

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Estudio sobre la mejora de la difusión del campo sonoro en una sala mediante la técnica de simulación diferencias finitas en dominio temporal”**

Tipología: Trabajo de investigación

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

Autor:

**Julián Mauricio Barreiro Pérez**

Tutor:

**Francisco Javier Redondo Pastor**

**GANDIA, 2014**

# Estudio sobre la mejora de la difusión del campo sonoro en una sala mediante la técnica de simulación diferencias finitas en dominio temporal

*Autor: Julián Mauricio Barreiro Pérez*

*Director: Francisco Javier Redondo Pastor*

## *Resumen*

Uno de los principales propósitos del diseño y acondicionamiento acústico de salas, es permitir que el campo sonoro pueda ser distribuido uniformemente por todo el espacio destinado para la audiencia. Para ello se sabe que los modos de vibración y la absorción de las ondas sonoras en los materiales al interior de un recinto, son el principal obstáculo para cumplir con este requisito. De lo anterior, se deriva una completa teoría sobre la difusión del sonido y con ella, los difusores de todo tipo y la irregularidad geométrica de salas; pero responder a las preguntas, qué tipo de difusor emplear, cuántos difusores se necesitan introducir o qué tipo de geometría de recinto generar, sigue siendo hoy una incertidumbre. Mucha de esta información está consignada en la bibliografía a manera de recetario y representada de forma conceptual a través de un número o una gráfica, rara vez de forma sensorial, siendo muchas veces impreciso relacionar los principales parámetros acústicos a cómo "suenan en la vida real". Con este trabajo se pretende corroborar la información sobre diseño geométrico de salas, así como también proveer un idea de cómo algunos parámetros acústicos pueden ser percibidos, para lo cual siempre se mostrarán los resultados en forma de auralizaciones, complementados también de forma gráfica.

**Palabras claves:** *Acústica arquitectónica, Simulación numérica, FDTD, MEF, Auralización Binaural, Espacialidad y Envolvente.*

## **Abstract.**

One of the main aims about the design and conditioning of enclosures is to allow that the sound field can be uniformly distributed through the audience area. It is known that the vibration modes and absorption of sound waves in materials into a room are the main obstacle to fulfill this requirement. All of this made possible to consolidate a complete theory about sound diffusion, all kind of diffusers, and different room geometries; but to try to answer to the questions about which kind of diffuser to use, how many of this structures are necessary to introduce in a room or which shape of enclosure to chose, still remains incertitude. Most of this information is shown as a recipe and in most of the cases, presented in a conceptual way and only through a graphic or a number but never in a sensorial way, being often inaccurate the manner as most of the acoustical parameters are related each other and sound in the real life. The main objective with this work is to corroborate the information about the enclosures geometry design, as well to provide a general idea about how some acoustical parameters can be perceived, always through auralizations and in some cases, complemented with some charts.

**Key words:** *Architectural acoustics, Numerical Simulation, FDTD, FEM, Binaural auralization, Spaciousness and Envelopment.*

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
2.	Objetivos .....	2
3.	Metodología .....	2
4.	Marco teórico .....	4
4.1.	Métodos numéricos de simulación .....	4
4.1.1.	Método de las diferencias finitas en el Tiempo .....	5
4.1.2.	Método de elementos finitos (FEM).....	9
4.2.	Acústicas de salas .....	10
4.3.	Propagación del sonido en salas.....	11
4.4.	Respuesta al impulso de una sala.....	15
4.5.	Modos de vibración en salas.....	17
4.6.	Parámetros objetivos en Salas .....	18
4.6.1.	Tiempo de Reverberación RT.....	19
4.6.2.	EDT (Early decay time).....	20
4.6.3.	Razones de Energía Temprana y tardía .....	21
4.6.4.	Calidez, Brillo y Timbre (BR/Br/TR1).....	22
4.6.5.	Sonoridad (G).....	22
4.6.6.	Intimidad (ITDG-Initial Time Delay Gap).....	23
4.6.7.	Impresión espacial (IACC) .....	23
5.	Desarrollo ingenieril.....	24
5.1.	Uniformidad en la distribución del nivel de presión sonora cuando se inclinan las paredes de la sala entre 0° y 10°. Ángulo ideal de inclinación .....	24
5.2.	Caracterización del nivel de presión sonora y auralización en una sala cuando se introducen difusores 28	
5.2.1.	Difusores convencionales QRD .....	29
5.2.2.	Simulación con difusores de Cristales de sonido.....	35
5.3.	Simulación comparación parámetros acústicos en salas con diferentes geometrías y misma área. ....	39
6.	Conclusiones .....	45
7.	Futuras líneas de investigación.....	47
	Bibliografía .....	48
	Anexos.....	50
	Anexo 1 .....	50
	Anexo 2 .....	54
	Anexo 3 .....	55
	Anexo 4 .....	57
	Anexo 5 .....	58

## 1. Introducción

La idea de investigar en esta disciplina, parte de que en la teoría es fácil y común encontrar recomendaciones de diseño arquitectónico para lograr construir recintos con “una buena acústica”, siendo muy común nombrar, la introducción de difusores, inclinación de paredes, irregularidad geométrica, entre otras alternativas. Muchas de estas recomendaciones, se sugieren a modo de “receta de cocina” para que aseguren un campo uniforme de la distribución de la presión acústica, espacialidad, calidez, brillo, inteligibilidad y tiempos de reverberación, acordes a las necesidades que se tengan.

Muchos de estos principios se basan, en estudios psicoacústicos del pasado, donde se le pedía al público (que en la mayoría de veces no tenía experiencia identificando parámetros acústicos) evaluar la sala, ignorando la mayoría de las veces las piezas artísticas allí interpretadas, detalle que en algunas ocasiones evita ser objetivos y cuantitativos en los resultados obtenidos. Con estas pruebas, se comenzó a determinar cuáles salas sonaban bien y cuáles no, y a partir de allí, se identificaron y definieron parámetros físicos objetivos que describen su comportamiento.

Con el fin de ignorar la subjetividad en este tipo de caracterizaciones, grupos de investigación se han dado a la tarea de construir herramientas que permitan evaluar objetivamente las características acústicas de una sala, para ello se han implementado técnicas de construcción de modelos a escala (1), simulación por trazado de rayos, por elementos finitos, diferencias finitas, procesamiento digital de señales y acústica virtual (ARD - Adaptive Rectangular Decomposition) (2), entre otras. Gran parte de estas herramientas buscan llegar a una aproximación de cómo será el comportamiento acústico de un espacio determinado antes de ser construido, recrear mundos virtuales en el caso de aplicaciones a videojuegos (Rapture3D, CMSS-3D) o simplemente evaluar de manera más objetiva, cómo suenan las salas que hoy día están construidas (3).

Con esta tesina de máster, se pretende hacer uso de alguna de las técnicas de simulación numérica nombradas anteriormente para esclarecer y corroborar parámetros de diseño geométricos básicos que se plantean tradicionalmente a la hora de diseñar un recinto acústico. Para ello se partirá de una geometría 2D simple como lo es una sala rectangular de 3m X 4m, cuyas dimensiones vienen escogidas por el criterio de Bolt (4), y posteriormente se harán modificaciones geométricas a la misma, introduciendo difusores, o evitando paredes ortogonales. Para ello se modelarán salas en forma de abanico, herradura, hexagonal, con difusores y otros arreglos, de tal manera que se obtenga el diseño que mejor uniformidad de campo acústico logre, mitigando un poco el efecto de los modos de vibración. Siempre en todo momento la evaluación se hará cuantitativamente, teniendo en cuenta desviaciones estándar de las variaciones de presión en la sala, calculando el IACC (correlación cruzada interaural) como criterio de evaluación de espacialidad y parámetros acústicos como la vivacidad ( $T_R$ ), Calor (BR), Brillo (Br), EDT, Sonoridad (G), Claridad ( $C_{50-80}$ ) e ITDG y teniendo la oportunidad de relacionar cada arreglo geométrico con su respectiva auralización. Se hará principalmente uso del modelado numérico del problema acústico mediante diferencias finitas en el tiempo, implementado a través del entorno de programación en Matlab y algunos estudios complementarios como el de distribución de la presión sonora en el espacio, con ayuda del modelado por elementos finitos.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Comparar simulaciones en dos dimensiones a través del método de diferencias finitas en el tiempo y elementos finitos, entre diferentes arreglos geométricos de salas, dejando como constante el área, para poder identificar y corroborar cuantitativamente y perceptivamente, parámetros acústicos que permitan definir criterios de diseño acústico arquitectónico.

### 2.2. Objetivos Específicos

- Modelado CAD de las salas en dos dimensiones con geometrías curvas. Para exportar a Matlab a través de un software de reconocimiento de imágenes (máscaras), programado para este trabajo. Se tendrá en cuenta mantener constante el área en todas las salas, para los diferentes arreglos geométricos.
- Construir los programas en Matlab para otro tipo de modelado como el de las salas con difusores de cristales de sonido y la sala con variación de inclinación de paredes (ángulos de  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ ).
- Mediante postprocesado, determinar qué ángulo de paredes permite tener una mejor distribución del nivel de presión sonora. Evaluación a través de promedios y desviaciones estándar de los niveles de presión en cada uno de los puntos del enmallado.
- Determinar entre difusor de cristales y QRD, cuáles generan mejor espacialidad en una sala. Evaluación a través de correlación cruzada interaural IACC.
- Realizar simulaciones variando la cantidad de difusores introducidos en una sala rectangular. De esta forma evaluar, cuántos difusores y en qué posición deben estar dentro de una sala para lograr un campo relativamente difuso o uniforme. Evaluación a través de IACC
- Determinar las propiedades acústicas básicas como vivacidad ( $T_R$ ), Calor (BR), Brillo (Br), EDT, Sonoridad (G), Claridad ( $C_{50-80}$ ) e ITDG, para cada uno de los arreglos geométricos de salas conocidas como recintos en forma de abanico, hexagonal, herradura, rectangular entre otros arreglos y caracterizar patrones de diseño acústico arquitectónico.
- Auralizar de forma Binaural cada una de las simulaciones para poder asociar detalles geométricos, con parámetros acústicos y su percepción auditiva.

## 3. Metodología

El desarrollo de este documento está basado en el cumplimiento específico de los objetivos anteriormente propuestos. Para ello se hará uso de la información impartidas en el aula de clase, específicamente de las materias “acústica de salas” y “métodos de simulación en acústica”, su respectiva bibliografía y herramientas computacionales con licencias académicas de los programas *Matlab* y *Comsol Multiphysics* para hacer estudios por FDTD y FEM de fenómenos acústicos en recintos. Parte de la información, también será analizada haciendo uso de programas comerciales como *Adobe Audition (Cool Edit)*, y software de procesado de señales acústicas por ordenador como *Aurora* y *Easera* en versiones demo, los cuales no tienen ninguna limitación en cuanto a la obtención de resultados durante un periodo 30 días.

Como primer paso, se configura el modelo acústico planteando algoritmos por FDTD haciendo uso de lenguaje de programación en Matlab, introduciendo la ecuación de onda para ser resuelta iterativamente en el tiempo y en el espacio para el caso de dos dimensiones. Esta herramienta tendrá diferentes formas de ingresar las condiciones de frontera, dependiendo si se introduce la geometría de forma programada (a través de un par de líneas de código que representen la geometría), o través de reconocimiento de máscaras desde una imagen, como se especifica en los objetivos específicos aunque más adelante en el desarrollo ingenieril, será explicado este procedimiento en detalle.

Teniendo la herramienta computacional lista, se escoge y dibujan las geometrías a simular, de acuerdo a la necesidad planteada en el objetivo principal. Luego se procede a construir algunos scripts que permitirán postprocesar los resultados obtenidos en la simulación para explorarlos y analizarlos externamente en una hoja de cálculo, o programa de procesamiento de señales acústicas como los también mencionados anteriormente (Esto para analizar en detalle respuestas al impulso y funciones de transferencia).

Alguno de los estudios propuestos en los objetivos, se obtienen de mejor forma haciendo uso del método de elementos finitos (debido a la carga computacional para obtener los promedios y desviaciones estándar de la variación de la presión sonora, por ejemplo en cada punto del enmallado, así como también para ver específicamente en determinadas frecuencias o en el dominio frecuencial dicha información), tomando como herramienta Comsol Multiphysics, a cambio de FDTD, pero de la misma manera, los resultados de variaciones de presión se exportan a una hoja de cálculo para su posterior análisis.

Una vez corroborado los resultados, los mismos se representarán en este documento en forma de gráficos o tablas resumen para hacer comparaciones rápidas entre diferentes geometrías, teniendo en cuenta las mismas condiciones de fuente y de entorno. Se dejará también registro de las auralizaciones binaurales en los archivos electrónicos adjuntos a este documento en caso tal que los links de igual forma aquí implementados dejen de funcionar. Lo ideal es que el lector siempre pueda tener los resultados y la representación sonora para poder hacer la asociación de parámetros. Esto es importante debido a que la información en este ámbito difícilmente se puede oír, por lo general libros o artículos científicos solo muestran resultados gráficos de experimentación de todo tipo que difícilmente permite asociar magnitudes físicas con una percepción sensorial.

Con todo lo anterior, se estructura el documento de la tesina, haciendo primeramente un recordatorio de los términos y parámetros acústicos que describen cuantitativamente una sala, así como también el principio básico de planteamiento de los métodos numéricos usados. Es de anotar que no se pretende entrar a profundizar en cómo funciona matemáticamente cada método, pues dicha información se ha tratado insistentemente en trabajos de tesinas de años anteriores y casi en cualquier documento que incorpore FDTD o FEM. Entonces el objetivo aquí es concebir dichos métodos como herramientas para corroborar conceptos y parámetros de diseño sugeridos hasta el día de hoy en el campo de la acústica arquitectónica.

Después de haber tratado brevemente el marco teórico, se describirá en forma detallada, el procedimiento empleado para llevar a cabo el cumplimiento de cada uno de los objetivos secundarios. Estos procedimientos podrán ser tomados de ejemplo a la hora de querer expandir o profundizar posteriormente en este campo, o para ser llevado a la vida real a la hora de poner a prueba los detalles de nuevos diseños acústicos arquitectónicos, que muy seguramente en etapa de simulación, permitirá identificar oportunamente cualquier falla y definir con gran nivel de certeza al menos conceptualmente, el resultado final de una sala.

Finalmente algunas conclusiones serán tratadas al final de este documento, así como también algunas sugerencias para mejorar el estudio aquí realizado, planteando futuras líneas de investigación. Muy seguramente el lector estará interesado en aprender a programar en sistemas más optimizados para estas físicas, basados en sistemas GPU por ejemplo (5), para llegar a resultados 3D en menor tiempo; o poner a prueba los métodos numéricos incorporando variables o constantes que contemplen “pérdidas”, cuando los resultados sean comparados con los del mundo real, haciendo ejemplos a escala usando herramientas de mecanizado CAD/CAM o impresión 3D y procesado digital de señal con sensores optoacústicos y sistemas de adquisición (6).

## 4. Marco teórico

Para la comprensión de los resultados y entender la metodología tenida en cuenta en el desarrollo de este documento, se detalla a continuación algunos conceptos clave.

### 4.1. Métodos numéricos de simulación.

Con respecto a este tema la bibliografía es bastante extensa y se ha venido desarrollando intensamente en las últimas dos décadas paralelamente a la evolución de los ordenadores y sus capacidades de procesamiento. Estos métodos surgen para resolver problemas estructurales, de termodinámica y electromagnetismo, pero han sido analógicamente implementados a áreas como la acústica, para resolver de forma iterativa y aproximada la ecuación de onda en un recinto bien sea en dos o tres dimensiones.

4

La aplicación de estos métodos específicamente en acústica de salas, han tenido gran aceptación a raíz de que son modelos basados en la resolución de la ecuación de onda, la cual describe el modelo fielmente, contemplando por defecto fenómenos refracción, interferencia y fase para definir parámetros acústicos. La gran limitación que presentan, es que por ser métodos que discretizan en forma de malla un problema físico, dicha segmentación permite tener resultados con limitaciones, que para el caso de la caracterización acústica de salas, consisten en obtener funciones de transferencia o respuestas al impulso con información limitada a media-baja frecuencia o dificultad para analizar recintos en tres dimensiones de gran tamaño.

Hoy en día es por ello que se hablan de modelos híbridos (7) (8), donde se busca lograr aproximaciones más eficientes combinado método de trazados de rayos o de acústica geométrica y métodos numéricos basado en la solución de la ecuación de onda “wave based method” como FEM, FDTD, BEM, ARD entre otros. Dichos modelos híbridos van de la mano de la necesidad de manejar lenguajes de programación basados en GPU (Graphics Processing Unit) aprovechando la implementación de una tecnología creada en 2006 por Nvidia, llamada CUDA (Compute Unified Device Architecture) (9), la cual aprovecha el paralelismo que ofrecen sus múltiples núcleos de procesamiento para poder ejecutar varias órdenes de cálculo simultáneamente, contrario a cómo opera un CPU (Central Processing Unit), que es como tradicionalmente viene constituido un sistema informático de unidad de procesamiento central (el que tenemos en casa, por ejemplo), por lo tanto un CPU complementado con un GPU, permitiría poder resolver simulaciones con geometrías complejas, de grandes proporciones en tres dimensiones en poco tiempo.

### 4.1.1. Método de las diferencias finitas en el Tiempo.

En la simulación por trazado de rayos, la cual asume que las ondas sonoras son parecidas a las ondas de luz, los efectos de refracción son ignorados, de ahí que los fenómenos de interferencia de ondas encargados de producir efectos estacionarios o modos de vibración en un recinto cerrado, no sean completamente representados. Esto sumado a la falta de claridad en la cantidad de rayos y el orden de rebote por rayo, hacen que otros métodos basados en la solución de la ecuación de onda o “wave-based methods” sean mejor concebidos, a costa de tener una mayor carga computacional.

El método de diferencias finitas en el tiempo, fue un modelo concebido en forma de algoritmo por K. Yee (10), hace más de 4 décadas, donde encontró la forma de resolver las ecuaciones de Maxwell para modelar problemas de campos electromagnéticos, a través de grillas escalonadas, lo que permite resolver el problema planteando ecuaciones diferenciales que se resuelven de forma iterativa lo que también se conoce como ecuaciones de actualización con una determinada resolución espacial y temporal; dichas ecuaciones, son luego implementadas en algún lenguaje de programación para ser resueltas por ordenador.

Este modelo es analógicamente implementado para resolver problemas acústicos como el de la propagación de ondas en un fluido, donde la simulación al mismo tiempo que se resuelve, por defecto permite conocer de forma visual cómo se va comportando un frente de onda a medida que choca con determinadas barreras o estructuras; consecutivamente y a través de postprocesado se pueden concebir mas estudios a partir de los resultados obtenidos. Como ventaja se tiene, el poder trabajar en el dominio del tiempo, lo que permite estudiar un amplio espectro; la restricción es que al ser un modelo basado en malla, la resolución espacial, o sea la distancia a la que las velocidad de partícula y presión serán calculadas, debe ser pequeña comparado con la menor longitud de onda que se quiera estudiar, esto trae como consecuencia que no sea un método muy práctico para análisis en alta frecuencia, pero bastante aproximado para hacer estudio de modos de vibración, o uniformidad del campo acústico en baja frecuencia o al menos hasta la frecuencia de Schroeder (11), la cual concibe que por encima de ese valor, los fenómenos resonantes dejan de ser prioritarios y el campo se puede considerar difuso, pues los modos de vibración están cada vez mas juntos a medida que la frecuencia va aumentando. Pero por el rendimiento que tienen las herramientas computacionales de hoy y sobe todo para efectos de una auralización con una calidad sonora aceptable, este valor se ha puesto hasta los 10Khz, lo cual es una frecuencia varias razones por encima de la frecuencia de Schroeder y donde quizás una teoría de rayos sea más útil.

En un medio homogéneo o isotrópico sin pérdidas, la propagación de las ondas sonoras, está gobernado por el principio de la conservación del momento y de la masa (o ecuación de continuidad) como se enuncia a continuación:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + k(\vec{\nabla} * \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} P + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Dónde  $p$  es el campo de presión,  $\vec{u}$  es el vector de la velocidad de partícula,  $\rho$  es la densidad de masa del medio y  $k = \rho c^2$  es el valor de la compresibilidad del medio.



Las ecuaciones ( 1 ) y ( 2 ) si se aplica para un sistema en dos dimensiones, puede ser expresado de la siguiente manera en las ecuaciones ( 3 )( 4 )( 5 ):

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

Las derivadas espaciales y temporales de cualquier función pueden ser aproximadas por diferencias finitas como sigue por lo tanto ( 6 ) aplicaría tanto para el eje X, Y o Z, dependiendo el caso, entonces:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{P(x_0 + \frac{1}{2}\Delta x) - P(x_0 - \frac{1}{2}\Delta x)}{\Delta x} \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_{t=t_0} = \frac{P(t_0 + \frac{1}{2}\Delta t) - P(t_0 - \frac{1}{2}\Delta t)}{\Delta t} \quad (7)$$

6

Donde el  $\Delta X$  hace referencia al intervalo tanto espacial como temporal entre los puntos considerados de la grilla como lo plantea Yee en la referencia anterior.

Suponiendo que se tiene una grilla como la de la Figura 1 Grilla escalonada del planteamiento de la ecuación de onda para ser implementada por FDTD.y se desea evaluar la ecuación 5, la ecuación de actualización que debe ser programada quedaría como sigue, este procedimiento también es sugerido en (12):

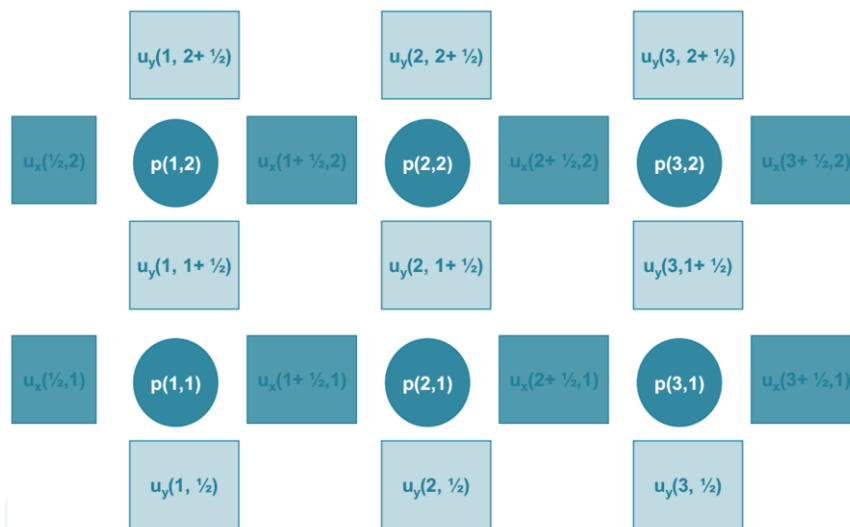


Figura 1. Grilla escalonada del planteamiento de la ecuación de onda para ser implementada por FDTD.

Primero  $p$  (presión) en el tiempo y  $v$  (velocidad de partícula) en el espacio, de acuerdo a la ecuación ( 5 )

$$\frac{p(1,1,t + \frac{\Delta t}{2}) - p(1,1,t - \frac{\Delta t}{2})}{\Delta t} + \rho c^2 \left( \frac{u_x(1 + \frac{1}{2}, 1, t) - u_x(\frac{1}{2}, 1, t)}{\Delta x} + \frac{u_y(1, 1 + \frac{1}{2}, t) - u_y(1, \frac{1}{2}, t)}{\Delta y} \right) = 0 \quad (8)$$

Luego despejando  $p(1,1,t + \frac{\Delta t}{2})$ , para poder conocer la presión en cualquier punto, pero conociendo el resultado del paso anterior en el tiempo para la presión y en el espacio para las velocidades de partícula en el eje x e y, la expresión quedaría:

$$p(1,1,t + \frac{\Delta t}{2}) = p(1,1,t - \frac{\Delta t}{2}) + \Delta t \cdot \rho c^2 \left( \frac{u_x(1 + \frac{1}{2}, 1, t) - u_x(\frac{1}{2}, 1, t)}{\Delta x} + \frac{u_y(1, 1 + \frac{1}{2}, t) - u_y(1, \frac{1}{2}, t)}{\Delta y} \right) \quad (9)$$

Lo anterior llevado a código de Matlab, sería algo como sigue a continuación:

```

%%% Se definen las condiciones iniciales%%%
% dh= Resolución espacial, tamaño de la malla
% nx y ny = límites del problema (dimensiones de la sala) en
metros
% rho= impedancia del aire, C= vel del sonido
dh=.01;nx=round(3/dh);ny=round(2/dh);
rho=1.21;c=341;k=(c^2)*rho;

```

Luego se introduce la ecuación ( 9 ) como sigue:

```

%inicialización de las variables antes del bucle for
p=zeros(nx,ny); %sound preassure
ux=zeros(nx+1,ny); % velocidad de partícula
uy=zeros(nx,ny+1); % velocidad de partícula

for tt=1:maxtt;
    %Cálculo de la presión
    p=p-k*dt/dh*(diff(ux,1,1)+diff(uy,1,2));

    %Introducción de la fuente
    p(algún punto, algún punto)= una señal definida previamente,
    puede ser un sinesweep o una señal ricker wavelet, etc.;

```

El cálculo de la velocidad en x e y, se puede despejar de las ecuaciones ( 3 )( 4 ) como sigue a continuación:

$$\frac{u_x(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t + \Delta t) - u_x(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t)}{\Delta t} = u_x(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t) - \frac{\Delta t}{\rho} \left( \frac{p(1,2,t + \frac{\Delta t}{2}) - p(1,1,t + \frac{\Delta t}{2})}{\Delta h} \right) \quad (10)$$

$$\frac{u_y(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t + \Delta t) - u_y(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t)}{\Delta t} = u_y(1,1 + \frac{\Delta t}{2}, t) - \frac{\Delta t}{\rho} \left( \frac{p(1,2,t + \frac{\Delta t}{2}) - p(1,1,t + \frac{\Delta t}{2})}{\Delta h} \right) \quad (11)$$

Siendo  $\Delta h$  la resolución espacial de la grilla o distancia entre elementos. De acuerdo a lo anterior y dando continuidad a las líneas de código anterior, se tendría:

```

%cálculo de la velocidad
ux(2:nx,:) = ux(2:nx,:) - dt/rho/dh*diff(p,1,1);
uy(:,2:ny) = uy(:,2:ny) - dt/rho/dh*diff(p,1,2);

```

Luego, asumiendo una condición local de frontera reactiva y como la grilla no tendría puntos posteriores para el cálculo de la velocidad, entonces allí se debe asumir que:

$$\vec{u} = \frac{p}{Z} (\vec{v}_{normal}) \quad (12)$$

Que de acuerdo a la Figura 2, si se dibuja una frontera (una pared por ejemplo), las ecuaciones de actualización para la velocidad de partículas en x e y, quedarían de la siguiente forma:

$$u_x\left(\frac{1}{2}, 2\right) = \frac{p(1,2)}{Z} (+1) \quad (13)$$

$$u_y\left(1, 2+\frac{1}{2}\right) = \frac{p(1,2)}{Z} (-1) \quad (14)$$

La representación en código sería la siguiente:

```
%Condiciones de frontera (impedance aplica si se define una impedancia
de paredes en las condiciones iniciales)
ux(1,:) = -p(1,:)/rho/c/impedance;
ux(end,:) = p(end,:)/rho/c/impedance;
uy(:,1) = -p(:,1)/rho/c/100;
uy(:,end) = p(:,end)/rho/c/impedance;
```

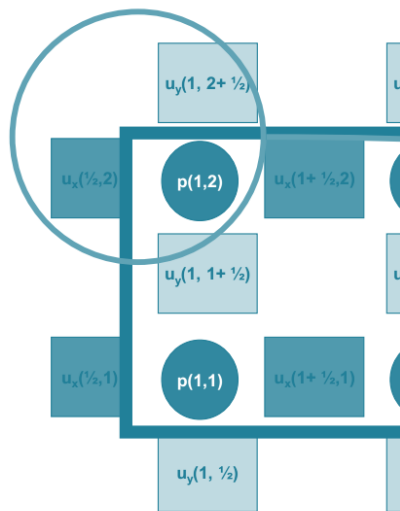


Figura 2 Grilla escalonada asumiendo una condición de frontera.

Otros casos se pueden implementar dependiendo de la necesidad de programar algún otro algoritmo para el caso de las condiciones de frontera, esto aplicaría por ejemplo, para el caso donde la frontera no sea ortogonal sino que sea en ángulo. Como el problema ha sido discretizado en espacio, es necesario calcular las ecuaciones (13) (14), con sus respectivas componentes en x e y. Teniendo en cuenta la Figura 2 se plantearía lo siguiente:

$$u_x \left( \frac{1}{2}, 2 \right) = \frac{p(1,2)}{Z} (+1) \sin(\alpha) \quad (15)$$

$$u_y \left( 1, 2 + \frac{1}{2} \right) = \frac{p(1,2)}{Z} (-1) \cos(\alpha) \quad (16)$$

Donde  $\alpha$  sería la componente de la inclinación de la frontera o pared.

Debido al error que implica el planteamiento de la ecuación ( 12 ) de contornos debido a la no coincidencia de la impedancia del medio con la de la pared o frontera, hecho que imposibilita tener un material perfectamente absorbente, es posible también introducir una condición PML (Perfectly Matched Layer) lo cual define un medio con pérdidas, cerca a la zona de frontera para evitar dichos errores acumulativos de aproximación. Lo que implica agregar un par de términos al cálculo de la presión en el tiempo y velocidades en el espacio.

$$\frac{\partial p_x}{\partial t} + \gamma_x p_x + k \left( \frac{u_x}{x} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial p_y}{\partial t} + \gamma_y p_y + k \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial t} + \gamma_x p_x \right) = 0 \quad (19)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \left( \frac{\partial u_y}{\partial t} + \gamma_y p_y \right) = 0 \quad (20)$$

Donde la presión sonora  $p$  ha sido partida en dos componentes aditivas  $P_x$  y  $P_y$ . Dichas componentes no tienen ningún significado físico, solo es definido por razones de cálculo.

#### 4.1.2. Método de elementos finitos (FEM).

Este modelo numérico es llevado a cabo para de una forma más precisa, poder ver en el dominio de la frecuencia cómo es la distribución de la presión en un área o volumen especificado, para este caso, dichos dominios fueron los planos de planta de las salas (áreas por ser 2D). Lo anterior pudo haber sido resuelto a través de FDTD, pero es un procedimiento más demorado, sumado el posprocesado para pasar el dominio del tiempo a la frecuencia y luego el proceso estadístico. Otro factor es que por FDTD, se debe especificar una grilla de receptores, para a partir de allí evaluar la distribución de la presión en la sala. Por FEM, los resultados pueden ser obtenidos selectivamente, escogiendo las frecuencias a las que se quiere conocer la presión en pascales para cada uno de los nodos de la malla, luego los datos de todos los nodos son posteriormente analizados estadísticamente.

El FEM es un modelo numérico con un amplio campo de aplicaciones (13) en la acústica, desde análisis modal, análisis fluido estructura, interacción acústica-piezoelectricidad, aeroacústica y termoacústica; basado en malla, donde también se discretiza un problema en pequeños elementos cuyas soluciones

pueden ser calculadas fácilmente para poder de esta manera solucionar un problema mucho más grande y de geometría compleja. El tamaño y la forma de esos pequeños elementos, está condicionado por factores propios del estudio que se desee implementar. Para el caso de aplicaciones en acústica, estos parámetros están limitados al igual que en FDTD por el CFL (número de Courant Friedrichs Levy) Definido por la distancia mínima del enmallado, el paso temporal de solucionador y la velocidad del sonido en el medio. Por lo general este parámetro se resume a que el tamaño del enmallado para un modelo acústico, debe cumplir que:

$$\text{Tamaño elemento} = \left(\frac{C}{F}\right) / N \quad (21)$$

Siendo C la velocidad del sonido en el fluido, F la frecuencia máxima de estudio y N, un número entero que debe oscilar entre 5 y 10.

El modelo una vez enmallado, resuelve para el caso de aplicaciones en acústica, la física que gobierna la propagación del sonido en fluidos, igual que para FDTD, esto son las ecuaciones de Momentum y continuidad, ecuaciones (1)(2)(3) las cuales frecuentemente son referenciadas como las ecuaciones de Navier Stokes y que expresadas en componentes armónicas a través de series de Fourier, para el caso de ondas sonoras, pasan a ser las ecuaciones de Helmholtz que propiamente resuelve el software Comsol en su módulo de acústica de presión.

Este fenómeno para el caso de acústica de presión, se suma un flujo sin pérdidas, sin efectos de viscosidad, adiabático y homogéneo. De esta forma la ecuación resultante para encontrar el valor de presión es:

10

$$P = A e^{i(\omega t - K \cdot x)} \quad (22)$$

Donde A es la amplitud de la onda, frecuencia angular  $\omega$  y número de onda K.

La condición de frontera al igual que en FDTD, sugiere que la velocidad normal en la frontera es cero y se especifica matemáticamente como:

$$\left(-\frac{\nabla p}{\rho}\right) \cdot n = 0 \quad (23)$$

Usualmente las condiciones de los programas comerciales como Comsol, con licencia disponibles en la universidad, permiten tener involucradas estas ecuaciones a medida que se va construyendo la física involucrada en el modelo acústico. Todo desde una interface gráfica que fácilmente solo exige tener un buen modelo geométrico CAD (en el caso 3D) y luego, un sólido conocimiento físico del fenómeno que se quiere recrear. Entonces a medida que se definen los dominios, parámetros iniciales y se escogen, condiciones de frontera, estos modelos numéricos se van configurando automáticamente, al tener ecuaciones ya definidas.

#### 4.2. Acústicas de salas.

Todo el trabajo aquí resuelto gira en torno a este tema, el cual busca estudiar los conceptos como sonido directo, campo reverberante, reflexiones útiles y armoniosas, y a su vez las estrategias para el control de

la propagación, reflexión y atenuación del sonido en un recinto determinado bajo el principio de la absorción y la difusión.

El propósito principal del diseño acústico de salas, es el de plantear escenarios con las mejores cualidades para diferentes aplicaciones. Para el caso de recintos como auditorios, es necesario resaltar la palabra en todo su espectro característico, mientras en otros, es necesario guardar cierta privacidad, como puede ser el diseño de oficinas. También se tienen en cuenta aplicaciones para la música, o la mezcla de esta última y palabra, que serían los que se conoce como salas polivalentes. El objetivo siempre es manejar una reverberación apropiada para las condiciones del lugar, así como también un sentido de la espacialidad o envolvente sobre la audiencia y desde luego no solo importa la sala y el público, sino también los escenarios, que deben favorecer a los músicos o intérpretes.

El diseño acústico contempla entonces, el diseño de difusores de sonido, diseño de absorción de sonido y desde luego la forma y geometría de los espacio. En esto último es en lo que se va a profundizar, tratando inclusive el tema de la difusión pero con el sentido de hablar de espacialidad y su efecto en la correlación cruzada interaural.

### ***4.3. Propagación del sonido en salas***

El sonido producido por una fuente sonora llega a los oídos de un oyente a través de dos vías; la primera de forma directa, que es como si el sonido estuviera al aire libre, donde su comportamiento se atenuará aplicando la ley del inverso al cuadrado, pero será modificada por la segunda vía, donde el sonido llegara al receptor a través de las múltiples reflexiones que este sufrirá producto del público alrededor, obstáculos o paredes; y que a su vez su trayectoria dentro de la sala, dependerá del grado de los materiales.

11

Dichas reflexiones que llegan al oyente dentro determinado periodo de tiempo (por lo general los primeros 100ms después del sonido directo, aunque ese tiempo es dependiente del tamaño de la salas), es conocido como primeras reflexiones o “reflexiones tempranas”, y que según (14) son reflexiones por lo general de orden  $\leq 3$ , siendo este número, las veces que incide (o rebota) una onda sobre las superficies de la sala. Las reflexiones que llegan posteriores a ese instante de tiempo, son conocidas como reflexiones tardías, las cuales a su vez constituyen la cola reverberante del recinto.

A continuación se ha recreado un ejemplo para ilustrar lo anterior, usando simulación por teoría de rayos, valga la aclaración que para efectos de visualización, se muestra una sala rectangular con vista en planta y con poco menos de 30 rayos saliendo de la fuente. Es de resaltar que en la vida real, el número de rayos sería infinito y que en estas simulaciones, esa opción es un condicionante. Pero que para cierta parte del espectro es una forma óptima de visualizar donde se concentran las primeras reflexiones y los tiempos a las que estas llegan al oyente.

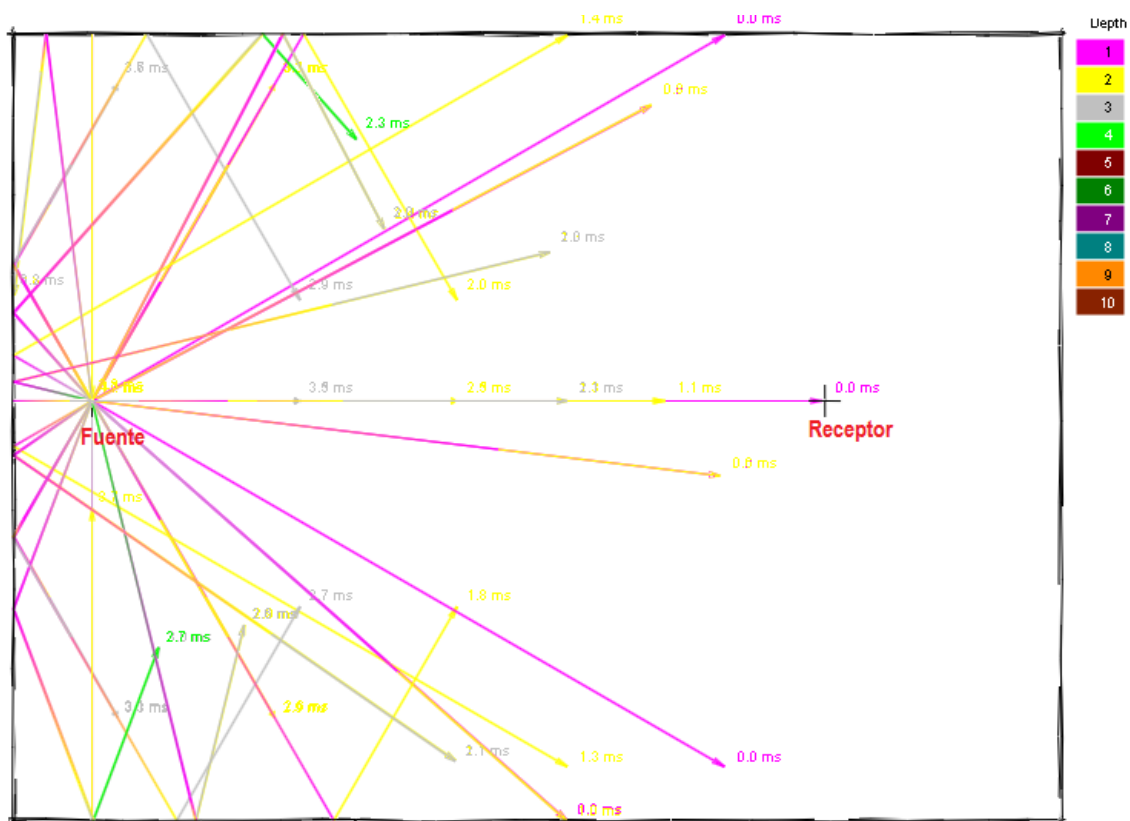


Figura 3. Representación de sonido directo (color morado), y primeras reflexiones según su orden, amarillo 1ra, gris 2da, verde 3ra. También se puede apreciar el tiempo con las que estas llegan al oyente.

12

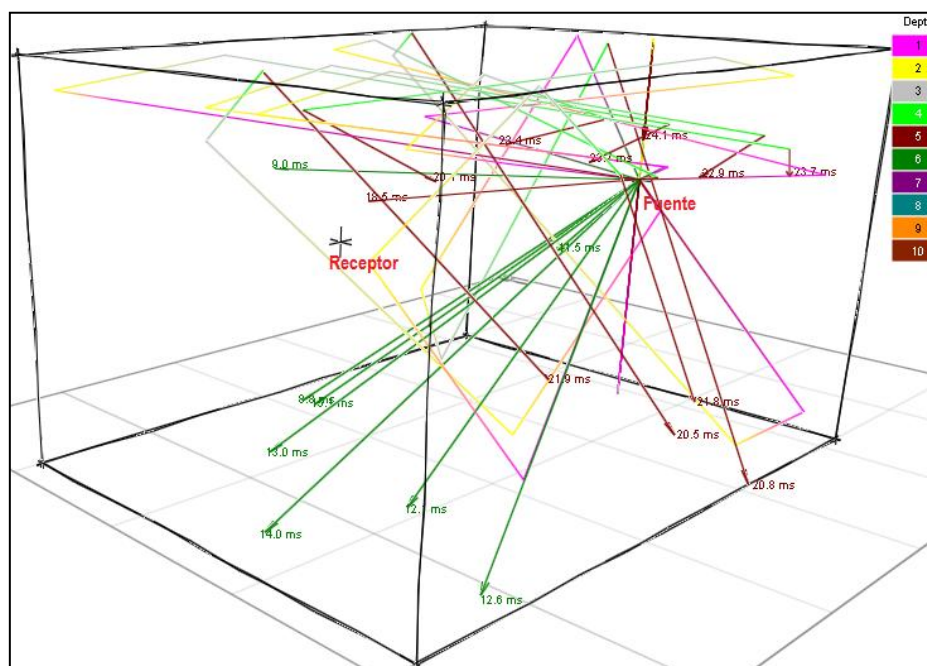


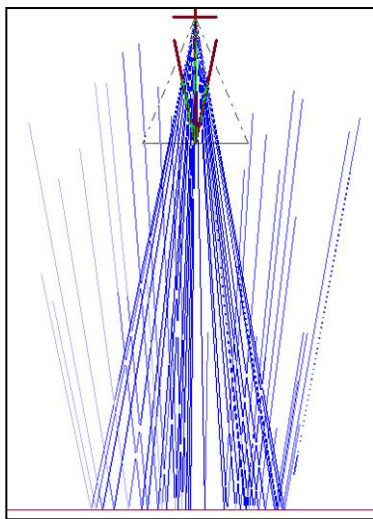
Figura 4. Reflexiones tardías en un recinto. Se pueden apreciar pocas reflexiones menores al cuarto orden, además del tiempo con que llegan al receptor

La idea con esta visualización, no es entrar en detalle o discusiones sobre las desventajas de la simulación por trazado de rayos, como el que todas las reflexiones son especulares, o que trata las ondas sonoras completamente por teoría geométrica o el hecho de ignorar por completo el fenómeno de difracción, sino que esta teoría es necesaria para entender, dónde se concentran las primeras reflexiones

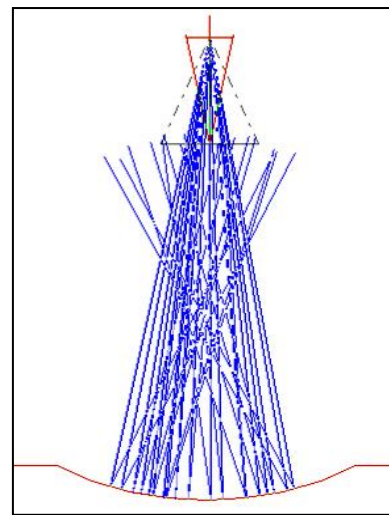
y visualmente cómo se comportan algunas superficies cuando son impactadas por una determinada longitud de onda. Esto con el fin de hablar de focalizaciones de sonido, dispersión o relaciones de campo directo y campo reverberante.

Con respecto a lo anterior, se puede comprobar el comportamiento que tienen algunas superficies al ser impactadas por una onda sonora (15). Hay que tener en cuenta que para que estos fenómenos sucedan, las superficies o irregularidades deben ser grandes comparadas con la longitud de onda que las impacta. Es bueno tener en cuenta estos comportamientos, porque de esta forma se pueden tratar problemas básicos como ecos, focalizaciones, flutter ecos o para ganar o perder información energética de una sala cuando se desea aumentar la envolvente, el ancho aparente, o la relación campo directo-reverberante de una sala, generando difusión o reorientando las reflexiones para lograr mayores concentraciones tempranas o tardía de energía sobre el oyente. .

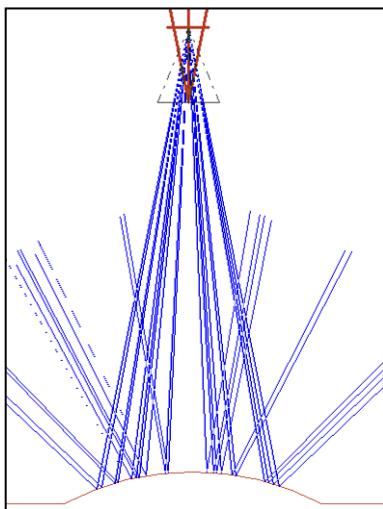
A continuación se muestran algunas imágenes donde se demuestra el comportamiento descrito anteriormente cuando se hace impactar un conjunto de ases de sonido contra una superficie que posee determinada geometría.



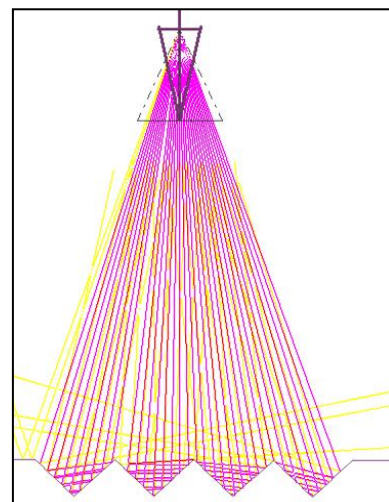
a. Superficie plana



c. Superficie cóncava

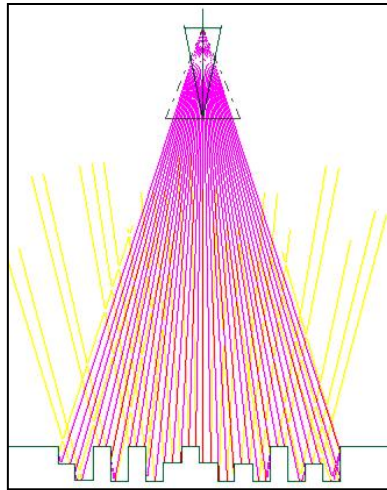


b. Superficie convexa



d. Superficie triangular





e. Superficie Irregular, difusor.

Figura 5. Patrones de reflexión de una onda sonora ante diversos tipos de superficies.

En cuanto a las formas de los recintos (16), se sugieren unas geometrías básicas las cuales se han identificado como las formas tradicionales que han tomados las principales salas de conciertos del mundo durante la historia. A partir de su construcción se han caracterizado y se han definidos sus cualidades acústicas como se muestran a continuación:

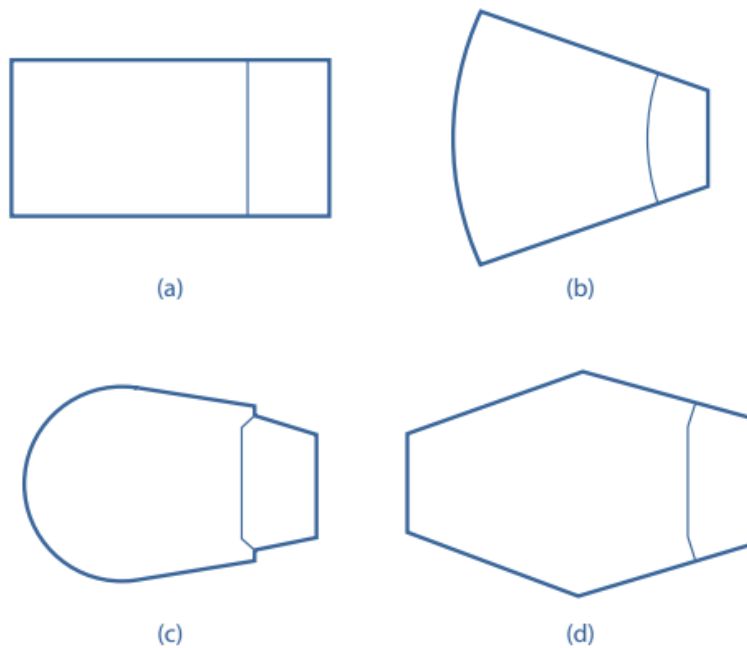


Figura 6. Vistas en plantas de las principales geometrías de salas de conciertos. a) Sala rectangular, b) Sala en forma de abanico, c) Sala en forma de herradura y d) Sala hexagonal.

Según (16), Las salas rectangulares cuentan con muy buena reputación acústica, debido a su notable aporte de reflexiones laterales, pero mala visual desde algunos puntos de la sala. Las salas en forma de abanico se destacan por su excelente campo visual desde el público hacia el escenario, gran capacidad de aforo, pero desde el punto de vista acústico las reflexiones laterales son dirigidas a la parte posterior de la sala permitiendo una mala uniformidad del campo sonoro. Las salas en forma de Herradura muy populares en teatros, tiene el mismo comportamiento de las salas en forma de abanico pero por su

geometría curva en la parte posterior presenta notables problemas de focalizaciones, tal como lo muestra la Figura 5c. Por otro lado, las salas en forma hexagonal ofrecen una fusión de cualidades entre la buena visual del abanico y las ventajas acústicas de excesivas reflexiones laterales del abanico invertido.

#### 4.4. Respuesta al impulso de una sala.

Otra herramienta empleada tanto para conocer los parámetros acústicos de las salas simuladas en este trabajo como para la realización de las auralizaciones, es la respuesta al impulso, en ella se podrán notar tres aspectos claves del comportamiento de un recinto como el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías; aspectos de los cuales se desprenden la mayoría de parámetros objetivos de evaluación acústica de recintos.

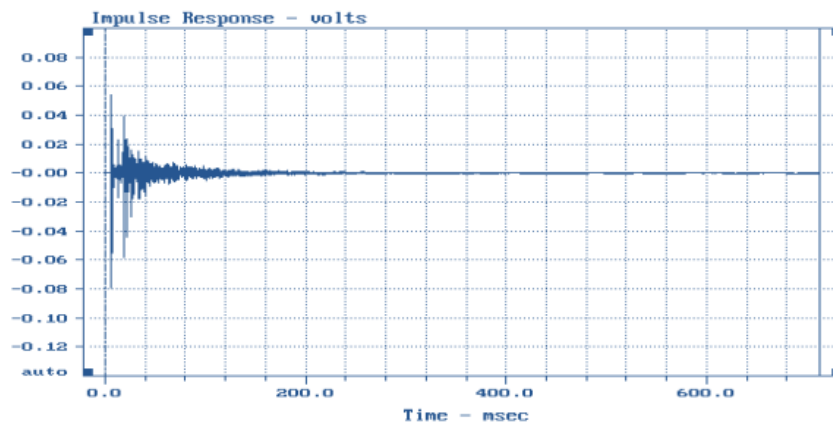


Figura 7. Imagen de una respuesta al impulso

Como ya se mencionó, una de las ventajas de la simulación por el método de diferencias finitas, es poder modelar las variaciones de presión en el tiempo en un determinado punto de la sala. Asumiendo que la sala es una caja negra conceptualmente descrita como un sistema lineal en invariante en el tiempo:

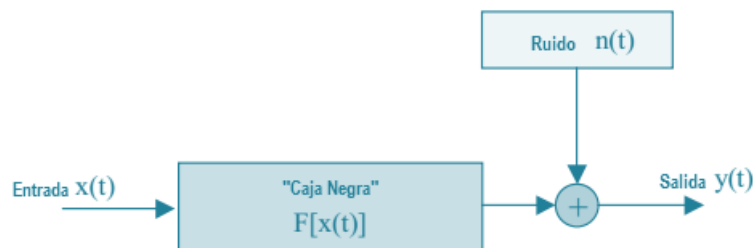


Figura 8 . Planteamiento esquemático del flujo de la señal en una sala. Fuente: web Angelo Farina

Y si un pulso de corta duración es enviado desde una fuente y su respuesta es grabada en un punto específico de recepción, dentro de la sala:

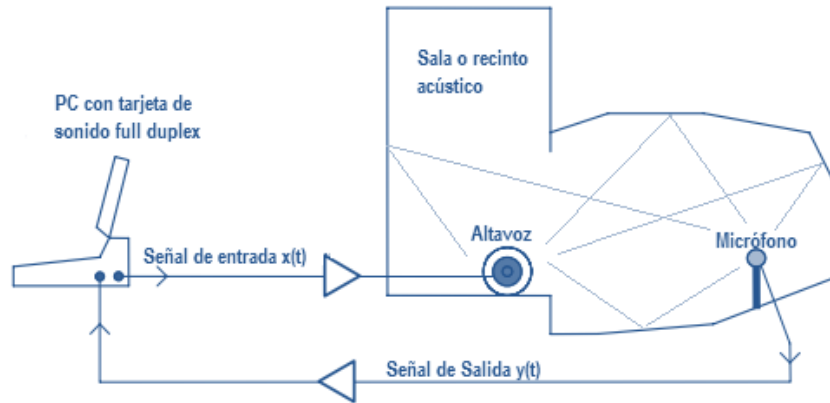


Figura 9. Esquema del conexionado de equipos para la obtención de la respuesta al impulso en una sala. Fuente: web Angelo Farina

Primero se verá el sonido directo, seguido por un número reflexiones espaciadas que conformarán la cola reverberante del recinto:

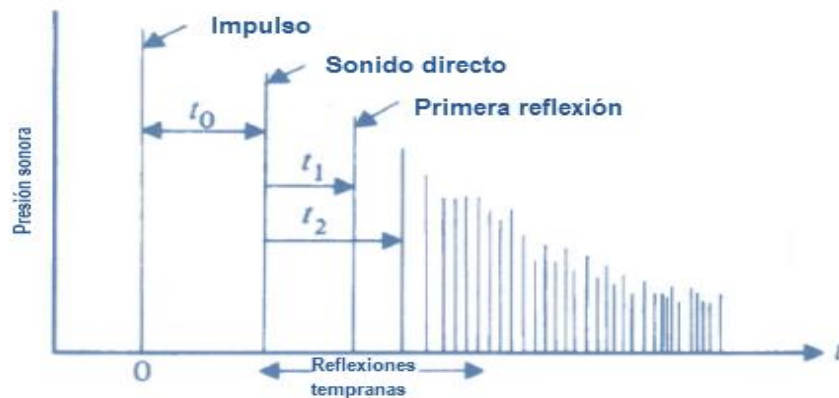


Figura 10. Respuesta al impulso en forma de reflectograma.

Para poder hacer esto, se utiliza un método conocido como "Exponential Sine Sweep (ESS)" propuesto por (17), donde en lugar de una función delta o impulso como señal de entrada, la obtención de la respuesta al impulso puede ser obtenida con barridos sinusoidales logarítmicos debidamente filtrados e invertidos, para luego ser convolucionada con una señal de salida previamente registrada.

De esta forma se introduce una señal test  $x(t)$  en el programa de FDTD o en una sala si es el caso, descrita matemáticamente como sigue :

$$s_n = \text{sen}\left[K\left(e^{-n/L} - 1\right)\right] \quad (24)$$

Siendo,

$$k = \frac{w_1 T}{\ln\left(\frac{w_2}{w_1}\right)} \quad (25)$$

$$L = \frac{T}{\ln\left(\frac{w_2}{w_1}\right)} \quad (26)$$

Donde  $w_1$  y  $w_2$ , son las frecuencia de inicio y fin del barrido, sobre un tiempo  $T$  en segundos para cada instante  $n$  (cada muestra).

Debido a que el espectro de la señal anterior  $x(t)$  tiene un decaimiento de 3dB por octava en el espectro, si se mira toda la señal con un analizador en frecuencia; es necesario aplicar un filtro inverso para compensar dicha pendiente y a su vez invertirla en el tiempo, obteniendo al final ya no un señal  $x(t)$ , sino una nueva llamada  $f(t)$ .

Una vez se introduce la señal de entrada en el sistema o en sala, se obtiene  $f(t)$  a partir de la misma señal como se mencionó anteriormente y paralelamente se captura o se registra a través de un micrófono la señal de salida del sistema  $y(t)$ ; de acuerdo a la siguiente expresión, se puede conocer la respuesta al impulso:

$$h(t) = y(t) \otimes f(t) \quad (27)$$

En la práctica  $f(t)$ , es simplemente la señal de test o de entrada invertida en el tiempo y filtrada inversamente.

Todo lo anterior, ecuaciones (24)(25)(26), programado en el entorno Matlab, quedaría una función que reproduce una señal de excitación de entrada en el modelo de simulación de salas por fdt, como sigue:

```
function [x,x_1]=logsinesweep(fs,T)
%x= sinesweep
%x_1= señal x con filtro inverso e invertida en el tiempo
t=1/fs:1/fs:T;
f1=30;f2=17000;
K=2*pi*T*f1/log(f2/f1);L=T/log(f2/f1);
argumento=K*(exp(t/L)-1);
frecuencia=diff(argumento)*fs;
x=sin(argumento);plot(t,x);title('waveform'),soundsc(x,fs)
x_1=x(end:-1:1).*( [frecuencia(end:-1:1) f1 ]/(2*pi*f1));
```

17

De acuerdo a lo anterior, a las salas se les introduce una señal de barrido sinusoidal logarítmico  $x$ , pero la señal de salida de la sala registrada con un micrófono, debe ser convolucionada con la señal  $x_1$ .

#### 4.5. Modos de vibración en salas

Uno de los fenómenos más importantes a tener en cuenta a la hora de establecer las dimensiones de los espacios, son los modos propios de vibración. Estos son causados por la combinación de ondas incidentes y reflejadas que traen como consecuencia los fenómenos de interferencias constructivas y destructivas, que al tener un fuente en constante emisión, dichos fenómenos de interferencia producen los que se llaman ondas estacionarias o modos propios de la sala. Dichos modos son ilimitados y vienen determinados por las dimensiones del recinto que coinciden con ciertas longitudes de onda de los sonidos reproducidos al interior. Dichos modos pueden ser axiales (tienen en cuenta dos paredes), tangenciales (4 paredes usualmente para estudios 2D) u oblicuos (6 paredes y por lo general se denotan cuando se hacen estudios en 3D).

El objetivo de la escogencia de las dimensiones de una sala, es con el fin de evitar que con estas, los modos naturales de vibración queden uniformemente distribuidos en el espectro o lo más uniforme. Pues muchos modos pueden estar muy cerca el uno de otro, permitiendo coloraciones o distorsiones de las señales reproducidas en el recinto. Algunos Autores como (4) y (18) han propuesto algunos métodos

para determinar la mejor relación dimensional entre largo, ancho y altura, para lograr que los modos de vibración estén las mas uniformemente distribuidos en el espacio, con fuertes estudios estadísticos.

Las notas bajas de un contrabajo provenientes de un sistema de música o teatro en caso en un recinto, podrían hacer vibrar el piso o las ventanas, al mismo tiempo hacen que algunos puntos del espacio presenten máximos y mínimos de presión sonora, permitiendo que en un teatro, sala de conciertos o un auditorio, hayan focalizaciones o coloraciones, o también que los parámetros acústicos tengan una gran desviación estándar alrededor del recinto, haciendo que cada asistente tenga una percepción acústica diferente a la emitida.

La metodología para identificar estas fallas es de dos tipos. Una con un cálculo aparentemente sencillo, que asume que la sala está totalmente vacía y es completamente rectangular. Para ellos se sugieren una ecuación (la fórmula de Rayleigh) que relaciona los modos propios de la geometría a partir de las dimensiones de la misma. Dicha fórmula se muestra a continuación:

$$f_{k,m,n} = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{k}{Lx}\right)^2 + \left(\frac{m}{Ly}\right)^2 + \left(\frac{n}{Lz}\right)^2} \quad (28)$$

Lo anterior para un modelo 3D, dónde Lx,Ly,Lz, representan las dimensiones de la sala y k,m,n, puede tomar cualquier valor entero (0,1,2,3...)

Si la geometría a analizar tiene alguna forma irregular o por ejemplo se quisiera contemplar el mobiliario dentro de una sala de escucha, la fórmula anterior no tendría ninguna validez. Entonces lo que se debe hacer es, con un software de simulación por elementos finitos, introducir la ecuación de onda simplificada en la forma de la ecuación de Helmholtz (19). Dicha fórmulas se encuentran definidas en el módulo de acústica “análisis de modos propios” de Comsol (20), también pueden ser implementados manualmente en Ansys. Dicha ecuación se muestra a continuación.

$$\Delta \hat{p} + \frac{\omega^2}{c^2} \hat{p} = 0 \quad (29)$$

Dónde  $p$  es la amplitud de la perturbación acústica. Todo lo anterior asumiendo que las fronteras como paredes, techo, pisos mobiliarios son perfectamente rígidas.

En cualquier caso, se asume que por encima de una determinada frecuencia, la densidad de modos de vibración es tan estrecha, que no merece la pena tenerlos en cuenta. Esa frecuencia se calcula como sigue:

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} \quad (30)$$

Donde RTmid es el promedio de los valores de tiempo de reverberación correspondientes a las bandas 500 Hz y 1000Hz en segundos, y V es el volumen de la sala en metros cúbicos.

#### 4.6. Parámetros objetivos en Salas

Estos parámetros surgen con el propósito de describir a través de un solo número y mediante mediciones objetivas, las impresiones subjetivas de los oyentes a la hora de evaluar recintos acústicos. Aunque por el momento se siga teniendo la situación que la correlación entre la medición objetiva de parámetros acústicos de salas y las opiniones subjetivas, sean poco convincentes.

El profesor de la universidad de Harvard W.C. Sabine (21) hace más cien años fue uno de los primeros personajes en relacionar un parámetro subjetivo con una medición objetiva, y lo hizo para relacionar el tiempo de reverberación de una sala, con la cantidad de material absorbente en ese espacio. En ese entonces la reverberación era medida creando un campo sonoro estable en la sala, luego se apagaba la fuente sonora y posteriormente se medía el tiempo que le tomaba al sonido decaer por debajo del umbral de audición. Esa relación hizo que hasta la actualidad el tiempo de reverberación se pueda calcular a partir del volumen y el total de área absorbente en una sala.

Pero con el tiempo se encontró que el TR solo, no era completamente claro a la hora de evaluar o de describir la acústica de una sala. A partir de los años treinta una gran oferta de descriptores acústicos fueron presentados, pero con la constante que todos eran parámetros monoaurales que en su mayor parte eran medidos con micrófonos omnidireccionales, algunos de ellos fueron la Claridad y la Sonoridad. Uno de los más importantes descubrimientos fue que el oído tiene un tiempo de integración, y que el sonido que llega en un intervalo de tiempo hasta 80 ms desde el sonido directo, cambiará la impresión aural del mismo. De allí se empieza a concebir los conceptos de reflexiones tempranas y tardías. Pero fue solo hasta después de los sesenta, que la percepción Binaural o los parámetros estereofónicos de un espacio fueron desde luego tan importantes como los monoaurales, de esta forma se empezó a hablar de impresión espacial, ancho aparente de la fuente o percepción de ser envuelto por el sonido y ya con ello se empezaron a hacer comparaciones acústicas entre los grandes recintos para conciertos en el mundo.

A continuación se describen algunos de los parámetros objetivos para caracterizar salas. El objetivo es que el lector los tenga en cuenta para más adelante poder entender gráficas, asociar con las auralizaciones y complementar las conclusiones aquí planteadas. También aparte de definir las características de cada parámetro, en algunos casos, se mostrará las fórmulas empleadas para su cálculo. Cabe aclarar que solo algunos se implementaron en Matlab, pero en otros casos se emplearon herramientas por software ya existentes para ello, nombradas previamente en la metodología.

#### 4.6.1. Tiempo de Reverberación $RT$ .

Parámetro clásico de evaluación de salas desde hace un siglo como se mencionó anteriormente, se define como el tiempo que le toma al sonido dentro de un espacio, decaer 60dB. Este parámetro puede ser medido creando un campo sonoro estable y luego apagando la fuente y posteriormente medir dicho tiempo o puede ser obtenido a partir de la respuesta al impulso a través de una integral regresiva y luego calculando la reverberación desde la envolvente de la respuesta.

Después de la tradicional fórmula de Sabine, la cual asume que toda la absorción en la sala está distribuida uniformemente por toda la superficie, otros autores encontraron que había opciones más aproximadas de determinar dicho parámetro, a continuación se detallan algunas de esas fórmulas:

*Fórmula de Sabine:*

$$RT = \frac{0.161 V}{\bar{\alpha} S_t} \quad (31)$$

Relaciona el volumen de la sala entre la absorción promedio y el área expuesta del recinto.

*Fórmula de Fitzroi*

$$RT = \frac{X}{S} \left( \frac{0,16V}{\alpha_x S + 4mV} \right) + \frac{Y}{S} \left( \frac{0,16V}{\alpha_y S + 4mV} \right) + \frac{Z}{S} \left( \frac{0,16V}{\alpha_z S + 4mV} \right) \quad (32)$$

Divide la absorción en las direcciones x,y,z del recinto y la superficie total.

Fórmula Eyring

$$RT = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (33)$$

Aunque hay algunas correcciones más para las ecuaciones de arriba, todo aquello para predecir los tiempos de reverberación en etapa de diseño de un recinto con un cálculo sencillo. Para este trabajo dichas ecuaciones no son tenidas en cuenta, dado que el problema por diferencias finitas en el tiempo, resuelve directamente y de forma más precisa el comportamiento de las ondas en un espacio gracias a la introducción y resolución discreta de la ecuación de onda. Por otro lado son aproximaciones para volúmenes y no para recintos modelados en dos dimensiones.

Es necesario entonces tener una fórmula que permita predecir el tiempo de reverberación, a partir del área de la sala y del coeficiente de absorción promedio (para el caso 2D), y a partir de allí definir el número de muestras que la simulación por ftdt deberá resolver iterativamente. De esta forma se asegura que el tiempo de reverberación quede bien representado y no vaya a quedar truncado por poner un tiempo de simulación menor al concedido naturalmente por la sala o se invierta mayor tiempo de cómputo, calculando silencios después que la onda haya sido absorbida por los materiales.

De lo anterior se desprende que deben existir unas condiciones iniciales. La primera, la definición de un área (geometría de la sala) y asumir un coeficiente de absorción que estará definido por una relación de impedancias entre medio de propagación (aire) y material de las paredes.

20

Según (22), las expresiones habituales que relacionan el coeficiente de absorción con el tiempo de reverberación pueden ser adaptadas al caso 2D como se demuestra en la siguiente fórmula:

$$t_r = \frac{\pi \cdot 0.162 \cdot S}{4 \cdot L \cdot \alpha} \quad (34)$$

Dónde  $t_r$  es el tiempo de reverberación, S la superficie de la sala 2D, L el perímetro y alfa el coeficiente de absorción, que a su vez viene definido como:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1} \right)^2 \quad (35)$$

Dónde Z1 es la impedancia del medio de propagación (aire =  $\rho c \approx 413$  rayls) y Z2 la impedancia del muros o paredes del recinto. Por lo general el valor de Z2 se da como valor normalizado con respecto a la impedancia del medio de propagación (tantas veces la impedancia del medio de propagación).

#### 4.6.2. EDT (Early decay time)

Es una media de seis veces el tiempo de decaimiento del nivel sonoro durante los primeros 10dB. En un espacio con un campo altamente difuso, producido por ejemplo por una sala regular con una distribución homogénea y uniforme de los materiales acústicos, se producirá una caída completamente lineal al ser representada en escala semilogarítmica. En tal caso las dos cantidades (EDT y RT) deberían ser idénticas.

Según Isbert (14), el EDT está subjetivamente relacionado con la impresión de Viveza. Esto significa que un EDT menor al valor de RT, otorgaría la sensación de una sala apagada. De esta forma con el fin de garantizar una buena difusión, es necesario que el valor promedio de los EDT para las bandas de 500Hz y 1KHz sea similar que el RTmid.

### 4.6.3. Razones de Energía Temprana y tardía

Estos parámetros describen la energía que llega al oyente dentro de un corto periodo de tiempo desde el sonido directo, y la energía que llega después.

#### Claridad Musical (C80)

Para sala de conciertos, se define un parámetro a partir de estas relaciones llamado Claridad (C80) que evalúa a través de una relación logarítmica la energía que llega al oyente dentro de los primeros 80ms y la energía que llega después de ese momento. El motivo de los 80ms es debido a que en este intervalo el oído integra todas las reflexiones junto con el sonido directo, lo que contribuye a aumentar la claridad musical. Según Marshall (23), valores pequeños positivos implican una sala muerta y valores pequeños negativos están asociados a espacios muy reverberantes, lo que conlleva a tener un margen recomendado entre 0 y -4dB, esto a partir de valores de salas muy exitosas en Boston, Amsterdam y Viena cuyos valores oscilan entre -2.7 y -3.7dB. Según Beranek, existe una relación que demuestra una relación inversamente proporcional entre el tiempo de reverberación y el C80.

$$C_{80} = 10 \log \left( \frac{\int_{0\text{ms}}^{80\text{ms}} p^2 dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2 dt} \right) \text{dB} \quad (36)$$

#### Claridad de la voz (C50)

Otro parámetro muy similar es el C50, que a diferencia del anterior tiene como tiempo límite 50 ms y se sabe que presenta una fuerte correlación con la inteligibilidad de la palabra. La fórmula para calcular este parámetro es similar a la ecuación (36) pero con la diferencia en el tiempo de integración. El valor luego se presenta como se muestra en la siguiente ecuación.

$$C_{50}(\text{speech average}) = 0.15 \cdot C_{50}(500\text{Hz}) + 0.25 \cdot C_{50}(1\text{KHz}) + 0.35 \cdot C_{50}(2\text{KHz}) + 0.25 \cdot C_{50}(4\text{KHz}) \quad (37)$$

Las constantes que acompañan al valor de C50, corresponden a una ponderación que se le da por la contribución estadística aproximada que cada banda hace a la inteligibilidad de la palabra. Se recomiendan valores mayores a 2dB.

#### Definición (D)

Otro parámetro similar al anterior y que también está relacionado con la inteligibilidad de la palabra es la Definición (D). La diferencia radica en que la energía que llega durante los primeros 50 ms incluyendo sonido directo se divide con la energía total recibida. La fórmula se puede expresar como en la ecuación (36) o como una relación energética, teniendo en cuenta los intervalos de integración.

$$D_{50} = \left( \frac{E(0, 50\text{ms})}{E(0, \infty\text{ms})} \right) \quad (38)$$



Valores recomendados mayores a 0.5. Cuanto más grande sea este valor, mayor será la inteligibilidad.

#### 4.6.4. Calidez, Brillo y Timbre (BR/Br/TR1)

La calidez y el brillo (Warmth and Brilliance) hace referencia a la influencia de la densidad de energía sonora en baja y alta frecuencia, respectivamente. La Calidez viene asociada al parámetro Bass Ratio (BR) y se define como la relación entre la suma de los tiempos de reverberación RT a frecuencias bajas (125Hz y 250 Hz) y los TR en medias (500Hz y 1000Hz). Glen Ballou (24) cita una referencia de Beranek como la persona que define el término subjetivamente sugiriendo que una sala es cálida si los valores oscilan entre 1 y 1.3 y que para salas con tiempo de reverberación por debajo de los 1.8 segundos, es permitido un BR hasta 1.45.

$$BR = \frac{t_R(125Hz) + t_R(250Hz)}{t_R(500Hz) + t_R(1000Hz)} \quad (39)$$

El término brillo (Br) hace referencia a que el sonido de una sala es claro y rico en armónicos. Relaciona la suma de los tiempos de reverberación entre las frecuencias altas (2KHz y 4KHz) y las frecuencias medias (500Hz y 1000Hz). De la misma forma Beranek recomienda para salas ocupadas debería ser  $\geq 0.87$ . Se dice que estos vapores no pueden ser mayores a 1 debido a la absorción que sufren las altas frecuencias producto de la absorción del aire. Estos valores se basan en observaciones que dicho personaje obtiene después de caracterizar las salas más importantes del mundo, donde al mismo tiempo se destaca que las formas rectangulares son las más comunes.

$$Br = \frac{t_R(2000Hz) + t_R(4000Hz)}{t_R(500Hz) + t_R(1000Hz)} \quad (40)$$

Ballou también cita a Schmidt como la persona que propone este parámetro objetivo que se define como la relación de la suma de los tiempos de reverberación entre alta y baja frecuencia.

$$TR1 = \frac{t_R(2000Hz) + t_R(4000Hz)}{t_R(125Hz) + t_R(250Hz)} \quad (41)$$

Por lo tanto este valor presenta otra definición de si la sala es Brillante si  $TR1 > 1$  o Cálida en cualquier otro caso. También es conocido como parámetro de "timbre".

#### 4.6.5. Sonoridad (G)

Se define como la diferencia entre el nivel de presión sonora producido por una fuente sonora en un determinado punto de la sala y la misma fuente sonando en condiciones anecoicas a 10 metros o también llamado nivel de referencia. En otras palabras, corresponde al grado de amplificación que la sala o recinto, produce sobre una fuente sonora. Este parámetro depende de la distancia del oyente al escenario, la energía asociada a las reflexiones tempranas y el nivel de campo reverberante. Se recomiendan valores de G entre 4 y 5.5 dB para salas vacías como promedio del nivel de sonoridad entre 500Hz y 1KHz.

$$G_{mid} = LP_{sala} - LP_{campoLibre(10m)} \quad (42)$$

#### 4.6.6. Intimidad (ITDG-Initial Time Delay Gap)

Este es otro parámetro interesante que da una buena caracterización objetiva de un recinto. Hace referencia al tiempo transcurrido en aparecer la primera reflexión después de la llegada del sonido directo. Según Beranek (25) en un estudio que hizo a 54 salas de conciertos, reportó que las salas más exitosas poseían ITDGs menores a 20ms. El mismo autor a partir de este estudio concibe la idea de que el ITDG estuviese relacionado con la intimidad acústica, este descriptor hace referencia a que generalmente se prefiere escuchar en un entorno pequeño, dónde se esté por lo general cerca de la fuente, de allí a que un recinto pequeño tenga reflexiones muy cercanas al sonido directo por la cercanía de las superficies al oyente. En grandes espacio, esto se logra colocando superficies reflectantes cerca de los oyentes.

#### 4.6.7. Impresión espacial (IACC)

Según Beranek (26), el sonido reverberante en una sala que llega a los oídos de un oyente desde todas las direcciones, le otorga la sensación de ser envuelto por la fuente sonora. De esta forma sugiere que la relación cruzada interaural (IACC) puede ser usada como parámetro objetivo para describir ese fenómeno, siendo de dos tipos (1-IACC<sub>Early</sub>) que correlaciona la percepción subjetiva del ancho aparente de la fuente y (1-IACC<sub>Late</sub>) que correlaciona la percepción subjetiva de ser envuelto por el sonido. Se mide la diferencia (correlación) entre los sonidos que llegan a los dos oídos del oyente de cara al escenario con una cabeza Binaural y una fuente omnidireccional y se calcula con la siguiente función de correlación cruzada interaural:

$$IACF_{t_1:t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} h_L(t)h_R(t + \tau)dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} h_L^2(t)dt \int_{t_1}^{t_2} h_R^2(t)dt}} \quad (\text{para } \tau \leq 1\text{ms}) \quad (43)$$

Siendo t1 y t2 los límites del tiempo de integración

Para IACC<sub>E</sub>= t1=0 ms; t2= 80 ms

Para IACC<sub>L</sub>= t1=80 ms; t2= 500 a 1000ms

El resultado se calcula como el promedio para tres rangos frecuenciales de octava: 500Hz, 1000Hz y 2KHz.

Beranek según observaciones en salas muy populares, sugieres rangos de IACC<sub>E</sub> entre 0.28 y 0.38 para la categoría superior o excelente y entre 0.39 y 0.54 para la categoría de bueno.

## 5. Desarrollo ingenieril

De acuerdo a lo descrito en la metodología y después de haber citado la teoría correspondiente. Se procede al diseño y realización de los experimentos que permitirán resolver el problema citado en el objetivo general y en cada uno de los objetivos específicos.

### 5.1. Uniformidad en la distribución del nivel de presión sonora cuando se inclinan las paredes de la sala entre $0^\circ$ y $10^\circ$ . Ángulo ideal de inclinación.

Con este experimento se busca resolver el problema de la inclinación de las paredes. Una de las grandes soluciones que se le da al problema de modos de vibración es el de evitar recintos con paredes ortogonales. La teoría y muchos de los libros de acústica, sugieren como solución rápida, resolver este problema de diseño de salas, inclinando las paredes de las salas con un determinado ángulo, por lo general  $5^\circ$ , de esta forma se evitan coloraciones por modos y ecos flotantes.

La motivación de este experimento consiste en dibujar una sala con las dimensiones propuestas por el criterio Bolt (4) donde se determinan el largo y ancho de la geometría. Para este caso se escogieron las dimensiones 3mX4m, medidas que hacen referencia al centro de la gráfica y que según el autor citado, esta relación dimensional, permite tener una distribución modal lo más homogénea posible, evitando fuertes coloraciones. A esta sala rectangular, se le modifican dos de sus lados, de tal forma que dichos lados se van inclinando con una variación de  $1^\circ$  hasta completar una inclinación de paredes de  $10^\circ$ . Desde luego, el aérea se va a ver modificada y por lo tanto la respuesta modal, pero el objetivo es determinar en el centro de la sala qué se puede percibir subjetivamente, y objetivamente ver si el espacio efectivamente se vuelve más o menos homogéneo.

El modelo a implementar es como el que se muestra a continuación. Desde luego fue modelado a través de líneas de código en Matlab, más adelante se explica cómo, y se definieron unos puntos de captura de señal al interior de la sala. 9 micrófonos fueron configurados, para de esa forma calcular la función de transferencia en cada punto, y luego determinar que tanto varía la información de cada uno de esos micrófonos a través de un promedio.

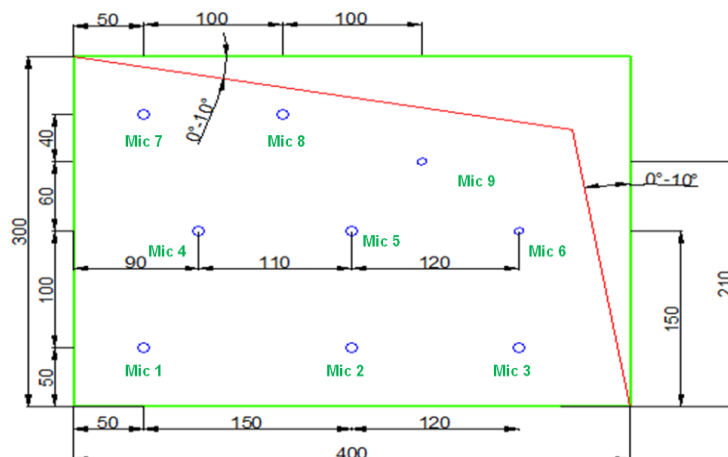


Figura 11. Esquema de las salas representadas con sus respectivas cotas y posiciones de micrófonos.

Antes de llevar a cabo la simulación por FDTD, se hace una aproximación rápida por elementos finitos para  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  y  $10^\circ$ , donde se obtuvo lo siguiente:

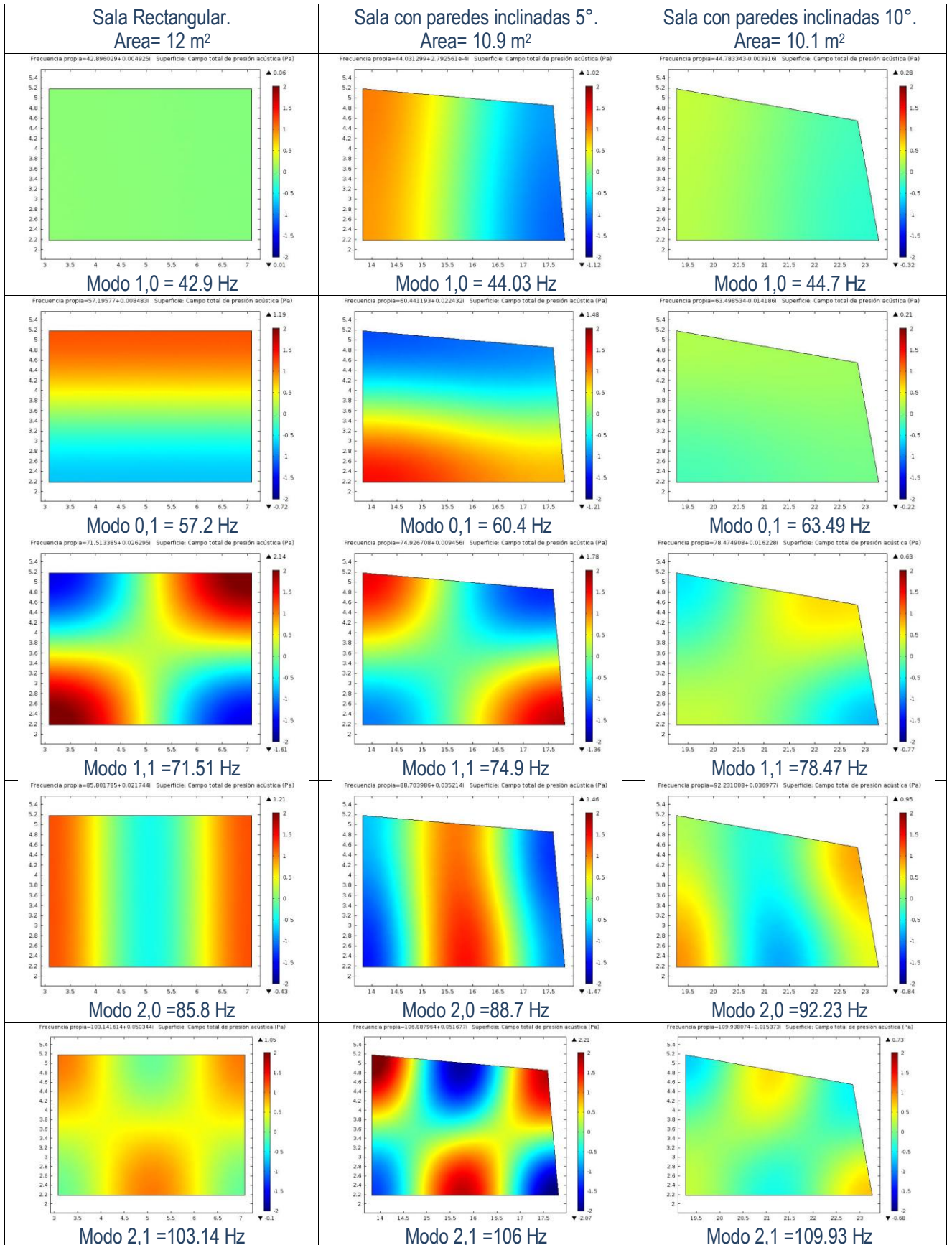


Figura 12. Modos de vibración, Frecuencia propia, sala con inclinación de paredes.

Claramente en las imágenes anteriores, se puede suponer como conservando la misma escala de colores, los primeros 5 modos de vibración fundamentales se destacan más en algunas geometrías que en otras. Claramente se puede apreciar que a pesar que las frecuencias propias de vibración para los 5 modos tiende a tener la misma representación, la amplitud de las vibraciones tiende a ser un poco más homogénea en la sala con la pared más inclinada. También, los valores de las frecuencias de resonancia cambian parcialmente, esto debido al cambio del área de la sala, a medida que se inclina las paredes, el área va disminuyendo y por lo tanto la frecuencias de resonancia aumentan. Desde luego esto sucede para los primeros modos fundamentales, pero en una sala hay muchísimos más que pueden estar más o menos cercanos a los valores antes representados. Es por esto que si tenemos una mejor representación en el tiempo y luego a través de una transformada o con una función de transferencia, se ve la cantidad de energía en el espectro, se podría saber cada uno de estos modos que tanto varían en amplitud en diferentes puntos de la sala. Con este antecedente se procede a emplear la técnica por FDTD para ver este comportamiento en detalle.

Para el modelado de la sala desde Matlab. Al programa básico que fue presentado en la teoría sobre FDTD, se le agregan un par de líneas adicionales, encargadas de encontrar los dominios y volverlos contornos rígidos. Este algoritmo permite identificar de acuerdo a un ángulo, los valores dentro de una grilla que estén dentro de una diagonal, tomando las componentes en X e Y. De esta forma se puede automatizar un estudio para una variación de ángulo y de esta forma identificar los resultados obtenidos para un conjunto de salas cuyo ángulo de inclinación varía de 0° a 10°.

Después de definir una matriz de ceros del tamaño de las dimensiones del recinto, llamada dominios, con un buscador se procede a encontrar los puntos que se quieran convertir en contornos rígidos al sonido. Para este caso, el programa busca las componentes tangenciales en X y Y de una pendiente

26

```
dominios=zeros(nx,ny);pcolor(1:nx,1:ny,dominios');axis image
[Y,X]=meshgrid((1:ny)*dh,(1:nx)*dh);
dominios(find(Y>-atan(angulo/180*pi)*X+ly))=1;
dominios(find(X>-atan(angulo/180*pi)*Y+lx))=1;
close all
pcolor(X,Y,dominios);axis equal;colorbar
shading flat
```

EL programa completo, quedará adjunto en el anexo.

Posteriormente y como se citó anteriormente, cada micrófono captura una variación de la presión en el tiempo. Con estas señales y con la de referencia o de entrada, transformadas al dominio frecuencia, se dividen y de esta forma se obtiene una función de transferencia. Según (27), define un campo sonoro difuso cuando se cumplen dos condiciones, hay una densidad de energía uniforme dentro de una región considerada y existe un promedio de energía igual en todas las direcciones de cualquier punto del campo sonoro. De acuerdo a esta premisa, se puede considerar que un campo sonoro es relativamente uniforme si pudiendo ver su función de transferencia, la misma no tiene picos o valles fuertemente desarrollados, lo que significaría grandes focalizaciones y coloración de las señales allí transmitidas. Entonces si se calcula la función de transferencia como sigue:

$$H = 10 \cdot \log \left( \text{abs} \left( \frac{FFT(\text{señal recibida en el micro})}{FFT(\text{señal de entrada})} \right) \right) \quad (44)$$

El logaritmo es debido a que los resultados presentan diferencias bastante considerables producto de tener iguales valores a la hora de hacer la transformada por la duración de la señal que se traduce en grandes niveles energéticos. A continuación a un trozo de señal considerado hasta la frecuencia de Schroeder (pues es donde debería presentarse mayores coloraciones debido a la distribución modal), se calcula una desviación estándar que manifestará qué tan irregular es el campo sonoro dentro de ese espectro. Este procedimiento de repite para cada posición de micrófono y luego se promedian dichas desviaciones entre todos los micrófonos puestos en la sala.

De acuerdo a lo anterior para cada sala se obtuvieron los siguientes resultados:

#### Condiciones de la simulación:

- ✓ Señal de entrada- Logsinesweep (30Hz-15KHz)
- ✓ Absorción de paredes: 0.2 aproxi 18 veces la impedancia del aire.
- ✓ Numero de muestras de simulación: 40000, aproximadamente 0.58 segundos
- ✓ Espectro tenido en cuenta para la desviación estándar: 30-500Hz

Micrófono/Inclinación de pared	Sala 1 - 0°	Sala 2 - 1°	Sala 3 - 2°	Sala 4 - 3°	Sala 5 - 4°	Sala 6 - 5°	Sala 7 - 6°	Sala 8 - 7°	Sala 9 - 8°	Sala 10 - 9°	Sala 11 - 10°
Mic 1	3,49	3,24	2,88	2,81	2,86	2,65	2,65	2,76	2,98	3,31	3,73
Mic 2	3,65	3,42	3,30	3,23	3,19	3,17	3,18	3,23	3,28	3,32	3,43
Mic 3	2,22	2,23	2,23	2,24	2,25	2,26	2,28	2,31	2,34	2,37	2,40
Mic 4	3,03	3,02	3,06	3,14	3,26	3,43	3,69	4,06	3,92	3,92	3,98
Mic 5	2,99	3,12	3,22	3,17	3,16	3,15	3,16	3,19	3,22	3,23	3,24
Mic 6	2,60	2,58	2,67	2,85	3,09	3,51	3,61	3,58	3,54	3,34	3,19
Mic 7	3,36	3,34	3,27	3,16	3,00	2,92	2,99	3,16	3,28	3,29	3,01
Mic 8	3,57	3,61	3,56	3,54	3,58	3,68	3,78	3,87	3,93	3,99	4,05
Mic 9	3,98	4,08	4,17	4,28	4,42	4,59	4,77	4,65	4,19	3,98	3,91
Mic 10	3,90	3,20	2,88	2,69	2,59	2,57	2,58	2,69	2,78	2,80	2,81
Mic 11	3,29	3,37	3,44	3,65	4,16	4,56	4,09	3,89	3,92	3,83	3,62
Promedio	3,28	3,20	3,15	3,16	3,23	3,32	3,34	3,40	3,40	3,40	3,40

Tabla 1. Promedio de las desviaciones estándar para cada sala. En Rojo-Azul (valor máximo y mínimo), desviaciones estándar de las funciones de transferencia para cada micrófono. En verde amarillo (min.max). Promedios para toda la sala.

De lo anterior, se puede identificar la sala que mejor uniformidad del campo presenta, simplemente mirando el valor con la desviación estándar promedio más pequeña. En este caso los valores resultados en verde que representan inclinaciones 2, 3 y 4°.

También se muestra el espectro de una señal auralizada en cada una de las salas. El objetivo de esta parte es poder percibir la coloración que se obtiene al ir inclinado las paredes. Aunque la diferencia progresivamente es casi imperceptible, se recomienda auralizar las primeras y las últimas salas, o sea la sala rectangular o 0° seguido de la sala 10°.

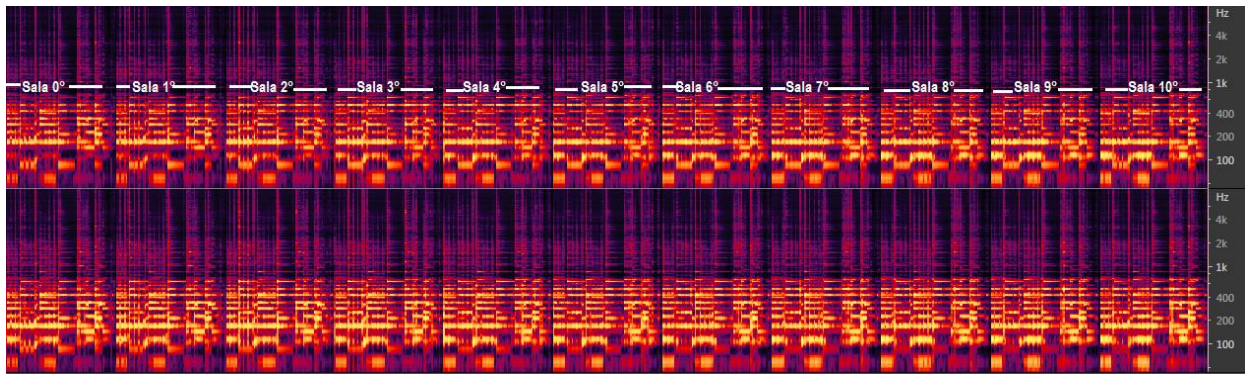


Figura 13. Espectro auralizaciones de cada una de las salas.

Se puede percibir un interesante aumento de respuesta en graves en las salas con mayor inclinación de paredes y a su vez un ligero decremento de la respuesta en alta frecuencia. La señal puede ser escuchada si se lee la versión digital de este documento haciendo clic sobre la *Figura 13*, (se requiere conexión a internet y audífonos).

## 5.2. Caracterización del nivel de presión sonora y auralización en una sala cuando se introducen difusores

La motivación con este experimento es con el objetivo de visualizar y auralizar la influencia de la introducción de difusores en una sala. Entender el para qué se implementan y cuántos son necesarios emplear para lograr la dispersión uniforme o no especular de un frente de onda y por tanto lograr uniformidad del nivel de presión sonora. Este apartado se puede sustentar según (28) donde se demuestra que a pesar de que haya mucha teoría sobre difusores en salas, aún quedan preguntas por hacer sobre cuánta difusión emplear y dónde ponerla en un recinto.

Muy bien es sabido que una solución para acabar con los ecos flotantes, ecos o reflexiones especulares no deseadas en salas, es con la introducción de difusores. Sobre este tema hay siempre mucha discusión pues usualmente se dice que cualquier superficie irregular es capaz de generar difusión, pero otros contradicen esas afirmaciones diciendo que un difusor debe cumplir varios requisitos como trabajar en espacio, tiempo y ancho de banda determinado y además en varias dimensiones (difusión en el eje vertical y horizontal), y que algunos generan y otros no generan absorción sonora dependiendo de sus diseño, por eso se sigue investigando. Sabiendo que los modelos numéricos de simulación son una buena Herramienta que resuelve directamente la ecuación de onda dentro de un dominio definido teniendo en cuenta por defecto fenómenos de interferencia, se pueden hacer buenas aproximaciones sobre qué tan importante es la influencia de cualquier geometría o superficie irregular para conseguir difusión. Mas que lo que plantean muchos artículos científicos, donde se desatan extensos procedimientos para medir los coeficientes de difusión y dispersión y dónde se hace especial mención a cuál de todos estos diseños recientes de difusores es mejor o peor; más importa y más se hace necesario ver realmente su aporte en la espacialidad o envolvente en una sala, así como que tanto es capaz de generar un campo sonoro uniforme, pero al mismo tiempo teniendo la posibilidad de auralizar su introducción a una sala y evaluar realmente el aporte que hace dicho accesorio a la percepción del sonido.

### 5.2.1. Difusores convencionales QRD.

Para este ejercicio, se planteo una sala nuevamente en 2D con dimensiones un poco más grandes que la sala anterior (5mx3.75m), con el fin que cupiesen hasta cuatro repeticiones del difusor definido a continuación.

Se diseñó un difusor de Schroeder QRD unidimensional de periodo 7 que trabaja para un rango teórico entre 650 Hz y 1200 Hz. Las condiciones de diseño que se siguieron se describen en (14) apéndice 1, las especificaciones del difusor fueron las siguientes.

Vel sonido	341
No. De ranuras (impar)	7
Ancho total resonador (m)	1
Ancho división ranuras	0,005
Fmax	1153,1
Fo	658,9
W (m)	0,14

Periodo	Sn	dn (cm)
0	0	0,0
1	1	3,7
2	4	14,8
3	2	7,4
4	2	7,4
5	4	14,8
6	1	3,7

Tabla 2. Condiciones de diseño del difusor.

Primero se hicieron pruebas con elementos finitos para ver el comportamiento de difusores a la hora de hacer un estudio del comportamiento de la presión en un espacio sujeto al dominio de la frecuencia, estudio que calcula la respuesta de un modelo linealizado sujeto a una excitación armónica para una o varias frecuencias. Con este estudio se podría apreciar cuando se introduce un difusor, qué pasaría con los modos de vibración en una sala a diferentes frecuencias; teóricamente se espera que el campo tienda ser más uniforme sin que se presente focalizaciones. A continuación se muestran los resultados de la distribución del nivel de presión sonora de una sala con difusor y sin difusor a tres frecuencias específicas.

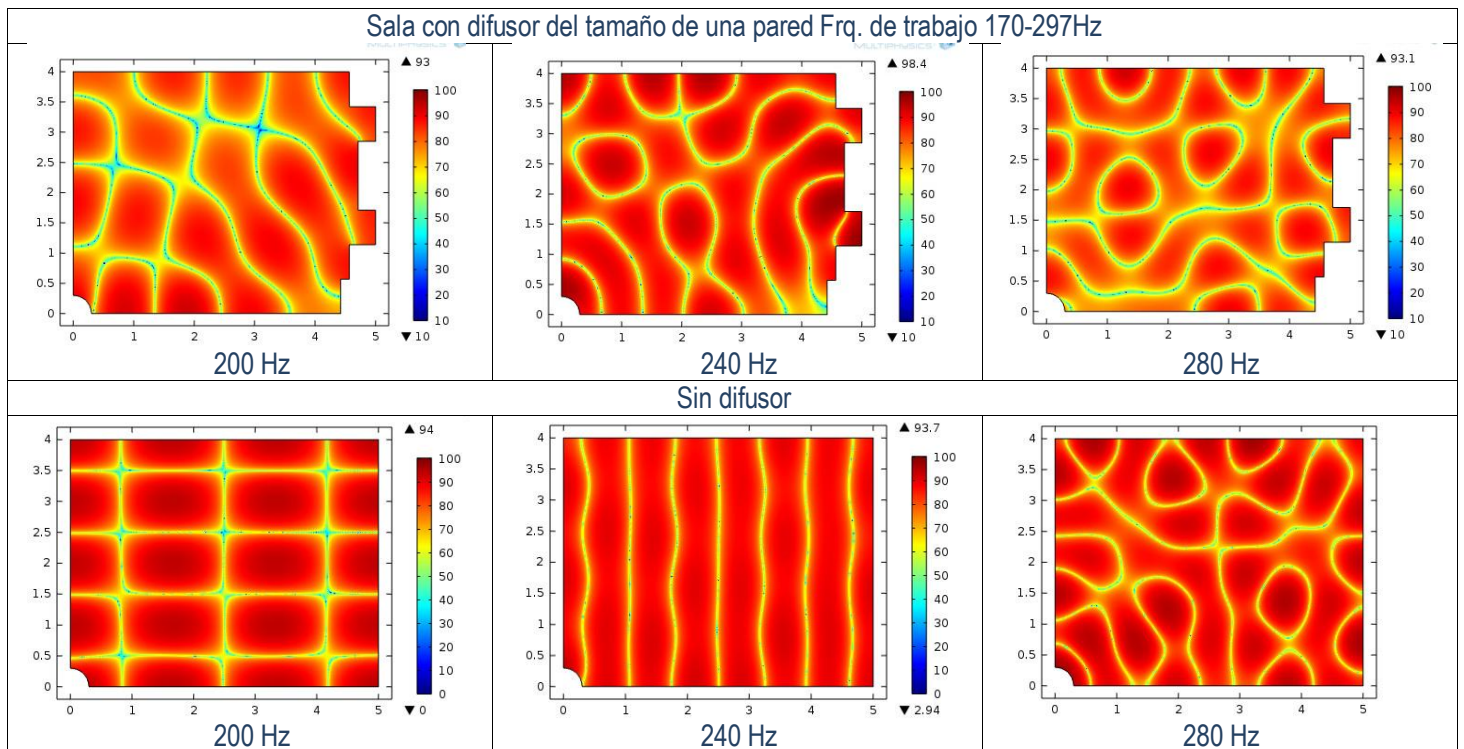


Figura 14. Comportamiento del nivel de presión sonora de una sala con y sin difusor cuando es excitada a tres frecuencias específicas dentro del ancho de banda de trabajo del difusor. .



En las imágenes, claramente se puede observar como el difusor trata de partir el frente de onda buscando generar cierta homogenización del campo. Se repite el experimento para el difusor calculado anteriormente, pero esta vez con un difusor, dos difusores y sin difusor para dos tonos puros a 800Hz y 700Hz.

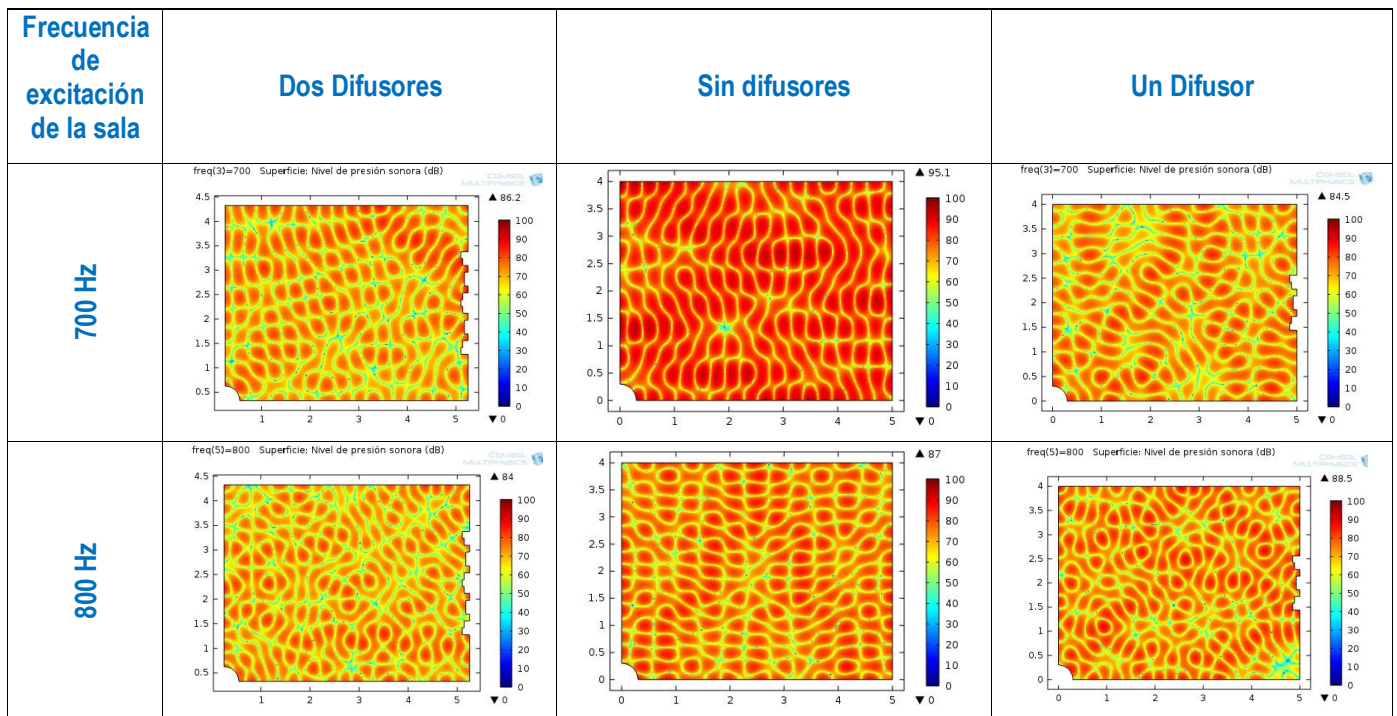


Figura 15. Comportamiento del nivel de presión sonora dentro de una sala rectangular sin difusores y cuando se introducen uno y dos difusores.

Lo anterior demuestra que existe una relación en la forma como el campo es distribuido al introducir más o menos difusión, así como también el nivel energético que aporta cada sala a la sonoridad, asumiendo que en todas está programada la misma fuente con el mismo nivel de presión acústica, se puede observar que el campo se torna más uniforme y con menos nivel de presión sonora. Pero hasta cuánto es necesario. Es aquí dónde con ayuda de FDTD, se realizará un experimento donde el difusor diseñado anteriormente, se introduce ubicándolo en diferentes paredes del recinto. De esta forma objetivamente se evalúa la impresión espacial o IACC y subjetivamente se puede oír su aportación obteniendo la respuesta al impulso y convolucionandola con una señal grabada en cámara anecoica.

Al programa básico de la resolución de la ecuación de onda por FDTD, se le agrega un algoritmo que facilita la introducción de geometrías. Esto es reconociendo de una imagen, una máscara o contorno a lo que cada pixel, espacialmente es asumido como un centímetro. Esto permite dibujar la geometría en un programa como Autocad, importar el plano como JPEG y de allí el algoritmo reconoce el color de los contornos y los asume con contornos rígidos de sonido o con determinada impedancia. En el Anexo 2, se expresa dicho componente del programa. De esta forma se puede introducir cualquier geometría irregular o con curvas.

Un esquema del experimento se muestra a continuación.

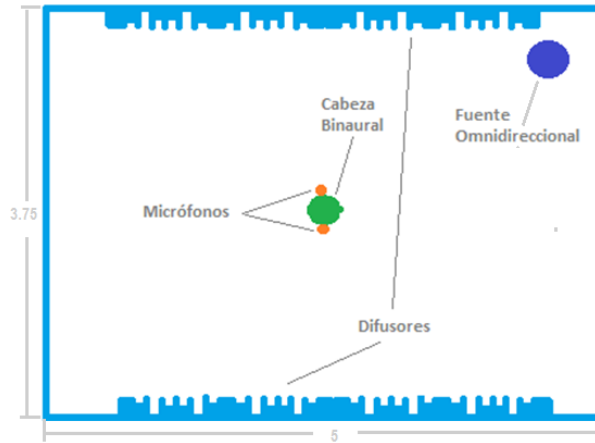


Figura 16. Esquema de las condiciones de medición.

Con ayuda de la herramienta anterior que identifica máscaras, la sala en 2D y el difusor definido en la Tabla 2 con dos repeticiones, son dibujados usando Autocad y exportando como imagen cada uno de los diferentes arreglos dentro de la sala. A continuación se muestran las "máscaras" o arreglos planteados.

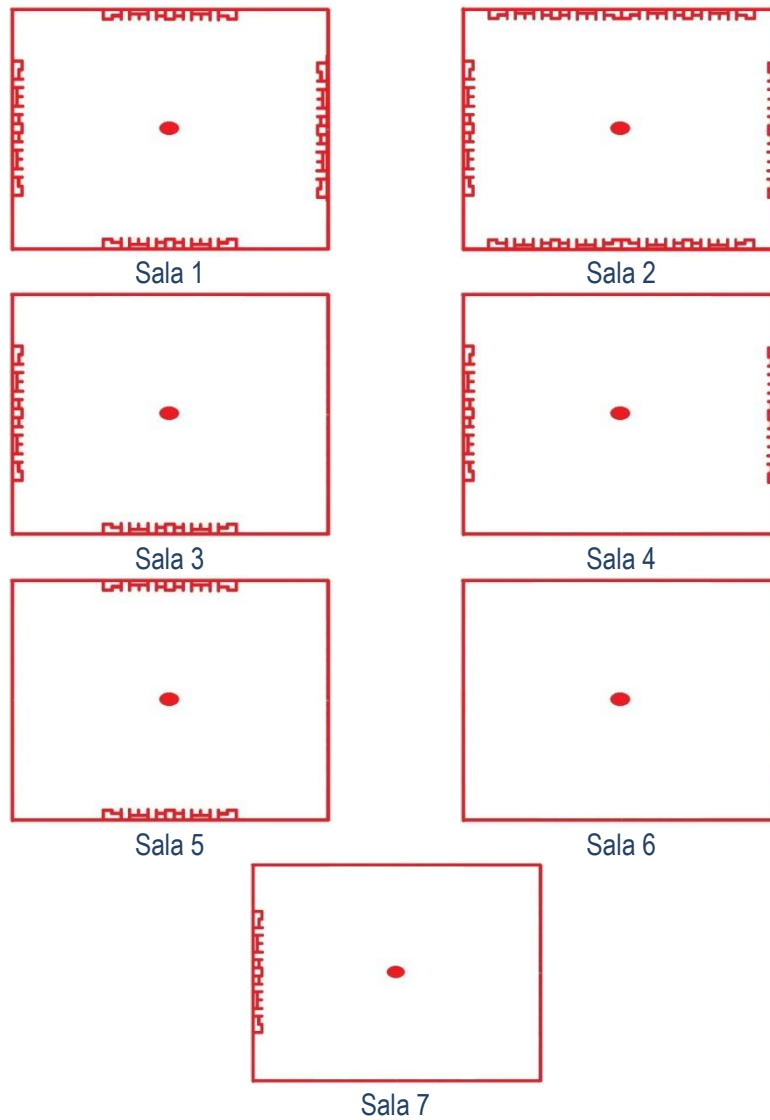


Figura 17. Disposición de los difusores para la simulación. El punto central en rojo hace referencia a una cabeza Binaural.

De las simulaciones se obtienen las variaciones de presión registradas por los micrófono de la cabeza Binaural, a esta señal se le convoluciona con la señal filtrada inversamente e invertida de la entrada, tal como lo describe el procedimiento para la obtención de respuestas al impulso citado en (17), el algoritmo que simula la fuente es presentada en el anexo 4. Luego dichas respuestas al impulso son convolucionada con una señal grabada en condiciones anecoica para tener una idea de cómo suena la sala cuando un instrumento por ejemplo, es ejecutado en su interior.

El efecto de cada uno de los arreglos puede ser escuchado si se lee la versión digital de este documento, haciendo clic en cada una de las imágenes de la Figura 17 (se requiere conexión a internet y audífonos). También a continuación se muestra una captura del espectro de la señal para cada una de las salas anteriormente representadas.

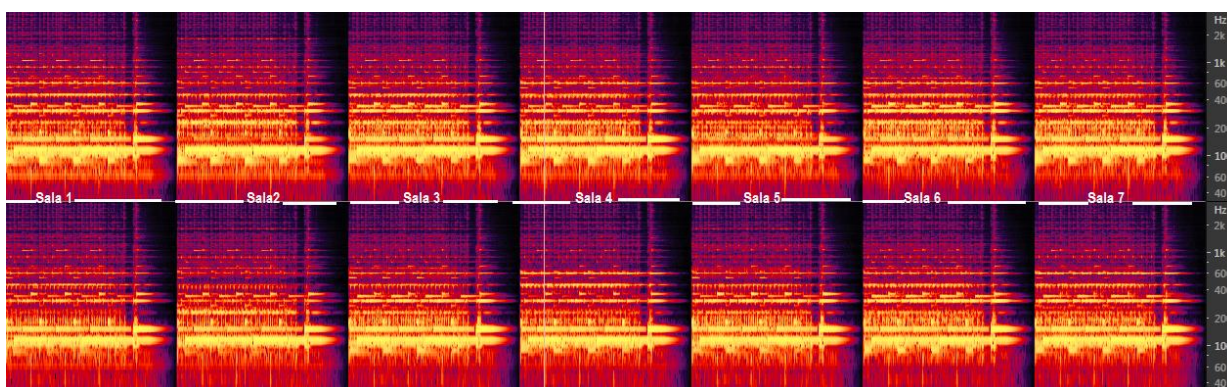


Figura 18. Espectro comparativo del comportamiento Difusores QRD de una misma fuente en las seis salas.

De la imagen anterior, si se revisa con buen zoom, se puede ver como en la sala 2 y 5 entre los 100 y 200 Hz desaparece una focalización en el oído izquierdo (canal superior). En las salas 1,2 y 5 se presenta una disminución energética, con respecto a las otras salas (esto último se corrobora mas adelante objetivamente con un análisis de amplitud total RMS de la señal auralizada. Figura 21). Este mismo comportamiento donde se difuminan ciertas concentraciones energéticas, aunque en menor nivel, se pueden apreciar entre los 400 y 1000 Hz, así como también entre 1Khz y 2Khz. Con estos resultados se podría decir que una sala con mucha difusión, alrededor de (12 difusores) produce cambios interesantes en el comportamiento energético del recinto, aunque objetivamente no sean tan drásticos como lo representan los números más adelante, pero si perceptivamente son notorios (como se puede oír en las auralizaciones).

Viendo que aunque es un poco difícil notar diferencias en la imagen espectral, es ahí donde se hace necesario acudir a un parámetro objetivo que nos diga a manera de resumen, numéricamente qué pasa en el espectro con cada sala. Es por ello que como se mencionó en la teoría se hace uso de la correlación cruzada interaural o IACC, para poder deducir la envolvente de cada uno de los arreglos geométricos propuestos, la cual viene dada por la disimilitud espectral entre las señales tanto en amplitud como en fase, que llegan a los dos oídos. A continuación se muestran los valores para cada recinto.

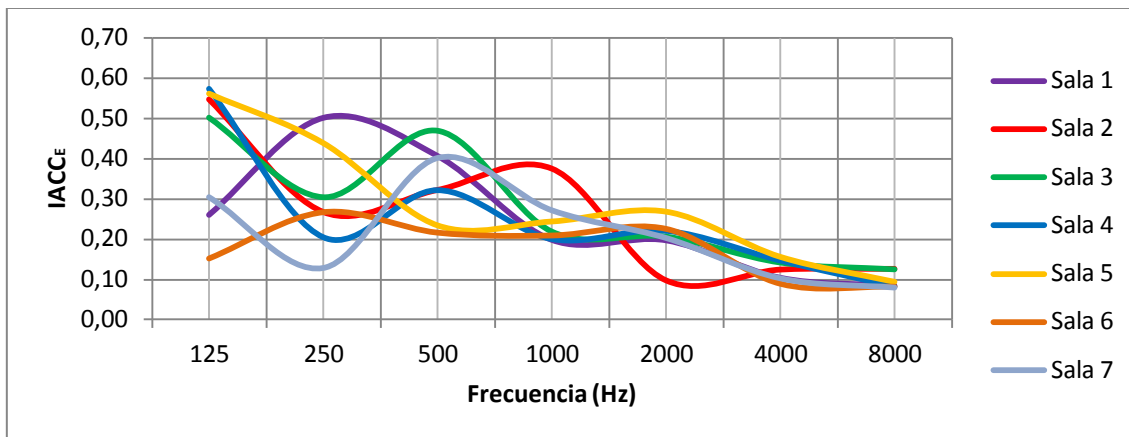


Figura 19. Gráfico de IACC vs frecuencia para cada sala.

Lo anterior muestra que las señales que llegan a los dos oídos se tornan muy diferentes entre sí a medida que la frecuencia va aumentando. Hay que tener en cuenta que los valores de IACC se han representado para un punto en el centro de la sala. La teoría sugiere que entre más difusión se introduzca, menos IACC y por lo tanto mayor espacialidad. En este caso se puede ver algo que contradice esta hipótesis, pues al menos en el centro de la sala, las cosas no se comportan, así. El experimento a cambio sugiere que entre más difusión, el campo tiende a ser más uniforme, por tanto las señales que llegan a los dos oídos tienden a parecerse. Entre 1 y 3Khz, que incluye la frecuencia de trabajo de difusor, si se podría comprobar la anterior suposición aunque con una diferencia mínima. Haciendo clic en cada una de las imágenes de la Figura 17, Se puede ver qué tan grandes perceptivamente son estas diferencias, que aunque parezca pequeñas en la gráfica, se pueden apreciar diferentes comportamientos. También es interesante ver cómo la colocación de los difusores en una sala, hacen la diferencia. Esto se puede comprobar, mirando los resultados de las salas 3, 4 y 5, las cuales solo tienen difusores en dos paredes de la sala con diferentes arreglos y se obtienen resultados bastantes diferentes.

A continuación se pone la tabla donde se Calcula el  $IACC_{E3}$  (correlación cruzada inter aural temprana, promediado entre 500Hz, 1KHz y 2KHz) así como también otros parámetros acústicos, que fueron promediados y obtenidos con la colocación de otros 5 micrófonos adicionales en la sala.

	$Rt_{mid}$	BR	Br	C80	Definición	$IACC_{E3}$
sin difusión	0,63	0,95	1,26	6,94	-1,67	0,22
un difusor	0,60	0,87	1,16	8,54	-1,21	0,29
dos	0,58	0,81	1,23	8,74	-1,26	0,25
dos ==	0,55	0,76	1,30	8,93	-1,17	0,25
dos	0,53	0,75	1,20	9,38	-1,12	0,30
cuatro	0,45	0,67	1,30	10,64	-0,90	0,27
mas	0,41	0,59	1,17	12,80	-0,70	0,27

Tabla 3. Valores de  $IACC_{E3}$  para cada uno de los arreglos propuestos con difusores QRD.

De lo anterior se puede decir, que según Beranek y citado en la teoría, los valores de IACC aquí mostrados son muy cercanos a los sugeridos como excelentes (0.28-0.38), siendo inclusive mejores. El autor, manifiesta que entre más diferentes sea las señales que llegan a los dos oídos, mas sensación de espacialidad hay y eso lo destaca como una percepción de que la sala es envolvente (si las señales son iguales la correlación daría 1 y no tendría sensación de espacialidad). En este caso las señales son muy diferentes entre sí y pasa en todas las salas, con ligeras diferencias. Cabe mencionar que los valores propuestos por Beranek, fueron tratados para recintos muy grandes y no para pequeñas salas como las del experimento. Por otro lado, tener en cuenta que la fuente está orientada hacia un lado para percibir

mejor la diferencia entre oídos y al mismo tiempo poder excitar mejor los modos de toda la sala, esto puede hacer que desde luego los resultados por defecto demuestren grandes espacialidades. Una modificación al experimento, podría sugerir cambiar la fuente de posición por cada arreglo geométrico y corroborar los valores de IACC, lo que llevaría bastante tiempo de medición.

También se pueden destacar algunos patrones interesantes, como por ejemplo que a medida que la difusión aumenta, también lo hace la definición y el C80 y que sucede el efecto contrario con la reverberación y la calidez BR. A continuación se muestran dichos patrones:

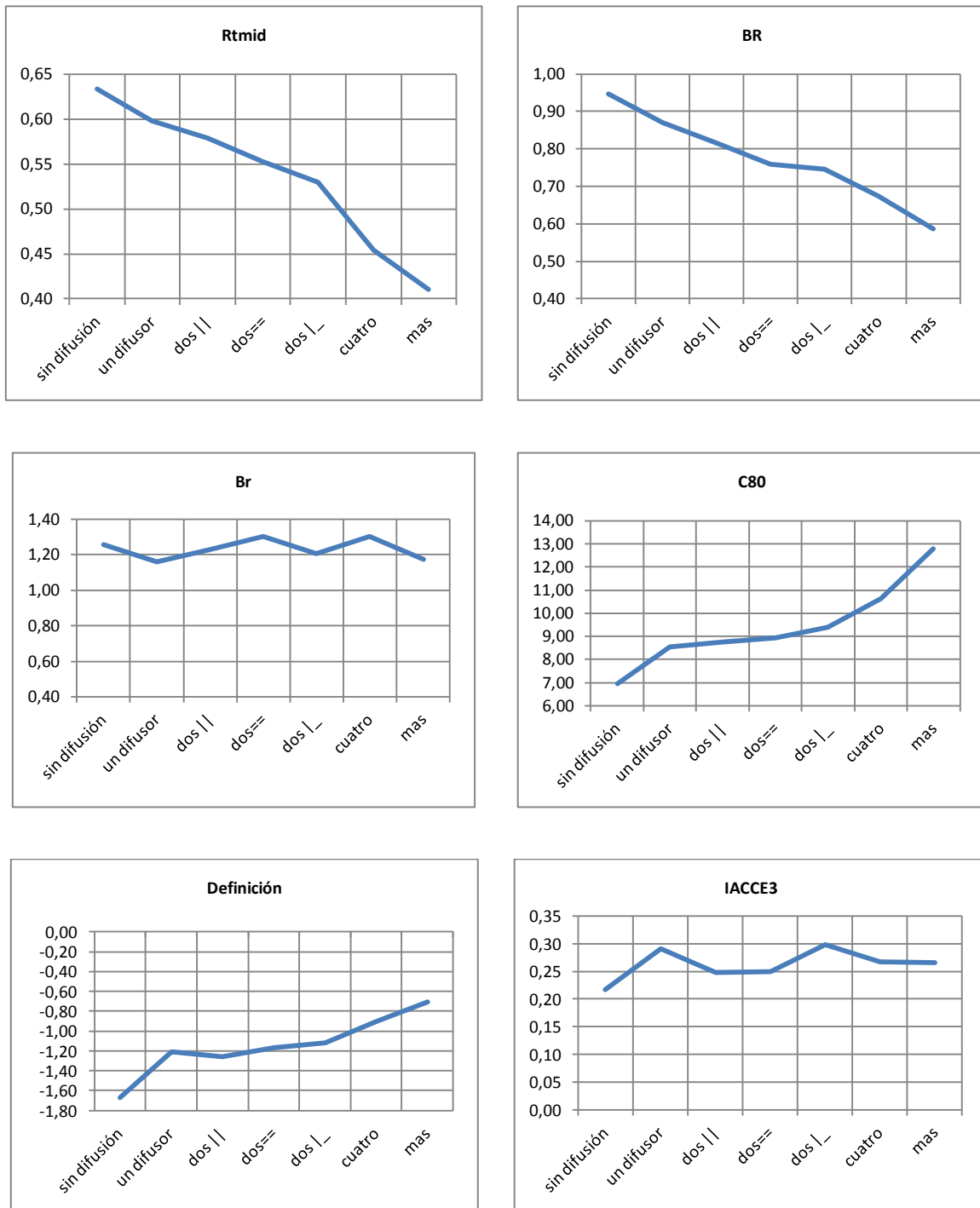


Figura 20. Gráficas que relacionan parámetros acústicos con la cantidad de difusores en una sala.

El IACC, pese a tener una tendencia ascendente, presenta bastante oscilación, que junto a Br, permitiría demostrar que son resultados a los cuales tocaría hacerles muchos más promedios para tratar de encontrar la existencia de alguna relación directa con la cantidad de difusores.

Por último, se hace una comparación de los niveles al interior de cada sala, algo similar un parámetro objetivo llamado Sonoridad, pero esta vez comparando no con una fuente en campo libre, sino sala sin difusores y con cada uno de los arreglos con difusores. A continuación los resultados:

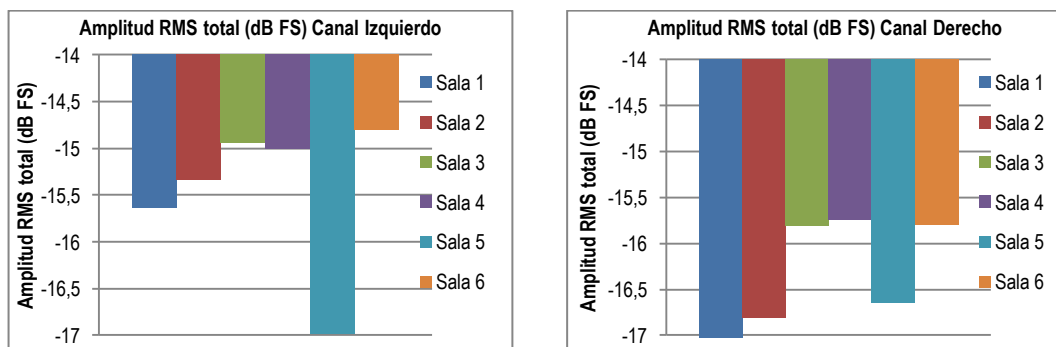


Figura 21. Comparación de la Amplitud RMS total en dB FS, entre cada una de las salas con y sin difusores QRD.

De lo anterior se puede deducir que la sala que no tiene difusores, mantiene un poco más la energía en el tiempo con respecto a las que si lo tienen (se pueden ver diferencias hasta de 3 dB), esto es debido a que la absorción es mayor por las superficies adicionales otorgadas por cada ranura del difusor (aumenta el área de absorción efectiva). Por otro lado está, que el difusor tiene la misma impedancia que las paredes del recinto, por lo tanto, parte del frente de onda es absorbido y otra pequeña parte reflejada. Las diferencia entre oído izquierdo y derecho radican en la posición de la fuente, la cual está a un costado.

### 5.2.2. Simulación con difusores de Cristales de sonido

En el siguiente experimento, se quiere determinar a nivel perceptivo la aplicación de difusores de cristales de sonido en una sala. Al igual que con el experimento anterior, también se piensa determinar, cuantos difusores y en qué ubicaciones en la sala son necesarios ponerlos para percibir algún efecto de espacialidad o de uniformidad del campo sonoro.

En este ejercicio se cita el diseño hecho por (29), autor de una tesis del máster de acústica en una edición anterior de la UPV. Tomando como referencia su diseño y su algoritmo de modelado geométrico, los difusores son modelados en forma de varios arreglos posibles para una sala rectangular. Cabe mencionar que para este ejercicio, no fue posible hacer uso del algoritmo de identificación de mascarar adjunto en el anexo dos, debido a que los cilindros del difusor, están demasiado juntos y la resolución de la imagen no permite que dichos círculos queden debidamente espaciados por pixelación. Es por ello, que se decide programar dicha geometría en Matlab partiendo del algoritmo ya propuesto en la cita del autor anterior. Dicho algoritmo, se encuentra en el anexo 3.

A continuación, se presenta un esquema del montaje del difusor, de la sala, posición de la fuente y cabeza Binaural.

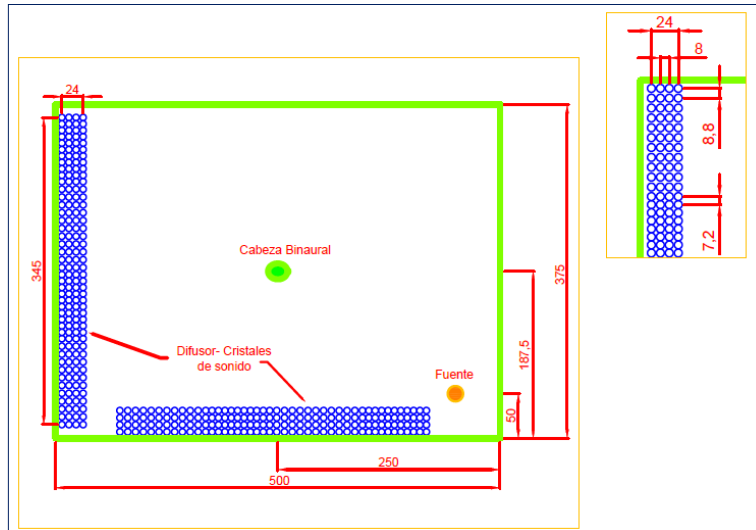
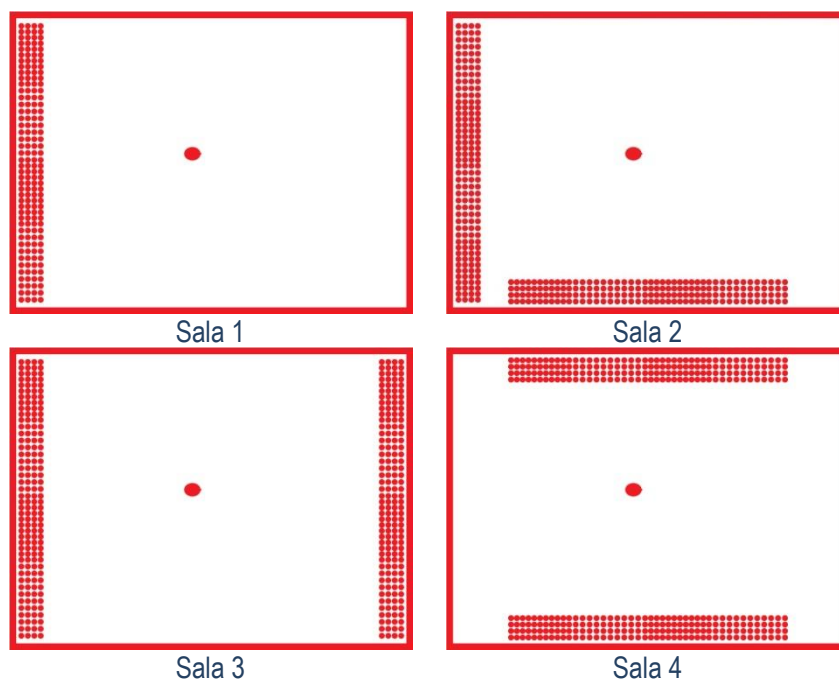


Figura 22. Dimensiones del difusor y la sala así como también ubicación de la fuente y la cabeza Binaural.

Los parámetros de la simulación por FDTD, se muestran a continuación:

- ✓ Fuente Sonora: Log Sine sweep 20Hz-10KHz.
- ✓ Resolución espacial:  $5e-3$  m.
- ✓ Resolución temporal:  $5e-3$  m/ $341$ m/s/2=  $7.33e-6$  s.
- ✓ Impedancia de paredes = 20 veces la del aire.
- ✓ Absorción promedio de la sala  $\approx 0.2$  s
- ✓ Tiempo de Reverberación  $\approx 0.68$  s
- ✓ Numero de muestras necesarias para lograr el TR = 81840
- ✓ Tiempo total de simulación por sala = 2.6 hrs.

Las geometrías de acuerdo a la distribución de los difusores se muestran a continuación:



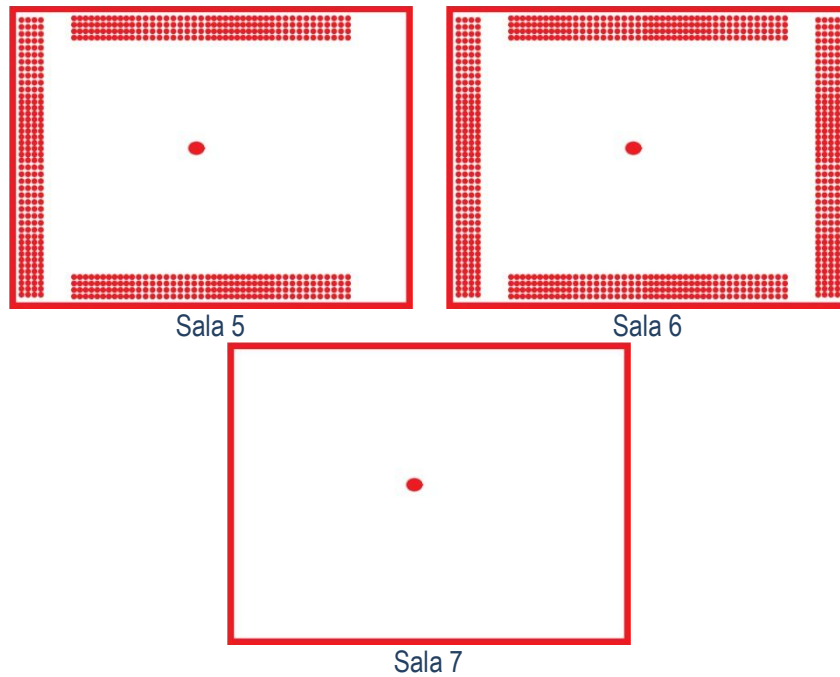


Figura 23. Diferentes arreglos de difusores de cristales de sonido en una sala rectangular.

De acuerdo a lo anterior, se obtuvieron los siguientes resultados. Dando clic sobre las imágenes anteriores se pueden oír cada uno de los arreglos geométricos (debe haber una conexión a internet y usar audífonos).

Desde el punto de vista de la espacialidad, la correlación cruzada interaural da como se muestra a continuación:

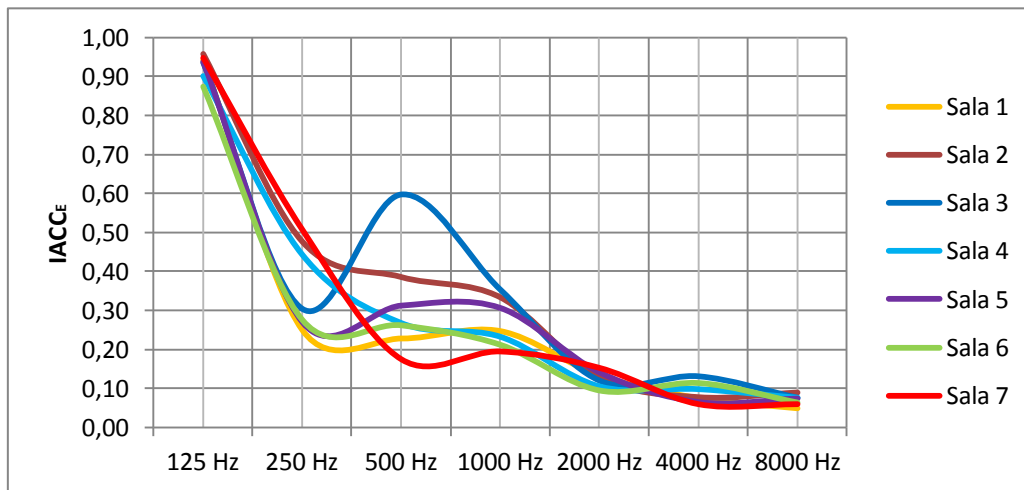


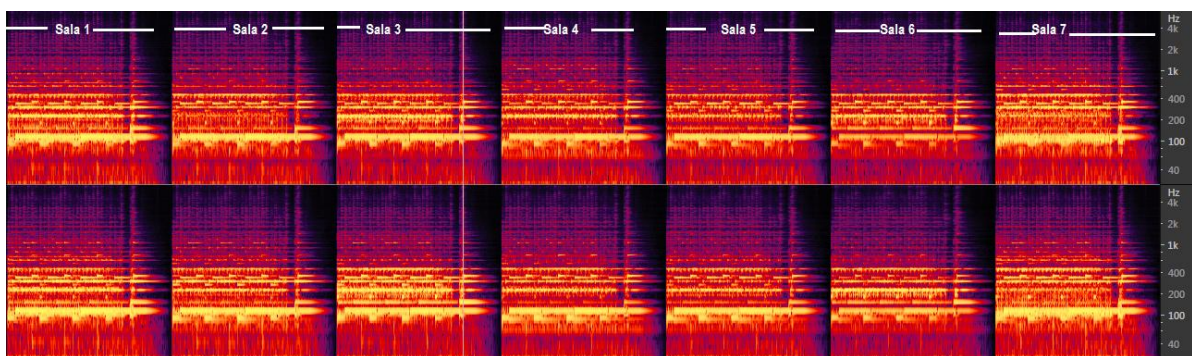
Figura 24. IACC<sub>E</sub> para cada una de las salas con diferentes arreglos de difusores de cristales de sonido.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	IACC <sub>E</sub> (500Hz,1KHz, 2KHz)
<b>Sala 1</b>	0,94	0,25	0,23	0,25	0,13	0,08	0,05	<b>0,20</b>
<b>Sala 2</b>	0,96	0,48	0,39	0,33	0,13	0,08	0,09	<b>0,28</b>
<b>Sala 3</b>	0,94	0,30	0,60	0,35	0,12	0,13	0,08	<b>0,36</b>
<b>Sala 4</b>	0,90	0,44	0,27	0,23	0,11	0,10	0,08	<b>0,20</b>
<b>Sala 5</b>	0,94	0,27	0,31	0,31	0,14	0,07	0,08	<b>0,25</b>
<b>Sala 6</b>	0,87	0,28	0,26	0,21	0,10	0,11	0,06	<b>0,19</b>
<b>Sala 7</b>	0,95	0,51	0,18	0,20	0,15	0,06	0,06	<b>0,17</b>

Tabla 4. Valores de IACC<sub>E</sub> para cada una de las salas por bandas de octava.



De la imagen anterior, se puede corroborar algo muy similar a lo obtenido con los difusores QRD, donde en la baja frecuencia, hasta la frecuencia de trabajo de los difusores, las señales entre los dos oídos, es bastante diferente, esto permite que la correlación sea menor con respecto a los resultados de la sala rectangular, en la grafica anterior esta observación se puede notar por debajo de los 500 Hz. Durante la frecuencia de trabajo de los difusores (por encima de 500Hz y hasta aproximadamente los 2Khz), pasa todo lo contrario, el campo tiende a homogeneizarse y permitir que el IACC sea superior a cuando no hay difusores, permitiendo que la señales entre ambos oídos tiendan a parecerse en comparación a cuando no hay difusores (aunque es muy estrecha la diferencia). Luego este evento vuelve a repetirse a partir de los 4000 Hz. Para saber cómo se percibe sensorialmente estas diferencias relativamente pequeñas vistas en la gráfica (pues son muy estrechas las diferencias entre salas), es necesario escuchar las auralizaciones (Figura 23). De esta forma el lector podrá sacar sus propias conclusiones y aprender a asociar dicho parámetro y reconocer que tan grande o tan diferente auditivamente es la estrecha relación de los valores de IACC obtenidos. Otra ayuda para ver una comparativa entre salas es viendo su espectro a continuación:



38

Figura 25. Comparación espectral de una misma señal reproducida en cada sala.

A partir de la imagen espectral anterior, se puede apreciar cómo la sala 7, que es la que no tiene difusores en su interior, tiene ciertas focalizaciones (o concentraciones energéticas, amarillo) en baja frecuencia (40 Hz), entre 100 y 200Hz y entre 400Hz y 2KHz. Cuando se introducen difusores, se puede ir observando cómo dichas focalizaciones se van suavizando o difuminando. Es curioso ver que para algunos casos como con la sala 1 y la sala 3, el campo sonoro presenta un incremento de amplitud con respecto a la sala que no tiene difusores. Para ver en detalle esto, las auralizaciones realizadas son analizadas con un histograma que muestra cuales son los promedios energéticos por canal, para todas las salas. Tener en cuenta que estos valores comparativos se extrajeron a partir de los registrados por la cabeza Binaural. Haciendo un promedio entre más puntos de la sala, se podría aceptar o rechazar dicha hipótesis. A continuación los datos obtenidos:

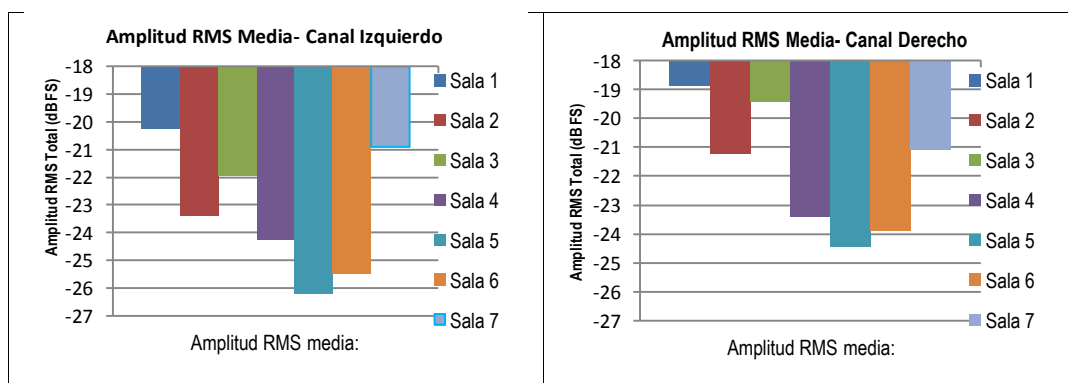
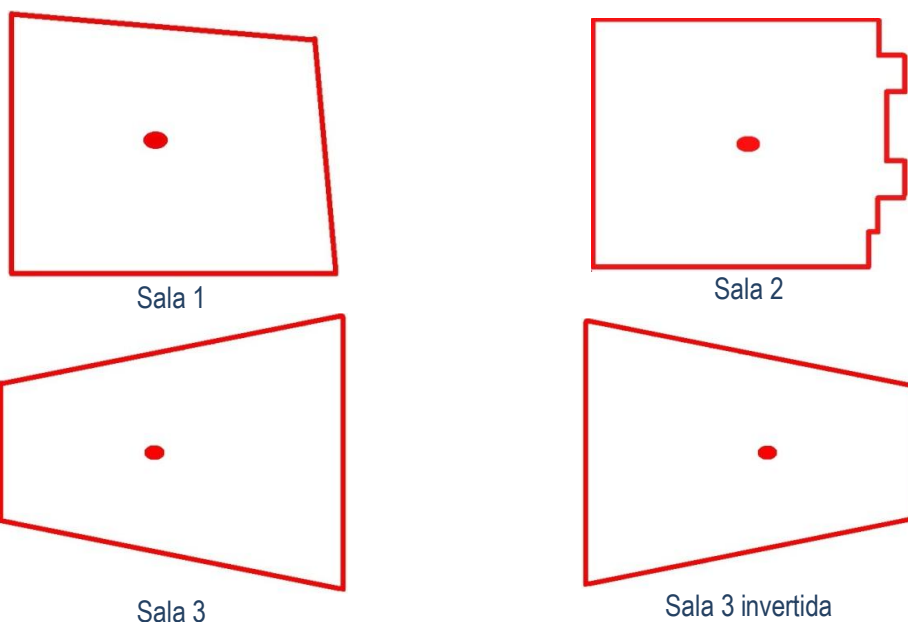


Figura 26. Comparativa de la amplitud RMS de una misma señal, dentro de una sala, para cada uno de los canales de una cabeza Binaural.

De acuerdo a lo anterior, se puede ver una clara diferencia entre el nivel de las señales que llega a cada uno de los oídos, esto debido en parte a que la fuente está colocada a un costado de la sala (puesta a propósito de esa forma para notar más la homogenización del campo sonoro por influencia de los difusores), pero lo más importante e interesante, es poder comparar cómo responde cada sala cuando se introduce una misma fuente. Claramente se aprecia que la sala sin difusores o con relativamente pocos difusores, son las que mantienen por más tiempo la energía aportada por la fuente, mientras en los otros casos, se puede observar una absorción de la energía por parte de los cristales de sonido. En parte esta absorción puede ser debido a que los difusores tienen la misma impedancia que las paredes, haciendo que parte del frente de onda sea absorbido y otro tanto reflejado, además que por la cantidad de cilindros, el área equivalente de absorción es mayor. Aunque se estaría hablando de una absorción promedio de 6dB entre la sala sin difusor y la que está cubierta de difusores. Los valores allí representados son relativos al nivel digital de una señal de audio, de allí se desprende su valor negativo, lo que implica que el valor máximo permitido sería 0 dB.

### 5.3. Simulación comparación parámetros acústicos en salas con diferentes geometrías y misma área.

Finalmente este experimento se lleva a cabo para conocer y corroborar tanto objetivamente como a nivel perceptivo las propiedades acústicas otorgadas por diferentes geometrías de salas. En este caso en particular, una sala rectangular es comparada acústicamente con diferentes geometrías usadas tradicionalmente en el diseño de recintos acústicos, como son los recintos en forma de abanico, herradura, hexagonal, etc. La literatura por lo general ha caracterizado recintos de gran tamaño donde usualmente se contempla un gran aforo de oyentes, pero por limitaciones computacionales, este ejercicio se realiza para recintos pequeños (del orden de  $18.75\text{m}^2$ ). Con este ejercicio, se busca dibujar varios modelos geométricos pero tratando de conservar constante el área, de esta forma evitar mayor o menor absorción efectiva por tamaño de salas, lo que conlleva a que los parámetros objetivos acústicos, se vean comprometidos, de aquí, a que las dimensiones tengan que ser ajustadas para tratar de dejar siempre el área constante. Una cabeza Binaural es puesta en el centro de las salas, rodeada de 7 micrófonos, con el fin de conocer cómo se comporta el campo acústico de cada sala. Al final se harán promedios energéticos entre micrófonos, cálculo de parámetros acústicos objetivos y análisis de espacialidad (aunque este último desde la posición donde se fija la cabeza, ya que ahí es donde se va auralizar), desde luego también se auralizará cada sala. Los arreglos geométricos se muestran a continuación:



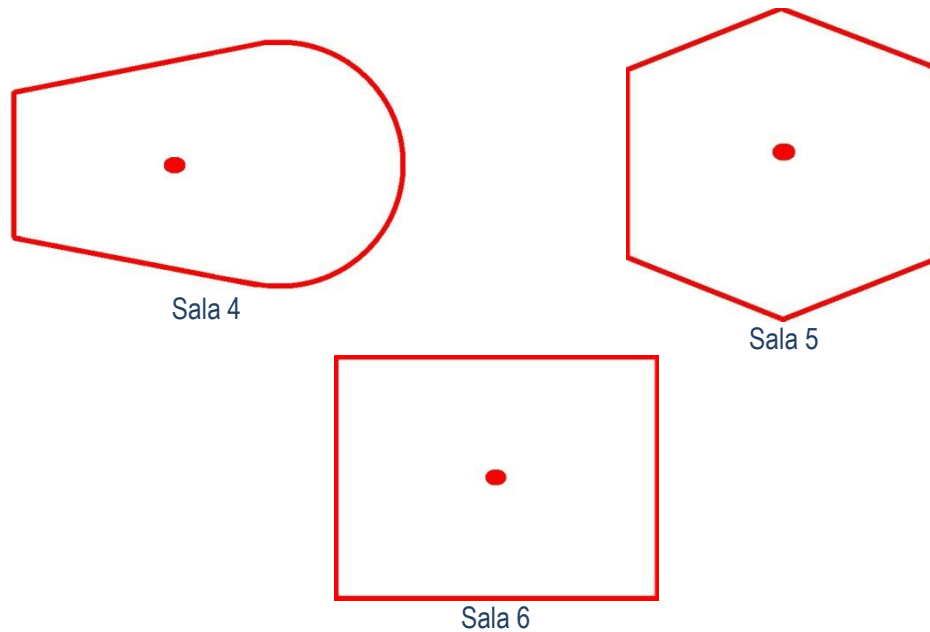


Figura 27. Diferentes arreglos geométricos escogidos para el estudio.

Para llevar a cabo este estudio, se hará de nuevo uso de dos herramientas computacionales de simulación. En el primer caso, por elementos finitos, que resuelve muy bien los fenómenos acústicos en el dominio de la frecuencia, se buscará conocer esta vez no la frecuencia propia de resonancia (frecuencia propia), sino a distintas frecuencias y con una misma fuente, lo que se conoce como un estudio de la distribución de la presión acústica (Dominio de la frecuencia en Comsol). Desde luego las condiciones de simulación, fueron escogidos con dominios rígidos al sonido para los contornos o paredes, aire como fluido al interior y una pequeña fuente programada con aceleración normal  $1\text{m/s}^2$ , tamaños de elementos de malla  $1\text{cm}$  y la excitación se hizo específicamente para  $50\text{Hz}$ ,  $60\text{Hz}$ ,  $80\text{Hz}$ ,  $125\text{Hz}$ ,  $160\text{Hz}$ ,  $200\text{Hz}$ ,  $250\text{Hz}$ ,  $320\text{Hz}$ ,  $400\text{Hz}$ ,  $500\text{Hz}$ ,  $1\text{KHz}$  y  $2\text{KHz}$ .

Como se mencionó anteriormente, el objetivo es ver cómo las diferentes geometrías distribuyen el campo sonoro en estas frecuencias. Como hipótesis se plantea, que algunas salas tendrán mayor focalización si alguno de sus modos fundamentales coinciden con alguna de las frecuencias propuestas anteriormente. Por eso el estudio se decide hacer precisamente no solo a una frecuencia sino a varias, con el fin de ver cuál sala tiene mayor dispersión en los valores de presión acústica a lo largo del área que ocupa.

Una ventaja de usar Comsol en este caso, es poder exportar los valores calculados para cada nodo, de esta forma poder hacer una buena revisión de la variación a través de una desviación estándar. Las imágenes obtenidas se pueden ver en el anexo 5, todas conservan la misma escala de presión para tener una mejor representación a la hora de comparar, a continuación se pone solo uno de los resultados de simulación a  $400\text{Hz}$ :

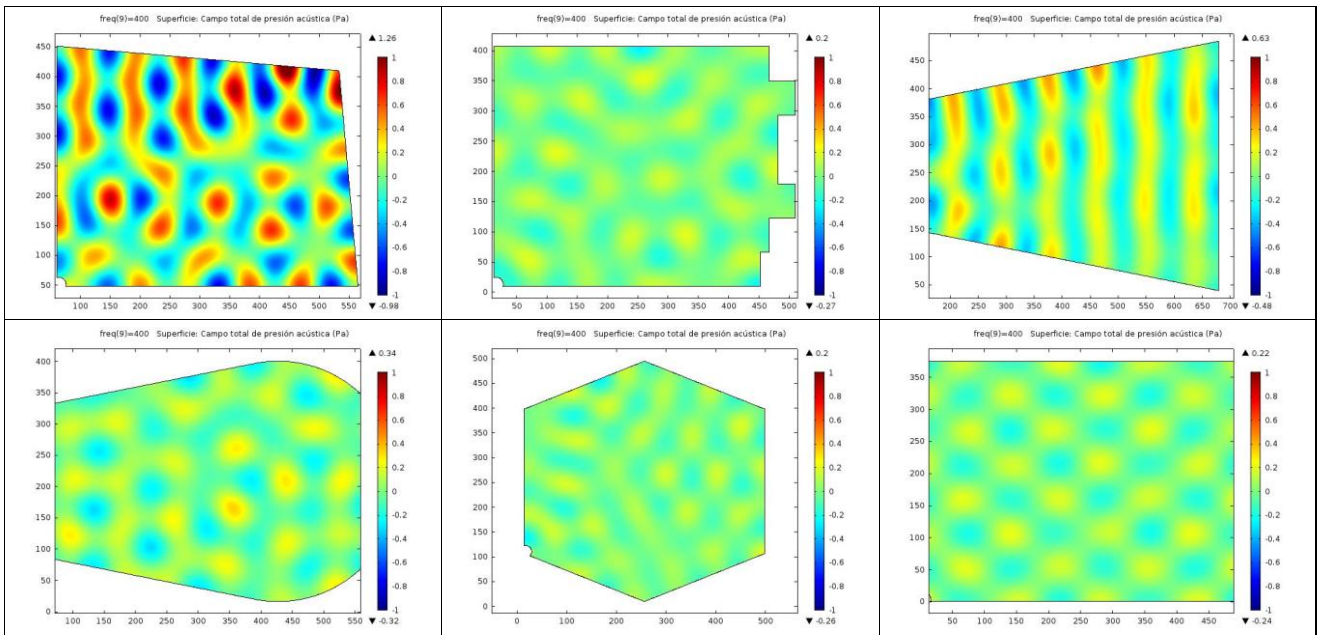


Figura 28. Distribución de la presión para 6 salas a una frecuencia de 400Hz. Otros resultados pueden ser vistos en el anexo 5.

De lo anterior se podría decir que, algunas salas distribuyen mejor el campo sonoro (sala 2 y 5) y de ahí, que no se noten tanto las focalizaciones, pero esto también puede ser debido a que muy cerca a esta frecuencia, en las otras salas puede existir algún modo fundamental.

Los valores obtenidos de las imágenes anteriores y del anexo 5, se exportaron a una hoja de cálculo y cada valor se divide por el valor máximo. De esa forma se obtiene un valor normalizado entre 0 y 1. Esto porque el valor de la presión en las salas no son los mismos pese a colocar la misma fuente, aunque esa diferencia de niveles, puede ser tratada como un aporte a la sonoridad G. Con los valores normalizados, ya es más fácil hacer comparaciones por bandas de frecuencia entre salas. Luego estos valores son graficados y se promedian para poder evaluar en todo el espectro, cuál es la sala que presenta la menor desviación estándar. Eso quiere decir, en cuál sala, se distribuye mejor la presión sonora o qué sala presenta una mejor uniformidad del campo sonoro. La sala que mejor distribución presentó, fue la que tiene forma de abanico. Seguidas por las hexagonal y en forma de herradura, de última quedó la sala rectangular. A continuación los resultados:

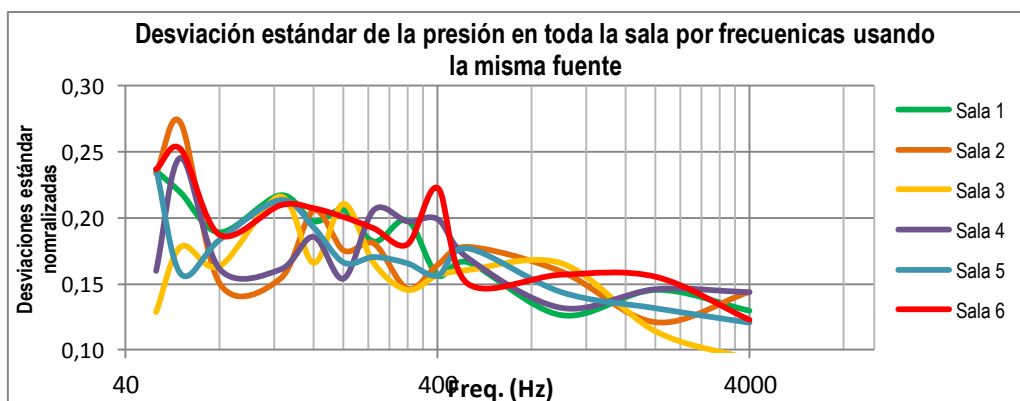


Figura 29. Gráfica comparativa de la desviación estándar de la distribución de la presión sonora normalizada en cada sala.

A raíz de que las graficas tienen bastante oscilación y los resultados son muy parecidos entre sí, se adjunta también una tabla con los valores numéricos de dicha gráfica, seguida por una columna que resumen los valores con un promedio de las desviaciones en el espectro.

	50 Hz	60 Hz	80 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	320 Hz	400 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	promedio desviaciones
<b>Sala 1</b>	0,24	0,22	0,19	0,22	0,20	0,21	0,18	0,20	0,16	0,17	0,13	0,15	0,13	0,18
<b>Sala 2</b>	0,23	0,27	0,15	0,15	0,21	0,18	0,18	0,15	0,16	0,18	0,16	0,12	0,14	0,18
<b>Sala 3</b>	0,13	0,18	0,16	0,22	0,17	0,21	0,17	0,15	0,16	0,16	0,17	0,11	0,09	0,16
<b>Sala 4</b>	0,16	0,25	0,16	0,16	0,19	0,15	0,21	0,20	0,20	0,17	0,13	0,15	0,14	0,17
<b>Sala 5</b>	0,24	0,16	0,18	0,21	0,19	0,17	0,17	0,17	0,16	0,18	0,14	0,13	0,12	0,17
<b>Sala 6</b>	0,24	0,25	0,19	0,21	0,21	0,20	0,19	0,18	0,22	0,15	0,16	0,16	0,12	0,19

Tabla 5. Desviaciones estándar de la distribución de la presión normalizada para cada una de las salas y para cada una de las frecuencias simuladas. En rojo, valores máximos, Azul valores mínimos. En verde promedios de las desviaciones estándar. Valores pequeños, mejor.

El estudio realizado por elementos finitos tiene una limitante y es que no se simuló para un espectro determinado sino para unas frecuencias concretas (aunque el estudio se puede hacer para más frecuencias, siempre será para un conjunto discreto de las mismas, lo que conlleva un tiempo de simulación bastante largo). En estos casos un método como FDTD daría más información detallada en el espectro, pues sus resultados dependerán solo de una frecuencia máxima de análisis, pero se puede obtener una función de transferencia muy bien representada hasta esa frecuencias máxima, por lo tanto una desviación estándar, acá será más precisa, pero limitada a la cantidad de puntos de medición que se hagan en la sala.

A continuación los resultados obtenidos por FDTD de la distribución del campo, el cual sigue el método para el ejercicio de inclinación de paredes siguiendo la ecuación ( 44) para el cálculo de la función de transferencia, analizando un espectro desde 30Hz a 4KHz. Una vez obtenidos estos valores, se revisa la desviación estándar de las oscilaciones de energía en la función de transferencia dentro de dicho rango y las desviaciones se promedian entre todo los puntos de medición en la sala. El procedimiento se repite para cada recinto.

	Mic 1	Mic 2	Mic 3	Mic 4	Mic 5	Mic 6	Mic 7	Mic 8	Mic 9	Promedio
<b>Sala 1</b>	2,93	2,97	3,31	3,09	3,07	2,83	3,27	3,44	3,23	3,13
<b>Sala 2</b>	2,88	2,97	3,09	3,04	2,97	3,26	3,36	3,19	4,10	3,21
<b>Sala 3</b>	2,74	3,16	3,24	3,40	3,18	2,92	3,15	3,45	3,10	3,15
<b>Sala 3inv</b>	3,00	3,06	3,63	3,82	3,31	3,02	2,96	3,91	3,09	3,31
<b>Sala 4</b>	3,05	2,96	3,29	3,16	3,40	3,05	3,13	3,28	3,05	3,15
<b>Sala 5</b>	2,71	2,90	3,04	3,17	2,95	3,15	3,27	3,10	3,09	3,04
<b>Sala 6</b>	3,03	3,13	2,94	3,03	2,93	3,30	2,95	3,09	3,36	3,08

Tabla 6. Desviación estándar de la función de transferencia entre 20Hz y 4KHz para cada punto de medición de cada sala en dB. Incluye los dos puntos capturados por la cabeza Binaural como mic 1 y 2. En Azul valor mínimo de la desviación y Rojo valor máximo.

Claramente se puede ver que los resultados de este método con los obtenidos en la Tabla 5, son contradictorios más que por el valor de numérico, es por señalar qué sala tiene la desviación estándar más baja y más alta. Esto puede pasar debido a que las desviaciones estándar por FDTD provienen del análisis de la variación de la función de transferencia en un espectro casi continuo de 30 a 4KHz además con una relación logarítmica de la energía para cada banda (de ahí la diferencia de valores con respecto

a Comsol donde las variaciones de presión fueron normalizadas). Es por ello que se desiste de los resultados obtenidos en Comsol y mejor se tienen en cuenta estos resultados, siendo la sala en forma de abanico invertido la que más oscilaciones presentan en su función de transferencia y la sala en forma hexagonal, la que sus valores eran menos dispersos (teniendo un espectro más plano, sin tanta desviación), seguido por la sala rectangular. También es de notar que los resultados son muy estrechos entre sí, pero también porque se ha procurado tener en todo momento la misma área entre las salas y se basa en promedios de valores logarítmicos.

Con la cabeza Binaural se procede a calcular cuál es la sala con mejor espacialidad a través del cálculo de la relación cruzada interaural. Los resultados se muestran a continuación:

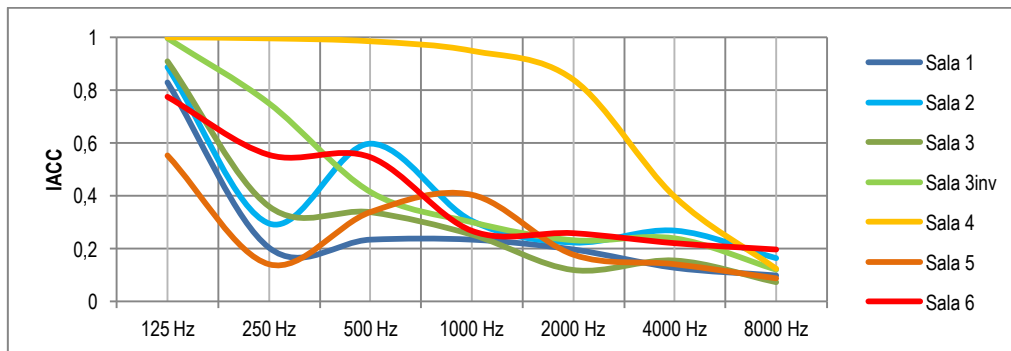


Figura 30. Comparación IACC salas con diferentes geometrías.

	IACCE3(500,1KHz,2KHz)
Sala 1	0,22
Sala 2	0,37
Sala 3	0,24
Sala 3inv	0,32
Sala 4	0,92
Sala 5	0,31
Sala 6	0,36

Tabla 7. Resumen de los valores de IACCE3 para las diferentes geometrías.

De acuerdo a lo anterior, se puede concluir que la sala que mayor envolvente tiene, es la sala con dos paredes inclinadas, seguida por la bien conocida sala en forma de abanico. La sala en forma de herradura, curiosamente otorga muy poco valor a la envolvente, siendo teóricamente las señales muy similares entre los dos oídos, seguido ampliamente por la sala rectangular. Las auralizaciones se puede escuchar haciendo clic en cada una de las imágenes de la Figura 27. Perceptivamente, la sala en forma de herradura opaca algunos armónicos fundamentales de la señal auralizada, lo mismo se percibe con la sala en forma hexagonal, no hay claridad del mensaje emitido con respecto a las otras salas.

A continuación se muestra espectralmente una comparativa de todas las salas, una vez sus respuestas al impulso fueron convolucionadas con una señal de entrada.

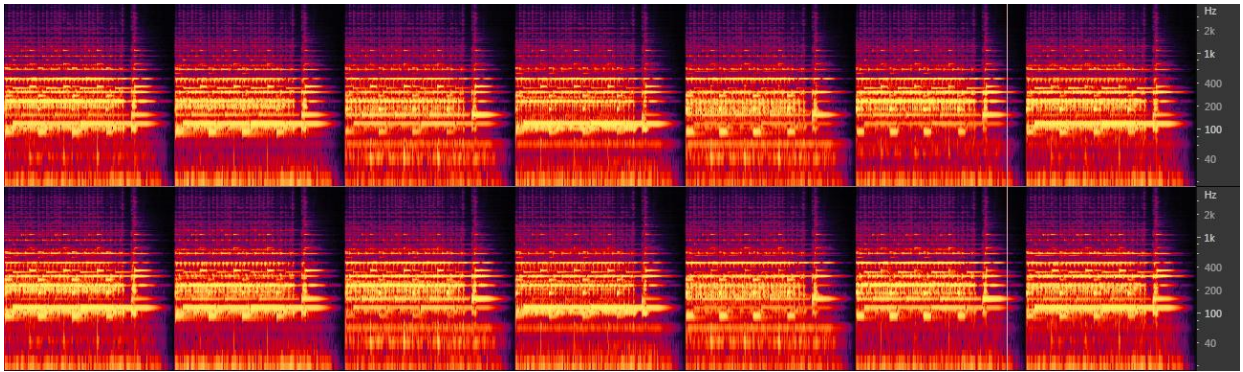


Figura 31. Comparativa de espectros de señal aural izada en la Figura 27. Canal L arriba y R abajo.

En la imagen anterior claramente se puede comprobar cómo entre 100 Hz y 400Hz, cada sala tiende a resaltar o difuminar la energía para este rango espectral.

Un análisis un poco más profundo y objetivo de la información anterior, se llevó a cabo, extrayendo parámetros acústicos tradicionales dentro de la caracterización acústica de salas. Aunque estos parámetros fueron concebidos para evaluar grandes salas de conciertos, operas y teatros; aquí se quisieron calcular, para ver si de alguna forma se pueden caracterizar salas de tamaño reducido, que en la práctica, representaría por dimensiones, una pequeña sala de ensayo, un estudio de radio o una sala de control. De esta forma y haciendo uso del Software EASERA para el cálculo de STI y ALcons en los dos puntos del centro de la sala y unos Scripts para el cálculo automatizado de los demás parámetros para los 7 puntos restantes por sala, a partir de las respuestas al impulso obtenidas en simulación, se calculan los parámetros D (definición), C50, C80, EDT, BR, Br, TR1 (timbre, relación entre brillos y bajos), Inteligibilidad de la palabra (STI, ALcons), ITDG (intimidad) y amplitud RMS otorgada por la sala (cual sala aporta más energía al campo sonoro).

	Rt <sub>mid</sub>	BR	Br	C80	C50	Definición	IACC	STI	%Alcons	ITDG	Amplitud RMS en el receptor (dB)
<b>Sala 1</b>	0,64	1,05	1,12	7,41	3,5	-1,64	0,14	0,765	2,7	4,58	-13,735
<b>Sala 2</b>	0,60	1,10	1,16	7,50	3,6	-1,61	0,39	0,77	2,633	7,26	-15,655
<b>Sala 3</b>	0,59	1,07	1,16	8,05	3,9	-1,50	0,12	0,773	2,579	5,02	-15,36
<b>Sala 3inv</b>	0,62	1,05	1,10	8,02	4,1	-1,45	0,31	0,775	2,564	7,6	-17,01
<b>Sala 4</b>	0,68	0,88	0,99	6,73	2,9	-1,83	0,92	0,762	2,745	6,96	-17,18
<b>Sala 5</b>	0,63	1,09	1,10	7,26	3,5	-1,61	0,20	0,756	2,83	5,53	-12,99
<b>Sala 6</b>	0,65	1,03	1,12	7,22	3,4	-1,66	0,34	0,759	2,785	6,37	-15,51

Tabla 8. Parámetros objetivos para diferentes geometrías de salas obtenidos por simulación FDTD.

De la tabla anterior se puede decir como primera medida que los valores de ITDG que en teoría, están relacionados con la intimidad, son valores muy por debajo del tiempo de integración del oído, por lo tanto las primeras reflexiones el oído las percibe como parte de sonido directo, pero con la ventaja de tener un sumatoria energética y por ende un mejor incremento en la sonoridad e intimidad. De hecho es lo típico de salas muy pequeña, las cuales denotan que la fuente está muy cerca del oyente (presentan bastante intimidad).

Por otro lado, la Amplitud RMS, se representa como una forma de cuantificar el nivel de amplificación de la fuente otorgado por la sala. Los valores allí planteados, están en dB FS, y entre las salas existe una diferencia de 4dB. Hay que tener en cuenta que la fuente es la misma y el área de las salas es

aproximadamente la misma, por lo tanto, se puede decir que las salas hexagonales en el centro de la misma, aportan más sonoridad frente a las otras geometrías, mientras las salas en forma de herradura, debido a su punto de focalización el cual está desplazado del centro de la sala, es la sala que menos aporte de sonoridad otorga, incluso 1.5dB menos que la sala rectangular.

El STI (Speech transmission Index) para todas las salas es muy similar y según la bibliografía está en el límite de ser considerado excelente ( $>0.75$ ), de igual manera el %Alcons que se considera bueno entre 0 y 4.8%. Desde luego esto no tiene mucha trascendencia a raíz del tamaño de la sala y de las características de absorción y reverberación que poseen, era de esperarse.

Del Bass Ratio BR y el Brillo, se puede decir que todas las salas tienden a sonar ligeramente un poco más brillante. Aunque las bajas frecuencias se destacan por encima de las medias. La sala con el difusor en baja frecuencia y la sala en forma hexagonal, son las que tienden a resaltar un poco más los bajos y la sala en forma de herradura, destaca más las frecuencias medias entre 500 y 1000 Hz, que el resto del espectro.

Con respecto a la claridad, según (25) en la pag. 139, el autor establece unos valores recomendados de claridad de palabra y claridad musical, para el caso C50, los valores por encima de 3 dB de energía que llegue entre los primeros 50ms con respecto a los que llegan después, son considerados buenos, mientras que para el C80, los valores como los obtenidos dan pie para escuchar conciertos de música con instrumentos electrónicos.

## 6. Conclusiones

45

Claramente se puede ver, como los métodos numéricos de simulación, pueden aportar un cúmulo de información con respecto a la acústica de salas. Se puede evaluar cualquier geometría y de allí deducir cualquier parámetro acústico, inclusive, si dichos resultados son complementados con evaluaciones subjetivas a la hora de auralizar, se podrían hacer correlaciones entre parámetros objetivos y subjetivos y llegar a encontrar nuevos parámetros y caracterizar tanto una geometría un accesorio acústico.

Se sabe que estos métodos contemplan la solución de la ecuación de onda y a partir de allí se conoce cómo es la propagación del campo sonoro, pero muchas veces no se conoce hasta qué punto otras pérdidas que no se contemplan como los fenómenos termo viscosos, puede alterar los resultados, esto por lo menos a la hora de evaluar la sonoridad el grado de amplificación otorgado por una sala.

Lo expuesto en la teoría a la hora de hablar de acústica de salas, por lo general pone como referente, estudios en grandes escenarios, haciendo que la intuición a la hora de sacar hipótesis o predicciones a priori, lleguen a contradecir los resultados obtenidos después de una simulación y aún así ser muy incoherentes. Esto en parte puede ser debido en este caso a que el estudio geométricamente tiene otras condiciones (dimensiones) y por lo tanto esas hipótesis no puedan ser tenidas en cuenta, pero a la hora de concluir, resolver dicho problema con modelos físicos, aplicando acústica a escala, podrían lograr complementar y ratificar lo que se pueda concluir. Herramientas como impresión 3D o de prototipado CNC, pueden ser herramientas muy útiles para ello. El factor económico, el interés en área y las herramientas de medición adecuadas, son algunas de las restricciones.

Desde el punto de vista de los métodos numéricos, se destaca de FDTD, poder tener la posibilidad de tener respuestas al impulso más representativas, se puede considerar una herramienta acertada a la hora de evaluar parámetros objetivos a partir de funciones de transferencia o respuestas al impulso y poder



tener la posibilidad de comprar de forma automatizada entre varias posibilidades de diseño geométrico de salas. Por otro lado, los elementos finitos, pueden ser más dirigidos a la hora de tener que caracterizar una sala identificando en baja frecuencia dónde hay fallos por problemas de modos propios y a partir de ahí, sabe ubicar una audiencia o colocar un sistema de sonido, por ejemplo. Pero por otro lado, definitivamente en alta frecuencia y a la hora de simular grandes geometrías, la teoría de rayos puede ser más interesante, a la hora de sugerir propuestas de diseño para tratar reflexiones que a su vez desencadenan en parámetros como el ITDG, inteligibilidad y relaciones energéticas o para conocer la escogencia de la posición de difusores, reflectores o sistemas de audio. De lo anterior se deduce que las empresas hoy en día consideran fabricar producir programas que involucran en un solo proyecto la resolución de todos estos métodos de simulación.

Con respecto al estudio de inclinación de paredes, queda claro que si se inclinan las paredes, el campo sonoro tiende a volverse un poco más homogéneo. Con respecto a lo planteado por alguno autores, dónde se determina que el ángulo recomendado es  $5^\circ$ , según el experimento realizado, arrojó que esto pasa entre  $3^\circ$  y  $4^\circ$ , por encima de este valor, la irregularidad del campo acústico en el espectro, es mucho más notoria con respecto a una sala completamente rectangular.

Con respecto a los difusores, Tanto QRD y Cristales, tienen un comportamiento que se ve reflejado ligeramente en la espacialidad, pero debido al coste computacional de repetir las simulaciones de cada configuración, con varias posiciones de cabeza binaural, los resultados obtenidos son aún poco concluyentes, pese a que los Valores de IACC sean menores en difusores con cristales que con residuo cuadrático. Se esperaba que entre más difusión se agregara, el IACC tenía que ser menor; a pesar que el campo se vuelve más uniforme, los desfases de las señales entre los dos oídos serían más evidentes y por ende, la espacialidad sería mucho más notoria con valores de correlación muy bajos, pero en este ejercicio, se pudo ver que algunos arreglos, cumplieron con esta hipótesis y otros no, evaluando una posición en el centro de la sala. Lo que lleva a concluir que es necesario realizar más auralizaciones para corroborar dicha suposición y hacer un estudio específico en este tema, pues muy seguramente los difusores no solo tienen influencia en la espacialidad de una sala sino en otras variables como la correlación que se encontró entre número de difusores y el tiempo de reverberación, la calidez, el C80 y quizás muchos otros parámetros que no se contemplaron. En cuanto a la pregunta de poner más o menos difusores, claramente se pueden notar diferencias en las auralizaciones, pero no son muy contrastantes, tampoco son determinantes para evaluar si una sala suena mejor o peor, por lo menos en estas salas tan pequeñas y además colocando difusores con un diseño aleatorio; quizás un difusor diseñado pensado en resolver una falla a una sala determinada, podría tener otras repercusiones en la auralización. Prácticamente se obtienen resultados muy similares entre una sala con un difusor a una sala llena de repeticiones del mismo difusor.

En cuanto a la posición de los difusores, como se mencionó anteriormente, a pesar que no es muy notorio a nivel perceptivo la distribución de los difusores (esto es, en qué paredes se instalan), si hay pequeñas diferencias en los parámetros objetivos. Las pequeñas diferencias espectrales de las auralizaciones y simplemente oyendo las mismas, pueden dar razón de ello. Destacar también la espacialidad del campo con Cristales de sonido en Baja frecuencia, lo cual a pesar de su espesor y debido a su configuración, tienen una buena aportación a dicho parámetro.

Estudios específicos en cada uno de los problemas planeados en este documento, complementados con evaluaciones subjetivos con oyentes entrenados, son requeridos, con el fin de encontrar correlaciones entre parámetros acústicos objetivos y subjetivos. Pues un simple concepto de aporte a la espacialidad, puede ser comprendido como un aumento o disminución del tiempo de reverberación o se mal interpreten

o se confundan con otros parámetros. De allí caracterizar, y relacionar el comportamiento de geometrías y accesorios acústicos en una sala y su relación perceptiva.

Con respecto al estudio de las diferentes geometrías de salas, fue interesante encontrar por FDTD, cómo los diferentes patrones geométricos, pueden influenciar en un aporte a la sonoridad o grado de amplificación de una fuente sonora. Además se puede identificar, cuál de esas geometrías, teniendo en cuenta un área constante, presenta mayor o menor irregularidad del campo sonoro. Por otro lado, no fue fácil encontrar una correlación entre un tipo de sala y algún parámetro acústico, por ahora solo fue posible caracterizar acústicamente cada geometría. A nivel específico, cada geometría podría ser estudiada a profundidad, realizando cambios en sus dimensiones y calculando de nuevo cada parámetro.

## 7. Futuras líneas de investigación

Aparte de algunos estudios complementarios que se discuten en las conclusiones, se puede plantear el hecho de explorar nuevas herramientas de programación multihilo para la simulación y auralización en tiempo real de recintos en 3D. Aunque en una sala promedio en el Eje Z (que va de piso a techo) no hay distribución de público, sería interesante notar si los parámetros encontrados en 2D, cambian drásticamente. Para ello, contar con las posibilidades de conocer lenguajes de programación basados en GPU, podría ser una gran ventaja en este campo. Por otro lado, no solo queda el hecho de caracterizar salas, sino el de poder auralizar en tiempo real en cualquier punto de la misma e inclusive llevar dichos algoritmos a videojuegos o entornos virtuales.

47

Gran parte de los métodos de simulación, se confrontan usualmente con problemas reales, para corroborar su nivel de precisión. En este caso, pese a conocer que dichas herramientas se comportan muy bien en otras disciplinas análogas a la acústica, es necesario corroborar, comportamiento no planteado en la teoría hasta el momento, dónde se pretende correlacionar cómo varían los parámetros acústico de las salas cuando se hacen diferentes arreglos geométricos. Sobre todo es muy importante confrontar estos hechos con la realidad, cuando se comienzan a tener resultados ambiguos o que no van conforme con la teoría. Entre las Herramientas para modelar salas a escala, se encontrarían impresoras 3D y sistemas de prototipado por CNC, en cuanto a sistemas de medición, equipos optoacústicos y sensores miniatura de gran respuesta en frecuencia. Eso sí, es muy clave que exista un interés en el área de la construcción y la arquitectura y desde luego su respectivo aporte económico.

Otra gran línea de investigación y que directamente va de la mano con el área del procesamiento digital de señales, consiste en implementar por síntesis, respuestas al impulso para que con fines pedagógicos se puedan realizar auralizaciones precisas, cuando se entrena un grupo de oyentes identificando y conociendo específicamente como suenan los parámetros subjetivos de una sala, modificando cada uno de los parámetros objetivos que describen el comportamiento de las mismas. De esta forma se esclarece y se llegaría a una mejor caracterización de recintos acústicos.

## Bibliografía

1. **Javier Gómez Bolaños, Ville Pulkki, Pasi Karppinen and Edward Hæggström.** An optoacoustic point source for acoustic scale model measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America* . April 2013, Vol. 133.
2. **Mehra, Ravish, y otros.** An efficient GPU-based time domain solver for the acoustic wave equation. *Applied Acoustics*. Febrero de 2012, Vols. 73, Issue 2, págs. 83-94.
3. **Lokki, Tapio.** Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls. *Physics Today*. Enero de 2014, Vols. 67, issue 1.
4. **Bolt, R. H.** Note on Normal Frequency Statistics for Rectangular Rooms . *The Journal of the Acoustical Society of America*. July de 1946, Vol. 18.
5. **Ravish Mehra, Nikunj Raghuvanshi, Lauri Savioja, Ming Lin, Dinesh Manocha.** AN EFFICIENT TIME-DOMAIN SOLVER FOR THE ACOUSTIC WAVE EQUATION ON GRAPHICS PROCESSORS. *gamma*. [En línea] [Citado el: 16 de Agosto de 2014.] <http://gamma.cs.unc.edu/GPUSOUND/>.
6. **Gómez, Javier, Pulkki, Ville y Karpine, Pasi.** Modeling room acoustics with a laser pulse in a scale model. *Aalto University research*. [En línea] [Citado el: 5 de Enero de 2014.] Demo video. <https://www.youtube.com/watch?v=U5qlqzvdUas>.
7. **Samuel Siltanen, Tapio Lokki and Lauri Savioja.** Rays or Waves? Understanding the Strengths and. *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics*. Special Session on Computational Room Acoustics Computational Room Acoustics, 2010.
8. **Vorländer, Michael.** MODELS AND ALGORITHMS FOR COMPUTER SIMULATIONS IN ROOM ACOUSTICS. *International Seminar on Virtual Acoustics*. 2011, págs. 74-80.
9. **Nvidia.** Nvidia CUDA Zone. [En línea] [Citado el: 07 de 07 de 2014.] <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>.
10. **YEE, KANE S.** Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENAS AND PROPAGATION* . 1966, Vols. AP-14 No.3.
11. **Schroeder, M. R.** Frequency-correlation functions of frequency responses in rooms. *Journal on the Acoustical Society of America*. 1962, Vol. 34 (12), pp.1819-1823.
12. **J. Redondo, R. Picoa and B. Roigb.** Simulation of the sound propagation inside a wind instrument by means of the Finite-Difference Time-Domain Method. [En línea] 2003. [Citado el: 1 de 08 de 2014.] <http://personales.upv.es/fredondo/fdtd.htm>.
13. Introduction to the Acoustics Module. *COMSOL*. [En línea] Mayo 2012. [Citado el: 2013 de 11 de 9.] <http://www.comsol.com/model/download/120903/IntroductionToAcousticsModule.pdf>.
14. **Carrión Isbert, Antoni.** *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona : Edicions UPC, 1998. ISBN: 84-8301-252-9.
15. **Möller, Henrik.** Introduction to a large room acoustics. *Aalto University*. [En línea] 2011. [Citado el: 23 de 2 de 2014.] [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-89.3421/materiaali/S-89\\_3421\\_luennoitsijan\\_materiaali\\_\\_osa\\_2.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-89.3421/materiaali/S-89_3421_luennoitsijan_materiaali__osa_2.pdf).

16. **Barron, Michael.** *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. New York : Spon Press, 2010. ISBN 0-203-87422-6.
17. **Farina, Angelo.** Advancements in impulse response measurements by sine sweeps. *Audio Engineering Society*. 122nd Convention, 5-8 de May de 2007.
18. **Cox, Trevor J y D'Antonio, Peter.** Determining Optimum Room Dimensions for Critical Listening Environments: A New Methodology. *Convention AES*. 2000, paper 5353.
19. *Aplicación del Método de los Elementos Finitos a la ecuación de Helmholtz.* **Ochoa, Guillermo Castaño.** España : Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2013.
20. **AB., COMSOL.** Comsol. *Introduction to Acoustics Module*. [En línea] Mayo de 2012. <http://www.comsol.com/model/download/120903/IntroductionToAcousticsModule.pdf>.
21. **Sabine y Sabine, Wallace Clement.** *Collected Papers on Acoustics*. Londres : Cambridge Harvard University Press, 1922.
22. **Redondo, J., y otros.** PREDICCIÓN DEL COEFICIENTE DE SCATTERING MEDIANTE UN ESQUEMA FDTD. *TecniAcústica*. 2009, PACS: 43.20.Fn, 43.55.Ka, 43.55.Br, 43.58.Ta .
23. **Long, Marshall.** *ARCHITECTURAL ACOUSTICS*. s.l. : ELSEVIER academic press, 2006. ISBN 13: 978-0-12-455551-8.
24. **Ballou, Glen.** *Handbook for Sound Engineers*. s.l. : Focal Press, 2008. págs. 165-166.
25. **Cavanaugh, William J., Tocci, Gregory C. y Wilkes, Joseph A.** *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. págs. 213-215. ISBN 978-0-470-19052-4.
26. **Beranek, Leo.** *Concert Halls and Opera Houses*. s.l. : Springer, 2004. págs. 524-525.
27. *The measurement of sound diffusion index in small rooms.* **Spring, N.F. y Randall, K.E.** Report No. 1969/16, s.l. : The British Broadcasting Corporation, 1969.
28. **Cox, T.J.** Acoustic diffusers: the good, the bad and the ugly. *Proceedings of the Institute of Acoustics* . 2004.
29. **Fuster Fajardo, José Miguel.** *Estudio de las aplicaciones de los difusores de sonido basados en cristales de sonido*. Gandía : Universidad Politécnica de Valencia, 2013. págs. 38-42.

## Anexos

Como datos anexos, se encuentran algunos detalles de los programas usados para calcular algunos de los parámetros descritos en este documento. Por otro lado se adjunta un CD con ficheros anexos a este documento con imágenes y auralizaciones de las salas involucradas, respuestas al impulso de la cabeza Binaural en cada sala en formato \*.wav y archivos \*.m, estos últimos con los resultados de las simulaciones en forma de matrices, donde se almacenan las señales captadas por los micrófonos según las descripción de los experimentos (h1,h2,h3...) y el valor de la frecuencia de muestreo. A lo largo del documento, también se especifica qué imágenes tienen hipervínculos para escuchar las auralizaciones, esto en caso de no poder acceder a los ficheros adjuntos, para escucharlos se requiere una conexión a internet y auriculares.

### Anexo 1

Ejemplo de uno de los programas completos para llevar a cabo la simulación de inclinación de paredes. Otros programas son encontrados en los ficheros adjuntos en el disco compacto adjunto con esta tesis.

#### Inclinación de paredes

```
function
[w,w_1,h1,h2,h3,h4,h5,h6,h7,h8,h9,h10,h11,dt]=fdtd_julian(angulo)
lx=4;ly=3; % largo por ancho en metros
dh=.01; % tamaño de la grilla
nx=round(lx/dh);
ny=round(ly/dh);
dominios=zeros(nx,ny);pcolor(1:nx,1:ny,dominios');axis image
h=[];
[Y,X]=meshgrid((1:ny)*dh,(1:nx)*dh);
dominios(find(Y>-atan(angulo/180*pi)*X+ly ))=1;
dominios(find(X>-atan(angulo/180*pi)*Y+lx ))=1;
close all
pcolor(X,Y,dominios);axis equal;colorbar
shading flat

pause(.1)

mascarax=1-(diff(dominios).'~=0).'; % Máscaras
mascaray=1-(diff(dominios)~0).';

%Busqueda de los puntos de contorno.
uxz=[];puxz=[];signoux=[];uyz=[];puyz=[];signouy=[];

%Busqueda de los puntos de contorno de ux
[i,j]=find(diff(dominios)==1);
puxz=[puxz (i+(j-1)*nx)'];
uxz=[uxz (i+1+(j-1)*(nx+1))'];
signoux=[signoux ones(length(i),1)'];
[i,j]=find(diff(dominios)==-1);
puxz=[puxz (1+i+(j-1)*nx)'];
uxz=[uxz (i+1+(j-1)*(nx+1))'];
signoux=[signoux -ones(length(i),1)'];

%Busqueda de los puntos de contorno de uy
[i,j]=find(diff(dominios)')==1);
puyz=[puyz (i+(j-1)*nx)'];
```

```

uyz=[uyz (i+j*nx)'];
signouy=[signouy ones(length(i),1)'];
[i,j]=find(diff(dominios')'==1);
puyz=[puyz (i+j*nx)'];
uyz=[uyz (i+j*nx)'];
signouy=[signouy -ones(length(i),1)'];

%%%CABEZA
x0=2;y0=1.5;radiocabeza=.10;
listapcabeza=find(sqrt((X-x0).^2+(Y-y0).^2)<=radiocabeza)';

```

```

%Búsqueda de los puntos de contorno.
dominios(listapcabeza)=1;
rightearx=x0/dh;
righteary=find(dominios(rightearx,:)>0,1,'first')-1;
leftearx=x0/dh;
lefteary=find(dominios(rightearx,:)>0,1,'last')+1;

```

```

uxzcabeza=[];uyzcabeza=[];
%Busqueda de los puntos de contorno de ux
[i,j]=find(diff(dominios)==1);
uxzcabeza=[uxzcabeza (i+1+(j-1)*(nx+1))'];
[i,j]=find(diff(dominios)==-1);
uxzcabeza=[uxzcabeza (i+1+(j-1)*(nx+1))'];
%Busqueda de los puntos de contorno de uy
[i,j]=find(diff(dominios')'==1);
uyzcabeza=[uyzcabeza (i+j*nx)'];
[i,j]=find(diff(dominios')'==-1);
uyzcabeza=[uyzcabeza (i+j*nx)'];
%Fin Busqueda de los puntos de contorno de cabeza.

```

```

%comienza el programa FDTD
rho=1.21;c=341;k=(c^2)*rho;
dt=dh/c/2;
impedance=18; % modificar la impedancia de las paredes
%initalization
p=zeros(nx,ny); % Presión sonora
ux=zeros(nx+1,ny); %Velocidad de partícula.
uy=zeros(nx,ny+1); %Velocidad de partícula
%excitación
maxtt=40000; %46487
% centralfrequency=500; %maxtt es el # numero de muestras de la
duración de la simulación
% a=centralfrequency/(sqrt(pi)/2)*4;
% t=(1:maxtt)/(1/dt)-4/a;
[w,w_1]=logsinesweep(1/dt,maxtt/(1/dt)); % fuente
%w=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));

```

```

for tt=1:maxtt;
    %cálculo de la presión
    p=p-k*dt/dh*(diff(ux,1,1)+diff(uy,1,2));
    p=p.*(1-dominios);
    % Posición excitación o Fuente
    p(round(.2/dh),round(.2/dh))=w(tt);
    %Cálculo de la velocidad
    ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:)-dt/rho/dh*diff(p,1,1);
    uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny)-dt/rho/dh*diff(p,1,2);

```

```

%Condiciones de frontera
ux(1,:)= -p(1,:)/rho/c/impedance;
ux(end,:)= p(end,:)/rho/c/impedance;
uy(:,1)= -p(:,1)/rho/c/impedance;
uy(:,end)= p(:,end)/rho/c/impedance;

ux(uxz)=signoux.*p(puxz)/rho/c/impedance;
uy(uyz)=signouy.*p(puyz)/rho/c/impedance;
%Grabación, poner las coordenadas espaciales según el recinto

h1(tt)=p(200,160);
h2(tt)=p(200,139);
h3(tt)=p(50,50);
h4(tt)=p(150,50);
h5(tt)=p(320,50);
h6(tt)=p(90,150);
h7(tt)=p(185,150);
h8(tt)=p(320,150);
h9(tt)=p(50,250);
h10(tt)=p(150,250);
h11(tt)=p(250,210);
if tt/50==round(tt/50);
    pcolor((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(p'.^2/(2e-5).^2));
    set(gca,'Clim',[-0 120]);shading flat,axis equal; colorbar;
%en corchetes cambiar la escala del gráfico si es necesario
    title(['time=' num2str(round((tt)*1000*dt)) ' ms']);drawnow
end
end
figure;
subplot(3,3,1);plot((1:length(h1))*dt,h3)
subplot(3,3,2);plot((1:length(h2))*dt,h4)
subplot(3,3,3);plot((1:length(h3))*dt,h5)
subplot(3,3,4);plot((1:length(h4))*dt,h6)
subplot(3,3,5);plot((1:length(h5))*dt,h7)
subplot(3,3,6);plot((1:length(h6))*dt,h8)
subplot(3,3,7);plot((1:length(h7))*dt,h9)
subplot(3,3,8);plot((1:length(h8))*dt,h10)
subplot(3,3,9);plot((1:length(h9))*dt,h11)
return
return

```

### Postprocesado

```

yacalculado=1;
if yacalculado==0
    angulos=(0:10);

    for ii=1:length(angulos)
        [w,w_1,h1(:,ii),h2(:,ii),h3(:,ii),h4(:,ii),h5(:,ii),h6(:,ii),h7(:,ii),
        h8(:,ii),h9(:,ii),h10(:,ii),h11(:,ii),dt]= ftdtd_julian(angulos(ii));
    end

    save miscalculos
else
    load miscalculos
end

longitud=1/dt;
frecuencias=(0:longitud/2-1)/(longitud/2)/dt;

referencia=fft(w,longitud);

```

```

fundetrans=cell(1,11); %se define una cell para guardar los H
(funciones de transferencia) mas abajo, por ahora no lo uso
H=zeros(longitud/2,11); % iniciliaización de H
Haura=zeros(longitud,11);% ini
for ii=1:length(angulos)
for nmicro=1:11
    pasointermedio=fft(eval(['h' num2str(nmicro)
':,ii'])),longitud)./referencia'; %función de transferencia para cada
microfono, por sala(orden de los for)
    H(:,nmicro)=abs(pasointermedio(1:end/2));
    Haura(:,nmicro)=pasointermedio;
    %fundetrans{:,ii}=Haura; %esta cell guarda las función de
transferencia para cada sala (11), las 9 posiciones de micro. no uso
esta línea aunque finalmente no se usó
    indicemin=find(frecuencias>30,1);
    indicemax=find(frecuencias>500,1)-1;

parametro(nmicro,ii)=std(10*log10(abs(H(indicemin:indicemax,nmicro))))
;
end
parametro2(ii)=mean(parametro(:,ii));

end

```

### Auralización, Crea las RI

```

s1=wavread('C:\Users\Jul\Dropbox\Tesis master\guitarra anecoica.wav');
[p,q]=rat((1/dt)/44100,0.0001); %coeficientes para remuestrear la
señal
s11=resample(s1,p,q); %señal 1 remuestreada a la frecuencia de
muestreo de la simulación 1/dt
for sala=1:11

RIL=conv(h1(:,sala),w_1); %convoluciona la señal de salida con la
entrada invertida cargada de la función "logsinesweep" dentro de la
función "cristales"
RIR=conv(h2(:,sala),w_1); % convoluciona la señal de salida con la
entrada invertida
RIbina=[RIL;RIR]; %almacena las dos RI, en una matriz
[p,q]=rat(44100/(1/dt),0.0001); %coeficientes para remuestrear la
señal

RIbina2=resample(RIbina',p,q); %señal remuetreada
wavwrite(2e-5.*RIbina2,1/dt, strcat('RIbina', num2str(sala), '.wav'));
%escribe en wav la RI stereo, pero muestreada 1/dt
end

```



## Anexo 2

Programa que extrae Máscaras desde una imagen. (Para el Modelado de geometrías complejas en 2D)

```
a=imread('salal.jpg');
imagesc(a);axis equal

R=a(:,:,1);
G=a(:,:,2);
B=a(:,:,3);

[x,y]=ginput(1);

r=a(round(y(1)),round(x(1)),1);
g=a(round(y(1)),round(x(1)),2);
b=a(round(y(1)),round(x(1)),3);
colores=[repmat([double(r)/255 double(g)/255 double(b)/255],63,1); 1-
gray; ];
limite=100;
R2=((R>r-limite).*(R<r+limite));
G2=((G>g-limite).*(G<g+limite));
B2=((B>b-limite).*(B<b+limite));

mascara=R2.*G2.*B2;

figure
imagesc(mascara)
axis equal
```

### Anexo 3

Algoritmo para la creación de los cilindros, para la simulación de cristales de sonido en Salas.

```
maxx=5;maxy=3.7; %dimensiones de la sala

[x,y]=meshgrid((1:nx)*dh,(1:ny)*dh);x=x';y=y';
listap0=[];

a_red=.08; %distancia entre los centros de los cilindros
radio=.035; %radio de cada cilindro

uxz=[];uyz=[]; %inicialización de la lista de puntos de velocidad que
son frontera

    ley(1:9)=.9;
    ley(11:19)=1.1;
    ley(21:29)=.9;
    ley(31:39)=1.1;
    ley([10 20 30])=1;
    ley =[0 cumsum(ley)];
    centrosx=[];centrosy=[];

%modelado de los difusores
%difusores derecha
for ii=1:4 %4 filas de cilindros
    for jj=1:40
        x0=57.5*a_red+a_red*ii;
        y0=maxy/2-max(a_red*ley)/2+a_red*ley(jj);

if (x0<maxx-radio) & (x0>0+radio) & (y0<maxy-radio) & (y0>0+radio)
        centrosx=[centrosx x0];
        centrosy=[centrosy y0];
    end
end
end
for ii=1:4 %difusor arriba
    for jj=1:40
        y0=41.5*a_red+a_red*ii; %modificar la constante para
desplazar el difusor
        x0=maxx/2-max(a_red*ley)/2+a_red*ley(jj);

if (x0<maxx-radio) & (x0>0+radio) & (y0<maxy-radio) & (y0>0+radio)
        centrosx=[centrosx x0];
        centrosy=[centrosy y0];
end
end
end
for ii=1:4 % abajo
    for jj=1:40
        y0=-.5*a_red+a_red*ii;
        x0=maxx/2-max(a_red*ley)/2+a_red*ley(jj);

if (x0<maxx-radio) & (x0>0+radio) & (y0<maxy-radio) & (y0>0+radio)
        centrosx=[centrosx x0];
        centrosy=[centrosy y0];
end
end
```

```
        end
    end

    for ii=1:4 % difusor a la izquierda.
        for jj=1:40
            x0=-.5*a_red+a_red*ii;
            y0=maxy/2-max(a_red*ley)/2+a_red*ley(jj);

            if (x0<maxx-radio) & (x0>0+radio) & (y0<maxy-radio) & (y0>0+radio)
                centrosx=[centrosx x0];
                centrosy=[centrosy y0];
            end
        end
    end
end
```

## Anexo 4.

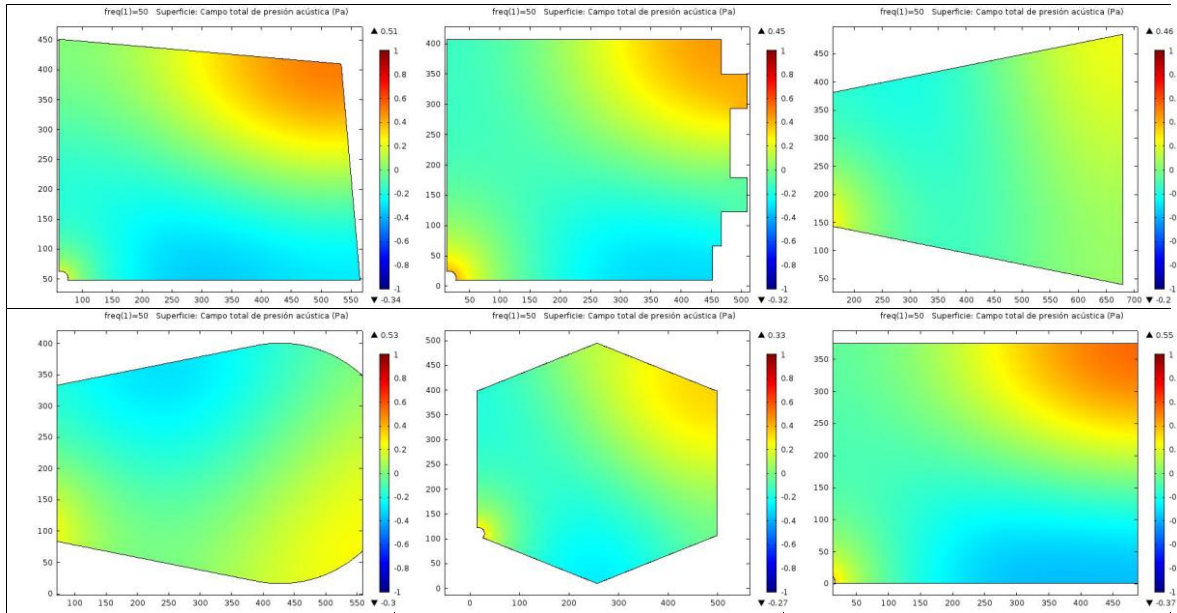
Señal de entrada para la simulación de las salas . LogSineSweep.

```
function [x,x_1,y]=logsinesweep(fs,T)
close all;clc
%T=46486/68200;fs=68200;
t=1/fs:1/fs:T;
f1=30;f2=17000;
K=2*pi*T*f1/log(f2/f1);L=T/log(f2/f1); %parámetros del cálculo del
sinesweep
argumento=K*(exp(t/L)-1);
frecuencia=diff(argumento)*fs;
x=sin(argumento);plot(t,x);title('waveform'),soundsc(x,fs) %señal de
entrada
%figure;spectrogram(x,256,[],(0:1000),fs);title('specgram')
x_1=x(end:-1:1).*([frecuencia(end:-1:1) f1 ]/(2*pi*f1)); %señal
invertida y filtrada
y=conv(x,x_1); %impulso de del barrido frecuencial
%figure;y=conv(x,x_1);plot([t t(end)+t(1:end-1)],y);title('convolution
with inverted signal')
```

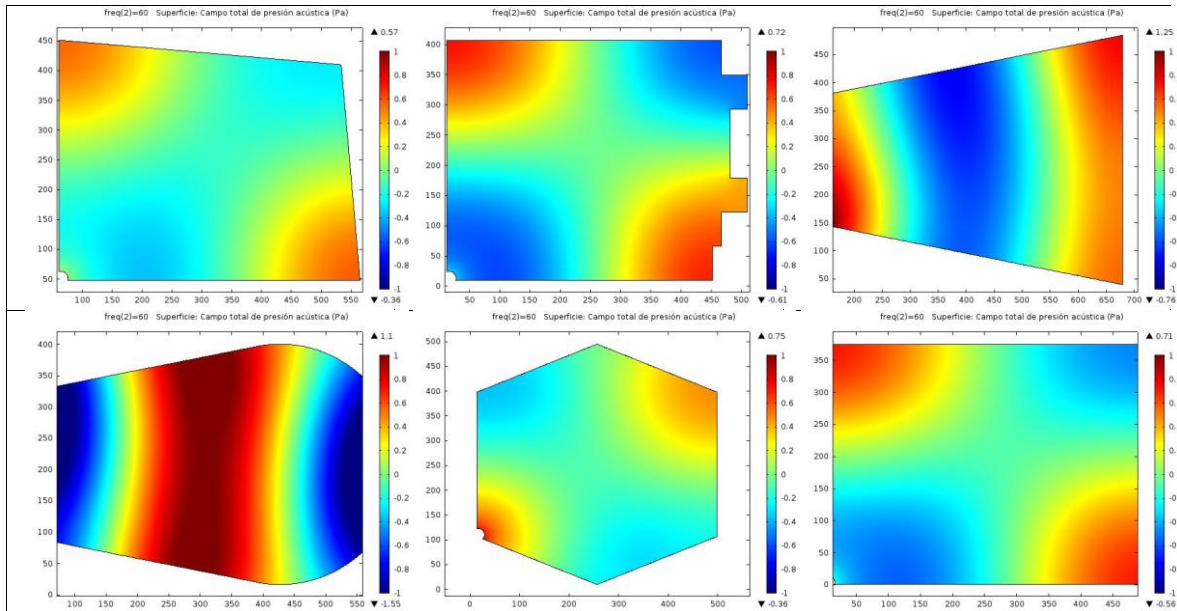
## Anexo 5

Imágenes obtenidas por elementos finitos de la distribución de la presión para diferentes geometrías organizadas por frecuencias para una mejor comparación.

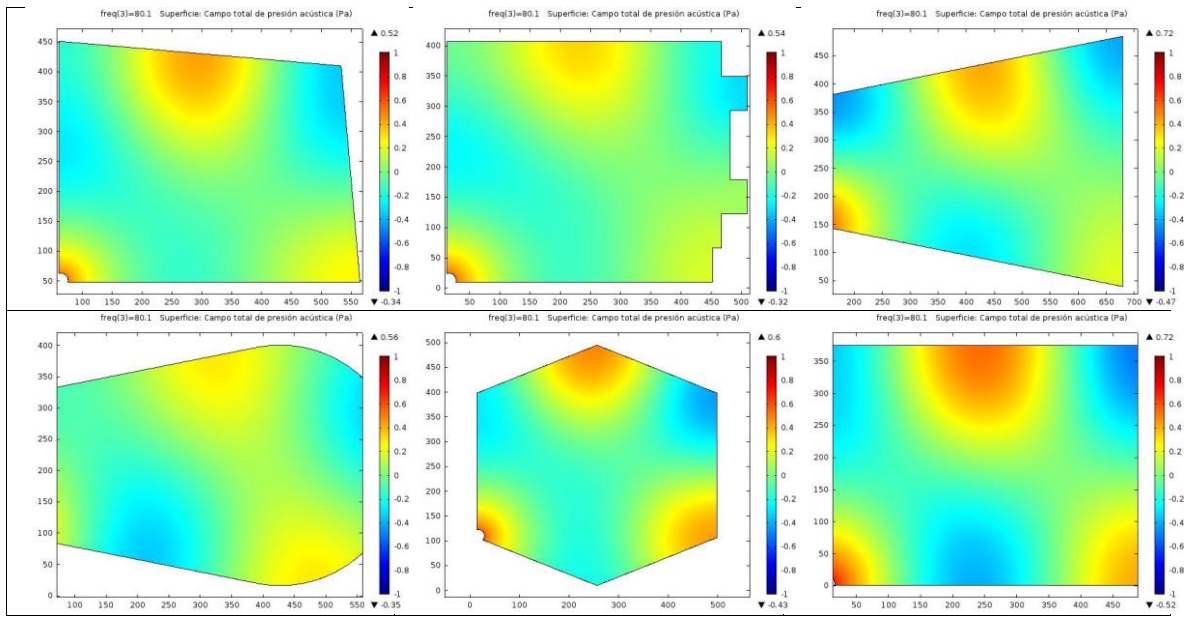
### Comparativa 50 Hz



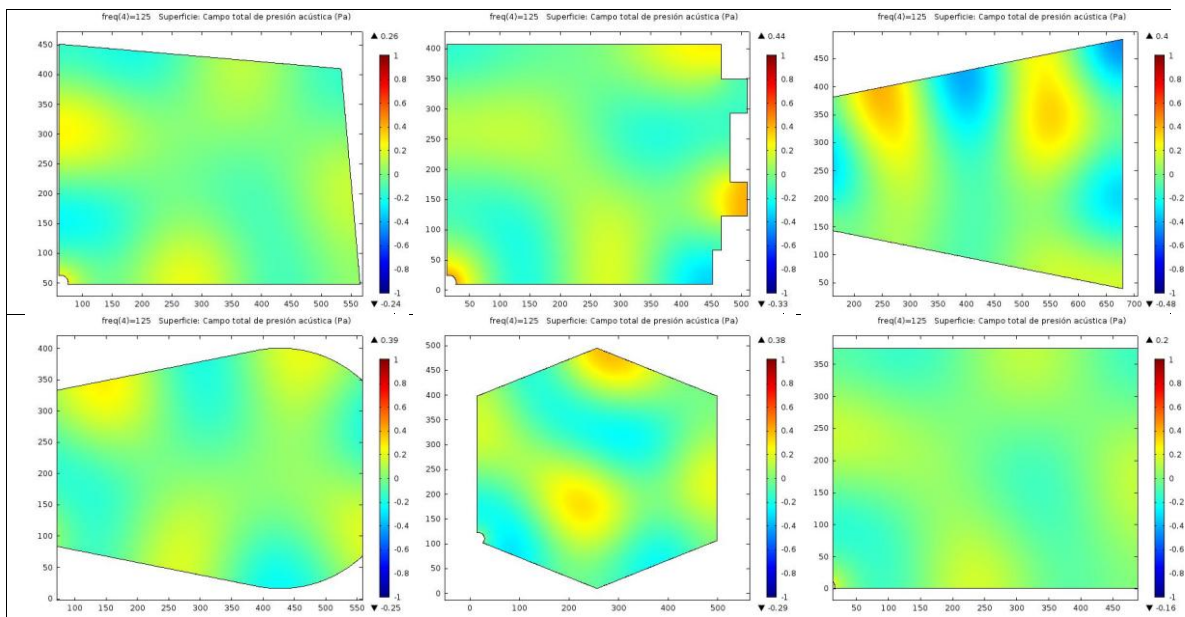
### Comparativa 60 Hz



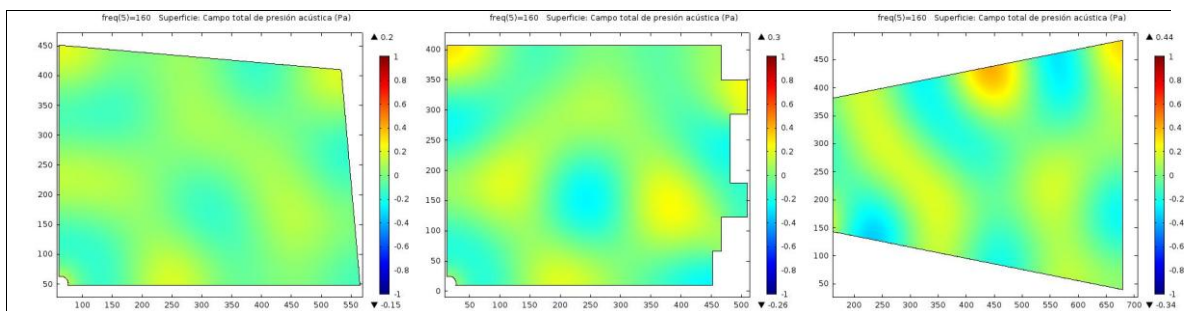
## Comparativa 80 Hz

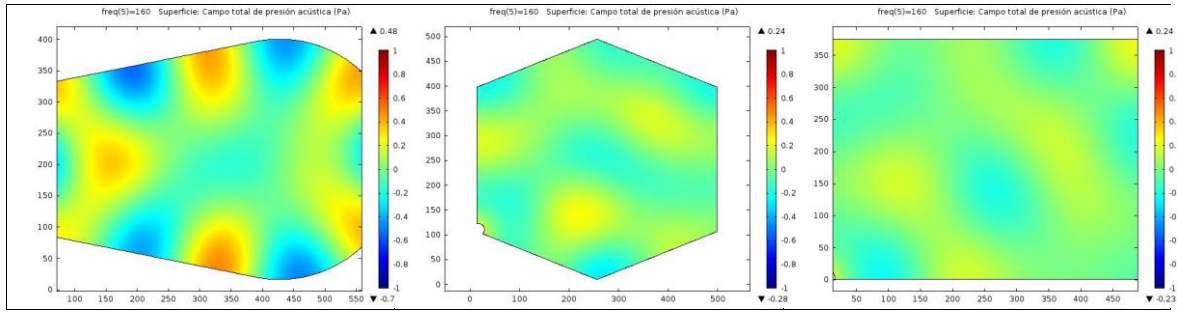


## Comparativa 125Hz

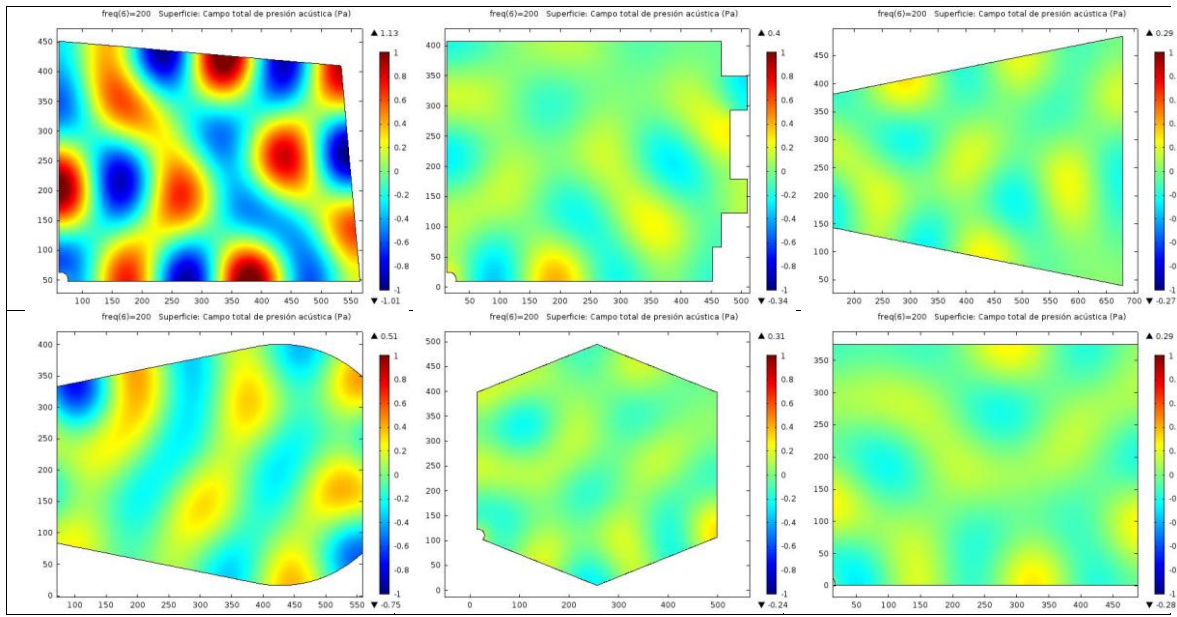


## Comparativa 160Hz

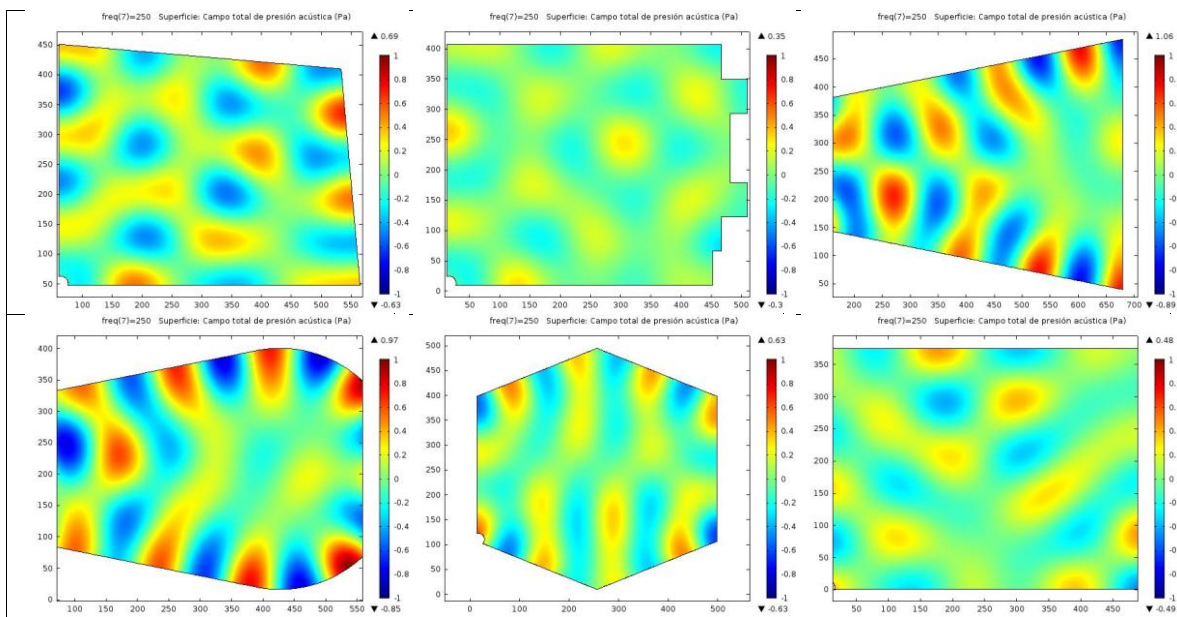




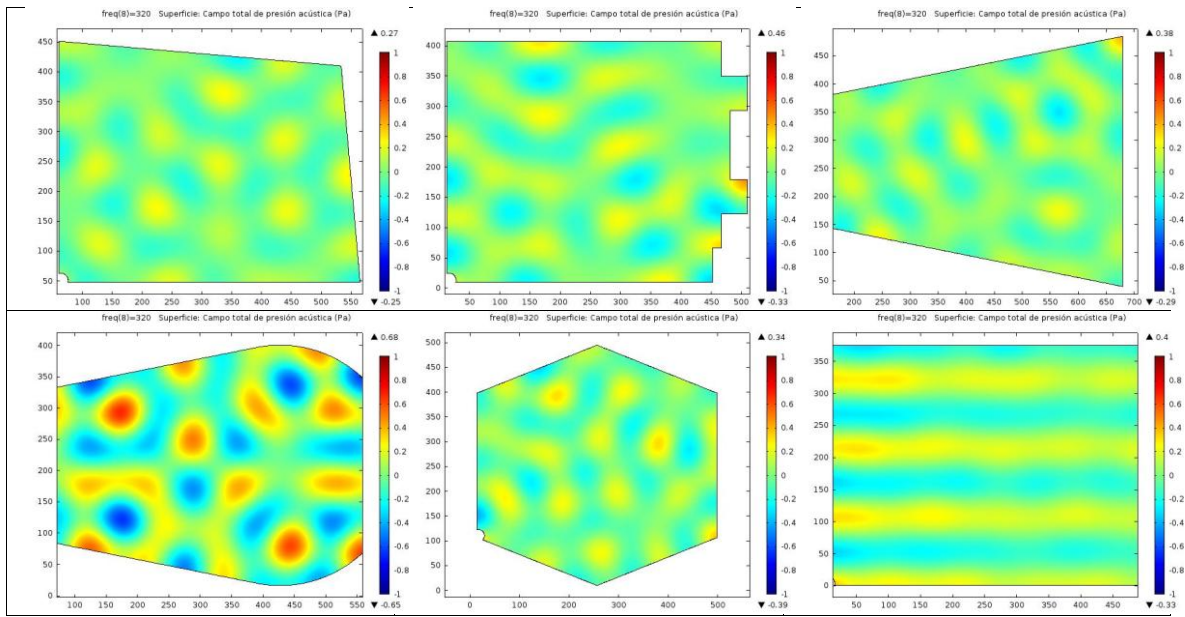
### Comparativa 200 Hz



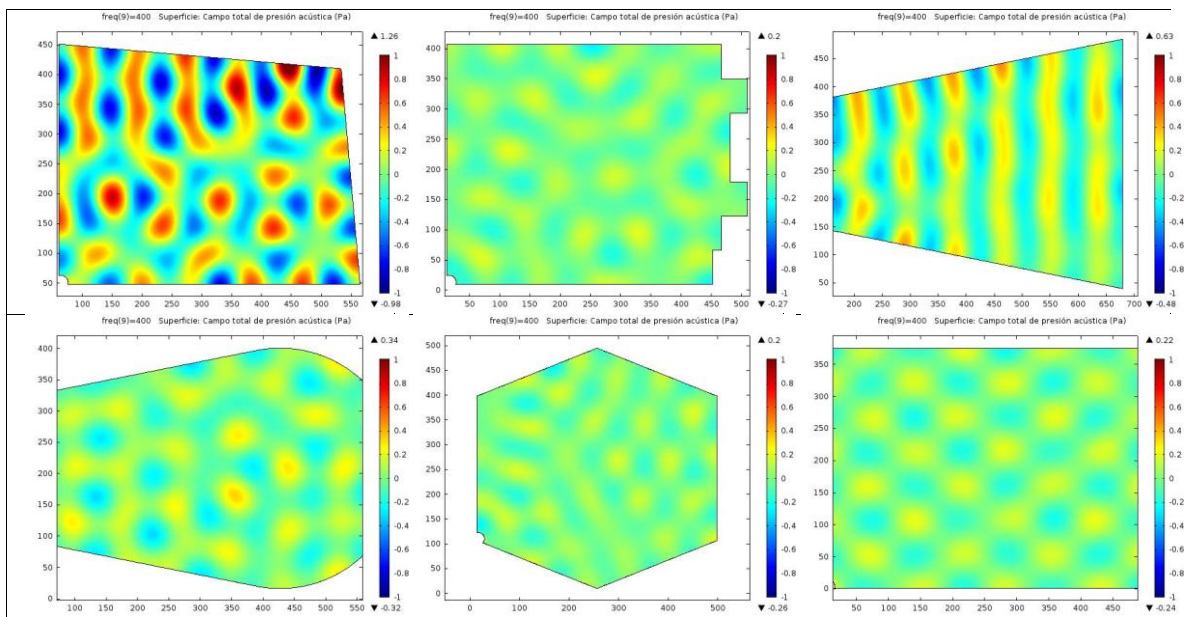
### Comparativa 250 Hz



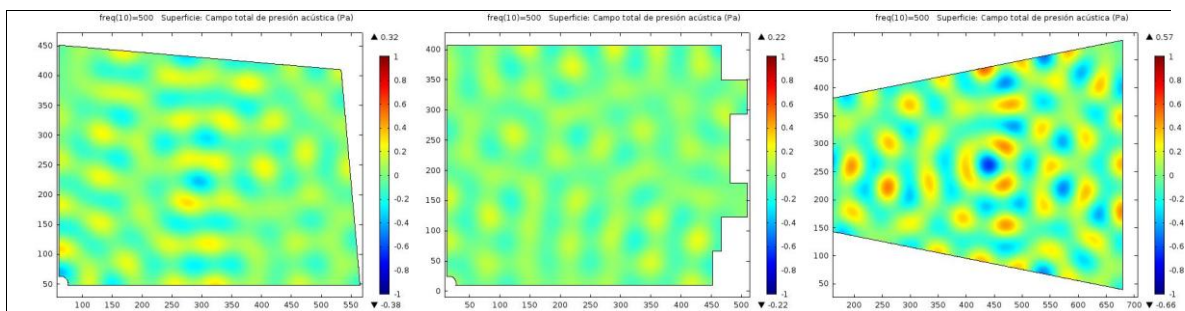
## Comparativa 320 Hz



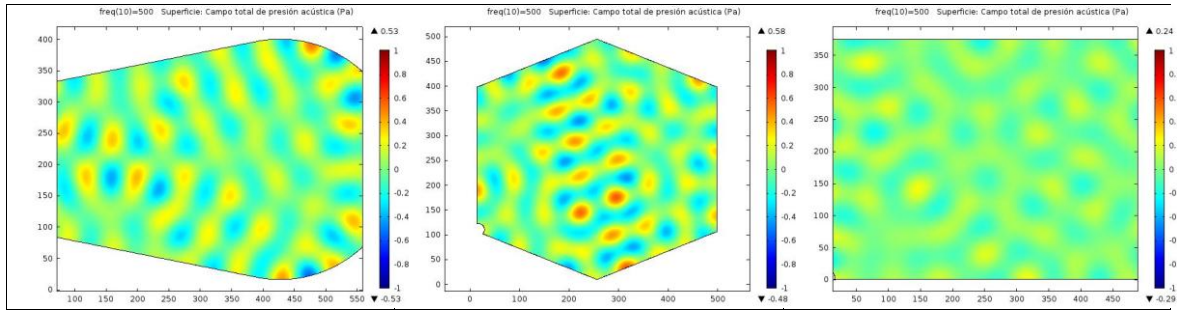
## Comparativa 400 Hz



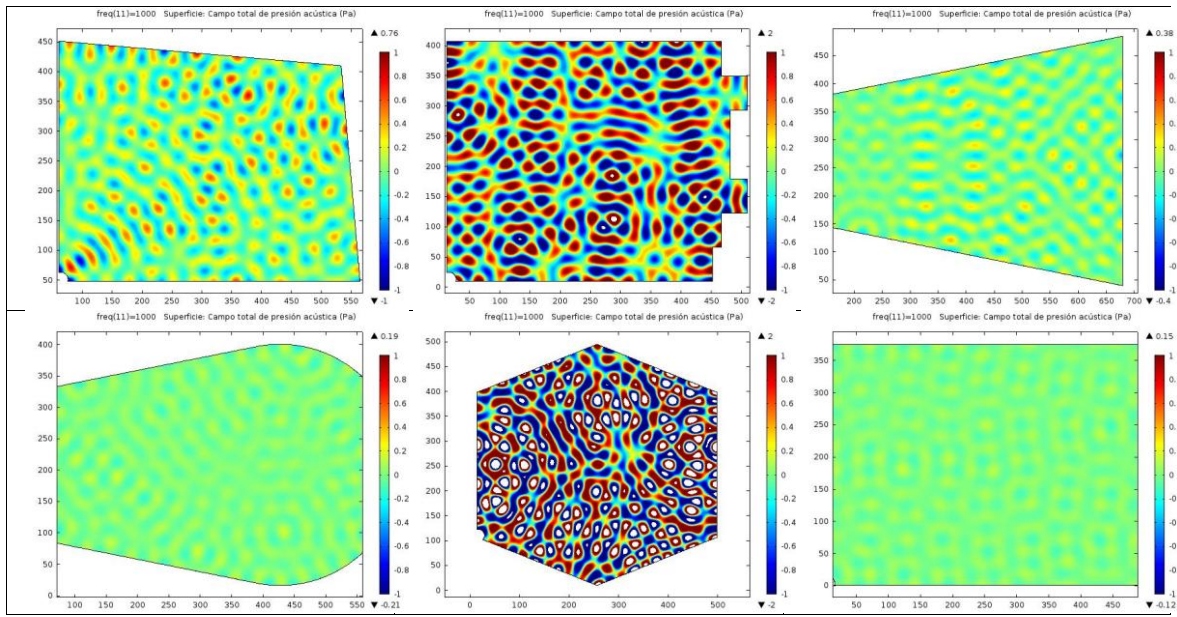
## Comparativa 500 Hz







### Comparativa 1000 Hz



### Comparativa 2000 Hz

