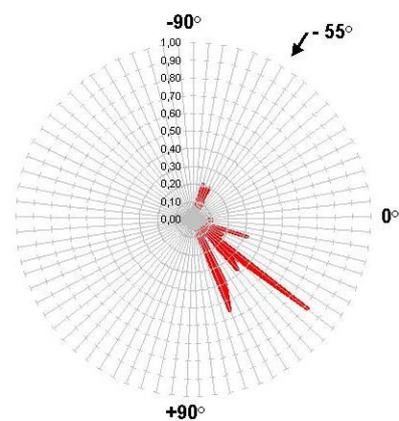
--- 1 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Aleatoria



--- 4 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Aleatoria



--- 8 KHz. Capa Reflejante - Incidencia Aleatoria

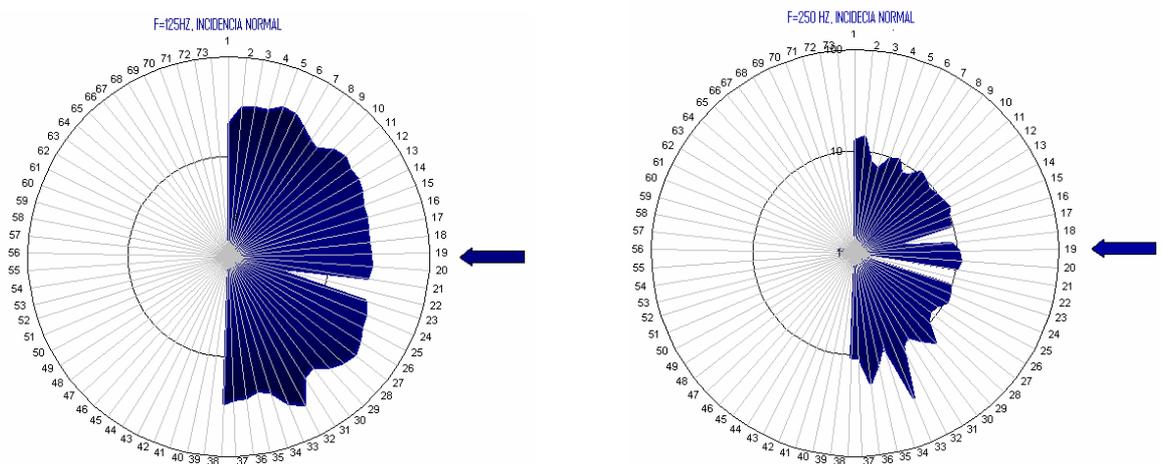


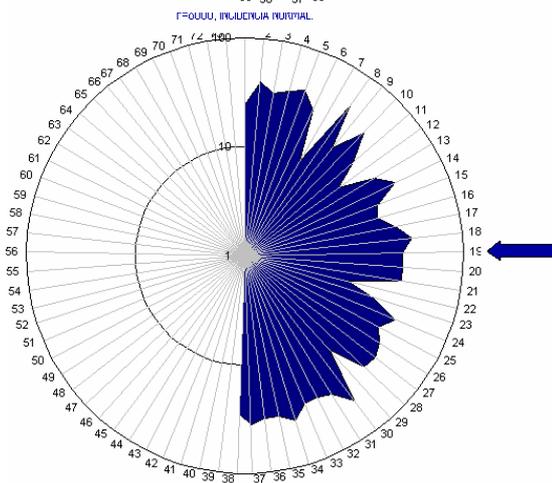
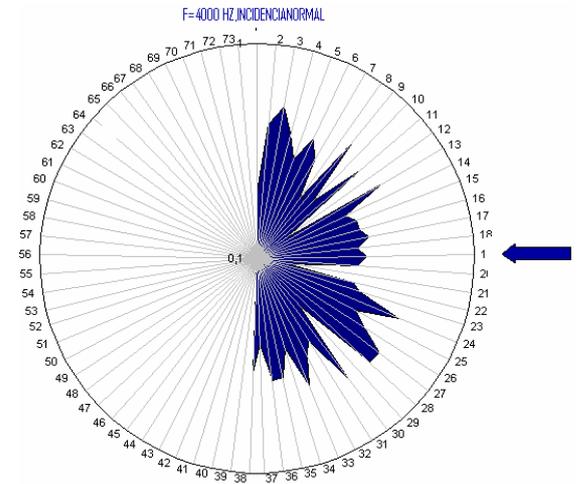
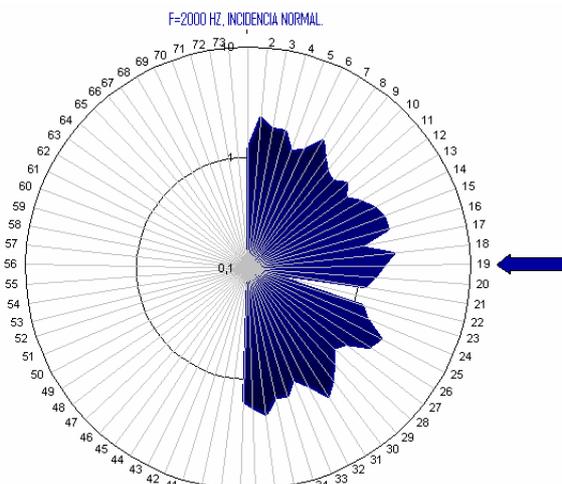
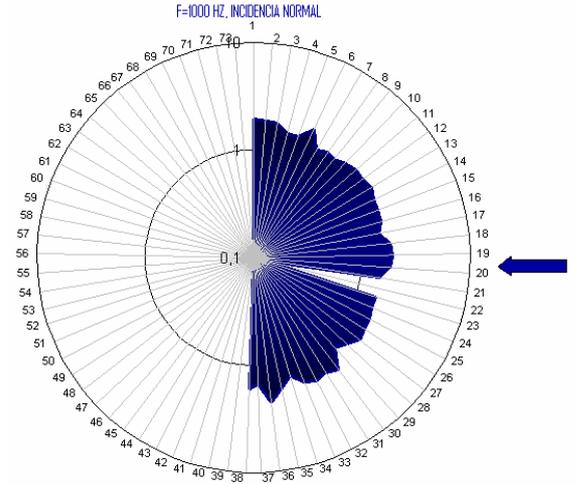
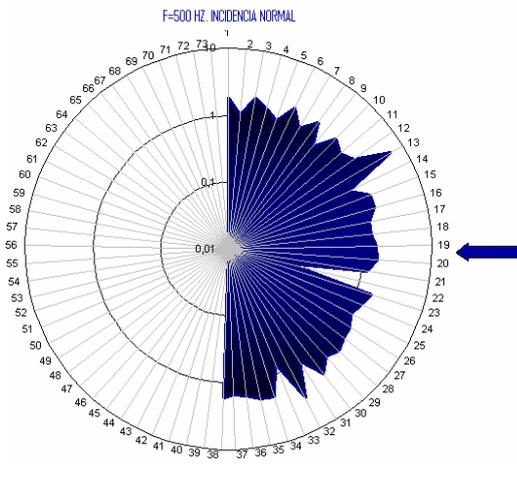
Con las anteriores graficas polares, se revela el comportamiento de reflexión de un panel plano, donde se puede identificar que de acuerdo a la procedencia del rayo sonoro, este se refleja en dirección opuesta en que este incidió, corroborándose la teoría de Snell sobre reflexiones especulares, descritas en este documento.

Así mismo se observa la poca difusión sonora que produce un plano reflectivo, se aprecia en las graficas una incorrecta distribución de la energía sonora, por lo contrario, esta se encuentra focalizada inversamente de la dirección de procedencia del rayo sonoro.

Como contraparte al fenómeno de reflexión sonora que muestra una superficie plana, se puede observar mediante planos polares la difusión sonora que genera el difusor anidado diseñado y construido en este trabajo de investigación.

Ilustración 27. Incidencia Normal, 0 grados del Difusor Anidado.



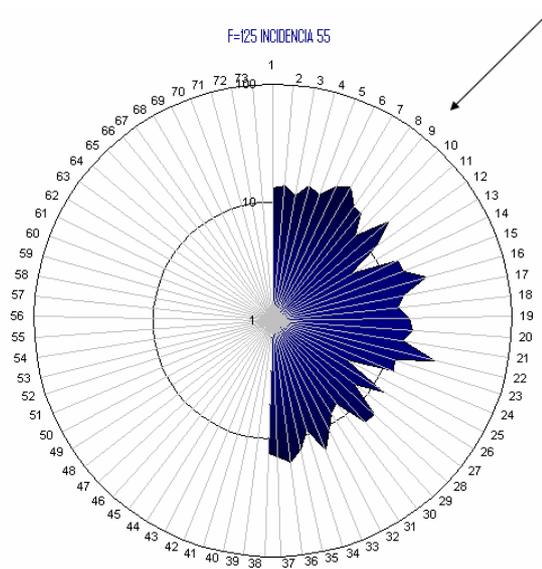


Con los anteriores diagramas polares se observa el comportamiento del difusor cuando la fuente esta ubicada a incidencia normal a 0 grados, donde se aprecia una dispersión uniforme de la energía sonora; se observan 3

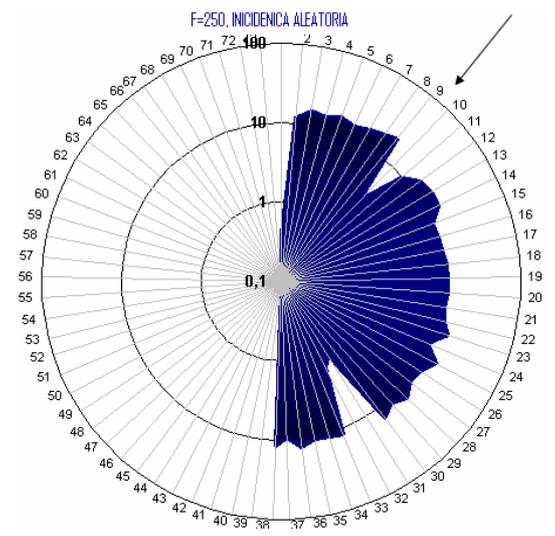
lobulaciones en frecuencias de 125 a 2000Hz, con estos se cumplen las expectativas planteadas en el diseño del difusor anidado.

A partir de frecuencias superiores a 2000 HZ se generan 5 lobulaciones de dispersión sonora según lo calculado para los difusores internos de medias y altas frecuencias.

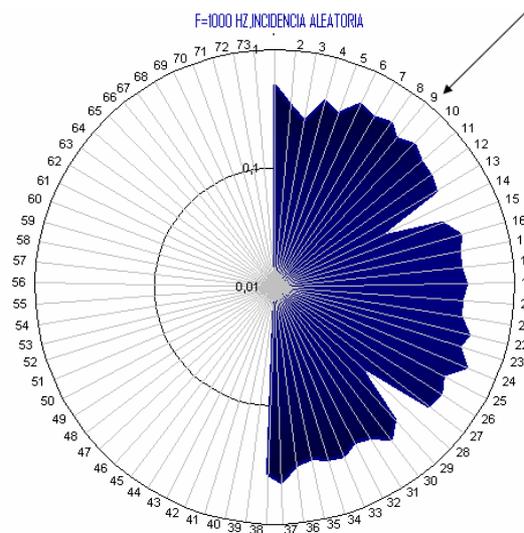
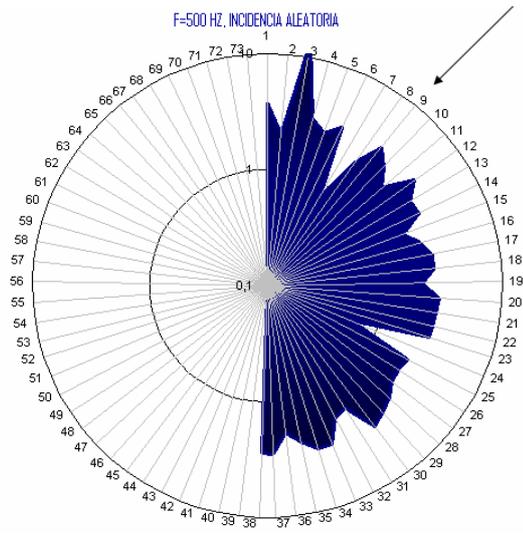
Ilustración 28. Diagramas Polares De Incidencia Aleatoria, -55 Grados.



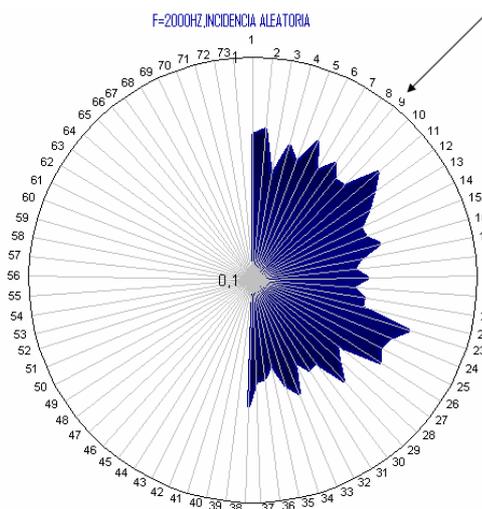
F=500HZ



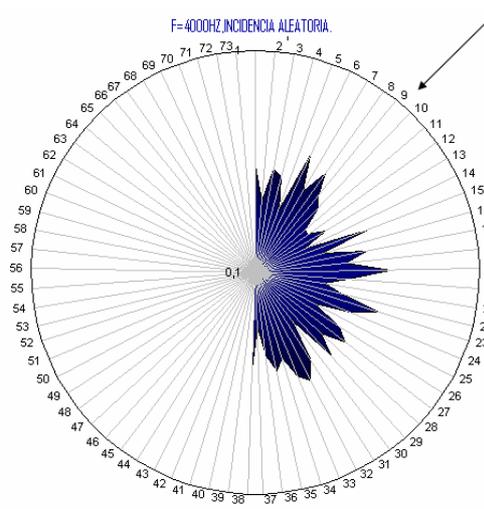
F=1000HZ



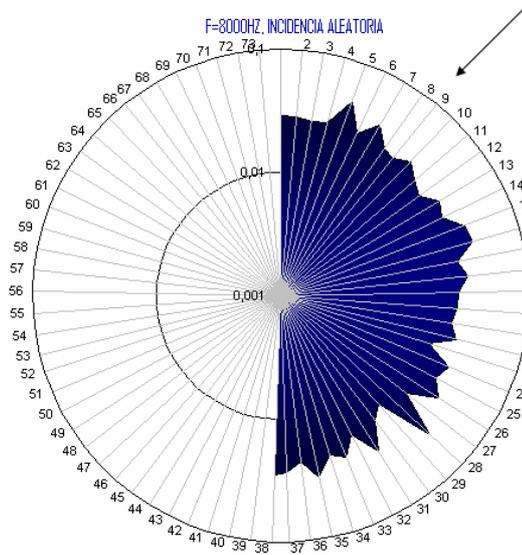
F=2000HZ



F=4000HZ



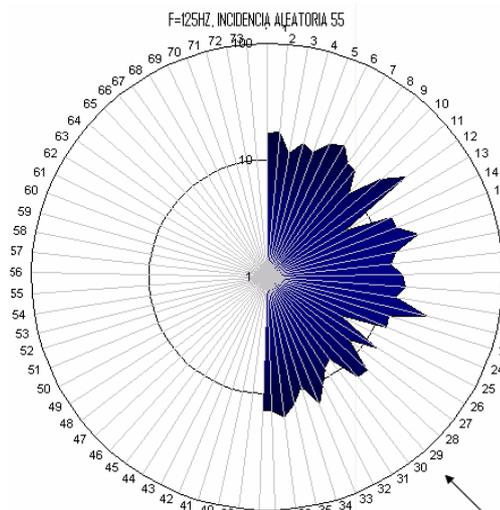
F=8000HZ



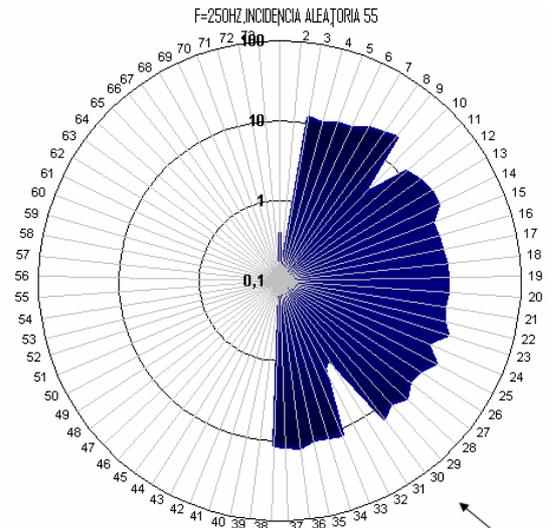
Para incidencia aleatoria a -55 grados, el comportamiento del difusor sigue siendo estable, con notoria mejoría para frecuencias medias y altas, donde la difusión se hace mas uniforme.

Ilustración 28 diagramas Polares de Incidencia Aleatoria, 55 Grados.

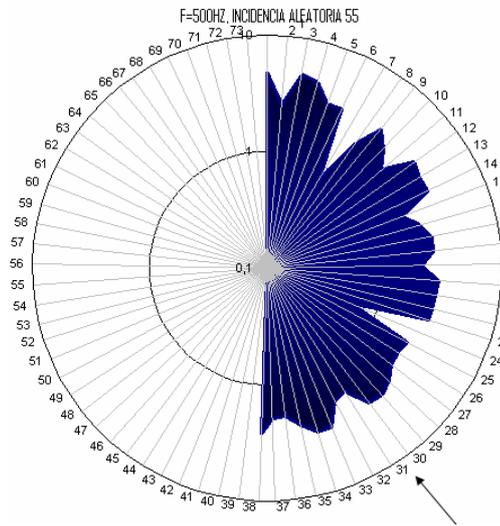
125HZ



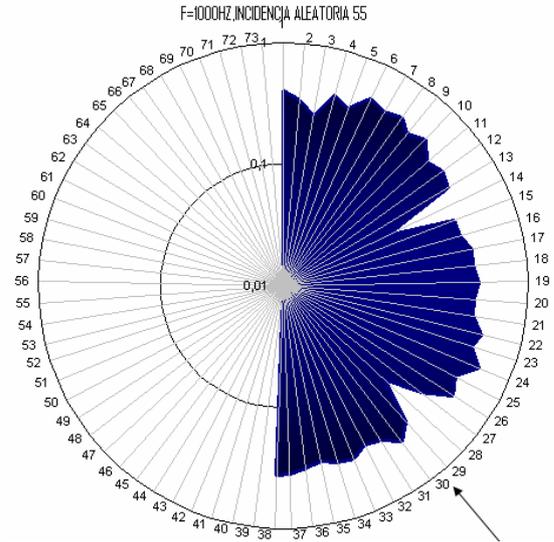
F=250HZ



F=500HZ

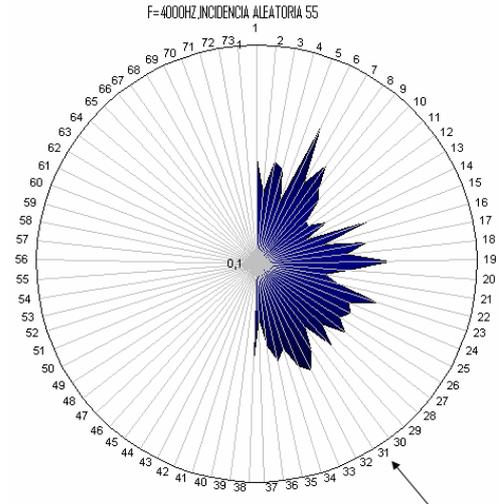
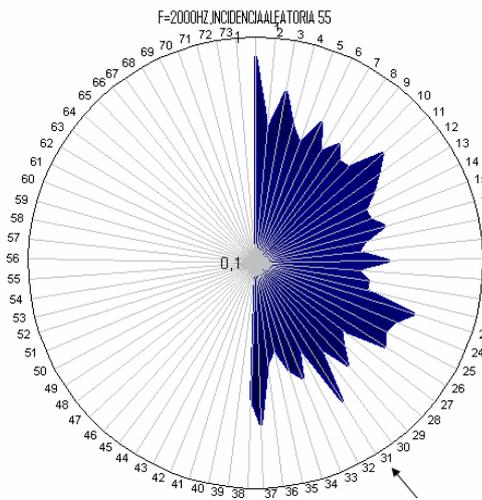


F=1000HZ

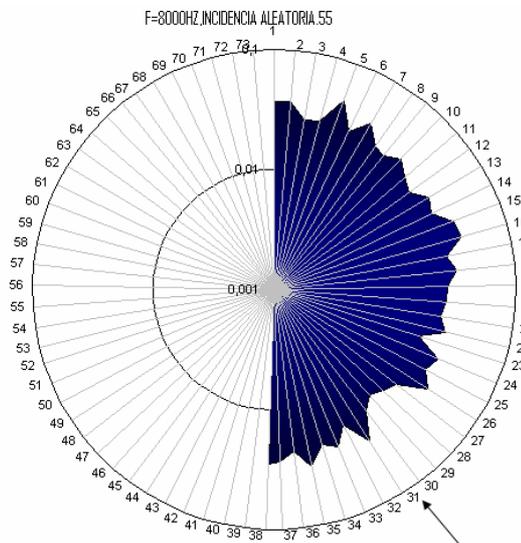


F=2000HZ

F=4000HZ



F=8000HZ



A incidencia aleatoria de 55 grados el funcionamiento del difusor es muy similar a la posición de -55 grados, donde la dispersión es semejante, especialmente para frecuencias de medias y altas. El nivel de intensidad es un poco inferior en la frecuencia de 4000HZ.

Ilustración 30. Coeficiente de difusión Normal.

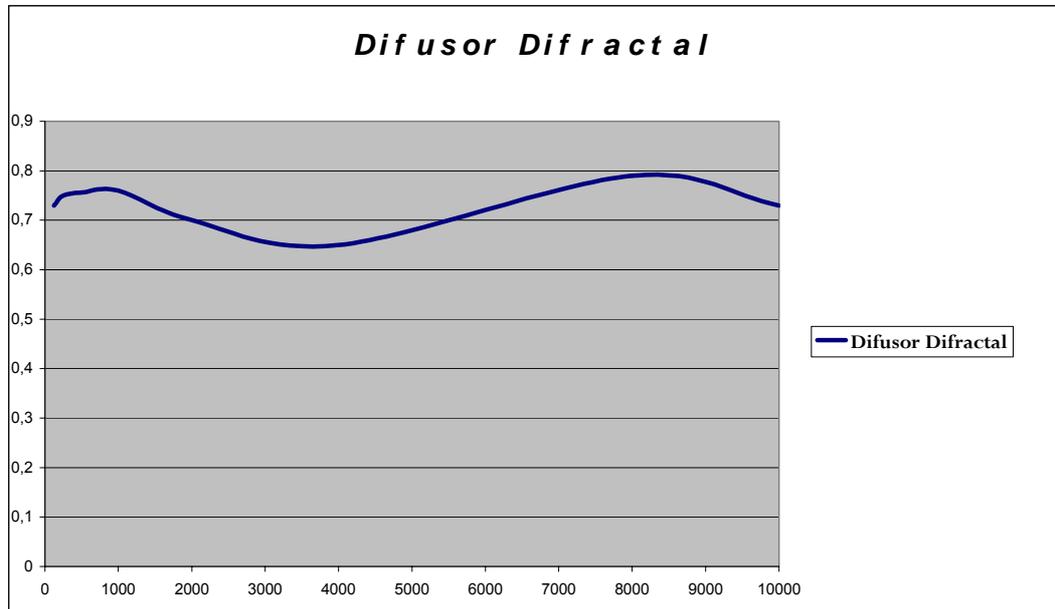


Tabla 7. Coeficientes de Difusión.

Superficie / Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000	10000
Difusor Difractal	0,73	0,75	0,76	0,76	0,7	0,65	0,79	0,73

Se corrobora en la tabla los coeficientes de difusión del difusor anidado, donde se revela una clara difusión desde los 100 hasta los 10000 Hz, tal como se planteo en los parámetros de diseño.

4.6 RELACION DE COSTOS Y VALOR COMERCIAL

Para el diseño y construcción de este difusor fueron necesario el encargo y corte de los materiales, insumos, la mano de obra, diseño ingenieril, transporte,

locacion entre otros, lo cual le da un valor comercial de \$1'300.000 Moneda local.

5. CONCLUSIONES.

- ⤴ Se pudo demostrar que la profundidad del difusor es inversamente proporcional con las longitudes de ondas, a mayores profundidades, la frecuencia mínima es menor.

- ⤴ Este difusor anidado, se comporta como una superficie irregular numérica, capaz de crea un campo difuso con un amplio rango de frecuencia desde los 100 hasta los 10000 HZ.

- ⤴ El espesor de los divisores siendo este de 4 mm debido a la comercialización del material, no se comporto como un resonador para bajas frecuencia; en este difusor se observa una difusión estable para este rango de frecuencias.

- ⤴ De acuerdo con el coeficiente de absorción del material, este se comporto de la forma esperada, con poca perdida de energía acústica y dispersiones sonoras estables.

- ⤴ Debido al cuidadoso proceso de diseño y construcción del difusor, este se extrapolo o se amplio su rango de frecuencias eficaz de difusión.

- ⤴ Para la etapa de construcción fue necesario aproximar las medidas de los cortes del material, así como las profundidades a cifras decimales, con el fin de optimizar el proceso de construcción del difusor.

- ▲ El espacio de la ranura del difusor primario, limitaba la inmersión de los difusores secundarios, por lo cual fue necesario acogerse a esta medida.

- ▲ El difusor fue capaz de generar difusión espacial y temporal, como se aprecia en la respuesta al impulso.

- ▲ El MDF se comporto como un material practico para la construcción de difusores anidados, tanto por su aspecto económico y versatilidad, como por su respuesta acústica en comparación con otros materiales.

- ▲ Debido a la ausencia de herramientas sofisticas para realizar cortes y moldes el difusor fue diseñado y construido, en adaptación a las medidas de comercialización en que se encuentran los materiales en el mercado.

- ▲ Con los cálculos realizado mediante la expresión matemática

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

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

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

Para mediciones de difusores, fue posible lograr una obtener una respuesta al impulso apropiada.

- ⤴ Las mediciones realizadas en incidencia aleatoria, de 55 y -55 grados, tuvieron una respuesta difusa muy similares entre si, debido a la simetría de panel difusor.

- ⤴ Para incidencia normal de 0 grados, el difusor se comporto de manera estable en su dispersión, con una notable mejoría en frecuencias bajas.

- ⤴ Los valores de coeficientes de difusión calculados, corroboran el rango de frecuencia eficaz con que se diseño el difusor.

- ⤴ Mediante la adaptación del material para crear una superficie irregular numérica, se comprobó la posibilidad de generar difusión desde los 250 hasta los 10000HZ.

6. RECOMENDACIONES.

- ⤴ Se recomienda a futuros investigadores realizar la medición de campos difusos en recintos cerrados.
- ⤴ La construcción de próximos difusores, debe ser más estable con el fin de evitar su deterioro físico.
- ⤴ Se deben implementar nuevos espacios de mediciones acústicas con el fin de no afectar la tranquilidad de la población vecina.
- ⤴ Investigar nuevas alternativas de materiales para la construcción de difusores.
- ⤴ Se aconseja la investigación sobre otros tipos de difusores, con el fin de ampliar los conocimientos sobre este fenómeno sonoro.

BIBLIOGRAFÍA

Alejandro Bidondo. Diplomado de acústica, Difusores1, U.S.B, 2003

ARAU, Higini. ABC de la acústica arquitectónica. España:Ceac. S.A, 1999. 336 p ISBN 84-329-2017-7.

CARRIÓN I, Antoni. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. México: Alfaomega, 1998.436 p. ISBN 970-15-0453-4.

COX, trevor, D'ANTONIO, Peter. Acoustics Absorbers and Diffusers: theory, Desing and Application. New York:2004. 405 p.

D'antonio, Peter and john H. Konnert, New Acoustical Materials and Designs Improve Room Acoustics, 81st Audio Eng. Soc. Convention, Los Angeles, November de 1986, preprint #2365.

EVEREST, Alton. Master handbook of acoustics. Estados Unidos: Mc Graw Hill, p 200. Fourth Edition. 616 p. ISBN 0-07-136097-2.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Normas Colombianas para la presentación de trabajos de investigación. Quinta actualización. Santafé de Bogotá D.C.: ICONTEC 2005. 126. NTC 1307.

www.rpginc.com./difracttal

www.us.es/decaletsa/dca1/documentos/assignaturas/acondicionamiento1/coeficientes.pdf