



Universidad
de Alcalá

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

MASTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA DE TELECOMUNICACION

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA DE
SIMULACIÓN ACÚSTICA DE SALAS EN
MATLAB**

**Luis Miqueleiz Monente
2015**

Resumen

La creación de una herramienta de simulación acústica de salas en Matlab, hace que no se tengan que usar programas destinados a acústica, ya que son programas con licencias muy caras. La herramienta creada, es fácilmente customizable para que el usuario pueda configurarla a su gusto (forma, tamaño y materiales) y añadir fácilmente nuevas funcionalidades y propiedades.

Además de crear la sala, gracias a unos scripts creados, se puede representar una animación del trazado de rayos (mediante la técnica de la imagen virtual) de cómo se distribuye el sonido por la sala, y mediante la respuesta al impulso, auralizar la sala con el sonido que el usuario quiera.

Palabras Clave: Acústica, Matlab, Salas, Trazado de Rayos, Respuesta al Impulso, Método de la Imagen Virtual.

Abstract

Creating a room acoustic simulation tool in Matlab, makes not have to use specific acoustic programs, because their licenses are really expensive. The created tool is easily customizable so the enduser can configure the room (shape, size and materials) and they can easily add new functionality and properties.

In addition to creating the room, thanks to scripts created, you can represent an animation of ray tracing (using the technique of the virtual image) of how the sound is distributed around the room, and by the impulse response, they can auralize the room with the sound that the user wants.

Keywords: Acoustic, Matlab, Rooms, Ray Tracing, Impulse Response, Image Method

Índice General

Resumen	iii
Abstract	v
Índice General	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tablas	xi
Índice de Ecuaciones	xiii
1 Introducción y Objetivos	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	1
2 Estudio Teórico	3
2.1 Introducción	3
2.2 Propagación del Sonido.....	3
2.3 Acústica de Salas.....	4
2.4 Acústica Geométrica	5
2.5 Geometría.....	8
2.5.1 Definición de un plano	8
2.5.2 Punto simétrico con respecto a un plano	10
2.5.3 Intersección entre una línea y un plano	13
2.5.4 Distancia entre dos puntos.....	14
2.6 Imagen Virtual.....	14
2.6.1 Caso de orden uno	14
2.6.2 Caso de orden tres	16
2.6.3 Caso de rayo imposible	19
2.7 Respuesta al impulso de una sala	20
3 Desarrollo.....	23
3.1 Definición de los parámetros que forman la sala	23
3.2 Obtener coeficientes de los planos	25
3.3 Algoritmo	25
3.3.1 Cálculo de la imagen virtual.....	26
3.3.2 Intersección entre recta y plano.....	26
3.3.3 Distancia entre dos puntos.....	27
3.3.4 Manera de abordar el funcionamiento del algoritmo	27

3.3.5	Estructuras resultado	28
3.4	Atenuaciones	30
3.4.1	Atenuación del aire.....	30
3.4.2	Atenuación de los materiales.....	33
3.4.3	Atenuación total	34
3.4.4	Cola reverberante	35
3.5	Auralizaciones.....	37
4	Resultados Obtenidos.....	39
4.1	Resultados	39
4.2	Tiempos de ejecución.....	41
4.3	Representaciones.....	42
4.4	Comparativas.....	43
5	Conclusiones y Líneas Futuras.....	49
5.1	Conclusiones	49
5.2	Líneas Futuras	50
6	Bibliografía	51
6.1	Acústica y Acústica Geométrica	51
6.2	Geometría.....	51
6.3	Técnica Imagen virtual y respuesta al impulso	51
6.4	Matlab	52
6.5	Otros.....	52
7	Anexos.....	53
7.1	Anexo 1: Lista de materiales empleados.....	53
7.2	Anexo 2: Comparación tiempos reverberación (datos).....	56
7.3	Anexo 3: Planos de las aulas de la EPS de la UAH	57
7.4	Encabezados de las funciones de Matlab creadas	59

Índice de Figuras

Figura 1: Compresión y dilatación de las partículas del aire para transmitir el sonido.....	3
Figura 2: Tipos de modelos en función de la manera de resolver la ecuación de onda	5
Figura 3: Tipo de rayos sonoros según las propiedades.....	6
Figura 4: Tipos de rayos según el número de reflexiones.....	7
Figura 5: Ecograma que indica los tipos de rayos.....	7
Figura 6: Tipos de planos según su definición.....	8
Figura 7: Punto simétrico con respecto a un plano	10
Figura 8: Trazado rayos de orden 1, obtener imagen virtual de la fuente	15
Figura 9: Trazado rayos de orden 1, cálculo del punto de intersección	15
Figura 10: Trazado rayos de orden 1, Construcción del rayo.....	16
Figura 11: Trazado rayos de orden 3, obtención de los puntos de simetría	16
Figura 12: Trazado rayos de orden 3, cálculo del punto de intersección uno	17
Figura 13: Trazado rayos de orden 3, cálculo del resto de puntos de intersección	18
Figura 14: Trazado rayos de orden 3, construcción del rayo	18
Figura 15: Trazado rayos de orden 3 imposible, obtención de los puntos de simetría.....	19
Figura 16: Trazado rayos de orden 3 imposible, obtener los puntos de intersección.....	20
Figura 17: Respuesta al impulso	21
Figura 18: Ejemplo de una sala tras definir los parámetros de ancho, largo y alto.....	23
Figura 19: Estructura de los materiales.....	24
Figura 20: Estructura del rayo directo (<i>rayo_directo</i>).....	28
Figura 21: Estructura de los rayos reflejados (<i>trazado_rayos</i>)	29
Figura 22: Contenido de la estructura <i>trazado_rayos</i>	30
Figura 23: Absorción del aire por bandas de octava	32
Figura 24: Atenuación producida por los materiales por bandas de octava	34
Figura 25: Atenuación total por bandas de octava	35
Figura 26: Trazado de rayos + Cola reverberante	36
Figura 27: Ejemplo de cola de reverberación generada	36
Figura 28: Atenuación total más cola de reverberación por bandas de octava.....	37
Figura 29: Comparación de los materiales en la banda de 250 Hz	39
Figura 30: Comparación de la absorción del aire para la banda de 500 Hz	40
Figura 31: Representación rayos	43

Figura 32: Ejemplo cálculo EDT	45
Figura 33: Comparación tiempos de reverberación (aula grande)	46
Figura 34: Comparación tiempos de reverberación (aula mediana).....	46
Figura 35: Comparación tiempos de reverberación (aula pequeña).....	47
Figura 36: Dimensiones de las aulas EPS de la UAH.....	57
Figura 37: Superficie de audiencia de cada tipo de aula	58
Figura 38: Jerarquía de las funciones creadas	59

Índice de Tablas

Tabla 1: Numeración de los puntos que forman el paralelepípedo	23
Tabla 2: Descripción de los planos del paralelepípedo	25
Tabla 3: Ecuaciones del plano del paralelepípedo	25
Tabla 4: Valor de la constante para la absorción del aire.....	31
Tabla 5: Número de rayos	39
Tabla 6: Tiempo de ejecución	41
Tabla 7: Tamaño aulas Escuela Politécnica Superior	44
Tabla 8: Relación área del suelo y área de la audiencia.....	44
Tabla 9: Coeficientes de absorción de los materiales para el suelo de las aulas	44
Tabla 10: Tiempos de reverberación obtenidos	45
Tabla 11: Lista de materiales con los coeficientes de absorción.....	55
Tabla 12 : Datos de Tiempo de Reverberación	56

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Absorción del aire	4
Ecuación 2: Coeficiente de absorción de un material	4
Ecuación 3: Tiempo de reverberación.....	5
Ecuación 4: Tiempo de reverberación (II)	5
Ecuación 5: Longitud de onda máxima.....	6
Ecuación 6: Ecuación del plano	9
Ecuación 7: Cálculo de los coeficientes que definen el plano	10
Ecuación 8: Ecuación continua de la recta.....	11
Ecuación 9: Ecuaciones paramétricas de la recta.....	11
Ecuación 10: Coordenadas del punto simétrico con respecto al plano	12
Ecuación 11: Coordenadas de la posición de un punto simétrico a un plano.....	12
Ecuación 12: Coordenadas del punto de intersección entre recta y plano	14
Ecuación 13: Distancia euclídea entre dos puntos	14
Ecuación 14: Caracterización numérica del ecograma (tiempo continuo).....	21
Ecuación 15: Número de rayos antes de eliminar los no válidos	28
Ecuación 16: Velocidad del sonido.....	31
Ecuación 17: Retardo de cada rayo	31
Ecuación 18: Atenuación del aire.....	33
Ecuación 19: Coeficiente de absorción al incidir en más de un material	33
Ecuación 20: Caracterización numérica del ecograma (tiempo discreto)	38
Ecuación 21: Tiempo de ejecución	41

1 Introducción y Objetivos

1.1 Introducción

El diseño acústico de salas, es un tema bastante complicado de realizar sin los programas específicos para tal fin. Estos programas de diseño de salas (como Odeon por ejemplo), son muy sencillos de utilizar y muy potentes, pero por contra son realmente caros. Por lo que se intentará conseguir que con un entorno de programación como Matlab, realizar una herramienta de simulación que sea capaz de realizar ciertas cualidades de ese tipo de programas.

Hay distintas maneras de abordar este proyecto, ya que hay varias maneras de llegar al mismo resultado, pero se ha considerado que la manera oportuna de hacerlo es utilizar la técnica basada en trazado de rayos mediante el uso de la imagen virtual de la fuente, en lugar de usar técnicas que están basados en modelado de ondas o en modelado estadístico. Se ha elegido esta técnica, porque es una técnica en la que se obtienen resultados bastante buenos y con una carga computacional inferior en comparación con el resto de técnicas posibles.

Este trabajo, está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, se abordarán los conceptos teóricos que son necesarios para poder obtener una solución al proyecto (tales como temas de propagación del sonido, acústica de salas, acústica geométrica, geometría, técnica de imagen virtual y respuesta al impulso de salas), después, vendrá un capítulo que explicará la metodología que se ha seguido para desarrollar la herramienta de simulación acústica con Matlab (tales como parámetros relativos a Matlab como de procedimientos necesarios para obtener los resultados esperados), a continuación viene un bloque en el que se comentarán los resultados obtenidos y distintas modificaciones que se han hecho al programa para obtener ciertas funciones. El siguiente capítulo, hablará sobre las conclusiones (tanto generales como específicas) obtenidas en la realización del proyecto y posibles líneas de mejora futuras, el penúltimo capítulo está la bibliografía utilizada para la realización del proyecto, dividida en función de los campos a los que se refieren, y en el último capítulo se encuentran los anexos que complementan la documentación necesaria e información de interés.

1.2 Objetivos

- **Objetivo General:**

El propósito principal de este proyecto es diseñar una sala variable (con sus características de materiales y difusiones asociadas) y mediante la ubicación de un emisor y un receptor en esa sala, estimar (hasta un número medio de reflexiones) cuál sería la señal recibida por ese receptor en la sala estudiada. Y con la señal recibida obtener la respuesta al impulso de la sala.

- **Objetivos específicos:**

- Profundizar en los conocimientos sobre acústica aplicado al diseño de salas.

- Investigar sobre los algoritmos existentes para el diseño de salas y ver cuál es el más eficiente a la hora de ser implementado en el lenguaje de programación elegido (Matlab).
- Programar de manera eficiente un trazado de rayos aplicado al diseño de la sala.
- Obtener un modelo lo más realista posible, a pesar de ser una simulación.
- Realizar estimaciones realistas, tanto a la hora de elegir parámetros de la sala (materiales y difusiones) como para las fuentes y receptores.
- Incentivar la utilización de un programa muy utilizado en la vida laboral, como es Matlab, para la programación de recintos acústicos.

2 Estudio Teórico

2.1 Introducción

En este capítulo se van a explicar los conceptos teóricos básicos para poder conceptualizar la problemática que hay que tratar de solventar. Para poder abordarlo, se ha dividido el capítulo en los diferentes grandes campos que se han considerado para la realización del proyecto, como son:

- Propagación del Sonido
- Acústica de Salas
- Acústica geométrica
- Geometría
- Imagen Virtual
- Respuesta al impulso de una sala

2.2 Propagación del Sonido

El sonido se produce debido a la vibración de una superficie, este sonido es generado por una fuente, puede ser un altavoz, un instrumento musical, etc... Este sonido generado, transcurre por el aire en forma de onda que va haciendo que las partículas que forman el aire oscilen (contrayendo y expandiéndolo), contribuyendo así al desplazamiento de la onda sonora.

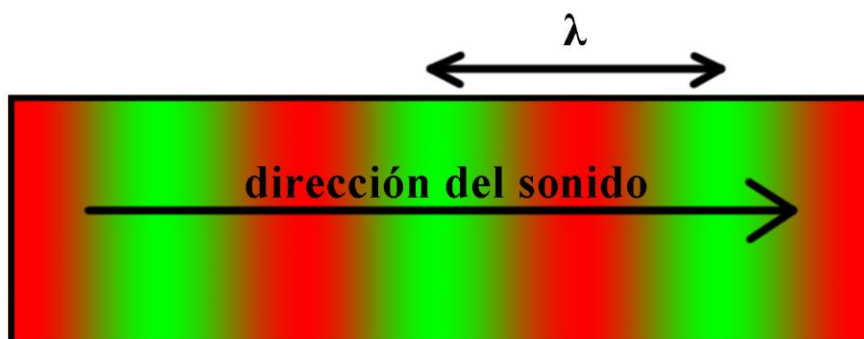


Figura 1: Compresión y dilatación de las partículas del aire para transmitir el sonido

Como se ve en la figura anterior, el sonido tiene una dirección de propagación con una longitud de onda determinada (la determina la fuente), hay zonas en las que el sonido está comprimido (zona roja) y zonas en las que el sonido está expandido (zona verde), esto hace posible que gracias a los movimientos de compresión-expansión, sea posible que el sonido se propague. Por ejemplo si se pone como fuente un altavoz, la vibración de la membrana, hace que se emita un sonido y este va a ir modificando la posición de las partículas del aire, contribuyendo así a la propagación del sonido.

El sonido, seguirá propagándose hasta que llegue a un receptor que lo recoja, a algún obstáculo que lo modifique o hasta que pierda toda energía que lleva para poder propagarse.

2.3 Acústica de Salas

La acústica de salas, está englobada en la denominada acústica arquitectónica.

Dentro de una sala en la que hay una fuente que emite un sonido y hay también un receptor, existen dos partes en las que el receptor obtendrá la señal emitida, en primer lugar recibirá como un sonido directo (como si se encontrara en campo abierto) y también recibirá la señal de forma indirecta, que es la señal que ha ido reflexionando por los distintos materiales y obstáculos que forman la sala hasta que ha llegado al receptor.

La potencia de señal recibida por el receptor para el caso del rayo directo, solo le afecta la distancia del emisor y la absorción producida por el aire, en cambio, a la señal reflejada, le afectan diversos factores, como son la distancia recorrida por el rayo, la absorción del aire, el orden de reflexión y los materiales sobre los que ha impactado el rayo, ya que al impactar, hay parte de la energía que es reflejada y otra parte la absorbe el material. Como es lógico, cuanto mayor tiempo de vuelo tenga el rayo o más materiales haya interseccionado, la energía asociada a ese rayo va a ser menor.

La absorción del aire, depende de la humedad relativa, de la frecuencia de la señal emitida y, en menor medida, de la temperatura y de la presión atmosférica a la que se encuentra la sala. La atenuación que produce el aire, puede expresarse con la siguiente ecuación

$$A_{aire} = \frac{X * d}{1000} (dB)$$

Ecuación 1: Absorción del aire

Donde, d, es la distancia que ha recorrido el rayo (en metros) y X es el coeficiente de atenuación atmosférica, y para conocer su valor, hay que consultar la *Tabla 4: Valor de la constante para la absorción del aire*.

Los materiales que forman la sala, tienen unas propiedades acústicas determinadas que no son iguales para todas las frecuencias incidentes. La cantidad de energía que puede absorber, la indica el coeficiente de absorción, el coeficiente de absorción es un valor comprendido entre cero y uno e indica la cantidad de energía que es capaz de absorber en función de la que ha incidido, estos valores se obtienen de manera experimental y cuando se dan, se dan para distintas bandas de octava, generalmente de la banda de 125 Hz hasta la de 4 KHz. El coeficiente de absorción se define como:

$$\alpha = \frac{\text{Energía Absorbida}}{\text{Energía Incidente}}$$

Ecuación 2: Coeficiente de absorción de un material

Para ver algún ejemplo de cómo se dan los coeficientes de absorción de algunos materiales, consultar el *Capítulo 7.1*, que ahí se encuentra una librería de los materiales que posteriormente en la realización del programa se utilizarán además de una descripción de los mismos y el uso para el que están destinados.

Una vez que se sabe que materiales están en cada superficie, de manera teórica se puede calcular el tiempo de reverberación de la sala, el cálculo de la manera teórica proporciona una idea

aproximada de lo que va a ser en la realidad, ya que en la realidad, el tiempo de reverberación se define como el tiempo que pasa desde que una fuente deja de emitir hasta que el nivel de presión sonora decae 60 dB. El tiempo de reverberación, como depende de los materiales, también se dará para cada banda de octava. Para calcularlo de modo teórico, hay que seguir la siguiente fórmula:

$$TR = 0.161 \frac{V}{\alpha S}$$

Ecuación 3: Tiempo de reverberación

Donde, V, representa el volumen de la sala (en m³), α, es el coeficiente de absorción del material y S, es el área de la superficie (m²) asociada al material. Pero como una sala no va a tener sólo un material, la ecuación puede reescribirse para quedar:

$$TR = 0.161 \frac{V}{\sum_i \alpha_i S_i}$$

Ecuación 4: Tiempo de reverberación (II)

2.4 Acústica Geométrica

En función de la manera en que se programe el algoritmo, hay varios tipos de modelos en función de cómo se resuelve la ecuación de onda, los más representativos, se encuentran en el siguiente esquema:

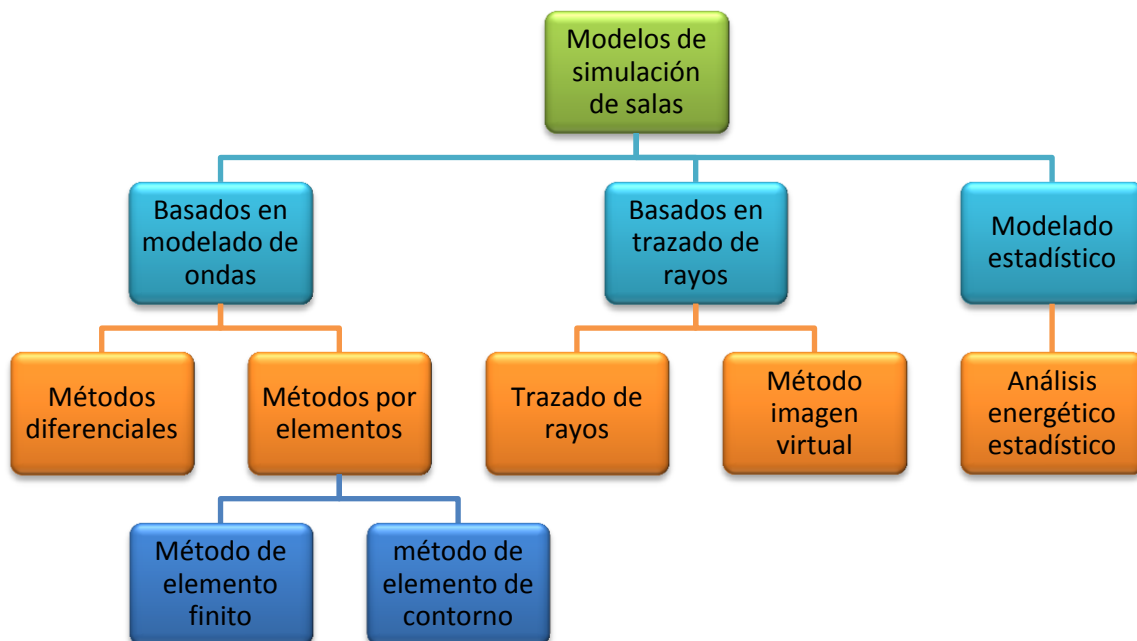


Figura 2: Tipos de modelos en función de la manera de resolver la ecuación de onda

En este caso, se considera óptimo el caso del método de la imagen virtual, que es el que más se aproxima a la acústica geométrica, ya que los basados en ondas y estadísticos son menos eficientes en comparación con los de trazado de rayos, además de que consumen muchos más recursos computacionales.

La acústica geométrica es la parte de la acústica que trata las ondas sonoras como rayos sonoros, que se reflejan y refractan sobre las superficies de manera especular en función del ángulo de incidencia, comportándose como rayos de luz en el régimen de óptica geométrica.

Esta hipótesis es válida cuando la longitud del espacio sobre el que reflejan los rayos (L) es superior que la longitud de onda del rayo incidente, es decir, $L > \lambda$.

Para el caso que se aborda en este proyecto, los rayos sonoros son los que están comprendidos entre las bandas de octava de 125 Hz y la de 4 KHz. En el peor de los casos, en el que la longitud de onda es mayor, va a ser a 125 Hz.

$$\lambda_{max} = \frac{C}{f_{min}} = \frac{340 \text{ (m/s)}}{125 \text{ (Hz)}} = 2.72 \text{ m}$$

Ecuación 5: Longitud de onda máxima

Como se ve en la ecuación anterior, en el peor de los casos, debemos de tener superficies que sean mayores a ese valor de longitud de onda.

Según las propiedades y procedencia, existen tres tipos de rayos, el incidente (proveniente de la fuente o de una reflexión anterior), el reflejado (que es el rayo que sale tras la reflexión contra un material) y el absorbido (que es el que, como su propio nombre indica, es absorbido por el material). Cabe recordar, que la capacidad de absorción de un material no es el mismo para todas las frecuencias, en este proyecto se ha dividido la capacidad de absorción de un material en las bandas de octava de 125 Hz hasta la de 4 KHz.

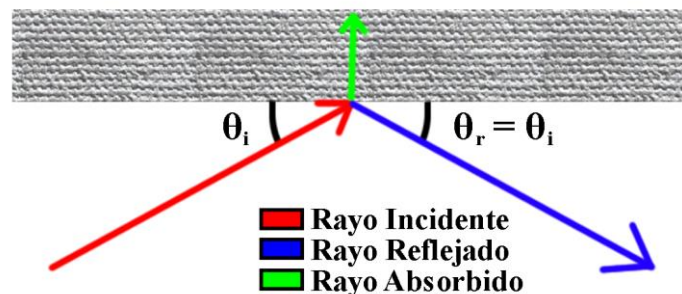


Figura 3: Tipo de rayos sonoros según las propiedades

Todos estos rayos, además de seguir las propiedades que se muestran en la imagen anterior, sufren una atenuación producida por el aire.

En la acústica geométrica existen tres tipos de rayos, el rayo directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante.

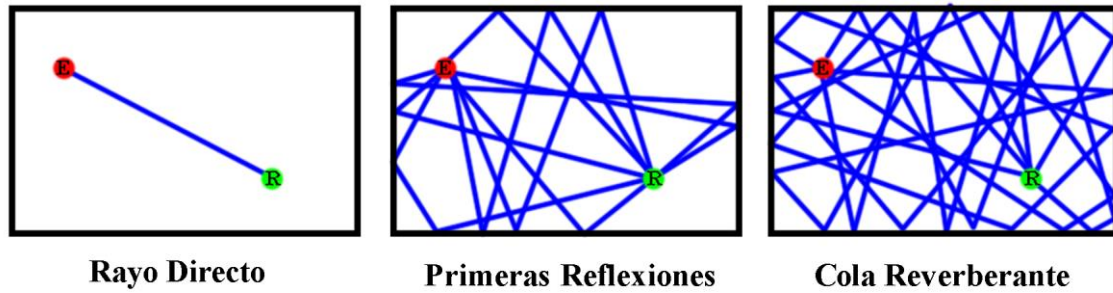


Figura 4: Tipos de rayos según el número de reflexiones

En la figura anterior, se representan el emisor como una bola roja con una 'E' dentro, el receptor, con una bola verde con una 'R' dentro y los distintos rayos acústicos están representados por las líneas azules que transcurren e intersectan sobre la sala (que es el cuadro negro).

El rayo directo va desde el emisor al receptor, sin sufrir atenuaciones debidas a las intersecciones con los materiales, solo le afecta la atenuación producida por el aire.

Las primeras reflexiones, son los rayos sonoros que han sufrido un orden de reflexiones pequeños, existen distintos autores, que indican que estas primeras reflexiones van desde rayos que han sufrido 3 hasta los que han sufrido 6, otros autores indican que son los rayos que tardan en llegar 100 ms desde la llegada del rayo directo. Además de la atenuación producida por el aire, a estos rayos también les afecta la absorción producida por los materiales (paredes, techos, suelos, objetos...) que en función del material que sean, tendrán una absorción y una refracción determinadas.

La cola reverberante son los rayos que tienen menor potencia acústica debido a que al ser de órdenes de reflexión superiores, se atenúan mucho debido a que la absorción del aire y de los materiales es mayor.

En la siguiente figura, se representan todos los tipos de rayos en un ecograma, que relaciona el nivel de presión sonora al llegar al receptor con respecto al retardo en llegar:

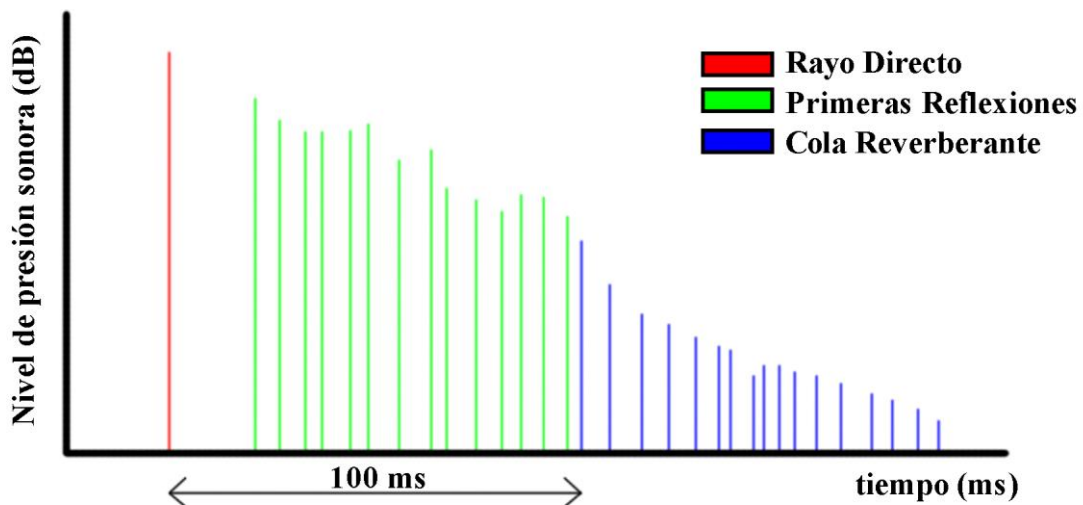


Figura 5: Ecograma que indica los tipos de rayos

Como es lógico cuanto mayor sea el orden del rayo, mayor es la absorción del aire (ya que crece linealmente con el tiempo que el rayo está transcurriendo por la sala) y también la absorción de los materiales, llegando hasta el punto que el rayo se pierde (o tiene una potencia acústica tal que el receptor no es capaz de identificarlo). El caso extremo es el caso en el que tenemos unos materiales que absorben toda la potencia incidente y no reflexionan nada, independientemente del orden de la reflexión del rayo. En este caso, la sala sería una sala anecoica, que es una sala en la que imita el comportamiento acústico de estar en campo libre.

2.5 Geometría

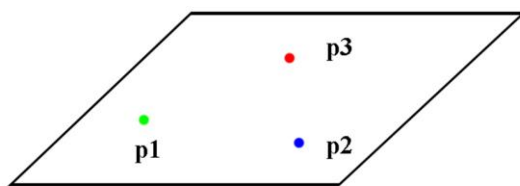
En este apartado se van a recordar conocimientos básicos de la geometría en el espacio (3D) que son necesarias para la realización del proyecto. Tales como parámetros para definir un plano, obtener el punto simétrico de un punto con respecto a un plano, realizar intersecciones entre recta formada por dos puntos y un plano u obtener la distancia que hay entre dos puntos.

2.5.1 Definición de un plano

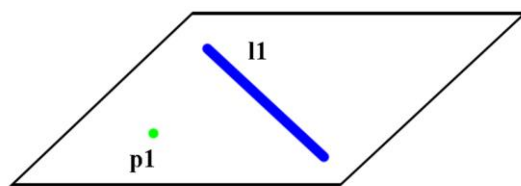
Un plano, es una superficie en dos dimensiones en el espacio que contiene infinitos puntos y rectas con unas determinadas propiedades. Aplicado a este proyecto, los planos, van a ser las superficies planas que van a delimitar la sala estudiada, o en otras palabras, serán las paredes, suelos y techos de la sala.

Un plano se puede definir de varias maneras posibles:

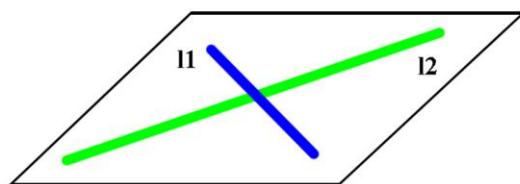
- Con tres puntos no alineados
- Con una recta y un punto que no pertenece a la misma
- Con dos rectas (pueden ser paralelas o dos rectas que se cortan).



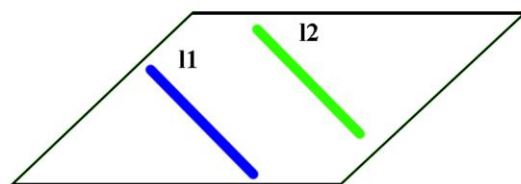
Plano definido por 3 puntos



Plano definido por una recta y un punto



Plano definido por 2 rectas secantes



Plano definido por 2 rectas paralelas

Figura 6: Tipos de planos según su definición

En este proyecto, se usa la definición de un plano por medio de tres puntos. Cada plano definido para el proyecto, se obtiene de la elección de tres de los cuatro puntos que forman los vértices de las distintas superficies.

Una vez que está clara la forma por la que se van a obtener los distintos planos, es hora de obtener la ecuación que lo define. Para ello habrá que seguir los siguientes pasos:

- **Punto de partida, los tres puntos:**

Se parte de las coordenadas de los 3 puntos:

$$p_1 = (x_1 \quad y_1 \quad z_1)$$

$$p_2 = (x_2 \quad y_2 \quad z_2)$$

$$p_3 = (x_3 \quad y_3 \quad z_3)$$

- **Obtener los vectores directores:**

Para obtener los vectores directores, hay que restar dos de los puntos con el restante:

$$\vec{U} = p_2 - p_1 = (x_2 - x_1 \quad y_2 - y_1 \quad z_2 - z_1) = (x_U \quad y_U \quad z_U)$$

$$\vec{V} = p_3 - p_1 = (x_3 - x_1 \quad y_3 - y_1 \quad z_3 - z_1) = (x_V \quad y_V \quad z_V)$$

- **Resolver el determinante:**

Para obtener la ecuación que define el plano, hay que resolver que el siguiente determinante sea igual a cero:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & x_U & x_V \\ y - y_1 & y_U & y_V \\ z - z_1 & z_U & z_V \end{vmatrix} = 0$$

- **Simplificar:**

Para simplificar este determinante, se puede hacer mediante la descomposición por adjuntos, obteniendo lo siguiente:

$$\begin{vmatrix} y_U & y_V \\ z_U & z_V \end{vmatrix} (x - x_1) - \begin{vmatrix} x_U & x_V \\ z_U & z_V \end{vmatrix} (y - y_1) + \begin{vmatrix} x_U & x_V \\ y_U & y_V \end{vmatrix} (z - z_1) = 0$$

$$(y_U * z_V - y_V * z_U) * x - (x_U * z_V - x_V * z_U) * y + (x_U * y_V - x_V * y_U) * z + (-x_1 * (y_U * z_V - y_V * z_U) + y_1 * (x_U * z_V - x_V * z_U) - z_1 * (x_U * y_V - x_V * y_U)) = 0$$

Simplificando al máximo obtenemos la ecuación general del plano, que se puede escribir como:

$$A * x + B * y + C * z + D = 0$$

Ecuación 6: Ecuación del plano

Donde

$$\begin{cases} A = (y_U * z_V - y_V * z_U) \\ B = (x_U * z_V - x_V * z_U) \\ C = (x_U * y_V - x_V * y_U) \\ D = (-x_1 * A + y_1 * B - z_1 * C) \end{cases}$$

Ecuación 7: Cálculo de los coeficientes que definen el plano

Una vez que ya se tienen los coeficientes que definen el plano, procederemos a trabajar con ellos.

Como para la realización de este proyecto se utiliza Matlab, con programar estas fórmulas es suficiente, no es preciso obtener los determinantes.

2.5.2 Punto simétrico con respecto a un plano

Esta sección es clave para entender y poder ejecutar correctamente el proceso de la imagen virtual de un punto.

Para hacerlo, se parte de un plano P y un punto p a una distancia d tal como muestra la siguiente figura.

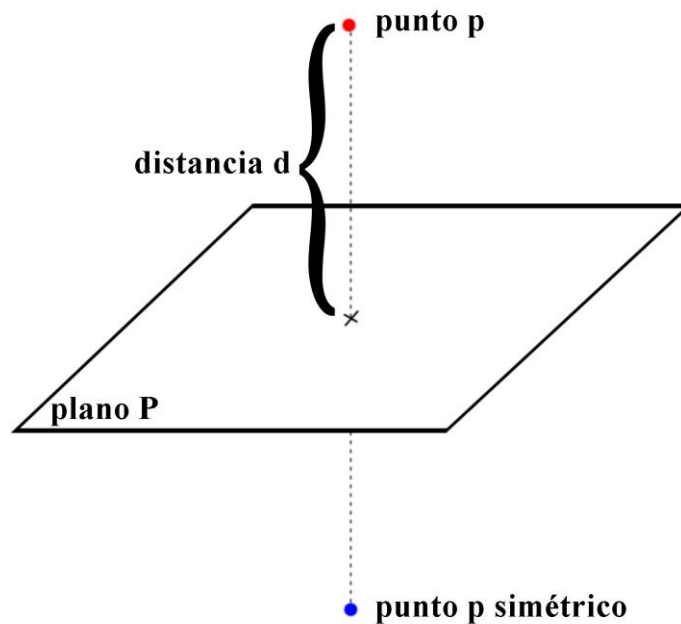


Figura 7: Punto simétrico con respecto a un plano

Para obtener el punto p simétrico se debe trazar una recta perpendicular al plano P, que pase por el punto p y a partir de aquí trasladar la distancia d al otro lado del plano.

Matemáticamente se haría del siguiente modo:

- **Punto de partida, ecuación del plano P y punto p:**
Como punto de partida tenemos la ecuación del plano:

$$A * x + B * y + C * z + D = 0$$

Y el punto p

$$p = (x_p \quad y_p \quad z_p)$$

- **Obtener el vector perpendicular:**

El vector perpendicular al plano P es el siguiente:

$$\vec{v} = (A \quad B \quad C)$$

- **Ecuación de la recta:**

Para obtener la recta perpendicular al plano, lo más fácil es obtener la ecuación en forma continua, y se haría del siguiente modo:

$$\frac{x - x_p}{A} = \frac{y - y_p}{B} = \frac{z - z_p}{C}$$

Ecuación 8: Ecuación continua de la recta

- **Cálculo de la posición del punto simétrico:**

Para el cálculo del punto simétrico, primero se debe saber la distancia a la que se encuentra el punto del plano, se calculará obteniendo la intersección de la recta y el plano y posteriormente calculando la distancia entre el punto de intersección y el punto p. Se hará del modo en el que está explicado en los apartados *Intersección entre una línea y un plano* y *Distancia entre dos puntos*.

Una vez que se tiene la distancia calculada y el punto de intersección de la recta con el plano, se debe obtener el punto que pertenece a la recta que se encuentra a la misma distancia del punto p, pero al otro lado del plano P, o con otras palabras, se debe obtener el punto de la recta que se encuentra a una distancia 2d desde el punto p.

- o Primero hay que convertir el vector que define la recta de manera que mejor conviene para este caso.

El nuevo vector se puede escribir como el vector formado por la resta del punto p y el punto de intersección de la recta y el plano:

$$\vec{v} = (x_p - x_i \quad y_p - y_i \quad z_p - z_i)$$

- o Posteriormente se recalculan las ecuaciones paramétricas de la recta:

$$\begin{cases} x = x_p - t * x_v \\ y = y_p - t * y_v \\ z = z_p - t * z_v \end{cases}$$

Ecuación 9: Ecuaciones paramétricas de la recta

- o El siguiente paso es calcular el valor de t que proporcionará las coordenadas a la distancia d', que en este caso va a ser 2d.

$$2d = \sqrt{(x_p - (x_p - t * x_v))^2 + (y_p - (y_p - t * y_v))^2 + (z_p - (z_p - t * z_v))^2}$$

$$t = \sqrt{\frac{4 * d^2}{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2}}$$

- El último paso, para obtener las coordenadas del punto simétrico es sustituir el valor recién calculado en las ecuaciones paramétricas de la recta.

$$\begin{cases} x = x_p - \sqrt{\frac{4 * d^2}{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2}} * x_v \\ y = y_p - \sqrt{\frac{4 * d^2}{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2}} * y_v \\ z = z_p - \sqrt{\frac{4 * d^2}{x_v^2 + y_v^2 + z_v^2}} * z_v \end{cases}$$

Ecuación 10: Coordenadas del punto simétrico con respecto al plano

Realizar este procedimiento en Matlab, es un procedimiento muy costoso computacionalmente, así que se enfoca de distinta manera para que el costo computacional sea menor. Para hacerlo debemos seguir estos cuatro pasos:

- **Punto de partida, punto p y el vector unitario normal al plano P:**

Este primer paso es igual que en procedimiento anterior:

Se define el punto p:

$$p = (x_p \quad y_p \quad z_p)$$

Y el vector unitario normal al plano:

$$\vec{v} = (A \quad B \quad C)$$

- **Calcular la distancia del plano al origen de coordenadas:**

Esta distancia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$d_{p-origen} = \left| \frac{D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right|$$

- **Distancia entre el punto p y el plano P:**

Esta distancia se calcula mediante la siguiente expresión:

$$d_{p-p} = d_{p-origen} - p * \vec{v}$$

- **Coordenadas del punto simétrico:**

$$p_{simetrico} = p + 2 * d_{p-p} * \vec{v}$$

Ecuación 11: Coordenadas de la posición de un punto simétrico a un plano

Como se ve este segundo método es mucho más sencillo y eficiente de programar en entornos de programación como Matlab.

2.5.3 Intersección entre una línea y un plano

Para poder calcular la intersección entre una recta y un plano, se necesita una recta y un plano para así obtener (si existe, ya que la recta puede ser paralela al plano o incluso coincidente) el punto en el que ambos espacios geométricos interseccionan.

Matemáticamente, se abordaría este problema del siguiente modo:

- **Punto de partida ecuación del plano y recta definida por dos puntos:**

Se parte de la ecuación del plano

$$A * x + B * y + C * z + D = 0$$

Y de dos puntos que forman una recta:

$$p_1 = (x_1 \quad y_1 \quad z_1)$$

$$p_2 = (x_2 \quad y_2 \quad z_2)$$

- **Formar la recta:**

Para obtener la ecuación de la recta, primero se obtiene el vector director de la misma:

$$\vec{U} = p_2 - p_1 = (x_2 - x_1 \quad y_2 - y_1 \quad z_2 - z_1) = (x_U \quad y_U \quad z_U)$$

Con el vector, obtenemos la ecuación vectorial de la recta:

$$(x \quad y \quad z) = p_1 + t * \vec{U} = (x_1 \quad y_1 \quad z_1) + t * (x_U \quad y_U \quad z_U)$$

El siguiente paso es convertir la ecuación vectorial en las ecuaciones paramétricas

$$\begin{cases} x = x_1 + t * x_u \\ y = y_1 + t * y_u \\ z = z_1 + t * z_u \end{cases}$$

- **Calcular la intersección:**

Para calcular la intersección se debe sustituir las ecuaciones paramétricas de la recta en la ecuación del plano e igualar a cero para así obtener el resultado de la incógnita t.

$$A * (x_1 + t * x_u) + B * (y_1 + t * y_u) + C * (z_1 + t * z_u) + D = 0$$

Simplificando:

$$t = - \frac{A * x_1 + B * y_1 + C * z_1 + D}{A * x_u + B * y_u + C * z_u}$$

El último paso para obtener las coordenadas del punto de intersección es sustituir el valor obtenido de t en las ecuaciones paramétricas de la recta para así obtener las coordenadas de la intersección.

$$\begin{cases} x = x_1 - \frac{A * x_1 + B * y_1 + C * z_1 + D}{A * x_u + B * y_u + C * z_u} * x_u \\ y = y_1 - \frac{A * x_1 + B * y_1 + C * z_1 + D}{A * x_u + B * y_u + C * z_u} * y_u \\ z = z_1 - \frac{A * x_1 + B * y_1 + C * z_1 + D}{A * x_u + B * y_u + C * z_u} * z_u \end{cases}$$

Ecuación 12: Coordenadas del punto de intersección entre recta y plano

2.5.4 Distancia entre dos puntos

Para poder calcular la distancia entre dos puntos, el procedimiento va a ser el de calcular la distancia euclídea entre ambos. Para ello se hará del siguiente modo:

- **Punto de partida, dos puntos:**

$$p_1 = (x_1 \quad y_1 \quad z_1)$$

$$p_2 = (x_2 \quad y_2 \quad z_2)$$

- **Calcular la distancia:**

La distancia euclídea, se calcula con la siguiente expresión:

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

Ecuación 13: Distancia euclídea entre dos puntos

2.6 Imagen Virtual

La técnica de la imagen virtual, es una técnica que se basa en la acústica geométrica para poder llegar a obtener la respuesta al impulso de la sala estudiada. Esta técnica es una técnica que es muy sencilla de entender y que además (como se verá en capítulos posteriores) es capaz de obtener resultados bastante buenos.

2.6.1 Caso de orden uno

Para explicar esta técnica, lo más claro va a ser explicarlo mediante un ejemplo, para ello, se parte de una sala en la que se quieren conocer los rayos que van del emisor al receptor. A partir de aquí, en todas las imágenes que se muestran, el emisor, se representa con una bola roja y el receptor con una bola verde.

Siguiendo el nombre de la técnica, el primer paso va a ser el de obtener la imagen virtual de la fuente, para ello, hay que ver la distancia a la que se encuentra el emisor del plano sobre el que se quiere hacer la reflexión y trasladar esa distancia hacia el otro lado del plano. En la siguiente imagen, se muestra cómo realizar este primer paso.

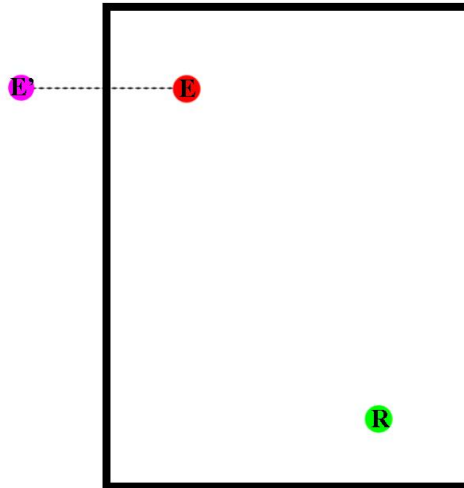


Figura 8: Trazado rayos de orden 1, obtener imagen virtual de la fuente

En este primer ejemplo se va a calcular una reflexión de orden 1, así que el siguiente paso va a ser el de obtener el punto de intersección del plano de reflexión con la recta formada por el receptor y el punto simétrico de la fuente (representado en la imagen con una bola de color magenta con la inscripción E' en el interior).

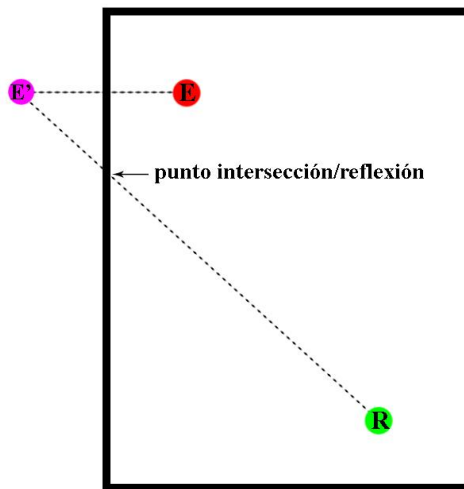


Figura 9: Trazado rayos de orden 1, cálculo del punto de intersección

El último paso es obtener el rayo, que va a ser unir el receptor con el punto de intersección y a su vez, este punto con el emisor

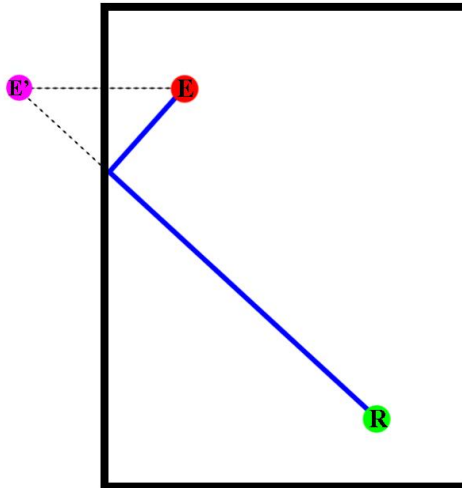


Figura 10: Trazado rayos de orden 1, Construcción del rayo

2.6.2 Caso de orden tres

Para órdenes de reflexiones superiores, el procedimiento a realizar es el mismo, pero haciendo las reflexiones necesarias para llegar al orden deseado. A continuación se va a presentar un trazado de rayos de orden 3.

El punto de partida, como en el caso anterior, es el mismo, sólo que en este caso, después de obtener el primer punto de simetría, se obtiene el punto de simetría número dos con respecto al plano de arriba (tal como lo define la línea punteada gruesa) y para obtener el punto de simetría tres, se hace sobre el plano de la derecha con respecto al punto simétrico dos. El modo de ejecución se repite en la imagen.

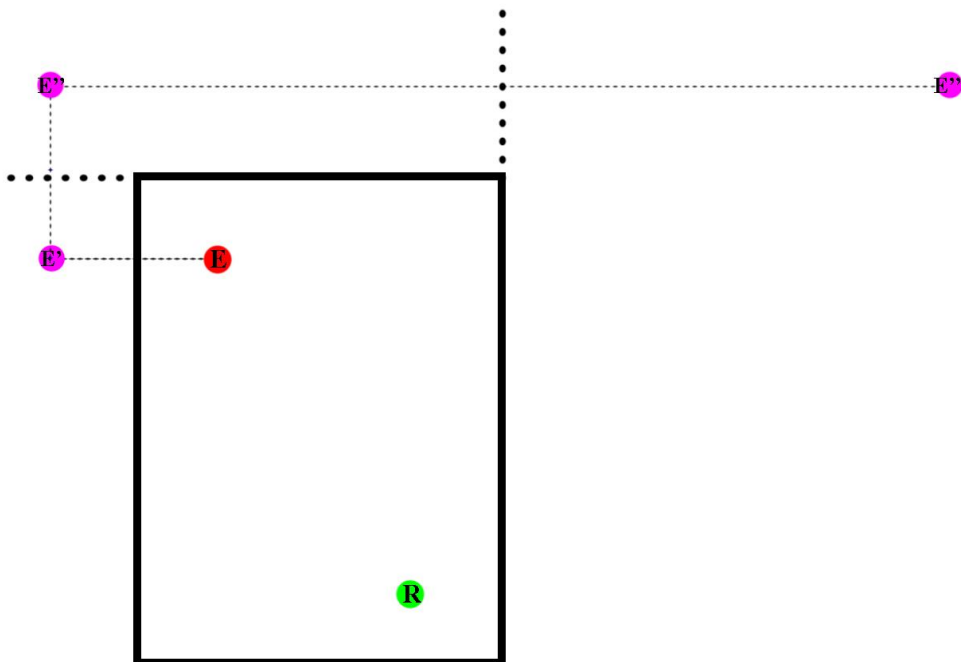


Figura 11: Trazado rayos de orden 3, obtención de los puntos de simetría

El siguiente paso, es como en el caso anterior, unir el receptor con el último punto de simetría para así obtener el primer punto de intersección.

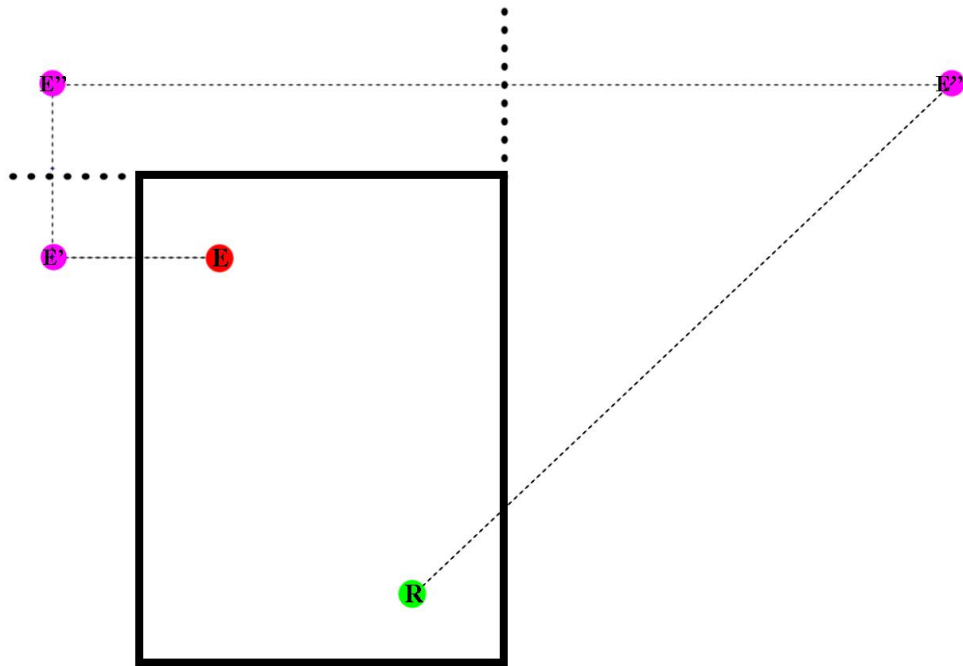


Figura 12: Trazado rayos de orden 3, cálculo del punto de intersección uno

A continuación hay que repetir este proceso para obtener todos los puntos de intersección, en primer lugar para calcular el siguiente punto de intersección se trazará la línea que une el punto simétrico dos y el punto de intersección uno; y para calcular el tercer punto de intersección del mismo modo, se obtendrá al unir el punto de intersección dos con el punto simétrico uno. En la imagen, se describe de nuevo el proceso.

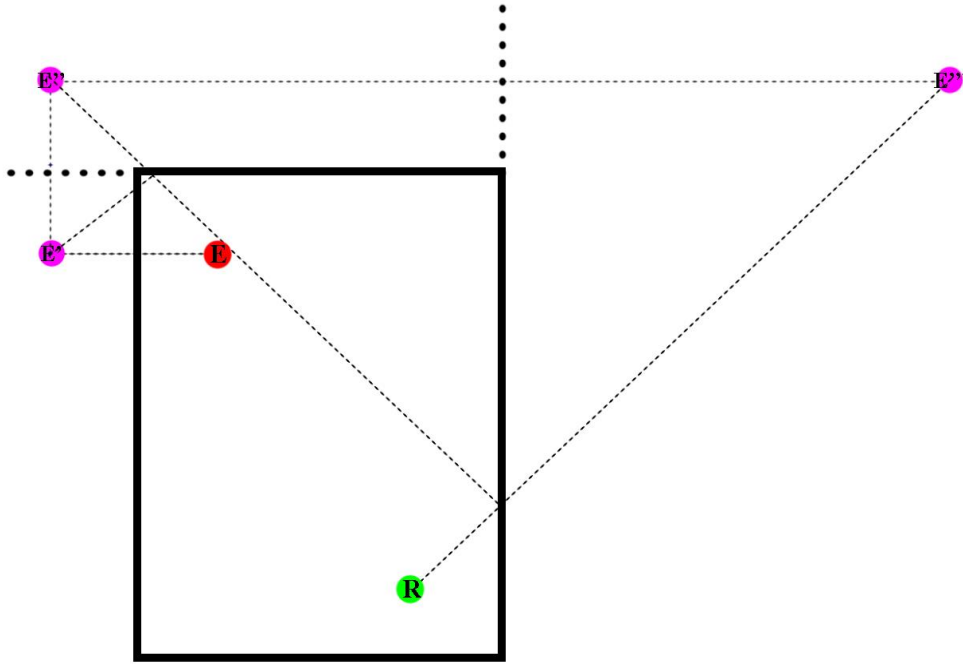


Figura 13: Trazado rayos de orden 3, cálculo del resto de puntos de intersección

El último paso a dar es el de unir los puntos que van a formar el rayo, uniendo el receptor con los puntos de intersección hasta llegar al emisor, pasando por todos los puntos de simetría.

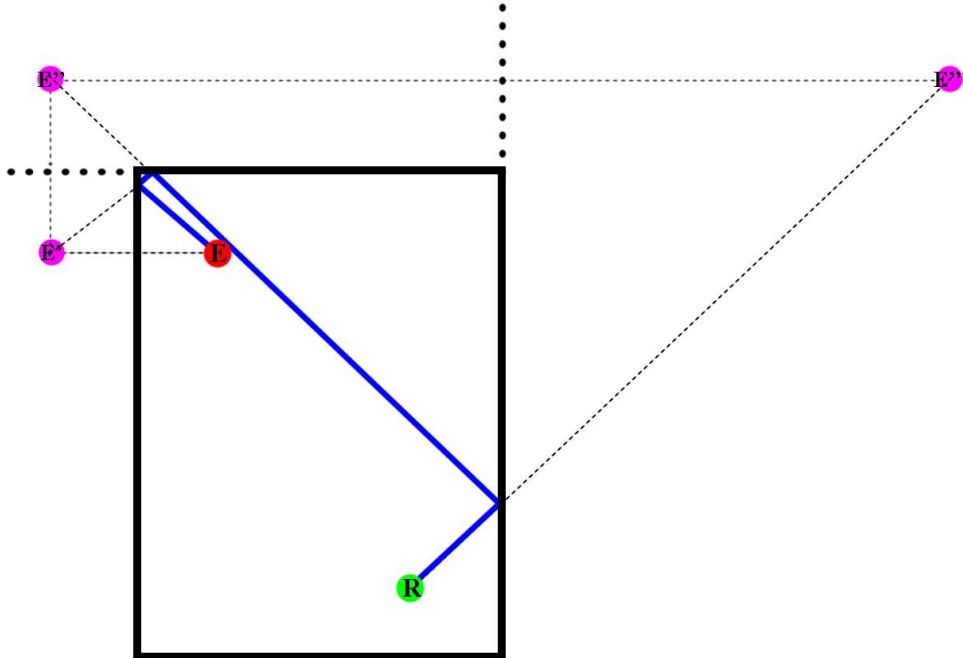


Figura 14: Trazado rayos de orden 3, construcción del rayo

2.6.3 Caso de rayo imposible

Hay casos que aunque se siga los procedimientos que aquí se han ido contando, no llegan a producir un rayo válido debido a que el rayo no hace intersección en el plano deseado, a continuación se muestra una secuencia de imágenes que lo demuestra:

Como siempre, se parte de una sala con un emisor y un receptor en la que se han calculado los puntos de imagen virtual de la fuente, en este caso de un posible rayo de orden tres (el primer punto simétrico sobre el plano de la izquierda, el segundo sobre el de abajo y el tercero sobre el plano de la derecha)

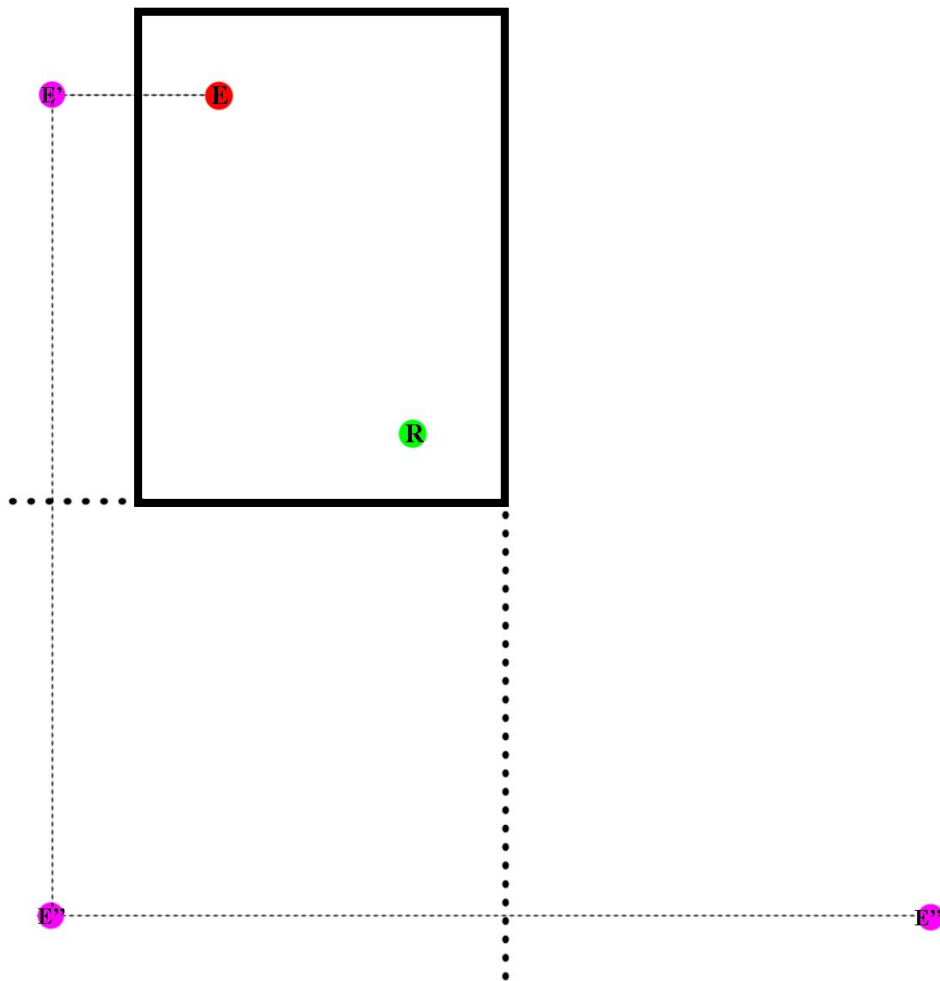


Figura 15: Trazado rayos de orden 3 imposible, obtención de los puntos de simetría

Una vez que se tienen los puntos de la imagen virtual de la fuente, el siguiente paso es obtener los puntos en los que el rayo produce la intersección con el plano.

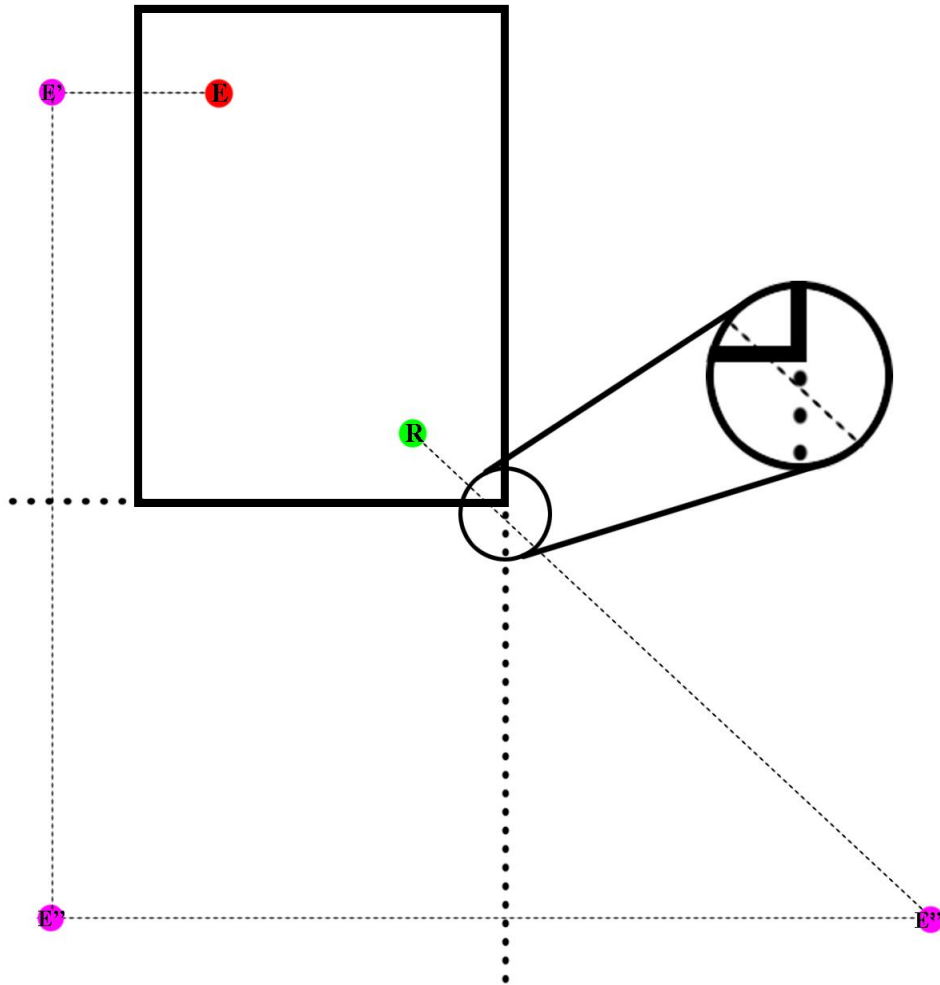


Figura 16: Trazado rayos de orden 3 imposible, obtener los puntos de intersección

Como se ve en la imagen, al intentar obtener el punto de intersección del punto simétrico de la fuente número tres con el receptor, el punto de intersección con el plano de interés (que es el plano de la derecha), se da sobre la línea punteada gruesa, o en otras palabras, se da fuera de la sala de estudio, como ya se ha dado esta situación, no tiene sentido seguir obteniendo los puntos de intersección, por lo que se concluye con que este rayo no es válido para esta sala y la posición del emisor y el receptor.

Posteriormente, en el capítulo destinado al *Cálculo de la imagen virtual*, se explicará cómo se ha afrontado y realizado la programación de esta técnica con Matlab.

2.7 Respuesta al impulso de una sala

Para obtener la respuesta al impulso de una sala, en este caso hay que fijarse en el ecograma que se ha obtenido (*Figura 5* o *Figura 25*). En ellos, está representada la energía acústica que llega al receptor (ya sea en dB o en W), con respecto al tiempo que tarda en llegar.

La respuesta al impulso se define como la señal recibida cuando se excita la sala con una señal $x(t)$ que es una delta ($\delta(t)$). En el caso estudiado, en realidad para obtener el trazado de rayos, no se está excitando la sala con una señal concreta ya que sólo interesa la atenuación y el retardo, así que a efectos prácticos, el ecograma obtenido, se puede decir que la señal de excitación es una delta. Si se representa el ecograma de forma numérica se obtiene:

$$h(t) = y(t) = \sum_{i=1}^{num_rayos} atenuacion_i \delta(t - retardo_i)$$

Ecuación 14: Caracterización numérica del ecograma (tiempo continuo)

Una vez que se tiene la respuesta al impulso calculada, se puede proceder a auralizar señales. Auralizar consiste en obtener la señal que recibiría un receptor en la sala cuando se emite una señal. Para poder auralizar una señal con respecto a una sala determinada, hay que obtener lo que indica la siguiente figura.

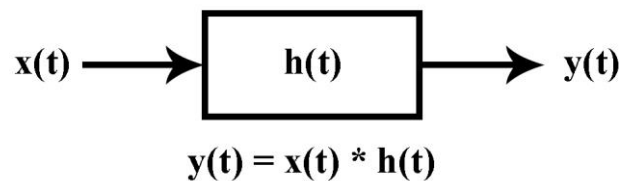


Figura 17: Respuesta al impulso

Cuando se estimula la sala, el emisor emite una señal $x(t)$. Pero el receptor no recibe $x(t)$, sino que recibe $y(t)$, que viene del resultado de convolucionar la señal emitida con la respuesta al impulso de la sala $x(t)*h(t)$.

Como los rayos que se obtienen mediante la técnica de la imagen virtual, para darle mayor calidez al resultado, se ha optado por añadir una cola reverberante, que consiste en añadir “rayos virtuales”, que no han sido simulados por el algoritmo, pero estos rayos, tienen una atenuación y un retardo, que va a seguir una línea recta descendente. Con esta técnica tan sencilla, se mejora el resultado, sobre todo en las salas grandes (salas que tienen un volumen alto), porque de no usar esta técnica, da impresión de que el sonido obtenido no es real.

3 Desarrollo

Para la ejecución de este proyecto, se han creado diversas funciones en Matlab (consultar capítulo 7.4) que cuando se ejecutan en un orden determinado, se obtiene el resultado buscado de simular la acústica de la sala formada. Pero, como se ha citado anteriormente, el objetivo principal es el de obtener mediante Matlab, una herramienta que sea capaz de simular la acústica de una sala.

En los sucesivos apartados se van a ir explicando el funcionamiento de estas funciones creadas y cómo modificarlas para poder lograr simular una sala que sea distinta a la que está creada por defecto:

3.1 Definición de los parámetros que forman la sala

Los parámetros que se exponen a continuación, son los parámetros que realmente caracterizan la sala estudiada. El usuario, podrá modificarlos, ya que se encuentran en variables, que encabezan el programa principal (*main.m*). Por defecto y como punto de partida, la sala que se ha creado, es una sala que tiene la forma de un paralelepípedo (ya que es la forma de sala más sencilla), por lo que para definir las características que van a dar la forma de la sala, sólo se va a necesitar ajustar las variables que corresponden a la longitud, anchura y altura de la sala. Una ventaja de hacerlo de esta manera es que con definir estas tres variables, podemos obtener los 8 vértices que forman la sala y posteriormente se utilizará para obtener los planos que formarán las paredes, el suelo y el techo. Definiendo estos parámetros, como se ve en la siguiente imagen ya es posible definir la sala (por lo menos en cuanto a las propiedades de forma que se refieren). En el caso de querer hacer una sala más compleja (que no sea un paralelepípedo), habría que meter los puntos a mano uno a uno y con los puntos definidos formar los planos que forman la sala.

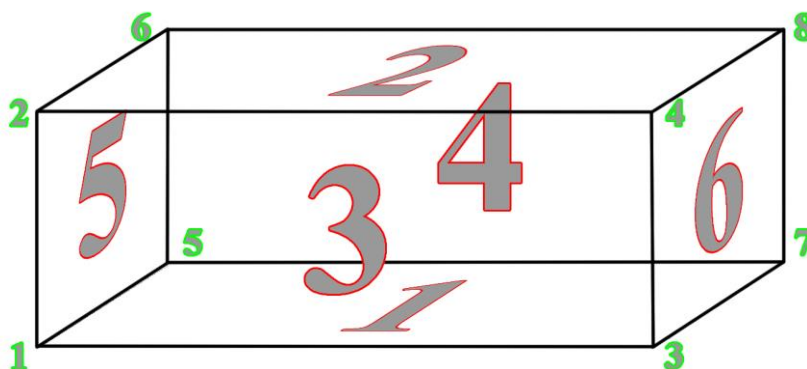


Figura 18: Ejemplo de una sala tras definir los parámetros de ancho, largo y alto

En la imagen se muestra la numeración de los puntos que se va a seguir de aquí en adelante, para consultar la numeración de los planos consultar *Tabla 2*:

PUNTO	COORDENADAS	PUNTO	COORDENADAS
1	(0, 0, 0)	5	(0, ancho, 0)
2	(0, 0, alto)	6	(0, ancho, alto)
3	(largo, 0, 0)	7	(largo, ancho, 0)
4	(largo, 0, alto)	8	(largo, ancho, alto)

Tabla 1: Numeración de los puntos que forman el paralelepípedo

Cuando está la sala definida, el siguiente paso es asignarle a cada plano que forma la sala, un material, para ello hay que consultar el *Anexo 1: Lista de materiales empleados*, en el, se puede ver la lista completa de materiales con sus coeficientes de absorción correspondientes para cada banda de octava. Para poder asignar el material deseado al plano, se ha creado en Matlab, una estructura, que contiene todos los materiales divididos en los distintos tipos que hay.

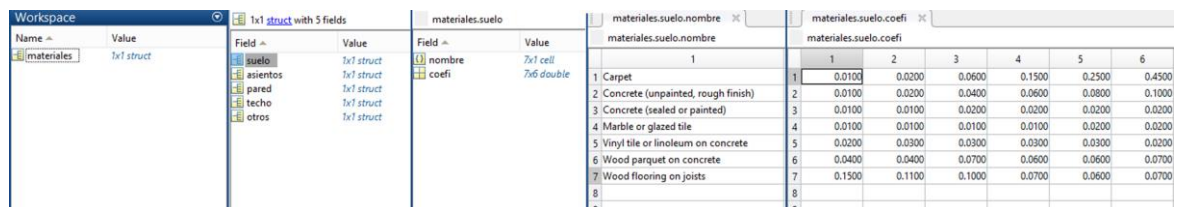


Figura 19: Estructura de los materiales

Como se ve en la primera parte de la figura anterior, está definida la estructura que contiene los materiales, la segunda parte, está contenida en la primera, y a su vez, contiene las distintas categorías de los distintos materiales que hay. Pasando a la tercera parte, es lo que sucede cuando entras dentro de alguna de las categorías (en el caso de la imagen es de los materiales del suelo), te encuentras con dos divisiones, una que se llama nombre y corresponde con la parte 4 y la otra que se llama coefi, que corresponde con la parte 5. Para seleccionar el material, se recomienda navegar por la estructura (por los bloques de nombres) hasta encontrar el material que interesa, posteriormente hay que recordar el índice del material deseado y seleccionarlo del bloque de coeficientes correspondiente (el que está asociado a esa categoría de nombres).

De manera teórica, como ya se tienen los vértices que forman la sala, se puede calcular (y al ser un paralelepípedo es muy sencillo) la superficie de cada plano y el volumen total de la sala, con estos datos, se puede calcular el tiempo de reverberación teórico de nuestra sala (consultar *Ecuación 4*), que posteriormente se utilizará para compararlo con el tiempo de reverberación que se obtiene mediante la simulación.

Como se ha visto en el capítulo 2.3, otros parámetros que son importantes a la hora de definir correctamente una sala, son la humedad y la temperatura a la que se encuentra la sala. Ya que estas dos magnitudes físicas influyen, y mucho, en la absorción producida por el aire, y por consiguiente en la correcta caracterización de la sala estudiada.

Otros parámetros importantes son la posición que va a tener el emisor y el receptor, como es un espacio tridimensional, a cada uno de ellos hay que darle sus tres coordenadas para tenerlo completamente definido en el espacio. En el caso de localizarlos fuera de los límites de la sala, el propio programa indicará que no se están ubicando del modo correcto.

El último parámetro que se puede configurar en esta parte del programa, es el orden de reflexiones que se van a calcular de modo real ya que posteriormente se añade una cola de reverberación para que el sonido obtenido en las auralizaciones sea lo más realista posible. Como se ha indicado anteriormente, con el ordenador que se ha creado el programa, cuando se fija un orden de reflexiones superior a 9, el programa no responde y hay que reiniciar el ordenador, por lo que no se recomienda llegar a órdenes tan altos.

3.2 Obtener coeficientes de los planos

Para poder ejecutar el algoritmo que se encargue de las tareas sucesivas, se necesita saber los coeficientes que tienen cada uno de los planos que forman la sala. Para ello, se seguirán los pasos demostrados en el capítulo de *Definición de un plano*, con el objetivo de obtener la ecuación que define cada plano (como la *Ecuación 6: Ecuación del plano* y la *Ecuación 7: Cálculo de los coeficientes que definen el plano*).

Como se ha visto en la sección *Definición de un plano* y se ha comentado, para crear un plano, se ha optado por la opción de crearlo a partir de tres puntos. Como cada plano tiene 4 puntos (los cuatro vértices de la sala que le corresponden al plano), sólo se han elegido tres.

En la siguiente tabla se muestra qué puntos se han seleccionado para cada plano del paralelepípedo:

Número de plano	Descripción	Puntos que lo forman	Puntos elegidos
1	Suelo	p1 p3 p5 p7	p1 p3 p5
2	Techo	p2 p4 p6 p8	p2 p4 p6
3	Pared Frontal	p1 p2 p3 p4	p1 p2 p4
4	Pared Trasera	p5 p6 p7 p8	p5 p6 p8
5	Pared Izquierda	p1 p2 p5 p6	p5 p6 p2
6	Pared Derecha	p3 p4 p7 p8	p7 p8 p4

Tabla 2: Descripción de los planos del paralelepípedo

Las descripciones de los planos se corresponden con las definidas desde el ángulo de visión que se muestra en la *Figura 18: Ejemplo de una sala tras definir los parámetros de ancho, largo y alto*.

Entonces, se ha programado en Matlab una función llamada *coef_plano.m*, obtiene para cada punto de entrada los coeficientes A, B, C y D. Para ello, hay que pasarle como parámetros de entrada los tres puntos y devuelve un vector con los coeficientes. En el caso de la sala con forma de paralelepípedo se obtendría:

Número de plano	Descripción	Ecuación del plano	Coefficientes A-B-C-D
1	Suelo	$z = 0$	0 0 1 0
2	Techo	$z = \text{altura}$	0 0 1 -h
3	Pared Frontal	$y = 0$	0 1 0 0
4	Pared Trasera	$y = \text{anchura}$	0 1 0 -a
5	Pared Izquierda	$x = 0$	1 0 0 0
6	Pared Derecha	$x = \text{longitud}$	1 0 0 -l

Tabla 3: Ecuaciones del plano del paralelepípedo

3.3 Algoritmo

Se ha creado una función de Matlab, llamada *algoritmo.m*, que realiza las funciones de que proporcionándole como entradas la posición de la fuente, la del receptor, el orden de reflexiones que se quiere llegar, los coeficientes de los planos que forman la sala y un vector que contienen el

valor de los vértices que forman cada plano, es capaz de obtener unas estructuras con los valores más representativos del rayo directos como de todos los reflejados.

Este algoritmo debe de realizar varios pasos, en primer lugar hay que calcular la imagen virtual de la fuente, en segundo lugar hay que obtener la intersección entre línea y plano y por último hay que calcular la distancia entre dos puntos para ir creando el rayo. En los sucesivos capítulos se irá informando del funcionamiento de cada uno de estos pasos.

3.3.1 Cálculo de la imagen virtual

Anteriormente, en el capítulo 2.6 *Imagen Virtual*, se ha expuesto de modo gráfico en qué consiste el cálculo de la imagen virtual, en este apartado, se va a comentar como convertir esos procedimientos que gráficamente son muy sencillos a una programación de texto con Matlab.

Para hacerlo, se ha creado una función en Matlab, llamada *imagen_virtual.m*, que se va a encargar de obtener dichos puntos de la imagen virtual. Como parámetros de entrada, esta función tiene las coordenadas del punto (x, y, z) sobre el que se quiere obtener la imagen virtual, que en su primer uso será la posición del emisor y los coeficientes A, B, C, D (calculados como indica la *Ecuación 7: Cálculo de los coeficientes que definen el plano*) del plano sobre el que se quiere obtener la imagen virtual. Esta función como parámetro de salida va a devolver las coordenadas (x, y, z) del punto simétrico con respecto al plano.

Esta función está programada de tal modo que si como parámetros de entrada se meten varios puntos y varios planos (siempre que sean el mismo número), la función devolverá un vector de puntos de las imágenes virtuales de cada uno de los casos que se han introducido en la entrada. Y en el caso de que sólo se introduzca las coordenadas de un punto pero los coeficientes de varios planos, la función devolverá un vector con los puntos simétricos del punto con respecto a todos los planos. Este último caso es especialmente útil para el caso en el que como punto de entrada se introduce las coordenadas de la fuente y como coeficientes de los planos, todos los de los planos que forman el recinto.

La programación de esta parte es relativamente sencilla porque sólo se ha de programar lo que anteriormente en la segunda parte del capítulo 2.5.2 se ha indicado, para llegar a obtener el punto de imagen virtual como se indica en la *Ecuación 11: Coordenadas de la posición de un punto simétrico a un plano*.

3.3.2 Intersección entre recta y plano

En este apartado, se va a ver como se programa de manera orientada Matlab la intersección entre una recta (formada por dos puntos) y un plano. El procedimiento a seguir será el que se ha recordado en el capítulo 2.5.3. Por lo que a continuación se muestra cómo ha sido la función *intersec_line_plano.m* que realiza tal función.

Esta función, como parámetros de entrada, tiene tres, los dos primeros son las coordenadas de los dos puntos que forman la recta y el tercero van a ser los coeficientes del plano sobre el que se quiere saber la intersección. Y como parámetro de salida se proporciona las coordenadas del punto de intersección entre ambos (recta-plano).

Al igual que la función anterior, esta función también es capaz de obtener varios puntos de intersección a la vez, siempre que se le proporcionen el mismo número de puntos que de planos.

Para esta función hay dos casos especiales, que la recta formada por los dos puntos sea paralela al plano y por lo tanto no interseccionan y el otro caso, es que la recta formada por los dos puntos esté contenida en el plano por lo que tampoco va a tener sentido hablar de intersección de la recta y el plano. En estos dos casos, la función devolverá como salida NaN (Not a Number). NaN es una representación aritmética creada por IEEE en la que este valor se asigna a operaciones que no tienen un resultado numérico definido.

Realmente, en esta función lo que hay que programar sería la *Ecuación 12: Coordenadas del punto de intersección entre recta y plano*, cosa que es relativamente sencilla porque en la ecuación ya está totalmente simplificado para que su programación sea lo más sencilla posible.

3.3.3 Distancia entre dos puntos

La última función que compone el algoritmo, es quizás la más sencilla de todas ya que trata de obtener la distancia euclídea entre dos puntos, para ello, como se ha explicado en el apartado 2.5.4 y mediante la *Ecuación 13: Distancia euclídea entre dos puntos*.

La función creada se llama *distancia_puntos.m*, y para hacerla funcionar, hay que pasarle como parámetros de entrada las coordenadas de los dos puntos sobre los que se quiere saber la distancia y se obtendrá como parámetro de salida la distancia a la que se encuentran dichos puntos.

Como en las funciones anteriores, en esta también se le pueden proporcionar una serie de puntos (siempre que sean el mismo número de puntos uno como de puntos dos) y así obtener un vector con todas las distancias entre los puntos correspondientes, o también se puede proporcionar un solo punto de un tipo y un conjunto de puntos del otro y la función devolverá un vector con las distancias a las que se encuentra el primer punto de la lista de los otros puntos.

3.3.4 Manera de abordar el funcionamiento del algoritmo

Para obtener el resultado esperado, hay que ejecutar las funciones citadas anteriormente de una determinada manera para que el algoritmo funcione correctamente.

El algoritmo son 5 bucles que tiene que obtener todos los datos desde el orden 1 hasta el orden que se le fija con la variable *orden*. En los que cada uno de ellos se encarga de ir obteniendo los datos que necesita el siguiente bucle para así llegar hasta el resultado final.

El primer bucle se encarga de obtener los puntos de imágenes virtuales de todos los posibles rayos que son candidatos a ser rayos finales. Dentro de cada bucle se definen dos casos, cuando el orden es 1 y el resto. Cuando el orden es igual a uno, hay que calcular todos los puntos de simetría con respecto a la fuente, en otro caso hay que basarse en los del orden inferior para así llegar a obtener los datos del orden actual.

El segundo bucle se encarga de ir obteniendo los puntos de intersección de los planos con las distintas rectas que se han ido formando. En este caso se dan tres casos especiales, cuando se está trabajando en el orden 1, en el orden máximo establecido y en el resto. El caso de orden 1 es especial porque hay que obtener la intersección del plano con la recta que se forma por el receptor y el último punto de imagen virtual de la fuente; el de orden máximo es especial porque tiene que obtener la intersección del plano con la recta formada por el emisor y el punto de intersección

anterior; y el resto la recta es la formada por el punto de intersección del orden actual y el punto de imagen virtual de orden inmediatamente anterior.

El tercer bucle, se encarga de obtener las distancias de las que está comprendido cada tramo del rayo, para poder almacenarlo posteriormente en la estructura y también de obtener la longitud total del rayo, para posteriores cálculos de retardos y atenuaciones producidas por el aire de cada uno de ellos.

El cuarto bucle, se encarga de eliminar los rayos que no son válidos, por motivos como por ejemplo el que se expone en la *Figura 16: Trazado rayos de orden 3 imposible, obtener los puntos de intersección*. Para ello, con los límites de cada plano, se mira en qué punto se ha producido la intersección del rayo con el plano y en el caso de que ese punto de intersección se encuentre fuera de los límites establecidos para el plano en cuestión, ese rayo es eliminado. Por eso quedan tan pocos rayos al final. En un principio, existen un número total de rayos delimitados por la siguiente ecuación:

$$num_rayos = num_planos * (num_planos - 1)^{orden-1}$$

Ecuación 15: Número de rayos antes de eliminar los no válidos

Siguiendo con el ejemplo del paralelepípedo (que tiene 6 planos que lo forman), si se fija el orden máximo de rebotes a 6, se tienen un total de 18750 rayos ($6*5^5$), pero después de ver cuáles de ellos son válidos (para unas posiciones de emisor y receptor determinadas), sólo quedan 466 rayos válidos más el rayo directo.

El quinto bucle se encarga de duplicar la estructura (consultar siguiente apartado) con los datos de los rayos válidos

3.3.5 Estructuras resultado

El resultado que se obtiene de ejecutar este algoritmo, son dos estructuras de Matlab, una para los datos del rayo directo, llamada *rayo_directo* y otra para los datos producidos de los distintos rayos reflejados, llamada *trazado_rayos*.

La estructura de *rayo_directo* es más sencilla, porque solo tiene dos campos, los puntos que la forman, que van a ser el emisor y el receptor y la distancia que hay entre ambos, que se calcula según lo explicado en el apartado 3.3.3. En la siguiente imagen, se ve claramente lo explicado en este párrafo.

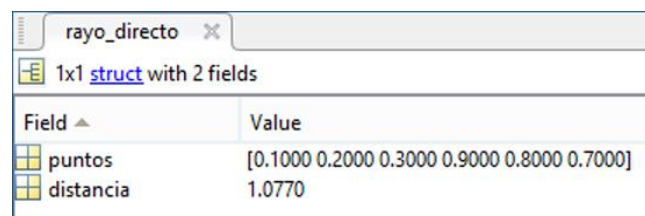


Figura 20: Estructura del rayo directo (*rayo_directo*)

Esta imagen, procede de una sala que tiene unas dimensiones de 1 metro de largo por uno de ancho por uno de alto, en el que fijándose en la estructura, el emisor está en la posición (0.1 0.2 0.3), el receptor está en la posición (0.9 0.8 0.7) y como se ve, la distancia entre ambos es de 1.077 metros.

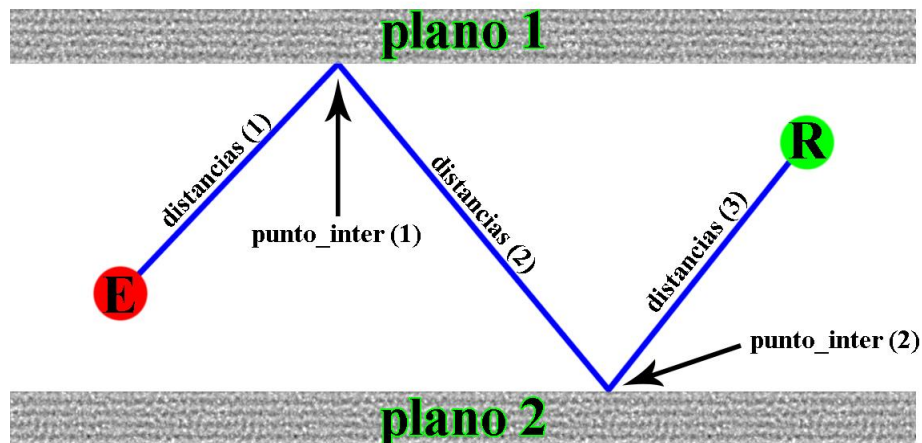
La estructura que corresponde a los rayos reflejados, *trazado_rayos*, es una estructura un poco más compleja que la anteriormente descrita, ya que en ella hay más campos que los dos que hay en la anterior. En este caso, para cada orden, ya que cuando se le fija un orden está implícito que también se calculan los de orden menor, se tienen 5 campos, el punto de simetría de la fuente virtual, llamado *punto_sim*, el punto de intersección de la recta con el plano sobre el que se ha calculado la nueva fuente simétrica, *punto_inter*, el plano sobre el que se ha hecho la imagen virtual, llamado *plano*, las distancias de cada tramo que conforman el rayo, llamado *distancias*, y la distancia total del rayo, llamado *distancia*.

Fields	punto_sim	punto_inter	plano	distancias	distancia
1	6x3 double	6x3 double	[1;2;3;4;5;6]	6x2 double	[1.4142;1.41...
2	18x6 double	18x6 double	18x2 double	18x3 double	18x1 double
3	38x9 double	38x9 double	38x3 double	38x4 double	38x1 double
4	70x12 double	70x12 double	70x4 double	70x5 double	70x1 double
5	118x15 double	118x15 double	118x5 double	118x6 double	118x1 double
6	216x18 double	216x18 double	216x6 double	216x7 double	216x1 double

Figura 21: Estructura de los rayos reflejados (*trazado_rayos*)

En la imagen anterior, se muestra el valor de la estructura *trazado_rayos* para el mismo caso que se ha comentado para el caso de la estructura del rayo directo. Como se ha comentado anteriormente, en esta estructura hay 5 campos (*punto_sim*, *punto_inter*, *plano*, *distancias* y *distancia*) y como se ve, también hay 6 filas de datos, esto indica que el orden ha sido fijado con un valor de 6, por lo que cada fila representa un orden, la fila uno representa al orden uno, la dos al dos y así sucesivamente hasta llegar, en este caso hasta el seis. Sumando todos los rayos de cada orden, se ve que para este caso concreto, hay un total de 466 rayos más el rayo directo.

Como se ve, dentro de cada celda, son valores con distintas tamaños, el primer valor, indica el número de rayos que hay de un determinado orden. El segundo valor, es variable y dependiente del campo en el que se esté mirando, en el caso del *punto_sim*, como se ve, todos los valores siguen la progresión de $3 * \text{orden}$, esto es porque para cada orden se van almacenando las coordenadas del punto de la imagen virtual actual y los puntos de imagen virtual que se han seguido para llegar al actual. En el caso del *punto_inter*, la filosofía es la misma, pero en lugar de almacenar las coordenadas de los puntos de la imagen virtual, se almacenan los puntos de intersección en el plano. El caso de planos, es similar, se van almacenando los datos del plano actual y de los planos sobre los que se ha ido calculando la imagen virtual para llegar hasta el plano actual. Distancias tiene la misma longitud que planos más uno debido a que al hacer los tramos y añadir el emisor y el receptor, sale un tramo más (consultar la siguiente imagen). Por último distancia es la suma de todos los tramos que forman distancias para conocer la longitud total del rayo.



$$\text{distancia} = \text{distancias (1)} + \text{distancias (2)} + \text{distancias (3)}$$

Figura 22: Contenido de la estructura *trazado_rayos*

Posteriormente, con los datos que están contenidos en estas estructuras, se procederá a calcular las atenuaciones que son producidas al rayo y las representaciones asociadas a los mismos.

3.4 Atenuaciones

Como se ha comentado en la introducción, a los rayos sonoros, les afectan dos tipos de atenuaciones, la producida por la absorción del aire y la producida por la absorción de los materiales. Hay que recordar que ninguna de las dos posibles absorciones se dan de igual modo para todas las bandas frecuenciales, para la absorción del aire, cuanto mayor sea la frecuencia mayor será la absorción y para la producida por los materiales dependerá más del tipo de material sobre el que la onda ha incidido.

3.4.1 Atenuación del aire

Los rayos sonoros, por el medio de transcurrir por un medio, sufren una atenuación, en este caso, como el medio es el aire, va a tener una absorción determinada, dependiente de las condiciones en las que se encuentra la sala (como se ha visto en el capítulo 2.3) y proporcional al tiempo de vuelo del rayo.

Para poder ver cuanta atenuación le corresponde a cada rayo, se ha creado en Matlab, una función llamada *abs_aire_y_retardo.m*, que como su propio nombre indica, se encarga de calcular el retardo que sufre cada rayo desde que sale del emisor hasta que llega al receptor y la absorción que se le produce debido a la absorción del aire durante ese tiempo de vuelo.

Esta función tiene cuatro variables como parámetros de entrada, la distancia del rayo directo, un vector columna con las distancias de cada uno de los rayos reflejados y por último la temperatura y la humedad a las que se encuentra la sala, aunque hay otra variable (opcional) que es la presión atmosférica, en el caso de no poner nada, se utilizará la presión atmosférica estándar. Como variables de salida, la función proporciona dos variables, cumpliendo con el nombre de la función, una va a ser el valor de absorción producida por el aire y la otra, será el retardo de dicho rayo.

Para calcular el retardo, se necesita primero saber la velocidad del sonido en las condiciones en las que se encuentra la sala, por ello, aplicando la siguiente fórmula se obtendrá la velocidad adiabática del sonido.

$$C = \sqrt{\frac{k * R * T}{M}}$$

Ecuación 16: Velocidad del sonido

Donde k, es la razón de los calores específicos, con un valor de 1.4 para el aire; R, es la constante de los gases (8.314 (J/K*mol)), T, es la temperatura a la que se encuentra la sala en grados kelvin y M, es el peso molecular promedio del aire, con un valor de $28.95 \cdot 10^{-3}$ (g/mol).

Posteriormente, una vez que se tiene la velocidad del sonido, para calcular el retardo del rayo se aplicará esta otra fórmula para cada uno de los rayos para así obtener el retardo de cada uno de ellos.

$$retardo = \frac{distancia\ recorrida\ por\ el\ rayo}{C}$$

Ecuación 17: Retardo de cada rayo

Para calcular la atenuación producida por el aire, hay que seguir lo que se explica en el apartado 2.3. Y consultando el valor de los coeficientes de absorción del aire que se muestran en la siguiente tabla, se obtiene la absorción del aire.

TEMPERATURA	HUMEDAD	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
0 °C	10%	1,3	4	9,3	14	17	19
	20%	0,61	1,9	6,2	18	35	47
	30%	0,47	1,2	3,7	13	36	69
	50%	0,41	0,82	2,1	6,8	24	71
	70%	0,39	0,76	1,6	4,6	16	56
	90%	0,38	0,76	1,5	3,7	12	43
10 °C	10%	0,79	2,3	7,5	22	42	57
	20%	0,58	1,2	3,3	11	36	92
	30%	0,55	1,1	2,3	6,8	24	77
	50%	0,49	1,1	1,9	4,3	13	47
	70%	0,41	1	1,9	3,7	9,7	33
	90%	0,35	1	2	3,5	8,1	26
20 °C	10%	0,78	1,6	4,3	14	45	109
	20%	0,71	1,4	2,6	6,5	22	74
	30%	0,62	1,4	2,5	5	14	49
	50%	0,45	1,3	2,7	4,7	9,9	29
	70%	0,34	1,1	2,8	5	9	23
	90%	0,27	0,97	2,7	5,3	9,1	20
30 °C	10%	0,96	1,8	3,4	8,7	29	96
	20%	0,73	1,9	3,4	6	15	47
	30%	0,54	1,7	3,7	6,2	12	33
	50%	0,35	1,3	3,6	7	12	25
	70%	0,26	0,96	3,1	7,4	13	23
	90%	0,2	0,78	2,7	7,3	14	24

Tabla 4: Valor de la constante para la absorción del aire

Analizando los valores de la tabla, se ve que el aire tiene una capacidad de absorber mayor potencia acústica para las bandas de octavas más elevadas. En la siguiente imagen, se ve un ejemplo de la absorción que produce el aire para un ejemplo concreto.

Con los valores de la tabla y aplicando la *Ecuación 1: Absorción del aire*, se obtiene para cada banda de octava cual es la absorción producida por el aire.

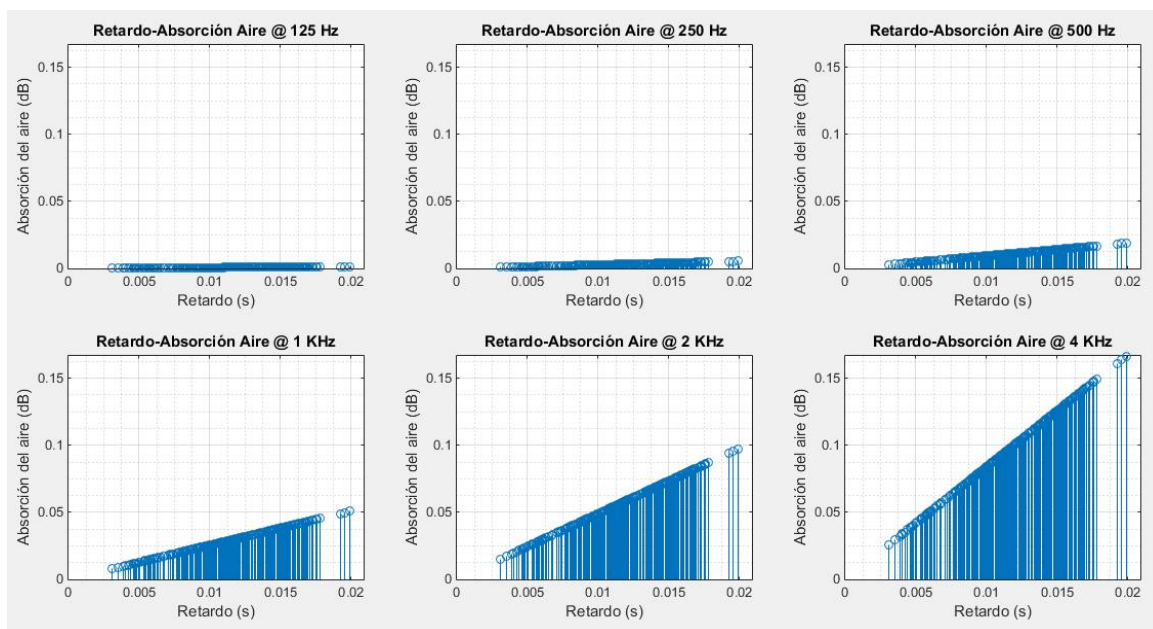


Figura 23: Absorción del aire por bandas de octava

Como se preveía, la absorción del aire es lineal con respecto tiempo de vuelo del rayo (lo que se representa en el eje x como retardo), cuanto mayor sea el retardo, más tiempo de vuelo ha tenido el rayo y por tanto mayor va a ser la absorción del aire y como se ve, la atenuación es mucho mayor cuanto mayor sea la frecuencia.

Existe otra manera que es más precisa para obtener la absorción producida por el aire, de esta manera, no es preciso tener unas condiciones de humedad y temperatura determinadas para obtener así los coeficientes que dan la absorción mirando en la Tabla 4, sino que es posible calcularlo mediante ecuaciones para poder obtener estos valores.

Para proceder a calcular la atenuación producida por el aire se deberán seguir las siguientes ecuaciones, para ello, se debe tener en cuenta la temperatura ambiente (T), la humedad relativa (hr) y la presión atmosférica de la sala (pa). También se tienen que tener las distintas constantes que aparecen en las ecuaciones.

$$psat = pr \cdot 10^{-6.8346 \cdot (To1/T)^{1.261} + 4.6151}$$

En esta ecuación, la presión estándar $pr = 101325 Pa$ y $To1 = 273.16 K$.

$$h = hr \cdot (psat/pa)$$

$$frN = \left(\frac{pa}{pr}\right) \cdot \left(\frac{T}{To}\right)^{-1/2} \cdot \left(9 + 280 \cdot h \cdot \exp\left(-4.17 \cdot \left(\frac{T}{To}\right)^{-1/3} - 1\right)\right)$$

Donde $T_0 = 293.15 \text{ K}$

$$\begin{aligned}
 frO &= \left(\frac{pa}{pr}\right) \cdot \left(24 + 4.04 \cdot 10^4 \cdot h \cdot \frac{0.02 + h}{0.391 + h}\right) \\
 z &= 0.1068 \cdot \exp\left(\frac{-3352}{T}\right) \cdot \left(frN + \frac{f^2}{frN}\right)^{-1} \\
 y &= \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-5/2} \cdot \left(0.01275 \cdot \exp\left(-\frac{2239.1}{T}\right) \cdot \left(frO + \frac{f^2}{frO}\right)^{-1} + z\right) \\
 a &= 8.686 \cdot f^2 \cdot \left(1.84 \cdot 10^{-11} \cdot \left(\frac{pa}{pr}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1/2} + y\right)
 \end{aligned}$$

Ecuación 18: Atenuación del aire

La atenuación viene definida por la expresión anterior y al multiplicarlo por la distancia total que recorre el rayo, se obtiene la atenuación que sufre el rayo.

$$as = a \cdot s$$

Al igual que en el caso anterior, hay que calcular la atenuación para cada banda de octava de las que se estudian en la realización del proyecto. Los valores obtenidos para ambos casos se obtienen prácticamente los mismos valores, pero se utilizará esta segunda manera debido a que se pueden elegir cualquier valor de temperatura y humedad al no estar cogiendo los datos de la tabla.

3.4.2 Atenuación de los materiales

Todos los rayos reflejados por el mero hecho de rebotar contra un plano de un material, para que se produzca la reflexión, parte de la energía incidente es reflejada y otra parte es absorbida por el material en forma de calor, tal como se muestra en la *Figura 3: Tipo de rayos sonoros según las propiedades*. Pero esta capacidad que tienen los materiales, depende de varios factores, como son el tipo de material, el ángulo de incidencia del rayo o la frecuencia de la onda incidente. Todos los materiales tienen distintos coeficientes de absorción dependiendo de la frecuencia (Consultar *Tabla 11: Lista de materiales con los coeficientes de absorción*). La capacidad de absorber energía acústica de un material, se define con el coeficiente de absorción (α), este valor, indica en tanto por uno la cantidad de energía que es absorbida por dicho material.

Si un rayo incide sobre un material con un coeficiente de absorción α , indica que el α por uno de la energía va a ser absorbida, lo que no es absorbido, será la parte del rayo reflejada. Si ese rayo reflejado vuelve a incidir sobre otro material, se volverá a absorber la energía correspondiente a este nuevo material. Esto se repetirá hasta que el rayo llegue al receptor o hasta que la energía del rayo sea tan pequeña que el receptor no la pueda detectar.

$$1 - \alpha_{equivalente} = \prod_i^{orden} (1 - \alpha_i)$$

Ecuación 19: Coeficiente de absorción al incidir en más de un material

Sabiendo en qué planos rebota el rayo, es muy sencillo de programar el coeficiente de absorción equivalente para cada rayo. Posteriormente, al hacerlo para cada rayo, se obtiene una gráfica para cada banda frecuencial como se muestra a continuación:

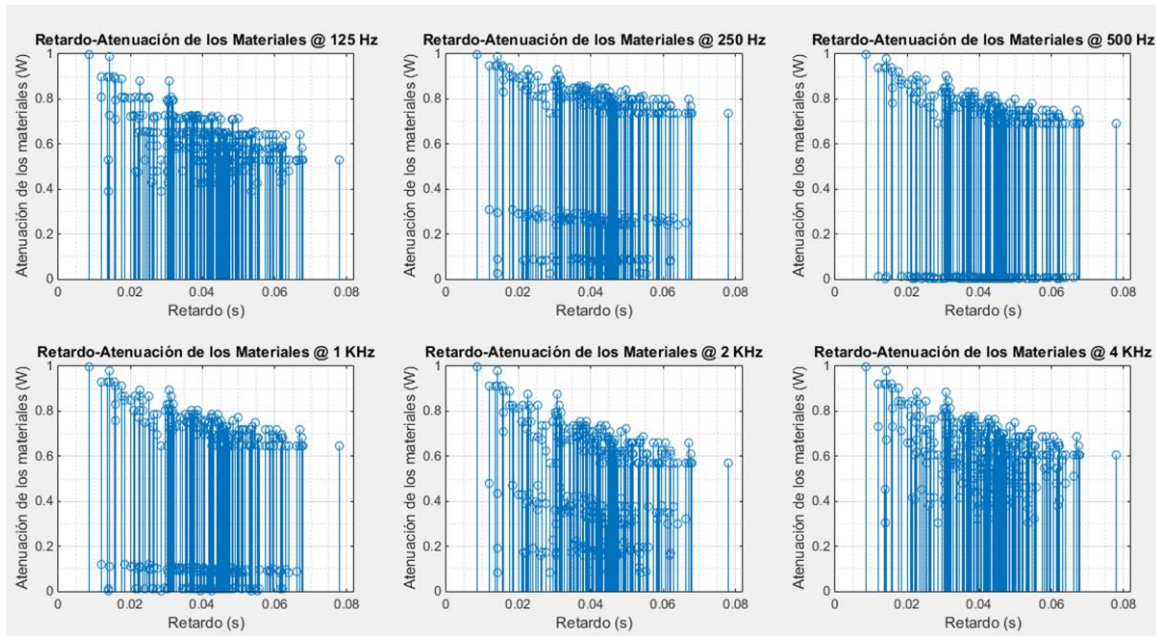


Figura 24: Atenuación producida por los materiales por bandas de octava

Como se ve en la figura anterior, cuanto mayor es el retardo, menor es la energía acústica que llega al receptor, debido a que esa energía que queda absorbida, se disipa en forma de calor al interseccionar con los distintos materiales que forman los planos de la sala.

3.4.3 Atenuación total

Para obtener la atenuación total que es producida a cada rayo, basta con sumar las dos atenuaciones anteriormente explicadas. La manera elegida de afrontarlo en Matlab es a la energía acústica que llega al receptor debido a la absorción de los materiales, restarle la atenuación producida por la absorción del aire.

Cuando se representa la energía que llega al receptor con respecto al retardo de cada rayo (ecograma), se obtiene una imagen como la que se presenta a continuación.

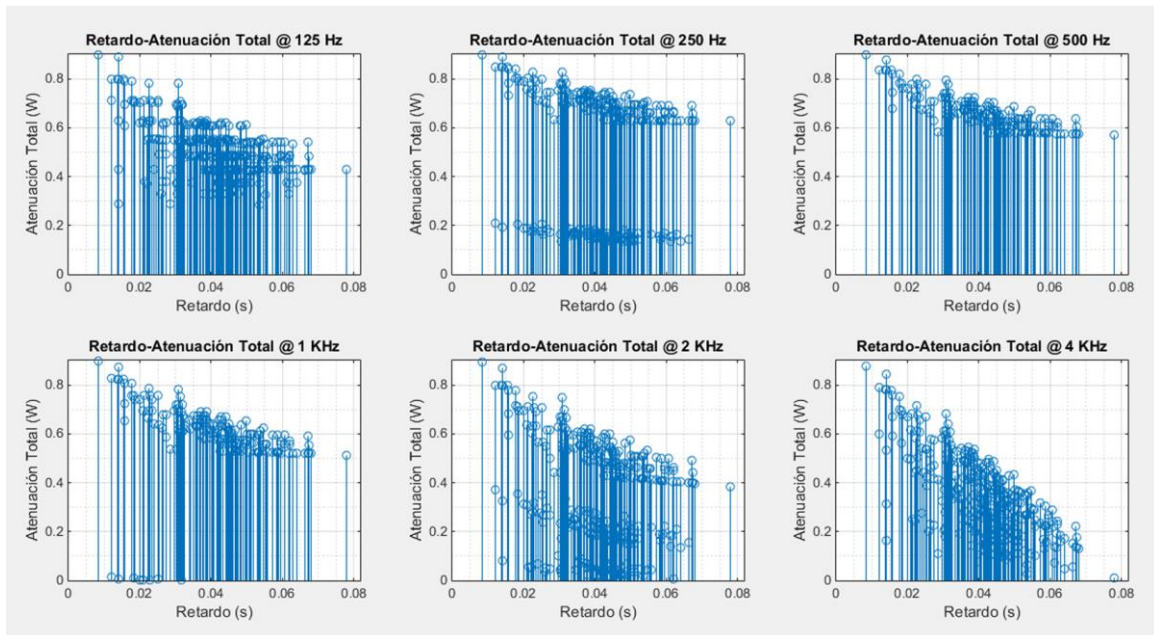


Figura 25: Atenuación total por bandas de octava

Esta figura, surge de restar la *Figura 24* a la *Figura 23* (previa transformación de decibelios a vatios). Como se ve, no hay mucha variación ya que en el ejemplo estudiado, es una sala de cuatro metros de largo, por tres de ancho y por tres de alto. Al ser una sala tan pequeña, para frecuencias bajas y medias, la absorción es prácticamente producida por los materiales ya que el aire produce mayor absorción a altas frecuencias.

3.4.4 Cola reverberante

En la figura anterior, se ve que la señal aguanta poco en el tiempo, ya que el número de reflexiones de esa imagen es de 6, por lo que al crear una cola reverberante, se conseguirá darle más calidez a la sala debido a que habrá más rayos generados.

Para poder generar una cola reverberante, se ha creado una función en Matlab, llamada *cola_reverberante.m*. Para hacer funcionar esta función hay que proporcionarle varios parámetros de entrada, como son el retardo del rayo directo (x_{rd}), el número de rayos que se han generado mediante la técnica de la imagen virtual (NR), el retardo del último rayo obtenido (x_0), el tiempo hasta el que se quieren obtener señales de retardo (x), el valor de atenuación del ultimo rayo (y_0) y el valor hasta el que se quiere llegar mediante las atenuaciones (y). Con todos estos parámetros de entrada, se obtienen como parámetros de salida el retardo (*ejex*) y las atenuaciones de los rayos de la cola reverberante (*cola*).

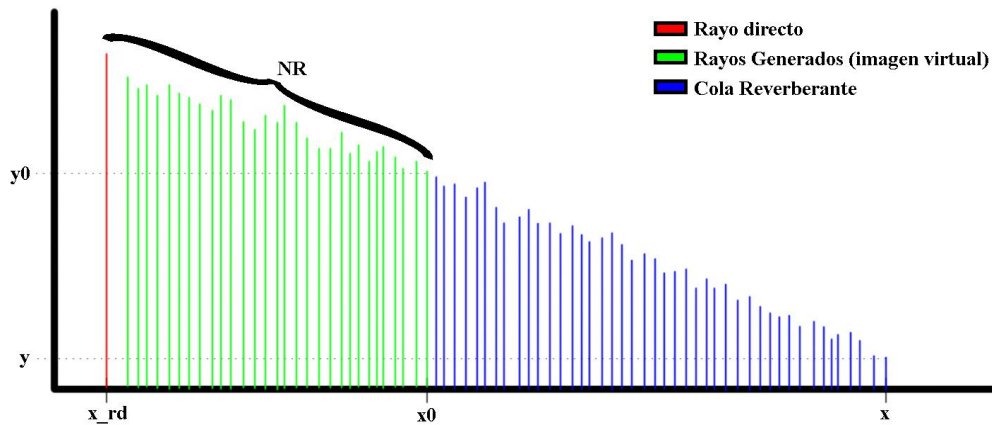


Figura 26: Trazado de rayos + Cola reverberante

Para esta función se necesita el valor de x_0 , x_{rd} y NR , para que la función creada, mantenga la misma proporción de rayos en el espacio temporal x_0-x , y con los valores y_0-y , se fija la pendiente que va a tener la caída (ya que va a tener una caída lineal). La caída generada, no va a ser del todo lineal, va a tener cierto componente de aleatoriedad, por lo que cada vez que se ejecute el programa, va a haber una cola de reverberación distinta, un ejemplo sería este:

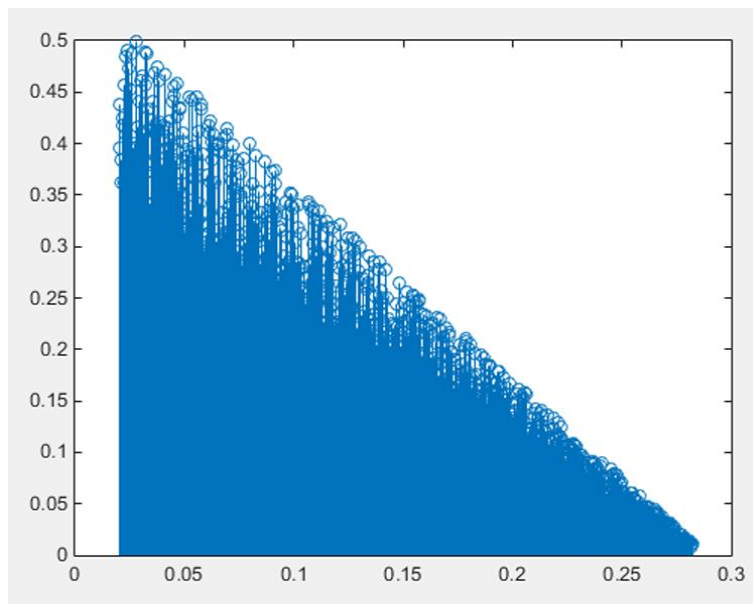


Figura 27: Ejemplo de cola de reverberación generada

En la imagen anterior, se muestra un ejemplo de la forma de la cola de reverberación generada. Para obtener la señal total, basta con colocar después de lo que se ha calculado mediante el trazado de rayos la cola reverberante. Cuando se aplica la función creada, se obtiene por cada banda de octava la atenuación que va a servir para las auralizaciones y se muestra en la siguiente figura:

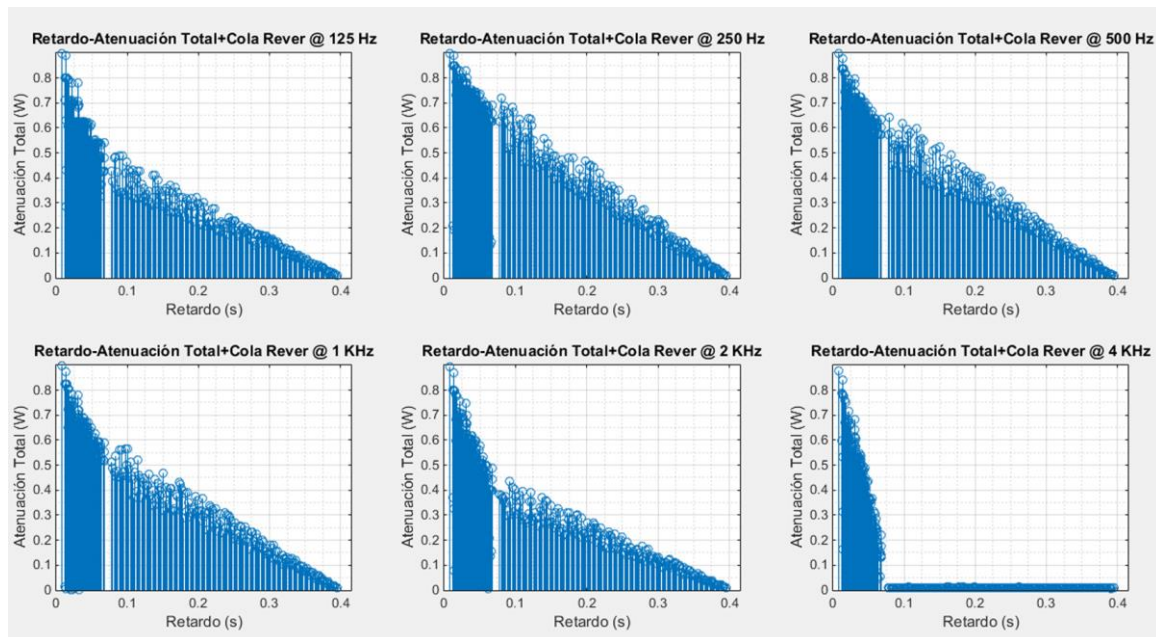


Figura 28: Atenuación total más cola de reverberación por bandas de octava

La pendiente que tiene la cola de reverberación, es distinta para cada banda de octava, debido a que parte del valor del último rayo obtenido, hasta el valor fijado; eso sí, el número de rayos creados para la cola reverberante es el mismo para todas las bandas de octava.

3.5 Auralizaciones

La auralización es la simulación de obtener una señal $y(t)$, que representaría cómo suena una señal emitida ($x(t)$) en una sala con unas características determinadas (estas características las determina la respuesta al impulso de la sala $h(t)$). Siempre que se tenga la respuesta al impulso de la sala, es muy sencillo de obtener, ya que con convolucionar la señal emitida con la respuesta al impulso de la sala, ya se tendría la señal buscada.

Por lo que después de obtener la respuesta al impulso de la sala, se ha creado en Matlab una función llamada *auralización.m*, en la que proporcionándole como parámetros de entrada el vector de retardo de cada uno de los rayos (incluidos los generados mediante la cola reverberante), *retardo*, también, la atenuación que sufre cada uno de ellos mediante los distintos tipos de atenuaciones que pueden sufrir, *aten_total*, opciones de guardado, si se quiere guardar la salida como un archivo de audio (*.wav) y con qué nombre y por último permite proporcionarle una señal $x(t)$, gracias a la variable *cancion*, en el caso de que no se le transmita una variable en este campo, se elegirá una canción por defecto que trae Matlab, '*gong.mat*', que como su propio nombre indica es el sonido de un gong. Esta función como salida, proporciona la señal $y(t)$ y la frecuencia de muestreo (F_s) de la misma.

Matemáticamente lo que hace esta función es convertir la señal de continua a discreta, para poder trabajar con muestras en lugar de con tiempos, para hacerlo, basta con convertir la *Ecuación 14*, en:

$$h[n] = \sum_{i=1}^{num_rayos} atenuacion_i \delta[n - Fs \cdot retardo_i]$$

Ecuación 20: Caracterización numérica del ecograma (tiempo discreto)

El siguiente paso es que a partir de la señal en el tiempo discreto, obtener los coeficientes del filtro que va a representar la sala, el filtro en cuestión va a ser un filtro FIR, ya que no hay realimentación.

Por último, con los coeficientes calculados, simplemente con convolucionar la respuesta al impulso con la señal de entrada, se obtiene la señal de salida.

4 Resultados Obtenidos

4.1 Resultados

Los resultados obtenidos, son distintos en función de las dimensiones de la sala y de la posición en la que se encuentran el emisor y el receptor. Aunque no hay mucha variación en salas que tienen tamaños proporcionales, cuando se cambian la relación largo-ancho-alto, el número de rayos varía. A continuación se presentan los resultados de los rayos obtenidos para una sala de 7x5x3 (largo-ancho-alto), en la que el emisor se encuentra en las coordenadas (1.75 1.25 0.75) y el receptor en (5.25 3.75 2.25).

ORDEN	NUMERO TOTAL DE RAYOS	NUMERO DE RAYOS + COLA REVERBERANTE
1	7	82
2	19	78
3	38	127
4	83	207
5	156	356
6	295	579
7	511	1003
8	829	1485

Tabla 5: Número de rayos

La elección de los materiales para los planos, no influyen en el número de rayos que se obtienen, ya que solo influyen en el diseño modificando la atenuación de los mismos. Del mismo modo, aunque en menor medida, la modificación de la temperatura y de la humedad, también afecta la atenuación de los rayos (debido a la atenuación producida por el aire).

En la siguiente imagen se muestra el ecograma de la banda frecuencial de 250 Hz de dos salas de las mismas dimensiones pero los materiales son distintos, en la primera de ellas (Sala 1), los materiales son suelo de moqueta, techo de madera y paredes de paneles de yeso; y en la segunda (Sala 2), los materiales son suelo de baldosa, techo metálico y paredes de bloques de cemento.

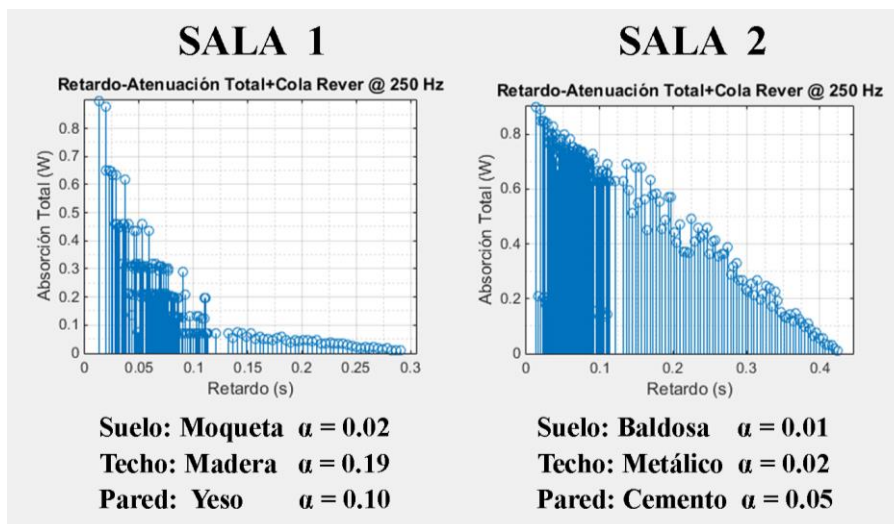


Figura 29: Comparación de los materiales en la banda de 250 Hz

Como se ve, en la primera sala, debido a los materiales ya que son más absorbentes, la caída es más abrupta que en el segundo caso que como los materiales son menos absorbentes, la señal obtiene reflexiones con mayor energía ya que el material absorbe menos.

En el siguiente caso se va a ver la variación de la atenuación debida a la variación de la humedad y de la temperatura a la que se encuentra la habitación en el momento de la simulación, al igual que en el caso anterior, en primer lugar se comparará la absorción del aire debido a la variación de la temperatura ambiente y la humedad relativa para la banda frecuencial de 500 Hz y posteriormente se verá cómo afecta esta absorción a la absorción total de la sala.

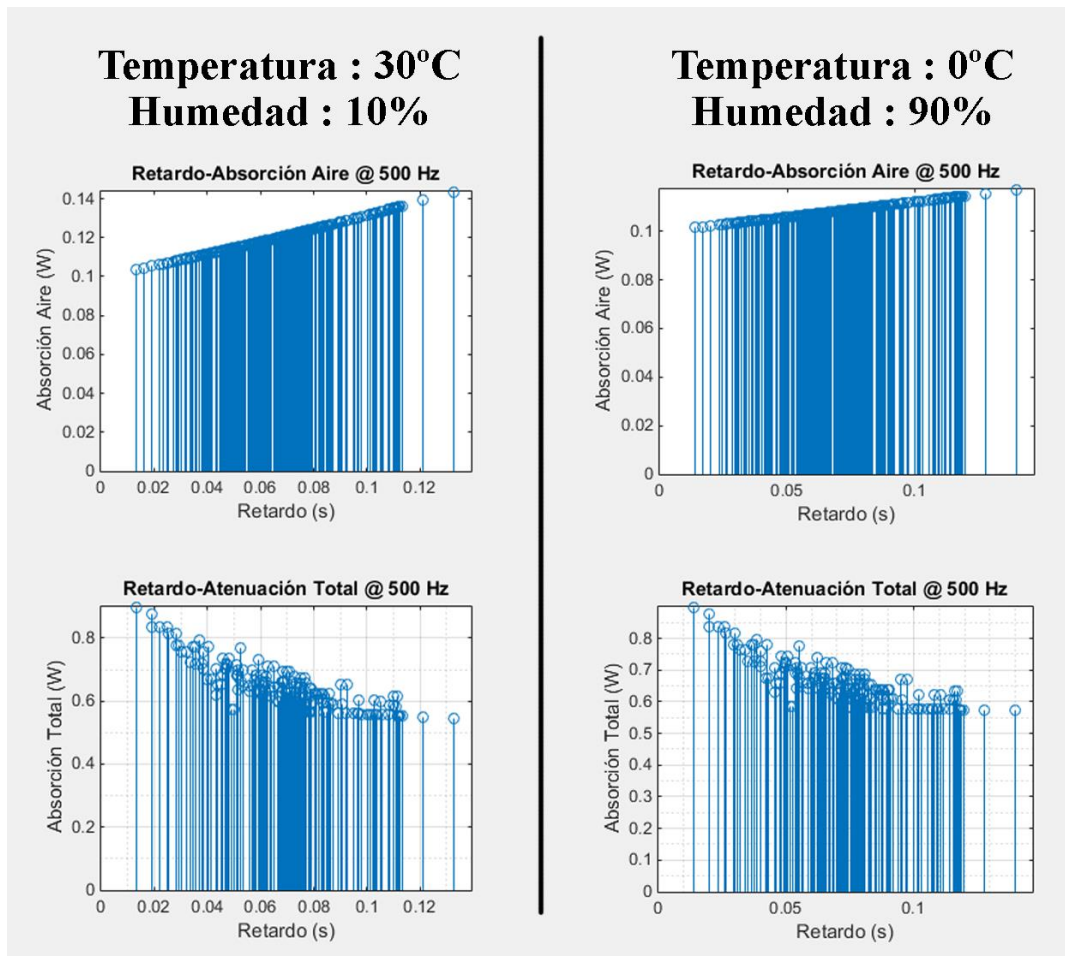


Figura 30: Comparación de la absorción del aire para la banda de 500 Hz

Como se ha dicho anteriormente, estos valores no afectan demasiado en el resultado final, ya que la atenuación producida por los materiales es la misma para los dos casos pero la diferencia radica en que el coeficiente de absorción del aire del primer caso (izquierda) es de 3.4 y el del segundo caso es de 1.5, a pesar de ser valores tan diferentes, como el tiempo de vuelo de los rayos es similar, el espacio que recorre en comparación a la velocidad del sonido es mucho menor y por tanto no afecta demasiado la diferencia entre ambos coeficientes.

4.2 Tiempos de ejecución

Como es lógico, cuanto mayor sea el orden de las reflexiones y mayor complejidad tenga la sala, mayor será el tiempo de ejecución necesario para poder ejecutar el programa. El número de rayos calculados (antes de eliminar los no válidos), en el caso de un paralelepípedo, siguen una progresión exponencial, como muestra la *Ecuación 15*, con número de planos igual a seis.

El tamaño de la sala no influye en el tiempo de ejecución, es decir, le cuesta el mismo tiempo ejecutar el algoritmo para un paralelepípedo que sea un cubo de lado un metro que para un cubo que tenga como lado cien metros. Esto es debido a que el tiempo de ejecución se basa en el número de imágenes virtuales e intersecciones recta-plano que hay que calcular y no en la distancia a la que se encuentran unas de otras.

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de ejecución para una sala que tiene como dimensiones, 7 metros de largo, 5 de ancho y 3 de alto. El ordenador con el que se ha ejecutado el algoritmo es un equipo portátil con 8 GB de RAM, con un procesador Intel Core i7 3612QM en el que se ejecuta el programa realizado en Matlab R2014b (versión de 64 bits). Para calcular los tiempos, en lugar de ejecutar el programa normalmente, se ejecuta con la opción de ejecutar y calcular tiempo, que cuando termina, con la opción *Profiler*, indica el tiempo de ejecución y el número de llamadas a otras funciones.

ORDEN	TIEMPO DE EJECUCIÓN TOTAL	LLAMADAS A IMAGEN VIRTUAL	LLAMADAS A INTERSECCION RECTA-PLANO	LLAMADAS A DISTANCIA PUNTOS
1	0.035 s	1	1	2
2	0.049 s	7	3	5
3	0.068 s	37	6	9
4	0.126 s	187	10	14
5	0.525 s	937	15	20
6	6.724 s	4687	21	27
7	145.585 s	23437	28	35
8	6689.362 s	117185	36	44
9*	111095.716 s	654879	82	87

Tabla 6: Tiempo de ejecución

Como se ve en la tabla, el tiempo necesario para completar el algoritmo es exponencial. El orden 9 está marcado como especial, debido a que no ha sido obtenido mediante el método tradicional, sino que se ha calculado la ecuación de la tendencia (por lo que no hay total precisión en la medida), ya que era inviable esperar tanto tiempo porque son más de 30 horas de trabajo para obtener la simulación de los rayos de este orden.

$$tiempo_ejecucion = 0.0166 \cdot e^{3.1433 \cdot (orden-4)}$$

Ecuación 21: Tiempo de ejecución

En el tiempo que aparece en la tabla no se contemplan auralizaciones, solo se tiene en cuenta hasta que el programa crea la cola de reverberación. Además en las ejecuciones en las que se ha calculado el tiempo, tampoco se han sacado las figuras ni se han mostrado en el *Command Window* el valor de variables. No se contemplan las auralizaciones debido a que el tiempo de

ejecución es independiente del orden, tiene que ver con la longitud de la señal que se quiere auralizar.

4.3 Representaciones

Con los datos de los rayos (antes de añadir la cola reverberante), se ha creado un script de Matlab, llamado *representar_sala_rayos.m*, que se encarga de representar en tres dimensiones la sala elegida por el usuario, y realizar una animación en la que se van pintando todos los rayos generados, pintando en primer lugar el rayo directo, a continuación los rayos reflejados de orden uno y así sucesivamente hasta llegar a los del orden máximo fijado por el usuario. Esta función se puede configurar de dos maneras, la primera de ellas, pinta un rayo y para poder pintar el siguiente, primero elimina el anterior, así en la escena sólo hay un rayo cada vez (este modo es útil para cuando se quieren ver los rayos de uno en uno) y el otro modo de funcionamiento va pintando los rayos de uno en uno sin eliminar los rayos anteriores (este modo da una idea global de cómo se distribuye el sonido por la sala para llegar del emisor al receptor).

La función como parámetros de entrada, tiene 8, la posición del emisor (*emisor*) y del receptor (*receptor*); las dimensiones de la sala (*largo*, *ancho*, *alto*); el orden de reflexión al que se va a llegar (*orden*), la estructura que contiene los datos del trazado de rayos (*trazado_rayos*) y el modo de ejecución (*modo*). La salida de esta función será la figura en la que se realiza la animación.

A continuación se muestra unas imágenes con distintos trazados en una sala.

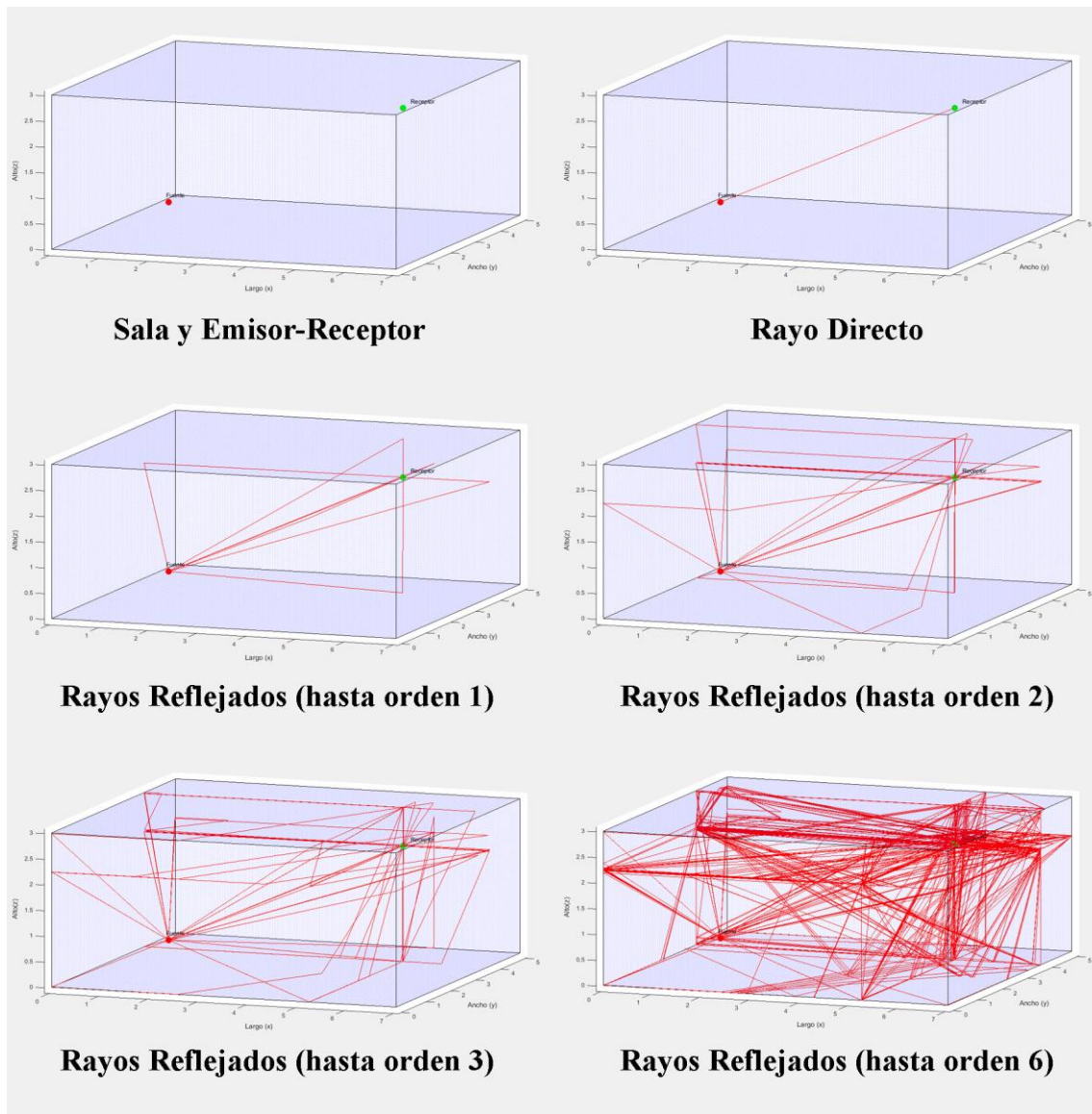


Figura 31: Representación rayos

4.4 Comparativas

En este apartado, se van a comparar los resultados obtenidos en el proyecto final de carrera realizado por Barrio Rodríguez, J en el año 2012, con título “Estudio acústico de las aulas de la Escuela Politécnica Superior de la UAH” (en el que se caracterizan las aulas de la Escuela politécnica Superior de la UAH), con las salas que se simularán de la manera más fidedigna a lo que son en la realidad, en lo que al tema de dimensiones y materiales se refiere.

Las aulas de la Escuela Politécnica superior, son de tres tamaños posibles:

- Grande
- Mediana
- Pequeña

Los tres tipos de salas, están formadas por los mismos materiales, a los que se asignarán los más parecidos de la lista de materiales que se dispone. El suelo, es de baldosa, el techo es de falso techo de yeso y las paredes son de hormigón pintado. A la hora de asignar los materiales, para hacerlo lo más realista posible, el material del suelo se asignará como una combinación de las baldosas y madera (que hará las funciones de las mesas y de las sillas). La relación del porcentaje para cada sala será distinta, ya que la disposición de las mesas y sillas es distinta para cada tipo de aula. Basándose en los planos creados por el autor (consultar *Anexo 7.3*), las salas se han simplificado para darles una forma de paralelepípedo de dimensiones:

TAMAÑO	LARGO	ANCHO	ALTO
GRANDE	13.43	9,47	3.57
MEDIANA	10.04	9.47	3.57
PEQUEÑA	6.80	9.4	3.57

Tabla 7: Tamaño aulas Escuela Politécnica Superior

Y la relación entre área del suelo y el área de la zona de audiencia es:

	GRANDE		MEDIANA		PEQUEÑA	
	m ²	porcentaje	m ²	porcentaje	m ²	porcentaje
ÁREA AUDIENCIA	63.96	50.18 %	41.32	43.48 %	28.28	44.20 %
ÁREA SUELO	63.49	49.82 %	53.71	56.52 %	35.69	55.80 %
TOTAL	127.45	100 %	95.03	100 %	63.97	100 %

Tabla 8: Relación área del suelo y área de la audiencia

Así viendo la tabla anterior, se creará un nuevo material para ponerlo en el plano del suelo con la combinación del material baldosas (material número 4 de la categoría suelos) y el de mobiliario de la audiencia de madera (material número 1 de la categoría asientos).

TIPO DE MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Suelo Baldosa	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
Audiencia Madera	0.1	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
Material S. Grande	0.055	0.050	0.045	0.045	0.050	0.050
Material S. Mediana	0.047	0.043	0.038	0.038	0.044	0.044
Material S. Pequeña	0.050	0.045	0.041	0.041	0.047	0.047

Tabla 9: Coeficientes de absorción de los materiales para el suelo de las aulas

Con estos nuevos materiales, se van a proceder a realizar las tres simulaciones (una para cada tamaño de sala) y con los ecogramas obtenidos, calcular los tiempos de reverberación (EDT, T20 y T30) de las distintas salas.

- EDT: Se define el EDT como diez veces el tiempo desde que la fuente dejada de emitir hasta que en NPS decae 10 dB.
- T20: Se define el T20 como tres veces el tiempo desde que la fuente dejada de emitir hasta que en NPS decae 20 dB.
- T30: Se define el T30 como dos veces el tiempo desde que la fuente dejada de emitir hasta que en NPS decae 30 dB.

Como la señal obtenida en el ecograma, se obtiene en vatios, se debe buscar el valor de retardo (eje x) que cumple lo siguiente, por lo que se tomará como referencia conforme a la potencia recibida del rayo directo:

- EDT: Es 10 veces el valor del retardo del ecograma (eje x), que satisface la ecuación:

$$-10 = 20 \log\left(\frac{y}{aten_rayo_directo}\right) \Rightarrow y = aten_rayo_directo \cdot 10^{-0.5}$$

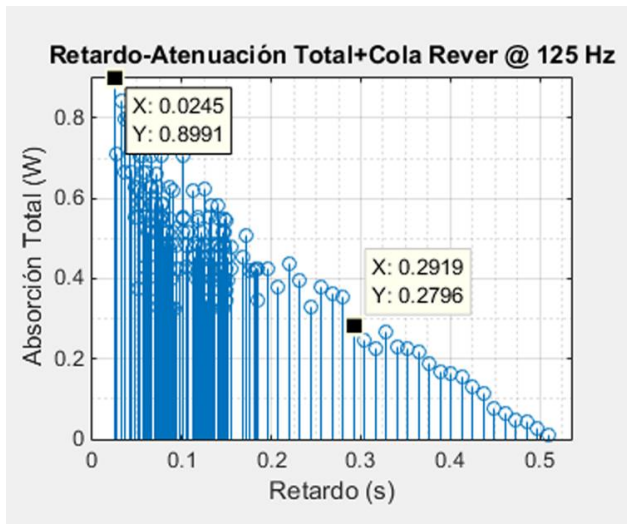
- T20: Es 3 veces el valor del retardo del ecograma (eje x), que satisface la ecuación:

$$-20 = 20 \log\left(\frac{y}{aten_rayo_directo}\right) \Rightarrow y = aten_rayo_directo \cdot 10^{-1}$$

- T30: Es 2 veces el valor del retardo del ecograma (eje x), que satisface la ecuación:

$$-30 = 20 \log\left(\frac{y}{aten_rayo_directo}\right) \Rightarrow y = aten_rayo_directo \cdot 10^{-1.5}$$

Antes de proceder a calcular se muestra un ejemplo de cómo se hace para obtener los distintos parámetros (concretamente para obtener el EDT de la banda de 125 Hz de la sala de tamaño grande):



$$aten_rayo_directo = 0.8991 \text{ W}$$

$$y = aten_rayo_directo \cdot 10^{-0.5} = 0.2843 \text{ W}$$

Buscar el rayo que más se aproxima a esa atenuación. Ese rayo es el que tiene un retardo de 0.2919 segundos y una atenuación de 0.2796 W.

$$EDT = 10 \cdot 0.2919 = \mathbf{2.919 \text{ s}}$$

Figura 32: Ejemplo cálculo EDT

Aplicando estas fórmulas a los ecogramas obtenidos en las distintas simulaciones, se obtienen los siguientes valores de tiempo de reverberación:

TR	SALA	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
EDT	Grande	2.919	3.524	3.161	3.040	1.761	0.719
	Mediana	3.821	3.793	3.153	3.281	1.370	0.742
	Pequeña	2.709	3.282	3.036	2.791	1.330	0.699
T20	Grande	1.311	1.435	1.347	1.383	0.948	0.688
	Mediana	1.292	1.292	1.292	1.407	0.764	0.675
	Pequeña	1.329	1.353	1.329	1.304	1.075	0.439
T30	Grande	0.995	1.254	1.413	0.995	0.874	0.171
	Mediana	0.964	1.021	1.217	1.021	0.861	0.177
	Pequeña	0.968	0.984	0.786	0.968	0.951	0.176

Tabla 10: Tiempos de reverberación obtenidos

Los datos de tiempo de reverberación obtenidos, no son del todo realistas, ya que al coger los datos, todos ellos se encuentran en la cola reverberante, que ha sido añadida de manera sintética. En las siguientes gráficas, se representa los datos obtenidos mediante simulación comparados con los obtenidos midiendo in situ.

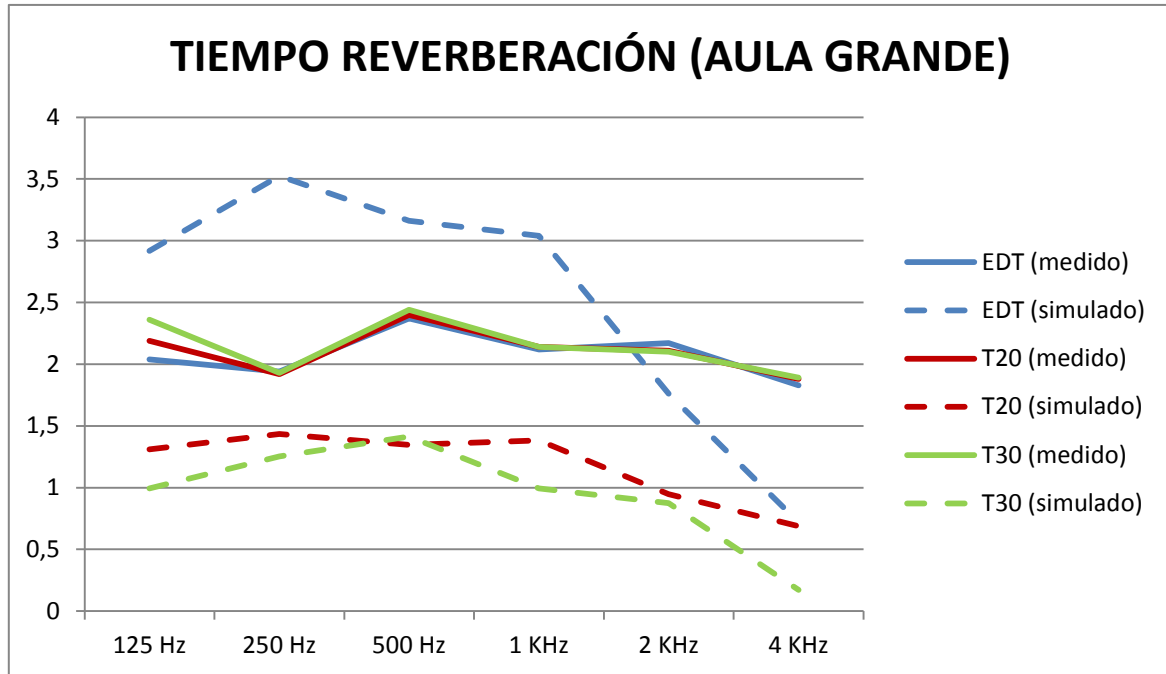


Figura 33: Comparación tiempos de reverberación (aula grande)

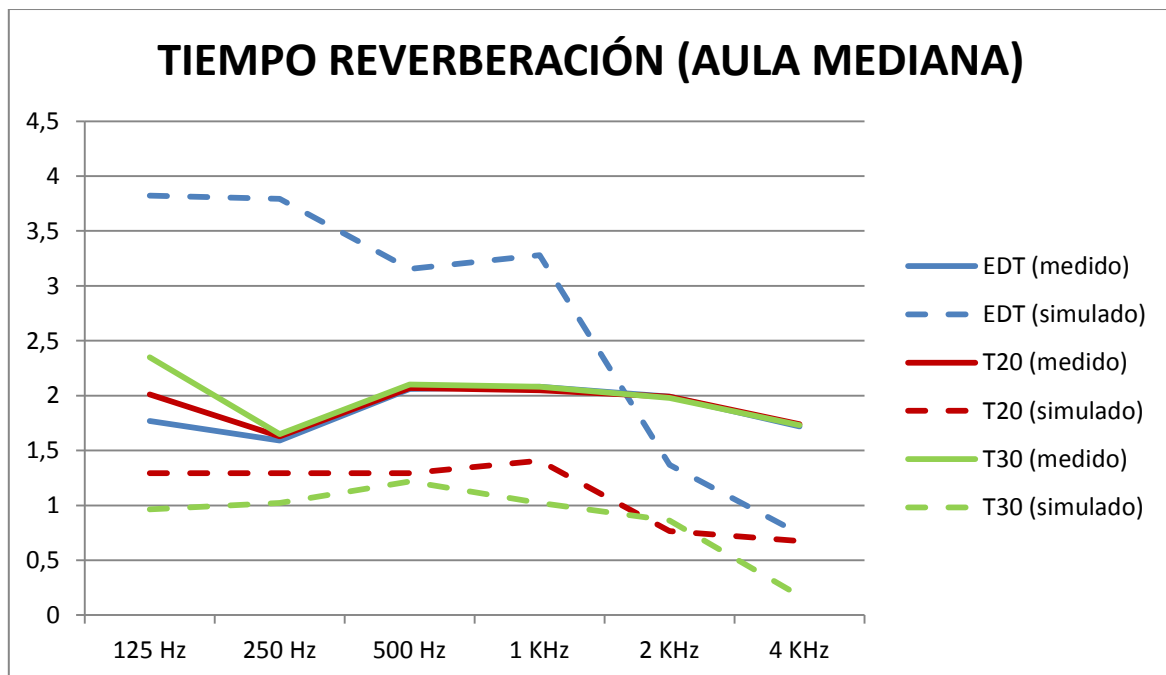


Figura 34: Comparación tiempos de reverberación (aula mediana)

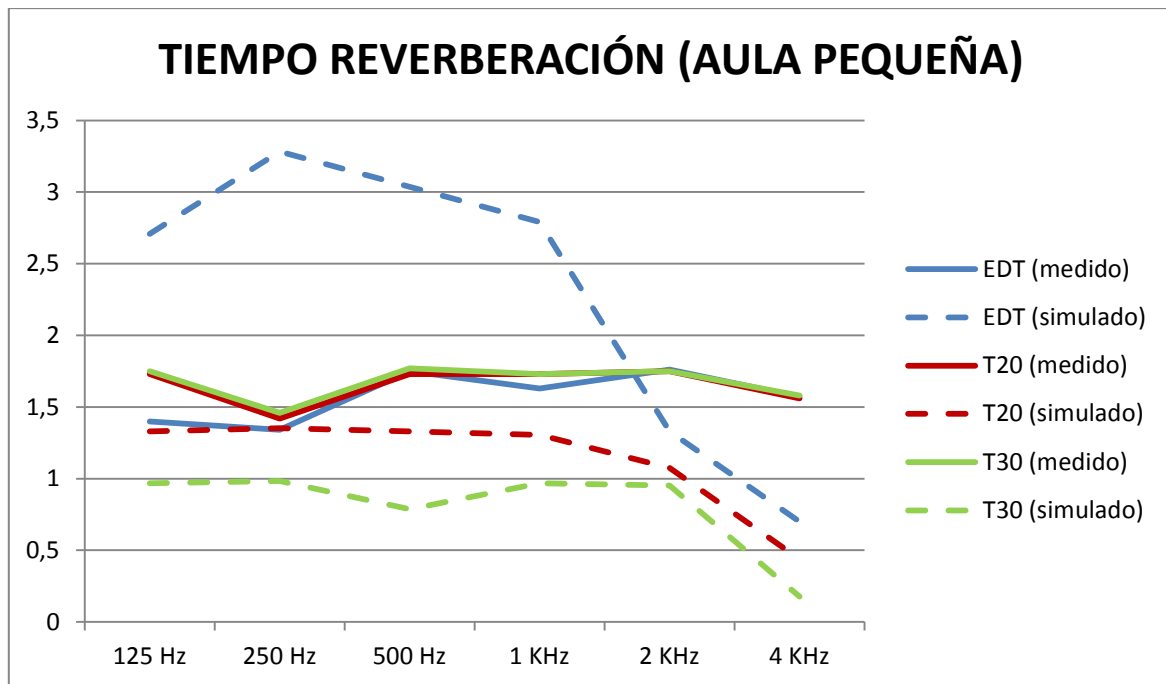


Figura 35: Comparación tiempos de reverberación (aula pequeña)

Para consultar los datos numéricos, consultar el *Anexo 2: Comparación tiempos reverberación (datos)*. De todos modos, como se ve en las imágenes, hay bastante diferencia entre los datos de simulaciones y de los datos medidos, la simulación que más se aproxima a los datos medidos es el T20 para frecuencias bajas y medias.

5 Conclusiones y Líneas Futuras

5.1 Conclusiones

GENERALES

- Se ha completado el objetivo principal creando una herramienta de simulación acústica de salas con Matlab. La herramienta creada es fácilmente editable y customizable a gusto del usuario
- Se ha recordado conocimientos de acústica y geometría, que son totalmente necesarios para la realización de la herramienta.
- Se ha creado un script para representar el trazado de rayos. Este script, representa la totalidad de los rayos calculados (hasta el orden elegido por el usuario) en la sala elegida desde el emisor al receptor.
- Se ha creado un script para poder auralizar archivos de audio sobre la sala diseñada. Este script da la opción de cargar un archivo de audio y de simular, cómo sonaría en el receptor el sonido en el caso de que lo emitiera el emisor en la sala diseñada.
- Se han comparado los datos de la simulación creada con los datos medidos en las aulas de la EPS de la UAH. Estos datos han sido obtenidos del Proyecto Final de Carrera “Estudio acústico de las aulas de la Escuela Politécnica Superior de la UAH”.

ESPECÍFICAS

- Se ha optado por la definición de salas en forma de paralelepípedo debido a que son las más sencillas de dibujar (ya que hay que dibujar los vértices de la sala uno a uno). El mayor tiempo de programación y preparación del algoritmo por parte del usuario, se lo lleva la realización de la definición de los puntos que forman la sala. Hasta este punto se hace punto a punto.
- La atenuación del aire no influye demasiado en la caracterización de una sala ya que la amplia mayoría de la atenuación la producen los materiales. A pesar de los dos modos de atenuación del aire analizados, ambos proporcionan prácticamente los mismos valores. Se ha elegido la segunda manera debido a que es posible para calcular para cualquier valor de humedad y temperatura y no los que están disponibles en la tabla.
- Los tiempos de ejecución son aceptables hasta orden de reflexión 7, a pesar de la cantidad de rayos que se procesan para después descartar más del 95% de los rayos (97,5% en un caso concreto de orden 6). Esto es debido a que se descartan los rayos que no interseccionan dentro de los límites del plano sobre el que se ha obtenido el punto de imagen virtual.
- Los resultados obtenidos para órdenes de reflexión bajos (hasta 8), son bastante buenos en lo que a comparaciones de calidad acústica con la realidad se refiere. Esta comparación no

se ha hecho de modo objetivo, sino que de modo subjetivo, ya que es el usuario el que determina la calidad de la auralización obtenida.

- La animación de la representación del trazado de rayos, da una idea de cómo se distribuye el sonido por la sala creada. En esa animación se representan los rayos que se han simulado (no representando los rayos válidos ya que son eliminados).
- Las colas reverberantes no son muy eficientes, ya que todas van a tener el mismo número de rayos independientemente de la banda frecuencial, aunque la tendencia de caída sí que se adapta a la caída de cada banda frecuencial (de manera lineal con cierta aleatoriedad), esto implica que el cálculo de los tiempos de reverberación no sean tan buenos como debieran. Todas tienen
- El parámetro que más representa la realidad en comparación con los datos obtenidos mediante la medición in situ es el T20, sobre todo para las frecuencias medias (500 Hz y 1 KHz) y bajas (125 Hz y 250 Hz). Para frecuencias altas (2 KHz y 4 KHz), hay una mayor diferencia.
- Las auralizaciones estudiadas se parecen bastante a la realidad (aunque mediante un método subjetivo por el oyente), a pesar de trabajar con órdenes de reflexión bajos y la cola de reverberación lineal (con la misma pendiente para todas las bandas frecuenciales).

5.2 Líneas Futuras

- Optimizar/Mejorar el código para poder llegar a órdenes de simulación mayores. Encargándose de esto, hará que no tenga tanta importancia la cola reverberante posteriormente insertada, ya que habrá más rayos calculados y menos simulados.
- Medir la tendencia de la caída del ecograma para poder estimar la caída de la cola reverberante. Esto hará que el algoritmo sea más realista y poder valores de tiempo de reverberación más precisos.
- Crear herramienta para poder importar salas creadas en programas de dibujo como Autocad o Google Sketch up. Haciendo esto, hará que no se tenga que dibujar punto a punto, que es la parte más tediosa del proceso de creación de la sala.
- Crear una interfaz gráfica para controlar la herramienta, debido a que al añadir nuevas funcionalidades sea más sencillo de controlar todos los parámetros de manera más intuitiva.
- Añadir patrones de radiación tanto a la fuente como al receptor, para poder hacerlos directivos. Haciendo esto, el programa será capaz de obtener un nivel de realidad mayor, ya que la fuente y receptor programados hasta este punto son perfectamente omnidireccionales, cosa que en los productos comerciales (sobre todo los receptores) es muy difícil de conseguir.

6 Bibliografía

6.1 Acústica y Acústica Geométrica

- Alexandre Cortizo, E y Pena Giménez, A. Ingeniería musical.
- Miqueleiz Monente, L. (2013). Proyecto Final de Carrera: 3D-Modelización acústica en recintos de gran capacidad. Estimación de tiempos de reverberación. UPNA.
- Beranek, L. (1996). Concert and opera halls: How they sound. Acoustical Society of America 1996.
- Carrión Isbert, A. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Ediciones UPC.
- Möeser, M. y Barros, J.L. (2009). Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones, Springer
- Arau-Puchades, H. (2008). Es el criterio Acústico el paradigma de la excelencia acústica en el diseño de salas. SPA-SEA, Coímbra, 20-22.
- <http://www.sengpielaudio.com/AirdampingFormula.htm>

6.2 Geometría

- http://www.vitutor.net/#hook_geo
- http://www.vitutor.net/2/17/geometria_espacio.html
- Mora Flores, W. (2013). Vectores, rectas y planos. Revista digital Matemática, Educación e Internet.

6.3 Técnica Imagen virtual y respuesta al impulso

- Allen, J. and Berkley, D. (1979). Image Method for Efficiently Simulating Small Room Acoustics,” Journal of the Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, pp. 943-950.
- Habets, E. A. (2006). Room impulse response generator. *Technische Universiteit Eindhoven, Tech. Rep*, 2(2.4), 1.

6.4 Matlab

- Ayuda de Matlab y página de Mathworks (<http://www.es.mathworks.com/help/matlab/>)
- Howard, C. Q., & Cazzolato, B. S. (2014). *Acoustic analyses using Matlab® and Ansys®*. CRC Press.

6.5 Otros

- Barrio Rodríguez, J. (2012). Proyecto Final de Carrera: Estudio acústico de las aulas de la Escuela Politécnica Superior de la UAH. UAH
- http://www.feilding.net/sfuad/musi3012-01/html/room_evaluation/CoefficientChart.htm

7 Anexos

7.1 Anexo 1: Lista de materiales empleados

http://www.feilding.net/sfuad/musi3012-01/html/room_evaluation/CoefficientChart.htm.

TYPE	DESCRIPTION	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Floor Materials	Carpet	0.01	0.02	0.06	0.15	0.25	0.45
	Concrete (unpainted, rough finish)	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
	Concrete (sealed or painted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02
	Marble or glazed tile	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02
	Vinyl tile or linoleum on concrete	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
	Wood parquet on concrete	0.04	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07
	Wood flooring on joists	0.15	0.11	0.1	0.07	0.06	0.07
Seating Materials	Benches (wooden, empty)	0.1	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
	Benches (wooden, 2/3 occupied)	0.37	0.4	0.47	0.53	0.56	0.53
	Benches (wooden, fully occupied)	0.5	0.56	0.66	0.76	0.8	0.76
	Benches (cushioned seats and backs, empty)	0.32	0.4	0.42	0.44	0.43	0.48
	Benches (cushioned seats and backs, 2/3 occupied)	0.44	0.56	0.65	0.72	0.72	0.67
	Benches (cushioned seats and backs, fully occupied)	0.5	0.64	0.76	0.86	0.86	0.76
	Theater seats (wood, empty)	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.08
	Theater seats (wood, 2/3 occupied)	0.34	0.21	0.28	0.53	0.56	0.53
	Theater seats (wood, fully occupied)	0.5	0.3	0.4	0.76	0.8	0.76
	Seats (fabric-upholsterd, empty)	0.49	0.66	0.8	0.88	0.82	0.7
	Seats (fabric-upholsterd, fully occupied)	0.6	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85
Wall Materials	Brick (natural)	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
	Brick (painted)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
	Concrete block (coarse)	0.36	0.44	0.31	0.29	0.39	0.25
	Concrete block (painted)	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
	Concrete (poured, rough finish, unpainted)	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
	Doors (solid wood panels)	0.1	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
	Glass (1/4" plate, large pane)	0.18	0.06	0.04	0.03	0.02	0.02
	Glass (small pane)	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
	Plasterboard (12mm (1/2") paneling on studs)	0.29	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
	Plaster (gypsum or lime, on masonry)	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
	Plaster (gypsum or lime, on wood lath)	0.14	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
	Plywood (3mm(1/8") paneling over 31.7mm(1-1/4") airspace)	0.15	0.25	0.12	0.08	0.08	0.08
	Plywood (3mm(1/8") paneling over 57.1mm(2-1/4") airspace)	0.28	0.2	0.1	0.1	0.08	0.08
	Plywood (5mm(3/16") paneling over 50mm(2") airspace)	0.38	0.24	0.17	0.1	0.08	0.05
	Plywood (5mm(3/16") panel, 25mm(1") fiberglass in 50mm(2") airspace)	0.42	0.36	0.19	0.1	0.08	0.05
Plywood (6mm(1/4") paneling, airspace,	0.3	0.25	0.15	0.1	0.1	0.1	

	light bracing)							
	Plywood (10mm(3/8") paneling, airspace, light bracing)	0.28	0.22	0.17	0.09	0.1	0.11	
	Plywood (19mm(3/4") paneling, airspace, light bracing)	0.2	0.18	0.15	0.12	0.1	0.1	
	Drapery (10 oz/yd ² , 340 g/m ² , flat against wall)	0.04	0.05	0.11	0.18	0.3	0.35	
	Drapery (14 oz/yd ² , 476 g/m ² , flat against wall)	0.05	0.07	0.13	0.22	0.32	0.35	
	Drapery (18 oz/yd ² , 612 g/m ² , flat against wall)	0.05	0.12	0.35	0.48	0.38	0.36	
	Drapery (14 oz/yd ² , 476 g/m ² , pleated 50%)	0.07	0.31	0.49	0.75	0.7	0.6	
	Drapery (18 oz/yd ² , 612 g/m ² , pleated 50%)	0.14	0.35	0.53	0.75	0.7	0.6	
	Fiberglass board (25mm(1") thick)	0.06	0.2	0.65	0.9	0.95	0.98	
	Fiberglass board (50mm(2") thick)	0.18	0.76	0.99	0.99	0.99	0.99	
	Fiberglass board (75mm(3") thick)	0.53	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	
	Fiberglass board (100mm(4") thick)	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	
	Open brick pattern over 75mm(3") fiberglass	0.4	0.65	0.85	0.75	0.65	0.6	
	Pageboard over 25mm(1") fiberglass board	0.08	0.32	0.99	0.76	0.34	0.12	
	Pageboard over 50mm(2") fiberglass board	0.26	0.97	0.99	0.66	0.34	0.14	
	Pageboard over 75mm(3") fiberglass board	0.49	0.99	0.99	0.69	0.37	0.15	
	Perfomated metal (13% open, over 50mm(2") fiberglass)	0.25	0.64	0.99	0.97	0.88	0.92	
	Ceiling Materials	Plasterboard (12mm(1/2") in suspended ceiling grid)	0.15	0.11	0.04	0.04	0.07	0.08
		Underlay in perforated metal panels (25mm(1") batts)	0.51	0.78	0.57	0.77	0.9	0.79
		Metal deck (perforated channels, 25mm(1") batts)	0.19	0.69	0.99	0.88	0.52	0.27
Metal deck (perforated channels, 75mm(3") batts)		0.73	0.99	0.99	0.89	0.52	0.31	
Plaster (gypsum or lime, on masonry)		0.01	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	
Plaster (gypsum or lime, rough finish or timber lath)		0.14	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04	
Sprayed cellulose fiber (16mm(5/8") on solid backing)		0.05	0.16	0.44	0.79	0.9	0.91	
Sprayed cellulose fiber (25mm(1") on solid backing)		0.08	0.29	0.75	0.98	0.93	0.76	
Sprayed cellulose fiber (25mm(1") on timber lath)		0.47	0.9	1.1	1.03	1.05	1.03	
Sprayed cellulose fiber (32mm(1-1/4") on solid backing)		0.1	0.3	0.73	0.92	0.98	0.98	
Sprayed cellulose fiber (75mm(3") on solid backing)		0.7	0.95	1	0.85	0.85	0.9	
Wood tongue-and-groove roof decking		0.24	0.19	0.14	0.08	0.13	0.1	

Other Materials	People-adults (per 1/10 person)	0.25	0.35	0.42	0.46	0.5	0.5
	People-high school students (per 1/10 person)	0.22	0.3	0.38	0.42	0.45	0.45
	People-elementary students (per 1/10 person)	0.18	0.23	0.28	0.32	0.35	0.35
	Ventilating grilles	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4
	Water or ice surface	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
		8	8	3	5		5

Tabla 11: Lista de materiales con los coeficientes de absorción

7.2 Anexo 2: Comparación tiempos reverberación (datos)

TIPO AULA	PARAMETRO	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz
Grande	EDT (medido)	2.04	1.94	2.37	2.12	2.17	1.83
	EDT (simulado)	2.919	3.524	3.161	3.04	1.761	0.719
	T20 (medido)	2.19	1.92	2.4	2.14	2.11	1.88
	T20 (simulado)	1.311	1.435	1.347	1.383	0.948	0.688
	T30 (medido)	2.36	1.93	2.44	2.14	2.1	1.89
	T30 (simulado)	0.995	1.254	1.413	0.995	0.874	0.171
Mediana	EDT (medido)	1.77	1.59	2.06	2.08	1.99	1.72
	EDT (simulado)	3.821	3.793	3.153	3.281	1.37	0.742
	T20 (medido)	2.01	1.63	2.07	2.05	1.99	1.74
	T20 (simulado)	1.292	1.292	1.292	1.407	0.764	0.675
	T30 (medido)	2.35	1.65	2.1	2.08	1.98	1.73
	T30 (simulado)	0.964	1.021	1.217	1.021	0.861	0.177
Pequeña	EDT (medido)	1.4	1.34	1.75	1.63	1.76	1.57
	EDT (simulado)	2.709	3.282	3.036	2.791	1.33	0.699
	T20 (medido)	1.73	1.42	1.73	1.73	1.75	1.56
	T20 (simulado)	1.329	1.353	1.329	1.304	1.075	0.439
	T30 (medido)	1.75	1.46	1.77	1.73	1.75	1.58
	T30 (simulado)	0.968	0.984	0.786	0.968	0.951	0.176

Tabla 12 : Datos de Tiempo de Reverberación

7.3 Anexo 3: Planos de las aulas de la EPS de la UAH

Los planos que se encuentran en este anexo, han sido extraídos del Proyecto Final de Carrera: Estudio acústico de las aulas de la Escuela Politécnica Superior de la UAH. En primer lugar están las dimensiones de las distintas aulas, y en segundo lugar se tienen las superficies que corresponden a la zona de audiencia de cada una de ellas.

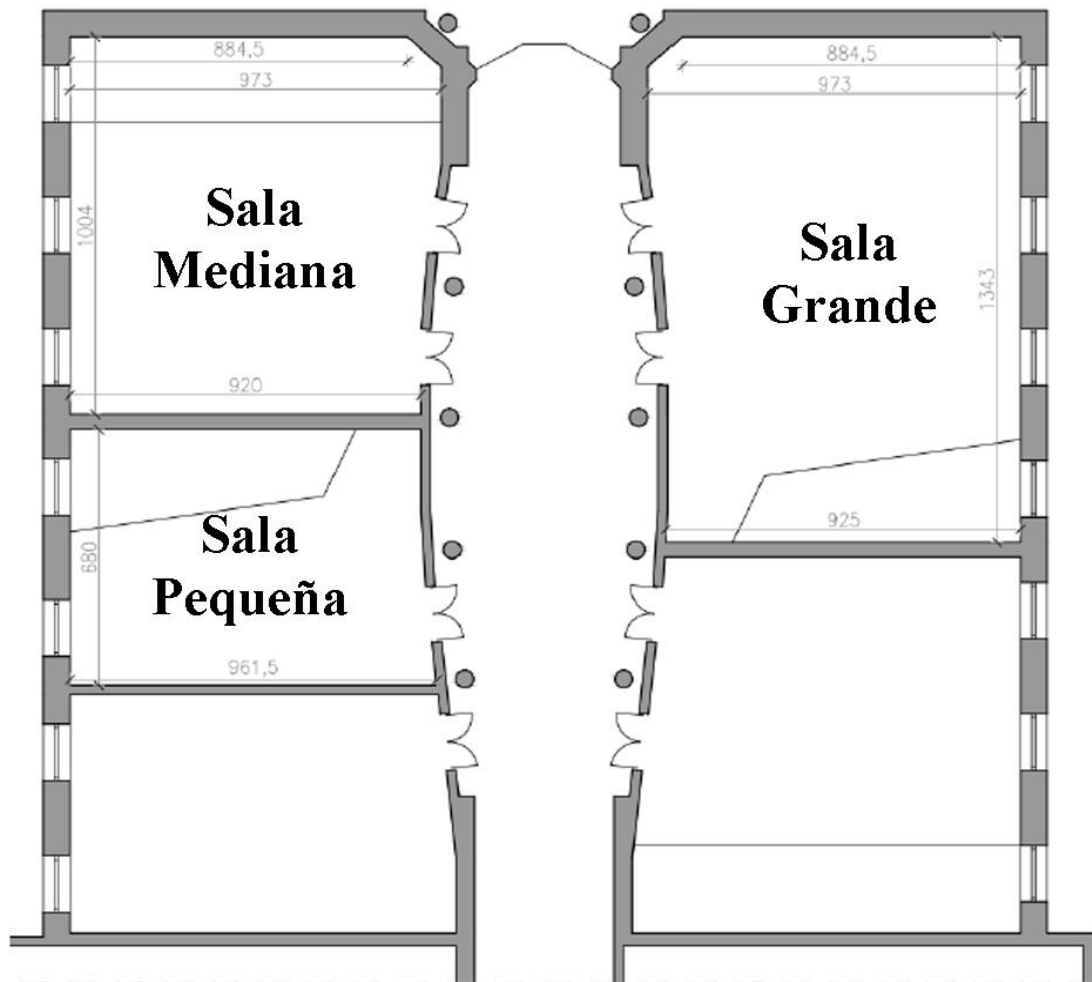


Figura 36: Dimensiones de las aulas EPS de la UAH

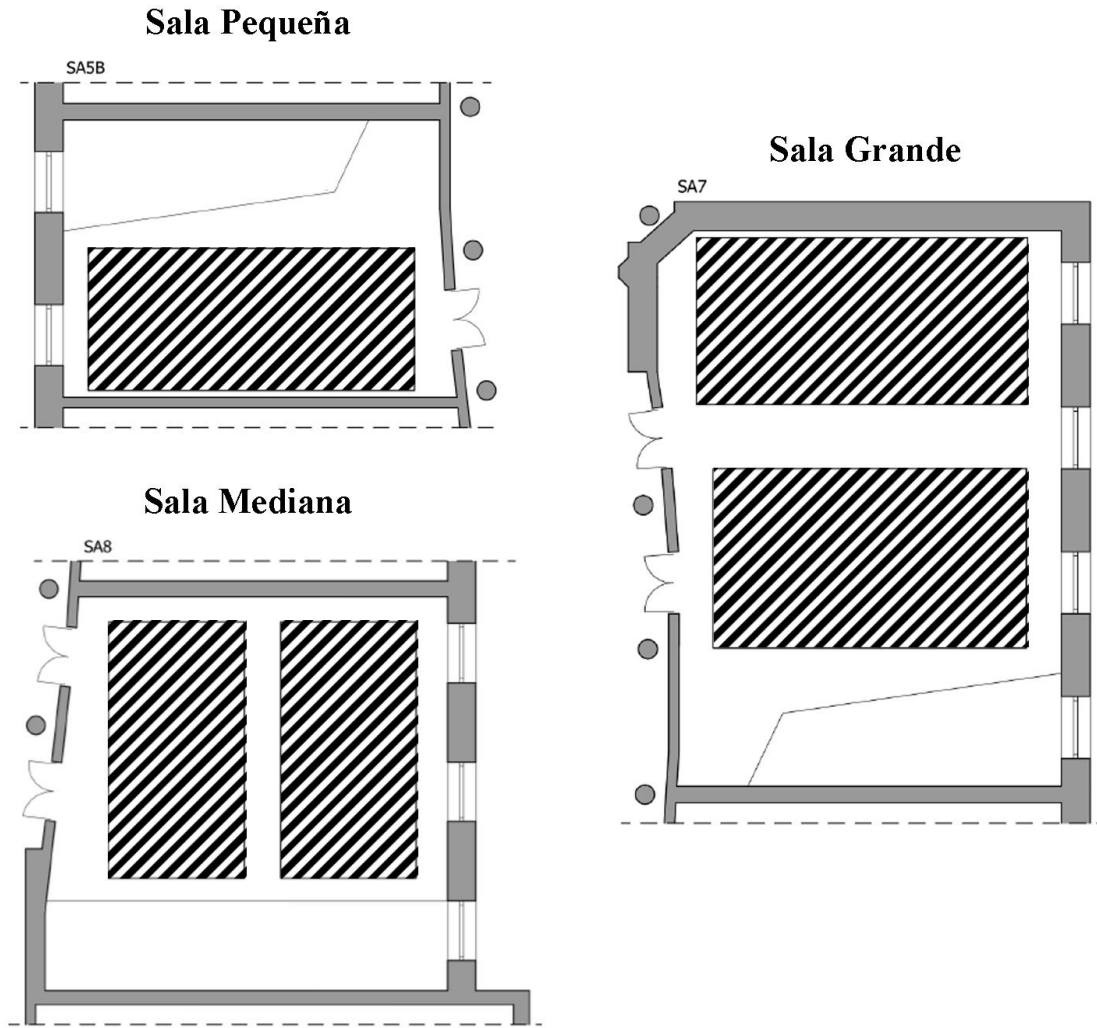


Figura 37: Superficie de audiencia de cada tipo de aula

7.4 Encabezados de las funciones de Matlab creadas

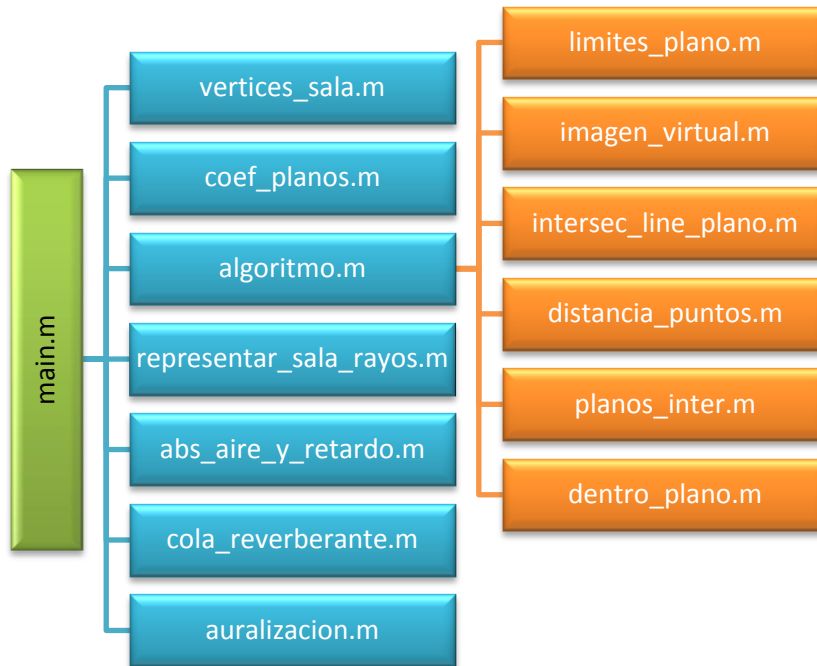


Figura 38: Jerarquía de las funciones creadas

```
function [ p1,p2,p3,planos ] = vertices_sala( largo,ancho,alto )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - largo: Longitud total de la sala (valor escalar)
% - ancho: Anchura total de la sala (valor escalar)
% - alto: Altura total de la sala (valor escalar)
% SALIDAS
% - p1: Conjunto de puntos 1 que definen el plano, será de dimensiones num_pla x 3
% - p2: Conjunto de puntos 2 que definen el plano, será de dimensiones num_pla x 3
% - p3: Conjunto de puntos 3 que definen el plano, será de dimensiones num_pla x 3
% - planos: Conjunto de los 4 puntos que forman cada uno de los planos,num_pla x 12
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [ coef_planos,planos_sin ] = coef_planos( p1,p2,p3 )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - p1: Conjunto de Puntos 1 que forman el plano, 1 por fila Nx3
% - p2: Conjunto de Puntos 2 que forman el plano, 1 por fila Nx3
% - p3: Conjunto de Puntos 2 que forman el plano, 1 por fila Nx3
% SALIDAS
% - coef_planos: Conjunto de coeficientes (A-B-C-D) que forman cada
% uno de los planos, definidos como Nx4, siendo N el
% número de planos y 4 los coeficientes del plano.
% - planos_sin: Matriz 3D en la que en la tercera dimensión falta
% cada vez un plano, en la 1 falta el plano 1, en la 2
% falta el plano 2 y así sucesivamente hasta formar una
% matriz de dimensiones (N-1)x4xN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

function [ rayo_directo, trazado_rayos2 ] = algoritmo( orden, emisor, receptor, coef_planos, planos_sin, planos )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - orden: Orden de reflexion al que se quiere llegar (incluyendo los anteriores
% - emisor: Posición en la que se encuentra el emisor, [x,y,z]
% - receptor: Posición en la que se encuentra el receptor, [x,y,z]
% - coef_planos: Conjunto de coeficientes (A-B-C-D) que forman cada uno de los
%               planos, definidos como Nx4, siendo N el número de planos y 4 los
%               coeficientes del plano.
% - planos_sin: Matriz 3D en la que en la tercera dimensión falta cada vez un plano,
%               en la 1 falta el plano 1, en la 2 falta el plano 2 y así
%               sucesivamente hasta formar una matriz de dimensiones (N-1)x4xN
% - planos: Conjunto de los 4 puntos que forman cada uno de los planos, num_pla x 12
% SALIDAS
% - rayo_directo : Estructura que contiene los datos del rayo directo (puntos de
%                 origen y destino y la longitud total del rayo
% - trazado_rayos2: Estructura que contiene los datos de los rayos reflejados (el
%                 punto de simetría, el de intersección con el plano, el plano
%                 sobre el que se ha dado la intersección, la distancia de cada
%                 uno de los tramos y la distancia total), para cada rayo de cada
%                 orden.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ limites ] = limites_plano( planos )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - planos: Conjunto de los 4 puntos que forman cada uno de los planos
%           que definen la sala estudiada, definidos de forma que cada
%           fila representa un plano, en el que estarán los 4 puntos que
%           forman dicho plano, Nx(3x4), donde N es el número de planos
%           3 son las 3 coordenadas de cada punto y 4 los 4 puntos que
%           forman el plano.
% SALIDAS
% - limites : Límites de las coordenadas máximas y mínimas de cada uno
%           de los planos que forman la sala, una fila por cada plano
%           y las dimensiones serán de Nx6, donde N es el número de
%           planos y 6 es el vector de coordenadas maximas y mínimas
%           [x_min,x_max,y_min,y_max,z_min,z_max].
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ psim ] = imagen_virtual(puntos,coef_planos)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - puntos: Puntos de los que se quiere obtener la imagen virtual, uno
%           por cada fila, siendo en total de Nx3
% - coef_planos: Conjunto de coeficientes (A-B-C-D) que forman cada uno
%               de los planos, definidos como Mx4, siendo M el número
%               de planos y 4 los coeficientes del plano.
% SALIDAS
% - psim : Punto de imagen virtual con respecto a cada uno de los planos,
%           teniendo una matriz 3D, en las dos primeras dimensiones son
%           las coordenadas X-Y-Z del punto imagen virtual con respecto
%           al plano de entrada i y la tercera dimensión son los datos si
%           hay más de un punto de entrada.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ punto ] = intersec_line_plano(p11,p12,coef_planos)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - p11: Conjunto de Puntos 1 que forman la linea, 1 por fila Nx3
% - p12: Conjunto de Puntos 1 que forman la linea, 1 por fila Nx3. Si
%       esta entrada es de tamaño 1x3, se tomará como que todos los
%       puntos de p11 se unen con el punto p12 para formar la recta.
% - coef_planos: Conjunto de coeficientes (A-B-C-D) que forman cada uno
%               de los planos, definidos como Mx4, siendo M el número
%               de planos y 4 los coeficientes del plano.
% SALIDAS
% - punto : Puntos de intersección recta-plano, 1 por fila Nx3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ distancia ] = distancia_puntos( p1,p2 )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - p1: Conjunto de Puntos 1, Un punto por fila Nx3
% - p2: Conjunto de Puntos 2, Un punto por fila Nx3
% SALIDAS
% - Distancia: Distancia que hay entre dos puntos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ planos ] = planos_inter( orden,num_pla )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - orden: Valor que define el orden de rebotes al que vamos a llegar
% - num_pla: Valor que indica el numero de planos que forma la sala
% SALIDAS
% - planos : Matriz que contiene los planos en los que intersecciona la
%           recta.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ comp ] = dentro_plano( planos,pinter,limites )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - planos: Planos sobre los que se ha hecho el rebote.
% - pinter: Coordenadas (x,y,z) sobre las que se produce el rebote.
% - limites: Coordenadas máximas de cada plano, para cada uno de ellos se
%           tiene [x_min,x_max,y_min,y_max,z_min,z_max], por lo que la dim
%           total, va a ser (num_pla x 6)
% SALIDAS
% - comp: Valor para cada rayo que indica si alguno de los rebotes se da
%        fuera del plano sobre el que se ha rebotado, dimensiones
%        (num_ray x 1).
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [] = representar_sala_rayos( emisor,receptor,largo,ancho,alto,orden,trazado_rayos2 )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - emisor: Coordenadas de la posición del emisor.
% - receptor: Coordenadas de la posición del receptor.
% - largo: Longitud total de la sala (en metros).
% - ancho: Anchura total de la sala (en metros).
% - alto: Altura total de la sala (en metros).
% - orden: Orden al que llegan los rayos.
% - trazado_rayos: Estructura que contiene los datos de los rayos creada.
% SALIDAS
% -
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ as,s ] = abs_aire_y_retardo( d_ray_dir,d_traz_ray,temp,hr,pa )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - d_ray_dir: Distancia del rayo directo entre el emisor y el receptor.
% - d_traz_ray: Distancia de los rayos trazados entre emisor y receptor.
% - tempe: Temperatura a la que se encuentra la sala en el momento del
%         estudio en grados celsius.
% - hume: Humedad relativa a la que se va a encontrar la sala estudiada.
%        Dato proporcionado en porcentaje.
% - pa: Presión atmosférica a la que se encuentra la sala (en pascales).
% SALIDAS
% - as: Absorción de la onda sonora (por bandas frecuenciales 125-4K)
%      por el hecho de transitar por un medio que no es el vacío.
% - s: Intervalo temporal, con las condiciones de temperatura y
%      humedad que cada uno de los rayos tarda en hacer el recorrido
%      emisor-receptor. También conocido como retardo
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ cola,ejex ] = cola_reverberante( x_rd,NR,x,x0,y,y0 )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - x_rd: Retardo del rayo directo.
% - NR: Número de rayos que se han obtenido mediante las técnicas
%       anteriores.
% - x: Valor temporal hasta el que va a haber rayos.
% - x0: Valor temporal (retardo) del último rayo obtenido anteriormente.
% - y: Valor hasta el que se quiere llegar como atenuación mínima.
% - y0: Valor de atenuación del último rayo calculado, es un vector fila
%       con el valor correspondiente para cada banda frecuencial.
% SALIDAS
% - cola: Valor de las atenuaciones de los rayos de la cola de
%         reverberación.
% - ejex: Valor del retardo de los rayos de la cola de reverberación.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function [ y,Fs ] = auralizacion( retardo,aten_total,guardar,titulo,cancion,fs )
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ENTRADAS
% - retardo: Vector columna con los retardos de cada uno de los rayos
% - aten_total: Vector columna con la atenuación de cada uno de los rayos
%               posee datos para cada banda de frecuencias, la dimension
%               total es de (num_rayos x 6).
% - guardar: Opción de guardar el audio, Cuando está a 1, guardará un
%             .wav con la salida, en otro caso no guardará nada.
% - titulo: En el caso de que guardar sea 1, titulo con el que guardará
%            el .wav
% - cancion: (Opcional) Canción que se quiere auralizar
% - fs: (Opcional) Frecuencia de muestreo de la canción de entrada. Si
%        no hay nada en el campo 'cancion' en este tampoco ha de haberlo.
% SALIDAS
% - y: Señal de salida, al pasar la señal de entrada por la respuesta
%      al impulso de la sala.
% - Fs: Frecuencia de muestreo de la señal de salida.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```