

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Análisis de los criterios de nivel e inteligibilidad de una sala mediante FDTD”

TRABAJO FINAL DE CARRERA

Autor/es:
Isaac López López

Director/es:
Francisco Javier, Redondo Pastor

GANDIA, 2011

Resumen

El campo de la acústica como en otros muchos campos de la ciencia, es extremadamente amplio. En la acústica podemos encontrar disciplinas como por ejemplo la acústica ambiental, la acústica musical, la psicoacústica y la acústica arquitectónica entre otras.

Este proyecto se va a centrar en la acústica arquitectónica. Más concretamente, el proyecto a desarrollar, va a hacer especial hincapié en el diseño de los sistemas de refuerzo sonoro. De una manera más extensa, dentro de la acústica arquitectónica, encontramos el aislamiento acústico y el acondicionamiento acústico, donde ambas son complementarias pero conceptualmente distintas. Por lo que en el acondicionamiento acústico, en muchas ocasiones, ya sea por la complicidad geométrica, por las dimensiones o por el uso que se le va a dar al local (ejemplo: centros comerciales), hace falta un refuerzo sonoro para garantizar la escucha de todos los usuarios.

El acondicionamiento acústico que se utiliza hoy en día puede ser pasivo o activo. En este proyecto se va a tratar el acondicionamiento activo que proporcionará la instalación de un refuerzo sonoro activo en una sala.

El proyecto a desarrollar consiste en la instalación de un refuerzo sonoro activo en una sala de dimensiones pequeñas. Es tal caso porque se va a llevar este refuerzo sonoro activo mediante la simulación en un lenguaje de programación, en cierta medida sencillo, como es el que utiliza el programa matemático Matlab.

Es aquí donde este tipo de proyectos cobran una relativa importancia, en los cuales se va a ser capaz de estudiar la respuesta de una sala (criterios de nivel e inteligibilidad), frente a un sistema de refuerzo sonoro activo con la gran ventaja de no estar construida la sala. Pudiendo ver las ondas acústicas en tiempo real, como se propagan en la sala, observando en que puntos del local hay máximos o mínimos para su posterior acondicionamiento.

Índice general

Índice general	I
1 Precedentes	1
1.1. Motivación del proyecto	1
1.2. Objetivo y plan de trabajo	2
2 Introducción	3
2.1. Conceptos básicos de acústica de recintos	3
2.2. Introducción a los sistemas de refuerzo sonoro	8
3 Diseño de los sistemas de refuerzo sonoro	15
3.1. Según los criterios de nivel: EAD y GAN	15
3.2. Según los criterios de inteligibilidad	20
4 Métodos numéricos	25
4.1. Programas de simulación	26
4.2. Aplicaciones e importancia en acústica	29
5 Método FDTD	31
5.1. Introducción	31
5.2. Aplicaciones en acústica	34
5.3. Desarrollo teórico	34
6 Simulación	39
6.1. Directividad de un altavoz en campo libre.	40
6.2. Sala con refuerzo sonoro activo	41
6.3. Límite de retroalimentación en una sala.	43
7 Análisis de los resultados	47
7.1. Nivel de presión sonora	47
7.2. EDT	48
8 Conclusión	51
8.1. Conclusiones	51

Bibliografía	53
A Código de los programas de simulación	55
A.1. Directividad	55
A.2. Salas con refuerzo	59
A.3. Salas virtuales	61
B Jerarquía de los programas de simulación.	65

Precedentes

1.1. Motivación del proyecto

En repetidas ocasiones nos encontramos en lugares dónde el uso de sistemas de refuerzo sonoro activo juegan un papel importante como por ejemplo las salas de conferencia, aulas, grandes superficies comerciales, hospitales, salas de concierto y de esta manera un largo etcétera. En todos estos lugares hay instalados sistemas de refuerzo sonoro activo dándole más importancia si aún cabe. Lo que quiero decir es que en este proyecto voy a analizar, tanto la viabilidad como la fiabilidad del uso de la técnica de simulación FDTD (Finite Difference Time Domain), para diseñar sistemas de refuerzo sonoro activo.

He escogido este proyecto junto con el profesor Francisco Javier Redondo, porque creo que es muy importante tener en cuenta las ventajas que nos ofrece el utilizar la simulación mediante FDTD a la hora de diseñar estos sistemas.

Aunque existen limitaciones cabe destacar que para salas pequeñas, la ventaja que nos aporta el uso de FDTD es bastante importante. Nos permite simular y elegir el tipo de sistema de refuerzo sonoro activo más apto para instalar en la sala a estudiar, sin la necesidad de estar la sala construida. De esta manera el resultado obtenido es mucho más óptimo y evitará escuchar el desagradable efecto electroacústico provocado por una mala elección e instalación de las fuentes sonoras (Reverberación electroacústica).

La elección final de este proyecto me viene influenciada por mi trabajo que ostento en estos momentos. Desde hace 7 años trabajo en la sonorización de espectáculos: tanto monólogos, como actuaciones musicales, etcétera. En todos estos años me he encontrado con salas que tenían en muchas ocasiones instalados sistemas de refuerzo sonoro activo, de las cuales me han traído más de un dolor de cabeza por no tener una buena instalación o en la mayoría

de los casos por no haber un estudio anterior para la elección más óptima del sistema de refuerzo sonoro activo. Es ahí dónde en este proyecto quiero aprender e intentar demostrar que con una herramienta tan vital en el mundo de las Telecomunicaciones, como el MATLAB, mediante sencillas operaciones matemáticas es posible estudiar los sistemas de refuerzo sonoro activo trayendo consigo mismo la posibilidad de elegir la mejor opción de instalación del sistema.

1.2. Objetivo y plan de trabajo

El objetivo es evaluar la viabilidad del uso de la técnica de simulación FDTD (Finita Difference Time Domain - Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo), para analizar y diseñar sistemas de refuerzo sonoro activo tanto en campo libre como en campo confinado. Se ha de tener en cuenta que la simulación de fuentes sonoras mediante FDTD no es trivial, y que la directividad de las fuentes juega un papel crucial en el diseño de sistemas de refuerzo sonoro activo.

- 1).- Búsqueda bibliográfica (30 h) :
 - * Diseño de sistemas de refuerzo sonoro activo. (10h)
 - * Método numérico FDTD y su estudio correspondiente en el campo de la acústica. (10h) * Directividad de fuentes sonoras mediante FDTD. (10h)
- 2).- Desarrollo de un código de simulación para recrear fuentes directivas en FDTD con MATLAB. (50h)
- 3).- Implementación de un código con FDTD mediante MATLAB para simular sistemas de refuerzo sonoro activo. (40h)
- 4).- Verificación de la fiabilidad del código desarrollado comparando con otras posibilidades. (30h)
 - * Comparación de los resultados con la teoría estudiada. (10h)
 - * Comparación de los resultados con los estudios de otros PFC, utilizando otras técnicas de simulación. (20h) - PFC de Ignacio Botella ->"Simulación de sistemas de refuerzo sonoro activo con software de simulación basado en la acústica geométrica".

Introducción

En este proyecto no se pretende dar un curso intensivo de acústica por ello, primeramente, en este punto se va a dar una visión global de aquellos aspectos, definiciones más importantes en la acústica de recintos para poder llegar a los objetivos finales de este proyecto.

2.1. Conceptos básicos de acústica de recintos

2.1.1. Sonido directo y sonido reflejado

Para analizar el comportamiento de una onda acústica en el interior de un recinto cerrado, partimos de una fuente puntual que emite una señal de audio [1]. Esta señal se propaga por todo el recinto hasta que llega al receptor o oyente. Pero no existe solo un camino de transmisión, sino que existen miles que podemos clasificar en dos grupos:

- **Sonido Directo:** Es el sonido emitido por la fuente que recibe el oyente directamente, es decir, el sonido que recibiría el receptor en espacio libre, donde no existen reflexiones o, lo que es lo mismo, el sonido que va en línea recta desde la fuente al oyente. Sólo depende de la distancia, disminuyendo su nivel a razón de 6 dB cada vez que se duplica la distancia a la fuente (Ley Cuadrática Inversa).

- **Sonido reflejado:** Es el sonido procedente de las infinitas reflexiones de la señal sonora con las superficies del recinto. Dentro de este último, podemos hacer una clasificación en base al tiempo transcurrido desde que llegó el sonido al oyente :

1. Primeras reflexiones o Reflexiones tempranas: aquellas que llegan al receptor dentro de los 100 primeros milisegundos, que siguen a la recepción del sonido directo (este límite temporal puede variar según la forma y volumen de la sala y también a la aplicación a la que se destine).

2. Cola reverberante o Reflexiones tardías: son las que llegan después de las tempranas y suelen corresponder a reflexiones de orden superior a 3. Su nivel sonoro es menor y su densidad es mayor que las reflexiones tempranas, cuya llegada está discretizada, aunque el oído las integre y las perciba como un sonido único. Éstas determinan cómo es la reverberación del recinto, es decir, el tiempo que el sonido permanece en él. Dependen fundamentalmente de las características de los parámetros de la sala, como el volumen del recinto y su forma.

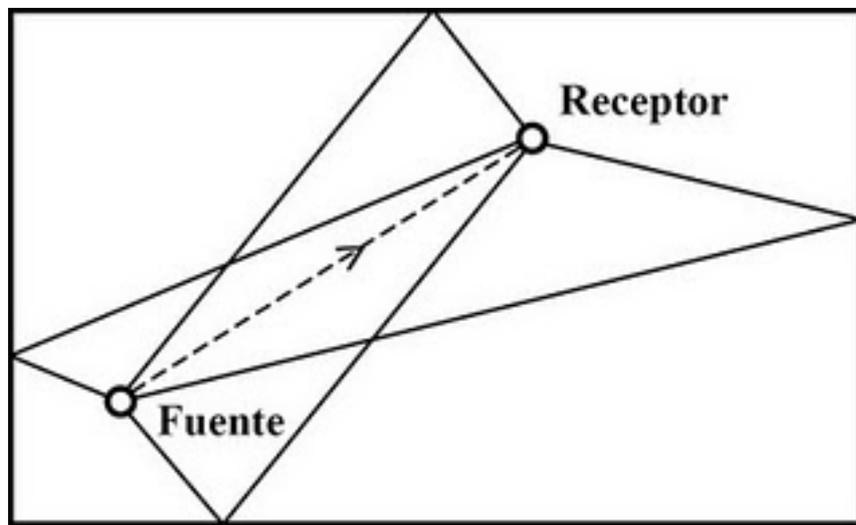


Figura 2.1: Propagación del sonido en una sala

Estas reflexiones, que por tener un camino más largo llegarán más tarde al oyente, se suman al sonido directo de manera que lo que recibe el oyente es la suma de la señal con copias de sí misma retardadas en el tiempo y atenuadas en nivel. Se puede decir que el oído humano se comporta como un integrador.

Una vez llegado a este punto, podemos diferenciar entre dos efectos muy comunes en la acústica de recintos: el eco y la reverberación. Para ello hay un umbral en el tiempo que nos haga diferenciar entre uno y el otro, este umbral es de aproximadamente 100 milisegundos. Para que se produzca eco, debe haber una relación entre el sonido directo y el reflejado de más de 100 milisegundos. Por lo contrario, si es menor el oído no es capaz de diferenciar el sonido directo del reflejado, dando una sensación de alargamiento de la señal, produciendo el fenómeno de reverberación.

Ambos son aspectos importantes a tener en cuenta en el diseño de sistemas

de sonorización, pero en este proyecto, no se tendrá en cuenta el fenómeno del eco, dado que las dimensiones de la sala a estudiar son pequeñas para que den lugar al eco.

En cuanto a la reverberación, se puede decir que es el fenómeno clave para el diseño de cualquier sistema de sonorización de un recinto cerrado. Se puede definir como la permanencia del sonido en un recinto, tras haber cesado la fuente que lo produjo. Éste es el principal fenómeno que caracteriza a un recinto y gracias a él, se pueden definir todas sus cualidades y predecir diversos problemas y/o necesidades.

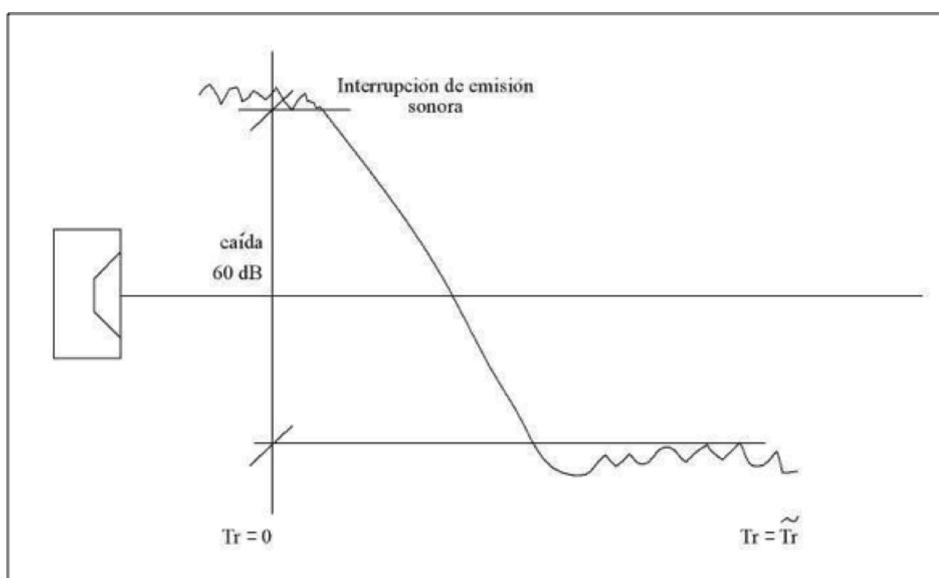


Figura 2.2: Caída del sonido directo en función de la distancia

En la gráfica se distinguen dos zonas:

• **Campo Directo:** es la zona de radiación directa y el nivel en esta zona dependerá de la potencia de la fuente, de la distancia al foco sonoro y de la directividad de la fuente. A su vez esta zona puede subdividirse en dos:

I. Zona de campo próximo: zona próxima a la fuente donde predomina el sonido directo. Sus dimensiones variarán dependiendo de las dimensiones de la fuente, las características de radiación de la misma y su frecuencia de trabajo.

II. Zona de campo lejano: zona con comportamiento de onda libre. La caída de nivel de presión sonora es de 6 dB al duplicar la distancia a la fuente.

• **Campo Reverberado:** zona donde el campo tiende a ser contante, dado que los sonidos reflejados van teniendo los mismos niveles que el sonido directo, aportando energía a los puntos de la zona. El nivel en esta zona estará condicionado por la absorción total que tenga el recinto y el tiempo de reverberación.

Además, existe otro parámetro vital de análisis: la distancia crítica (d_c). Es aquella en la que el campo directo y el campo reverberante coinciden, o lo que es lo mismo, es el punto donde pasamos de campo directo a campo reverberante. Se puede apreciar mejor en la siguiente gráfica:

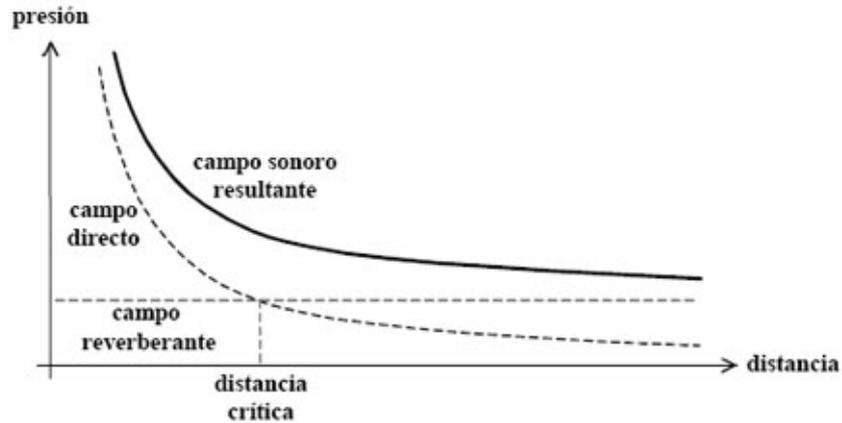


Figura 2.3: Distancia crítica

2.1.2. Tiempo de reverberación

Con el fin de poder cuantificar la reverberación de un recinto, se define el tiempo de reverberación (de forma abreviada TR) a una frecuencia determinada como el tiempo (en segundos) que transcurre desde que el foco emisor se detiene hasta el momento en que el nivel de presión sonora SPL cae 60 dB con respecto a su valor inicial. Un recinto con un TR grande se denomina “vivo” (nave industrial, iglesia, etc.), mientras que si el TR es pequeño recibe el nombre de recinto “apagado” o “sordo” (locutorio, estudio de grabación, etc.). Por lo general, el TR varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir a medida que ésta aumenta. Ello es debido, en parte, a las características de mayor absorción con la frecuencia de los materiales comúnmente empleados como revestimientos, así como a la absorción del aire, especialmente manifiesta en recintos grandes y a altas frecuencias.

Habitualmente, cuando se establece un único valor recomendado de RT para un recinto dado, se suele hacer referencia al obtenido como media aritmética de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1kHz. Se representa por RT_{mid} . En general, el valor más adecuado de RT_{mid} depende tanto del volumen del recinto como de la actividad a la que se haya previsto destinarlo. Por ejemplo, cuando se trata de salas destinadas a la palabra, es conveniente que los valores de RT sean bajos, con objeto de conseguir una

buena inteligibilidad, mientras que en el caso de salas de conciertos son recomendables unos valores apreciablemente más elevados a fin de que la audición musical resulte óptima.

Como ejemplo a ilustrar [2], en la siguiente tabla 2.4, se dan los márgenes de valores recomendados de RT_{mid} para diferentes tipos de salas en el supuesto de que estén ocupadas.

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Cine	0,7 – 1,0
Sala de conferencias	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

Figura 2.4: Márgenes de valores recomendados de TR_{mid}

Si bien existe un gran número de fórmulas para el cálculo teórico del TR , la fórmula clásica por excelencia, y aceptada como de referencia a nivel internacional por su sencillez de cálculo, es la denominada fórmula de Sabine. La correspondiente expresión matemática, obtenida aplicando la teoría acústica estadística y despreciando el efecto de la absorción producida por el aire, es la siguiente:

$$TR = \frac{0,162 \times V}{A_{tot}} \quad (\text{segundos})$$

donde:

$$V = \text{volumen del recinto (m}^3\text{)}$$

$$A_{tot} = \text{absorción total del recinto}$$

Cabe destacar, que el RT calculado a cada frecuencia de interés mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge exclusivamente de la aplicación de la acústica estadística.

Por otra parte es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones).

- Geometría regular de la sala.
- Coeficiente medio de absorción media inferior a, aproximadamente, 0,4.

El TR resulta ser un parámetro fundamental en el diseño acústico de recintos. Ahora bien, en la práctica se utilizan una serie de parámetros complementarios que, por estar fundamentados en la acústica geométrica, dependen de la situación del receptor. La optimización de todos ellos en la fase de diseño permite garantizar con un elevado grado de fiabilidad la obtención de una acústica adecuada, una vez construido el recinto.

Para finalizar este primer punto teórico, hay que resaltar que la acústica de recintos es estudiada en sí mismo, por tres variantes[3] en su campo:

- Teoría Estadística. Estudia los procesos acústicos en recintos de manera similar a la Teoría Cinética de Gases. Se basa en la hipótesis de la homogeneidad, isotropía e incoherencia del campo sonoro.
- Teoría Geométrica. Análisis del campo directo y de las primeras reflexiones de manera individualizada. Detección de ecos y focalizaciones provocadas por superficies de la sala.
- Teoría Ondulatoria. La teoría ondulatoria tiene en cuenta la naturaleza ondulatoria del sonido. Se basa en la resolución de la ecuación diferencial de la onda acústica en la sala introduciendo sus condiciones específicas de contorno. Los cerramientos imponen condiciones de contorno que limitan la forma de las posibles soluciones.

2.2. Introducción a los sistemas de refuerzo sonoro

2.2.1. Definiciones

- **Sonorización**: Reproducción del sonido en una determinada área (área de audiencia) mediante medios artificiales (sistemas de refuerzo sonoro y megafonía).

- **Refuerzo sonoro**: Término que se refiere al uso de sistemas electrónicos para realizar la amplificación de sonido en vivo, con el objeto de que éste pueda ser percibido por una mayor cantidad de oyentes. Estos sistemas pueden variar desde muy sencillos (por ejemplo en un discurso con un orador) hasta extremadamente complejos (en el caso de un concierto masivo).

Cualquier sistema de sonorización que consista en un sistema de refuerzo sonoro activo, debe de asegurar una serie de objetivos:

- a) Alcanzar un nivel sonoro suficiente en el área de audiencia.
- b) Fidelidad de la señal reproducida (respuesta en frecuencia, distorsión, SNR, reverberación, etc.)
- c) Suficiente inteligibilidad.
- d) Recubrimiento uniforme.

Es importante puntuar, que los sistemas de refuerzo sonoro están compuestos por una serie de elementos, de los cuales va a depender en gran medida, la fidelidad de la reproducción. Estos elementos pueden ser:

- i) Acústicos: características acústicas del entorno a sonorizar.
- ii) Electroacústicos: micrófonos y altavoces.
- iii) Equipos de audio: mesas, equalizadores, amplificadores . . .
- iiii) Conexiónado: cables, conectores . . .

Debido a la gran variedad de locales en los cuales nos podremos encontrar, no siempre es necesarios el refuerzo sonoro, ya sea debido a su geometría, acondicionamiento acústico, etcétera. Es por eso que el refuerzo sonoro será necesarios si:

$$\Delta SPL \leq 10dB$$

$$\Delta SPL = SPL_o - 10 \log(D_{max}^2) - SPL_r$$

Siendo:

SPL_o el NPS a 1 metro.

D_{max} la distancia al último espectador.

SPL_r el nivel de ruido de fondo.

2.2.2. Criterios de nivel e inteligibilidad

La situación de los altavoces tiene un efecto importante en el funcionamiento de un sistema sonoro. Según la utilidad, existen configuraciones que se comportan mejor que otras. Se pueden situar los altavoces en columna, en abanico, en el techo, etc. Los sistemas de refuerzo sonoro intentan acercar la fuente al oyente para cubrir dos necesidades: el criterio de nivel y el criterio de inteligibilidad. Estos dos criterios nos proporcionaran datos, los cuales nos ayudaran a elegir el LPS (Level Presion Sound), adecuado de un sistema de refuerzo sonoro.

Los criterios de inteligibilidad deben aplicarse siempre que la instalación vaya a ir destinada a la reproducción de palabra. En muchos de los casos, estos criterios nos proporcionarán datos de niveles de presión mínimos necesarios. En otros casos, en los que el nivel de presión es evidentemente suficiente, se aplicarán para comprobar el grado de inteligibilidad. En los casos de locales con 'acústica difícil' estos criterios nos permiten evaluar la viabilidad de un sistema de refuerzo sonoro, ya que no siempre es posible realizarlo con éxito.

Entre los criterios de inteligibilidad usuales tenemos ALcons, STI y RASTI.

Que el oyente perciba un determinado nivel, es el criterio de nivel, se debe cumplir que el nivel supere al menos en 25 dB el ruido de fondo. Los criterios de nivel se usan o bien solos o bien como complemento de los criterios

de inteligibilidad. Si se utilizan solos, es evidente que la instalación no va a reproducir palabra o que la inteligibilidad está asegurada gracias a un cuidado diseño acústico del local para la aplicación específica (p.e. cines). En cualquier caso, siempre interesa comprobar el grado de inteligibilidad de una instalación.

Cuando la instalación se ha diseñado en base a un criterio inicial de inteligibilidad, suele ser conveniente añadir un criterio de nivel para la selección del nivel a usar. Entre los criterios de nivel típicos, se encuentran el de DISTANCIA ACÚSTICA NECESARIA (EAD) y el de GANANCIA ACÚSTICA NECESARIA (GAN).

2.2.3. Campo sonoro percibido

Cabe destacar que, una vez la fuente ha emitido un sonido, este se propaga por el espacio hasta llegar al lugar donde se encuentra el oyente. Según los límites que existan en el espacio donde se emite el sonido, existirán distintas trayectorias posibles que recorrerá el sonido hasta llegar al oyente. Cada trayectoria supone un tiempo distinto, empleado para llegar, dado que la onda de sonido se propaga a una velocidad concreta.

Así, un único sonido emitido por la fuente, puede suponer una gran cantidad de sonidos recibidos en el oído en momentos de tiempo distintos, según la disposición de las superficies del local (si existen) y según la colocación de la fuente y del oyente respecto a aquellas. Siempre existe un sonido directo que llega desde la fuente al oyente sin reflejarse en ninguna superficie.

Dado que siempre existirá el suelo, siempre llegará una reflexión debida a él. La existencia de otras superficies, en el caso de local cerrado, dará lugar a otras reflexiones que irán llegando en momentos distintos, desde direcciones distintas y con niveles distintos, no sólo por absorciones en la superficie sino por la divergencia esférica (cuando exista).

El enfoque a usar en el estudio del efecto de las reflexiones dependerá mucho de lo que el oído haga con ellas. En principio, interesa empezar por considerar que cada reflexión es un sonido único, claramente diferenciado, en su aparición temporal, de los otros. Con esta perspectiva se elaboran los diagramas de distribución temporal de las reflexiones, llamados ecogramas 2.5.

Los ecogramas sólo serán físicamente ciertos cuando el sonido emitido sea de una duración suficientemente corta (del orden de 1ms) . Cuando eso no ocurra (es lo normal) , los ecogramas indicarán el retardo en la aparición de cada una de las reflexiones, pero las señales directa y reflejada coexistirán durante un cierto periodo de tiempo (cada una de ellas con su retardo asociado), provocando fenómenos acústicos de interferencia, dando lugar a una única onda acústica resultante con el nivel de presión correspondiente y un espectro modificado en cierto grado

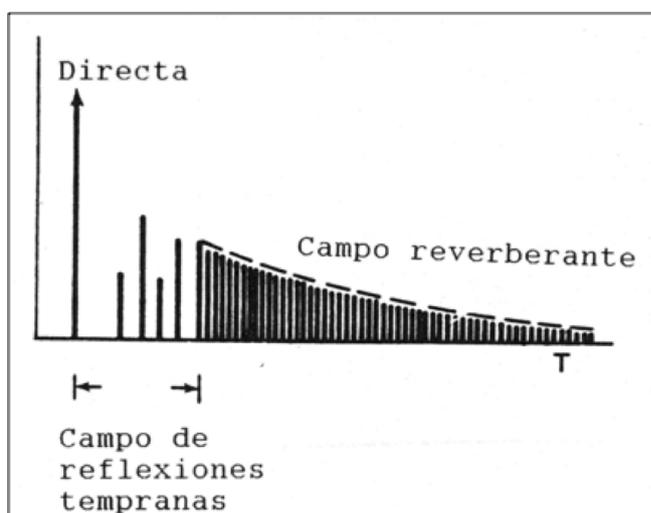


Figura 2.5: Diagrama de reflexiones o ecograma

2.2.4. Efecto de precedencia (Efecto Haas o Imagen Shift)

Aún en el caso de suponer que acústicamente existe una sucesión de reflexiones claramente diferenciables entre sí, el sistema oído-cerebro no las interpretaría siempre así, sino que deben cumplirse ciertos requisitos.

El periodo de integración de Haas es un parámetro que indica un hecho psicoacústico muy concreto: cualquier sonido que llega al oído después de otro sonido, siendo el retardo entre ellos inferior a un cierto valor, no se escucha como sonido diferente sino que queda integrado junto con el anterior en una única sensación. El retardo límite que permite el efecto de integración se conoce como periodo de integración de Haas y su valor se cifra entre 25 y 35 milisegundos, tomando un valor concreto para cada oyente.

Sin embargo, el hecho de que a partir de 35 ms los sonidos se identifiquen como independientes no quiere decir que su audición sea molesta o deteriorante de la calidad de la señal emitida. De hecho, con sonidos reales, en muchas ocasiones es difícil que el oyente identifique dos sonidos distintos (efectos de eco) con retardos inferiores a 50 ms. Pero este es un efecto adicional al de integración y presenta una gran dependencia con el tipo de señal escuchada. Los sonidos que llegan dentro del periodo de integración forman la sensación de la recepción de un sonido único, pero no debe pensarse que la sensación obtenida es siempre la misma.

La complejidad de la percepción de diversas reflexiones que llegan dentro del periodo de integración es elevada, dando lugar a sensaciones distintas según el nivel, dirección y momento de llegada de cada una de las reflexiones. El efecto Haas o Imagen Shift, puede presentarse principalmente en dos zonas del ecograma. En la zona correspondiente a la reverberación en la cual las

sucesivas reflexiones llegan todas con retardos muy pequeños entre ellas, y en la zona de las primeras reflexiones donde pueden existir retardos pequeños.

En la zona de reverberación no se pueden distinguir unas reflexiones de otras, pero la sensación de reverberación varía mucho con el local dada la distinta distribución de las reflexiones integradas. La zona de las primeras reflexiones también varía mucho con el local y es responsable de ciertos efectos psicoacústicos exclusivos que deben considerarse, además de la reverberación, para analizar la calidad de la acústica del local.

De forma mucho más concreta, en la figura 2.6 se muestran las cuatro zonas por lo que a relación entre sonido retardado e inteligibilidad de la palabra se refiere. En el eje de abscisas se indica el retardo temporal entre la reflexión (sonido retardado) y el sonido directo, mientras que en el eje de ordenadas aparece la diferencia de niveles entre ambos sonidos. La curva de separación entre las zonas es solo aproximada.

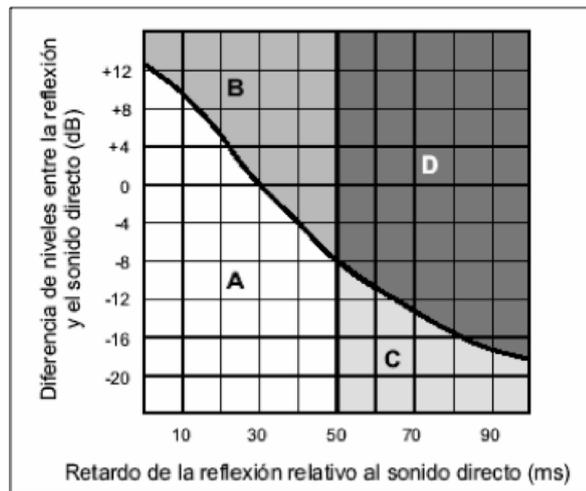


Figura 2.6: Efecto Haas o imagen shift

a) Zona A. La reflexión llega antes de los 50 ms: el oído integra la reflexión y se produce un aumento de inteligibilidad y de sonoridad.

b) Zona B. La reflexión llega antes de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado: el oído integra la reflexión, pero se produce un desplazamiento de la localización de la fuente sonora, generadora del sonido directo, hacia la superficie generadora de la reflexión (imagen shift).

c) Zona C. La reflexión llega después de los 50 ms: la reflexión no es perjudicial para la inteligibilidad debido a que su nivel relativo es suficientemente bajo.

d) Zona D. La reflexión llega después de los 50 ms, si bien con un nivel relativo más elevado la reflexión es percibida como un eco y se produce una pérdida de inteligibilidad.

En principio el oído recibe reflexiones desde distintas direcciones, y el cerebro lo tiene en cuenta, pero toma una decisión al respecto de la procedencia principal del sonido. Esta decisión se toma en base al 'EFECTO DE PRECEDENCIA', según el cual, la procedencia del sonido queda fijada por el sonido que primero llega al oído, es decir, por el sonido que precede a los demás. A esta norma se la suele llamar también 'Ley del primer frente de onda'. Sin embargo, este efecto de precedencia puede ser modificado alterando el nivel de los sonidos recibidos. Si el retardo está en el margen de 5 a 35 ms y la señal que llega más tarde tiene un nivel más de 10dB superior a la señal que llega primero, la sensación de procedencia cambia, siendo el sonido que llega más tarde el que determina el origen del sonido. Para retardos menores de 5 ms, el incremento de nivel necesario para cambiar la sensación de procedencia es menor de 10dB. Su valor concreto puede verse en la figura 2.7.

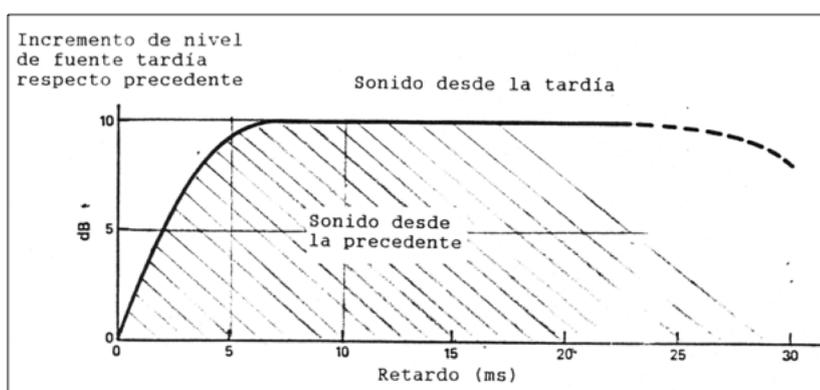


Figura 2.7: Relación retardo/nivel para relacionar señal precedente con sensación de procedencia del sonido.

Resulta evidente que las reflexiones de un sonido emitido desde una fuente, nunca pueden tener un nivel superior al de la onda directa, por lo que la sensación de procedencia siempre corresponde con la onda precedente, que es la directa. Sin embargo, si establecemos un sistema de refuerzo sonoro, en el que existen una serie de altavoces que emiten el mismo sonido, ¿cuál será el que marque el origen del sonido?.

Si nos fijamos en la figura 2.8, podemos ver el caso de una sonorización. En este caso, el sonido que llega antes es el del altavoz más cercano, mientras que el sonido que viene del escenario llega más tarde. En principio por tanto, la sensación de origen del sonido corresponde al altavoz más cercano. Esta situación puede ser considerada como no adecuada en muchas aplicaciones, dado que quiere darse la sensación de procedencia del escenario. Para ello, la señal que llega más tarde debe ser de mayor nivel. Esto vuelve a ser imposible pues la señal del escenario tiene menos nivel de presión que la del altavoz más cercano, pues de no ser así no estaría sirviendo de nada el altavoz cercano.

La solución en estos casos es introducir un retardo electrónico en la señal que alimenta el altavoz más cercano. Así, puede conseguirse que el sonido que llega antes sea el del escenario. Ahora, el sonido que llega más tarde es el del altavoz. Si además le retardamos electrónicamente otros 10 ms, se hace más tardía. La utilidad de hacerla más tardía es que puede incrementarse su nivel hasta en 10dB respecto a la que llega del escenario, sin que se modifique la procedencia. Debe tenerse en cuenta que si el nivel del altavoz se hace superior al del escenario en más de 10dB, la sensación de procedencia vuelve a localizarse en el altavoz.

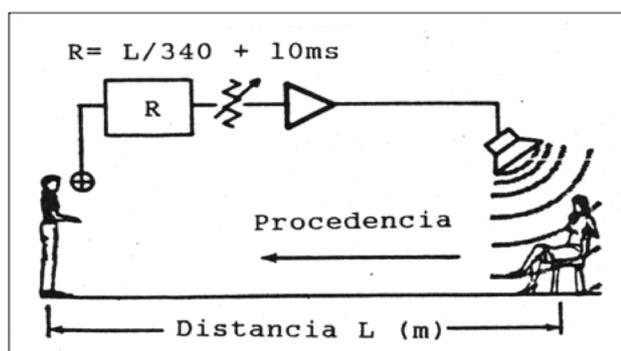


Figura 2.8: Aplicación de retardo para que la sensación de procedencia no corresponda al altavoz cercano.

Diseño de los sistemas de refuerzo sonoro

sonoro

3.1. Según los criterios de nivel: EAD y GAN

En este proyecto se va abordar el diseño de un sistema de refuerzo sonoro en un recinto cerrado. Para poder entender mejor que es un sistema de refuerzo sonoro, previamente introduciremos el sistema de refuerzo sonoro básico, en el que se pueden despreciar los efectos de eco y reverberación. Solo se considera el sonido directo y la atenuación por la distancia (ver figura 3.1).

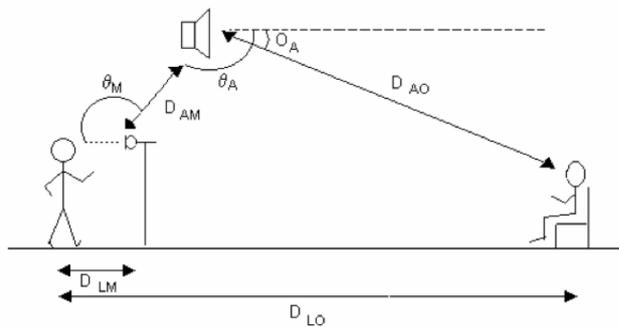


Figura 3.1: Sistema de refuerzo sonoro básico

3.1.1. Distancia acústica equivalente

Los criterios de nivel [4] se desarrollan considerando que la única fuente de problemas para la inteligibilidad es la S/N.

Existen ábacos acerca de la calidad de una comunicación orador-oyente, en función de la distancia entre ellos, del ruido de fondo ponderado A y del nivel de la voz del orador, estando el oyente en el campo directo del orador. Cabe destacar, que estos ábacos nos proporcionan valores recomendados orientativos (ver figura 3.2).

Las curvas (rectas) indican el nivel de señal según la distancia entre la fuente de sonido (orador o altavoz) y el oyente. Aparecen curvas que indican el nivel para cada tipo de voz.

Es curioso notar que los ejes están dispuestos de forma contraria, sin embargo esa disposición es más útil para su utilización. Esto se debe a que el uso de estas gráficas suele ser el de calcular a qué distancia se obtiene un cierto valor de presión acústica.

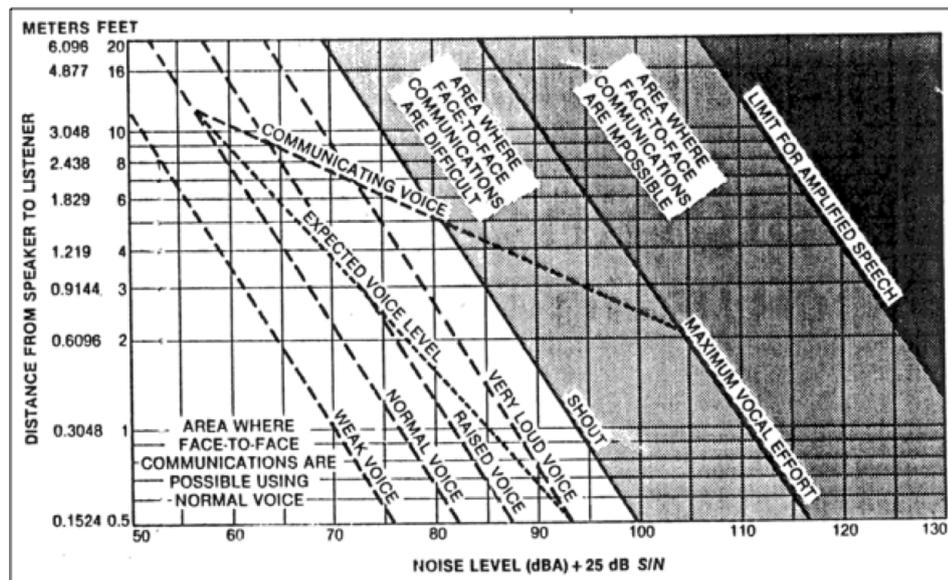


Figura 3.2: Gráfico que muestra para los niveles de voz típicos y la distancia las condiciones de calidad en la comunicación entre quien habla y quien escucha en presencia de un cierto nivel de fondo

Si consideramos que las condiciones de trabajo deben asegurar una relación S/N de 25dB (inteligibilidad asegurada), está claro que el nivel de ruido será 25dB menor que el nivel de señal, y por tanto:

$$\text{nivel de señal} = \text{nivel de ruido} + 25\text{dB}$$

El nivel de ruido calculado corresponde a nivel ponderado A. Otra información disponible en esta gráfica hace referencia a la dificultad de establecer una comunicación en base al nivel requerido de señal. Así, por encima de la línea correspondiente a niveles de grito, la consecución de dichos niveles es problemática para el orador y es difícil su obtención. Obtener niveles de voz por encima de la línea de 'máximo esfuerzo vocal' es imposible cara a cara y debe recurrirse siempre a sistemas amplificados. Los sistemas amplificados también tienen un límite de nivel, impuesto por las posibilidades del oído del oyente. De esta manera, conocido el nivel de ruido de fondo, basta con sumar 25dB para saber el nivel de voz necesario para una buena comunicación a la distancia en estudio. Si el nivel calculado para dicha distancia da un punto por debajo de la línea de 'grito', es posible establecer una buena comunicación a viva voz.

Procesando los datos de estas gráficas, se puede obtener una relación de las distancias máximas a las que pueden estar separados orador y oyente, para obtener una buena comunicación. Estas distancias dependen del ruido de fondo y del nivel de la voz. Al ser distancias máximas, cumplen la condición límite para inteligibilidad ($S/N=25\text{dB}$).

La EAD (distancia acústica equivalente) es un concepto que se aplica a un sistema de refuerzo sonoro. No tiene sentido su aplicación si se tiene una comunicación emitida por un orador de viva voz.

Observamos que si el oyente se encuentra más lejos del orador que la distancia máxima indicada en las curvas, la inteligibilidad no queda asegurada al existir una S/N pequeña y deberá usarse un sistema de refuerzo sonoro. Si se usa el sistema de refuerzo sonoro, el nivel de presión sube respecto al ruido y se vuelve a establecer una correcta inteligibilidad. La subida de nivel de presión es equivalente al acercamiento del orador. De tal manera, podemos decir que usar un sistema de refuerzo equivale a acercar al orador.

La EAD es la distancia a la que estaría un orador que provocara en el oyente el mismo nivel de presión sonora, en campo directo, que está produciendo el sistema de refuerzo sonoro. Este último puede tener al oyente en campo directo o en reverberante, lo que importa es el valor del nivel de presión. Así, el uso de EAD hace que cualquier campo directo o reverberante, en el que no haya problemas de inteligibilidad por la reverberación, sea equivalente a un campo directo provocado por un orador. ¿Cuánto hemos acercado al orador?, ¿a qué distancia se encuentra el "orador equivalente"? La respuesta es que el "orador equivalente" se encuentra, respecto al oyente, a la EAD.

En la figura 3.3 se muestra un ejemplo de la EAD.

Podemos encontrar tablas con valores orientativos de EAD según sea el uso que se le va a dar al local, sala a estudiar (ver figura 3.4).

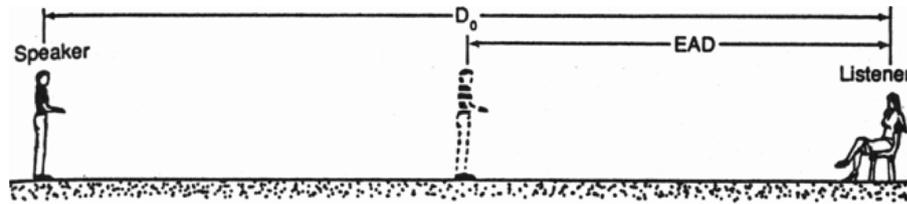


Figura 3.3: Ejemplo EAD

Tipo de sala	EAD (metros)
Teatros silenciosos	6-7
Interiores poco ruidosos	2-3
Exteriores	0-1.5
Naves industriales o similares	0-0.3

Figura 3.4: Criterios para elegir EAD

3.1.2. Ganancia acústica necesaria

Una vez establecido un valor de nivel de presión a conseguir, basta con realizar los cálculos tendentes a establecer dicho nivel en los oyentes más alejados o en los peor cubiertos. Resulta evidente la utilidad de un método que nos indique rápidamente las posibilidades que tiene el sistema de refuerzo de conseguir dicho nivel de presión.

Este método de cálculo previo hace uso del concepto de 'Ganancia Acústica'. La Ganancia Acústica (GA) es la diferencia de niveles de presión en un punto de la instalación (p.e. un oyente) entre el nivel obtenido con refuerzo sonoro (sistema encendido) y el obtenido con un orador de viva voz (sistema apagado).

$$GA = L_{Pon} - L_{Poff}$$

Si consideramos que el nivel de presión que debe dar un sistema de refuerzo sonoro es el de la EAD, entonces:

$$L_p = L_o(1m) - 20 \log\left(\frac{EAD}{1m}\right)$$

y la diferencia de ese nivel con el que produce un orador de viva voz es una ganancia acústica que se denomina "Ganancia Acústica Necesaria para EAD (GAN)", es decir, Ganancia Acústica Necesaria.

3.1.3. Realimentación y ganancia acústica potencial (GAP)

La realimentación acústica es la captación por el micrófono de la señal proveniente del altavoz (de forma directa o a través de reflexiones en el entorno).

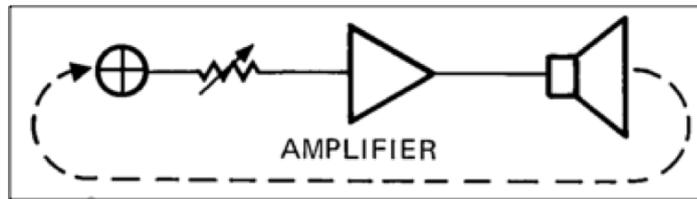


Figura 3.5: Realimentación acústica

Si se cumplen las condiciones de oscilación a alguna frecuencia, el sistema se volverá inestable por oscilación de dicha frecuencia(s). Estas oscilaciones del sistema se denominan habitualmente “acoplos” y se caracterizan por un pitido ensordecedor que va creciendo a medida que el resto del programa sonoro desaparece por efecto enmascaramiento y pérdida de potencia en las demás frecuencias. Los sistemas de sonido son de banda ancha, por lo que si la condición sobre la amplitud de la ganancia de lazo se cumple, la condición de fase se cumplirá a alguna frecuencia, por lo que se debe limitar la ganancia del sistema para que la ganancia de lazo sea menor que la unidad. Esta limitación será la Ganancia Acústica Potencial (GAP.), la cual establece un límite para la ganancia acústica máxima que se puede obtener con el sistema de refuerzo antes de que se produzcan la inestabilidad por oscilación. Uno de los efectos de la realimentación acústica es la pérdida de inteligibilidad, ya que es la causante de provocar una coloración en la respuesta en frecuencia de la sala y un aumento del tiempo de reverberación. La ganancia acústica potencial, también se le podría llamar Ganancia Acústica Máxima, ya que es la máxima ganancia que se le puede dar al sistema de refuerzo sonoro, sin que este se vuelva inestable por realimentación.

Como hemos podido observar en la figura 3.1, en un esquema de un sistema de refuerzo sonoro, tenemos varias distancias importantes que destacar:

- $D_{AM} \Rightarrow$ Distancia altavoz-micro.
- $D_{LO} \Rightarrow$ Distancia locutor-oyente.
- $D_{LM} \Rightarrow$ Distancia locutor-micro.
- $D_{AO} \Rightarrow$ Distancia altavoz-oyente.

Con estas cuatro distancias podemos formular la ecuación de la ganancia acústica potencial.

$$GAP = 20 \log \frac{D_{AM} \times D_{LO}}{D_{LM} \times D_{AO}} - (6 + OMR)$$

Siendo OMR, otros márgenes de retroalimentación.

3.1.4. Consideraciones a tener en cuenta.

I. Debe quedar claro que la ganancia acústica es una relación de niveles y no un nivel absoluto. También debe tenerse en cuenta que el concepto es, en

principio, aplicable a una instalación en la que existe un orador y que necesita refuerzo sonoro.

II. Si no existe un orador o el orador no es visible (p.e. megafonía de avisos) puede seguir usándose el concepto de EAD a conseguir.

III. La ganancia acústica necesaria GAN es un dato que se obtiene directamente a partir de la EAD elegida.

IV. Los datos básicos de la posición y distancias de los elementos de la instalación permiten calcular la ganancia acústica máxima obtenible GAP.

V. Para que el sistema sea fiable la $GAP > GAN$.

3.1.5. Potencia eléctrica necesaria.

Una vez calculadas la GAN y la GAP y comprobada la viabilidad del sistema, se calcula la potencia eléctrica necesaria (Electrical Power Required, EPR). La EPR es un parámetro muy importante para el dimensionamiento de un sistema de sonido.

$$EPR = 10^{(L_p + 10 + \Delta D2 - sens)/10}$$

Siendo :

$$\begin{aligned} sens &= 10 \log \frac{Q\eta}{4\pi} \\ L_p &= \text{nivel_requerido} \\ \Delta D2 &= \text{distancia altavoz - oyente más lejano} \end{aligned}$$

3.2. Según los criterios de inteligibilidad

Los criterios de inteligibilidad [5] presentan dos perspectivas:

- La perspectiva de la fase de evaluación o investigación del grado de inteligibilidad bajo ciertas condiciones de prueba en cuanto a T60 y S/N.
- La perspectiva de uso de los datos investigados previamente para la selección del T60 y S/N a obtener en una instalación de refuerzo sonoro, para asegurar una inteligibilidad suficiente.

El grado de inteligibilidad obtenible con unas condiciones de T60 y S/N se evalúa con algún parámetro como por ejemplo, ALcons, IA, STI y RASTI. Estos parámetros deben encontrarse dentro de ciertos límites para asegurar una adecuada inteligibilidad. La definición de estos parámetros y su relación con el grado de inteligibilidad se desarrolla durante la fase de investigación, mediante pruebas estadísticas realizadas con test diversos. Lo que hace que estos parámetros sean útiles es el hecho de que se relacionan con magnitudes físicas del sistema de refuerzo sonoro (p.e. T60 y S/N), de una forma asequible para la toma de decisiones. Así, una vez fijado el valor del parámetro de inteligibilidad a conseguir, pueden obtenerse valores de T60 y S/N.

Esta segunda perspectiva es la que utilizaremos en los proyectos de refuerzo sonoro.

Estos criterios se ven sometidos a un cierto grado de variación por factores reales no considerados en su desarrollo. Concretamente, la calidad de dicción del orador, afecta a la inteligibilidad debidas a sistemas sometidos a distorsión no lineal (p.e. saturación de amplificadores, altavoces de mala calidad o con demasiada excitación).

3.2.1. Pérdida de articulación de consonantes: ALcons.

Es sin duda uno de los criterios más importantes y que más datos proporcionan para el diseño de refuerzo sonoro.

Su desarrollo se debe a Peutz y a Klein de la Universidad de Nijmegen en Holanda.

La ALcons se relaciona con el T60 y con la S/N, por lo que es de buen uso en locales cerrados.

También puede aplicarse en instalaciones en exteriores, sin hacer uso de la parte relativa al T60. Este criterio se relaciona con el grado de inteligibilidad de la siguiente forma:

Del 0 al 10 por ciento => Inteligibilidad muy buena.

Del 10 al 15 por ciento => Inteligibilidad buena.

Si es mayor del 15 por ciento => Inteligibilidad insuficiente.

Como criterio de diseño se toma siempre que la ALcons debe ser menor del 15 por ciento. Debe recordarse que estos datos son estadísticos y por tanto pueden existir personas que con una ALcons de un 15 por ciento no entiendan bien la palabra.

3.2.2. Fundamentos

-La inteligibilidad decrece según el oyente se aleja de la fuente de sonido, hasta llegar a una distancia límite (DL), a partir de la cual la inteligibilidad no varía aunque se siga alejando.

-La inteligibilidad más allá de la distancia límite depende del tiempo de reverberación (T60).

-Además de la dependencia de la inteligibilidad con la reverberación y con la relación sonido directo-sonido reverberante (relación implícita en el hecho de variar la inteligibilidad con la distancia a la fuente), existe una dependencia de la inteligibilidad con el nivel de ruido de fondo, más concretamente con la S/N. Si la S/N es superior a 25dB, no introduce modificación en la inteligibilidad. Para valores de S/N inferiores a 25dB, existe un decrecimiento proporcional de la inteligibilidad. La pendiente de decrecimiento depende del T60.

-La dependencia de la inteligibilidad con la distancia a la fuente se expresa como el valor de ALcons en función de D/DL (distancia respecto a distancia

límite) . Cuando se representa en un gráfico con escala logarítmica en ambos ejes, se obtienen rectas.

3.2.3. Criterio del índice de articulación (AI)

Si bien el análisis de la inteligibilidad en función de la S/N es muy exhaustivo, la influencia de la reverberación es considerada de una forma demasiado simple, por lo que su aplicación es de interés en refuerzos en exteriores o en locales muy poco reverberantes o con los oyentes muy cerca de las fuentes, pero especialmente en los primeros.

La relación entre el valor del AI y el grado de inteligibilidad aparece en la figura 3.6, necesitándose en general un valor de AI superior a 0.5, siendo en ocasiones suficiente un valor de 0.3. La valoración del AI va de 0 a 1.

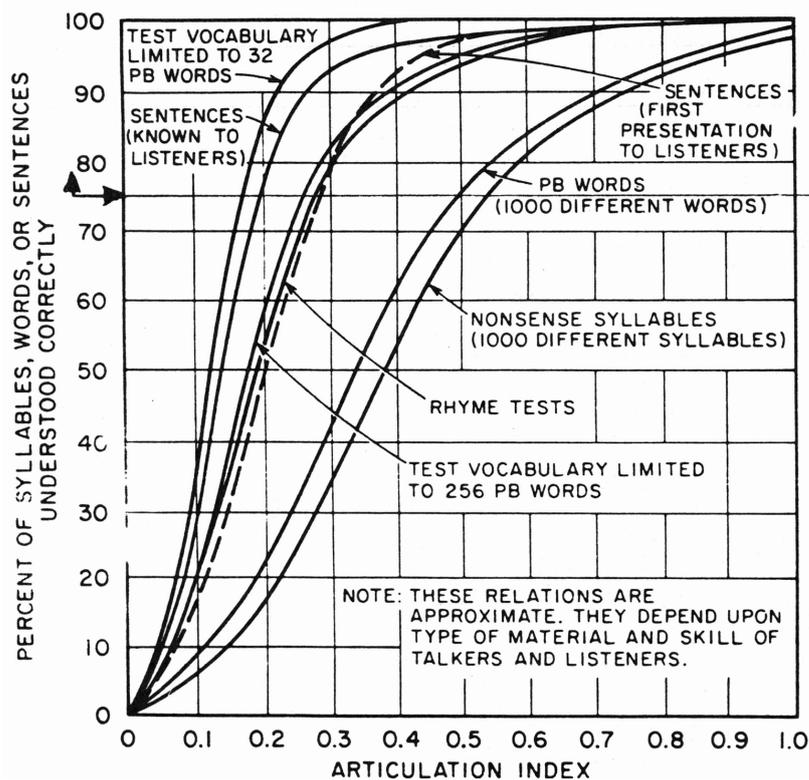


Figura 3.6: Relación entre el grado de inteligibilidad y el valor del índice de articulación (AI)

3.2.4. S.T.I (Speech Transmission Index)

Si analizamos la evolución temporal del NPS en un punto, comprobamos que la 'forma' del gráfico queda muy modificada en amplitud debido a efectos de la reverberación y el ruido de fondo. Sin embargo, si analizamos la evolución temporal de la Intensidad acústica en ese mismo punto, se ve que el efecto, tanto de la reverberación como del ruido de fondo, sólo se aprecia en la amplitud, pero no en la forma. El análisis puede ampliarse, si se quiere, al efecto de toda la cadena de audio y no sólo del local. La 'forma' de la intensidad de un sonido corresponde a una modulación de amplitud de una frecuencia portadora (la fundamental del sonido) por una señal moduladora de baja frecuencia (entre 0.5 y 16Hz) . El índice de modulación varía entre 0 y 1.

El efecto de la reverberación y del ruido de fondo es el de reducir el valor del índice de modulación de la intensidad en el punto en estudio. El efecto debe estudiarse en bandas de octava, ya que el grado de modificación del índice de modulación depende de la frecuencia portadora. El valor del índice de modulación se evalúa mediante el análisis de la envolvente de la intensidad. Esta envolvente tendrá frecuencias entre 0.5 y 16Hz, y será distinta para cada banda de octava de la señal portadora que se está analizando.

Se analizan 7 bandas de octava, desde 125Hz hasta 8 kHz. Y en cada una de ellas, la envolvente se analiza entre 0.5 y 16Hz en bandas de tercio de octava (0.5-0.63-0.8-1-1.25-1.6-2-2.5-3.15-4-5-6.3-8-10-12.5-16). La muestra para el análisis suele ser un fragmento de palabra de 1 minuto de duración. La relación entre los índices de modulación originalmente emitidos y los obtenidos se define como 'Reducción del Índice de Modulación'. Suele expresarse en función de la frecuencia moduladora F , y toma valores entre 0 y 1. La función que representa la reducción del índice de modulación para cada frecuencia moduladora se llama 'Función de Transferencia de la Modulación' (MTF) , y se especifica una para cada banda de frecuencia portadora. Si la señal emitida tiene un índice de modulación 1 y la obtenida un índice 'm', la MTF coincide con 'm' y por eso se suele hablar de 'm(F)'. En definitiva, la MTF no es única sino que existe una para cada una de las 7 bandas de señal portadora y además, en cada banda tampoco es una constante sino que es función de la frecuencia moduladora. Como curiosidad, debe tenerse en cuenta que la MTF en cada banda de octava, puede considerarse independiente del tipo de señal que se tenga que reproducir, siempre que todas las señales a reproducir tengan la misma 'intensidad acústica media' en cada banda de octava.

3.2.5. RASTI (Rapid STI)

Para evitar el manejo de los 98 valores de MTF que se utilizan en la evaluación del STI, se ha desarrollado un método condensado que sólo hace uso

de 9 valores de MTF de los 98 posibles. Este método, denominado RASTI, aunque hace uso de menos datos, permite evaluar el valor del STI con suficiente precisión, en la mayoría de las situaciones que se encuentran en los auditorios. La medida se realiza sólo en 2 bandas de octava de la señal portadora, concretamente 2 kHz y 500Hz. En la banda de 500Hz se analizan sólo 4 frecuencias moduladoras (1-2-4-8Hz). En la banda de 2 kHz se utilizan 5 frecuencias moduladoras, que no coinciden con las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava usadas para el análisis. Concretamente 0.7-1.4-2.8-5.6-11.2Hz.

La figura 3.7 muestra un resumen de lo indicado. El proceso de evaluación del RASTI es el mismo que el del STI pero con sólo 9 valores de MTF.

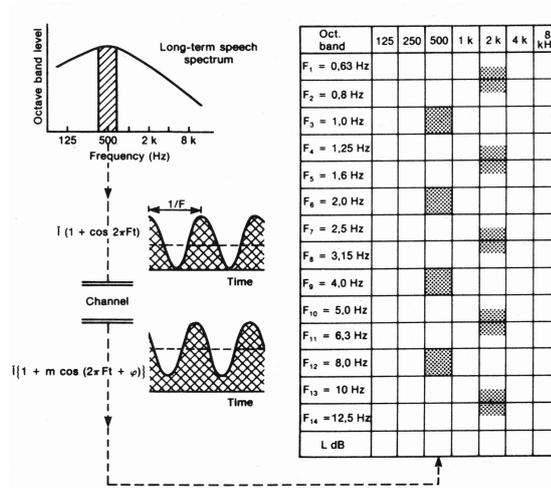


Figura 3.7: RASTI. En un análisis completo, el factor de reducción de modulación 'm' se determina para 14 frecuencias de modulación en 7 bandas de octava, dando un total de 98 datos organizados en una matriz. También se miden los niveles de cada banda de octava. En el método RASTI, sólo se consideran 9 factores de reducción de modulación 'm', que son los marcados con sombra en la matriz

Métodos numéricos

La simulación [6] con métodos numéricos es un intento de modelar situaciones de la vida real por medio de un programa de ordenador. La simulación por ordenador se ha convertido en una parte útil del modelado de muchos sistemas naturales en física, química y biología, y en sistemas humanos como la economía y las ciencias sociales. Estas simulaciones son frecuentemente usadas como un accesorio para, o sustitución de, sistemas de modelado para los cuales las soluciones analíticas de forma cerrada simple no son posibles.

Ahí se encuentran diferentes tipos de simulación por ordenador, donde su característica común en todas ellas es el intento de generar una muestra de escenarios representativos para un modelo en el que una enumeración completa de todos los estados posibles serían prohibitivos o imposibles. En el área de las ciencias son de gran ayuda ya que los estudiantes relacionan conceptos abstractos con reales (el choque de moléculas) y también ayuda en el sentido de los recursos ya que solo se tiene que disponer con un par de computadoras y no con todo el aparataje de un laboratorio entero.

Con la simulación numérica se aumentó en un paso intermedio y con ello se logró alterar el ciclo teoría-experimento. La posibilidad de integrar numéricamente las ecuaciones que definen al problema físico, dio pie a una nueva forma de estudiar y comprender los fenómenos naturales. Cuando queremos realizar este tipo de simulaciones se tiene que entender el comportamiento de cierto tipo de soluciones de nuestras ecuaciones, ya que al realizar un cálculo numérico con la idea de entender un fenómeno físico hay que distinguir la efectividad de los resultados.

Al realizar una simulación numérica se intenta lograr que la información y los resultados obtenidos se asemejen de forma correcta a la realidad. Por

lo tanto, el hecho de que esta simulación represente algún tipo de fenómeno físico depende de los siguientes puntos:

- Las ecuaciones deben ser correctas y exactas, hasta cierto orden de magnitud.
- Los cálculos numéricos deben dar resultados que estén muy próximos a las soluciones de nuestras ecuaciones, de tal manera que el error numérico sea menor respecto a cierto orden de magnitud que hayamos fijado previamente.
- Los resultados numéricos deben ser reproducibles y entendibles por cualquier otro investigador interesado en este fenómeno. Los dos últimos puntos son los importantes desde el punto de vista computacional. Otro apartado a tener en cuenta es el tiempo que ocupará nuestro experimento numérico. Se debe realizar una simulación en un tiempo breve.

Al tener todos estos apartados resueltos sin complicaciones podemos decir que el cálculo numérico es computable. Con todo esto se observa que es necesario llegar a un equilibrio entre el error numérico máximo permitido, el método numérico utilizado, el tiempo de simulación estimado y el error propio de la máquina para asegurar obtener resultados numéricos.

4.1. Programas de simulación

Para llevar a cabo las simulaciones con métodos numéricos podemos utilizar diferentes softwares comerciales. A continuación hablaremos de algunos de ellos utilizados en la actualidad como Comsol Multiphysics, Geosoft 2 de NEXO, JBL Vertec Line Array Calculator y Matlab.

4.1.1. Multiphysics

Comsol Multiphysics es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en físicas, Comsol Multiphysics también permite entrar en sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP). Las EDP se pueden introducir directamente o utilizando la llamada forma débil.

Existen varios módulos de aplicación específicos para Comsol Multiphysics. Entre los mas destacables se encuentran:

- AC/DC Module: simula componentes y dispositivos eléctricos que dependen de fenómenos electrostáticos, magnetostáticos y aplicaciones electromagnéticas cuasiestáticas, particularmente acopladas a otras físicas. Consta de interfaces específicas para aplicaciones de maquinaria rotatoria e importación de listas de circuitos SPICE.
- CAD Import Module: facilita la lectura de la mayoría de los formatos CAD estándar de la industria. Incluye paquetes adicionales que soportan los

formatos de fichero para los núcleos de geometría de programas CAD específicos.

- Acoustic Module: contiene incorporados modos de aplicación y ajustes de contornos para el modelado de propagación acústica en sólidos y fluidos estacionarios. También modela aplicaciones aeroacústicas en fluidos móviles.

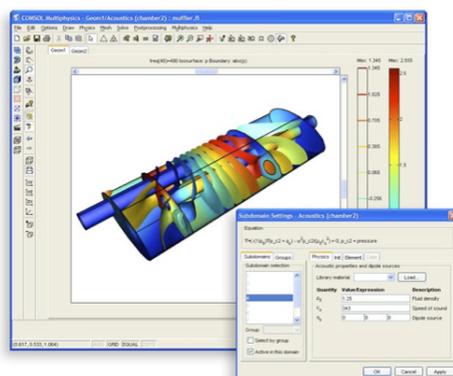


Figura 4.1: Ejemplo de simulación con Comsol Multiphysics.

4.1.2. Geosoft 2

Otro software importante en simulación es Geosoft 2 de NEXO, un programa de predicción de la marca NEXO el cual nos muestra una vista 3D del lugar el cual se quiere cubrir y el cluster completo. A continuación se muestra algunas ventanas del programa en el cual se indica los parámetros que podemos variar y el resultados arrojados por el programa.

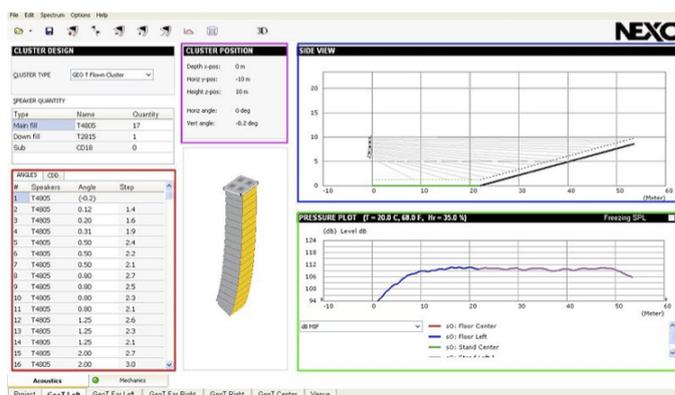


Figura 4.2: Imagen de interfaz de Geosoft 2.

En la figura 4.2, vemos como en el recuadro rojo, se tienen la cantidad de altavoces y la angulación de cada una de ellos. En el recuadro azul se tiene la vista de la cobertura del cluster en toda el área a cubrir. En el recuadro verde nos muestra el mapa de presión sonora a través de toda el área. En el recuadro rosa nos muestra la posición e inclinación del cluster.

Una ventaja que nos ofrece este software de predicción es una vista en 3D del plano de predicción y la colocación de los diferentes clusters y cada una de las zonas en las cuales se requiere cierta cobertura. Así como se muestra a continuación (ver figura 4.3) .

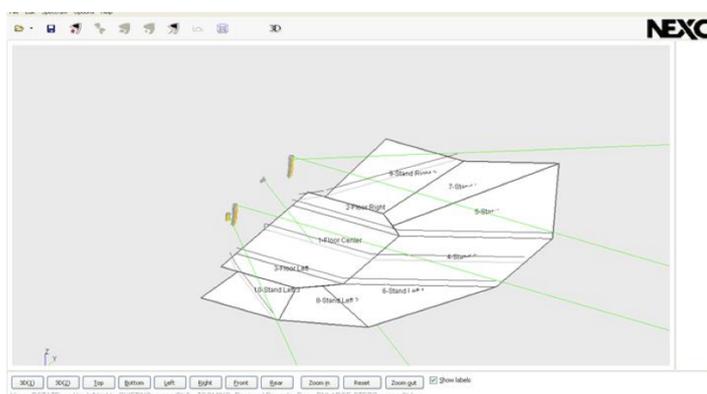


Figura 4.3: Ejemplo de simulación con Geosoft 2.

4.1.3. JBL Vertec Line Array Calculator

Otro programa de simulación a tener en cuenta es el JBL Vertec Line Array Calculator. Al igual que en el programa anterior este programa muestra la misma información pero de una forma diferente, en el cual se puede editar el plano de predicción, muestra dispersión de energía, muestra información sobre el arreglo (peso, ángulo, puntos de rigging).

4.1.4. Matlab

El software de simulación que utilizaremos para llevar a cabo este proyecto es Matlab. MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, proceso de señal y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

MATLAB dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializados, denominados Toolboxes, que extienden signi-

ficativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc. es un entorno de cálculo técnico, que se ha convertido en estándar de la industria, con capacidades no superadas en computación y visualización numérica.

De forma coherente y sin ningún tipo de fisuras, integra los requisitos claves de un sistema de computación técnico: cálculo numérico, gráficos, herramientas para aplicaciones específicas y capacidad de ejecución en múltiples plataformas. Esta familia de productos proporciona al estudiante un medio de carácter único, para resolver los problemas más complejos y difíciles.

4.2. Aplicaciones e importancia en acústica

Mediante simulaciones acústicas podemos prever un determinado comportamiento de las ondas acústicas, ya sea en un espacio abierto o cerrado. Básicamente, los trabajos que podemos desarrollar en el ámbito de las simulaciones son simulaciones acústicas en exteriores y en interiores.

Las simulaciones acústicas en exteriores que podemos realizar son:

- Creación de mapas estratégicos de ruido en formato tridimensional, para evaluar el comportamiento de un determinado ruido y la influencia en éste de orografía de la zona.
- Predicción de niveles sonoros en núcleos de población, determinando el efecto contaminante del ruido sobre la población.
- Estudios de impacto ambiental ocasionados por ruido, para la instalación de complejos industriales o posibles focos generadores de ruido.
- Diseño de la ubicación u optimización de barreras y pantallas acústicas a situar en carreteras, zonas de vías férreas, aeropuertos, etc.
- Predicción de niveles sonoro por la influencia de una actividad previsiblemente ruidosa todavía no existente.

En cuanto a las simulaciones acústicas en interiores que podemos desarrollar, se enfocan a dos grupos fundamentales:

- Acondicionamiento acústico: puede ser requerido en auditorios, estudios de grabación, restaurantes, etc., pudiendo calcular y dimensionar de forma correcta la sala a tratar obteniendo parámetros tan importantes como reflectogramas, ecogramas, inteligibilidad de la palabra...
- Previsión del aislamiento acústico: podemos simular el posible nivel de aislamiento acústico que tendrá un cerramiento en concreto, aportando datos como las posibles pérdidas de aislamiento acústico debidas a flancos, cumpliendo con la normativa de construcción española CTE en su apartado acústico DB-HR.

En este proyecto se llevará a cabo una simulación acústica del refuerzo sonoro en el interior de una sala. Donde, se pueda hacer sin necesidad de construir la sala, la cual cosa, supone un avance muy grande, ya que tomar medidas de refuerzo sonoro cuando una sala ya está acabada, suele ser una tarea muy costosa y engorrosa y no siempre se pueden modificar tantos factores cómo antes de ser edificada. En cambio si tenemos constancia de los fallos con anticipación, podemos buscar soluciones sin tantas limitaciones.

A parte de las aplicaciones comentadas anteriormente en la simulación acústica de interiores, también se puede utilizar este método para altavoces e instrumentos musicales, siendo capaces de predecir cómo van a sonar o a emitir, calcular sus modos propios, su patrón direccional,...

Es importante tener en cuenta los errores más comunes en los programas de simulación, que son:

- el coeficiente de absorción difuso no es el coeficiente de absorción “real”.
- simplificaciones geométricas.
- simulación de scattering y la difracción.

Método FDTD

El método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (Finite Difference Time Domain, FDTD) se utiliza para resolver problemas electromagnéticos transitorios utilizando diferencias finitas. El método fue desarrollado por Kane Yee en 1966 para resolver las Ecuaciones de Maxwell. Estas ecuaciones en derivadas parciales se reemplazan por un sistema de ecuaciones en diferencias finitas .

Eligiendo convenientemente los puntos en que se evalúan las componentes de los campos en estas ecuaciones, la solución al sistema de ecuaciones satisface las condiciones de borde que involucran superficies conductoras ideales.

Este método es un caso particular del método de Diferencias Finitas, que es un método standard para la resolución de Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDP).

5.1. Introducción

Las Ecuaciones de Maxwell describen la evolución en el tiempo y en el espacio de los campos magnéticos B y eléctricos E . Los diferentes problemas se especifican con distintas condiciones de borde que describen situaciones físicas como la posición de los conductores en un circuito. Las ecuaciones son tan generales y potentes que resumiendo la física clásica en ocho ecuaciones, cuatro de ellas serían las de Maxwell.

En 1966 Kane Yee propuso un conjunto de ecuaciones en diferencias finitas para resolver las ecuaciones de Maxwell. Para ello, la región tridimensional que

interesa se divide en una rejilla de celdas cúbicas de coordenadas

$$(i, j, k) = (i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z)$$

siendo Δx , Δy y Δz , los incrementos espaciales. Cada función de espacio y tiempo se escribe como

$$F(i \Delta x, j \Delta y, k \Delta z, n \Delta t) = F^n(i, j, k)$$

siendo Δt , el intervalo de tiempo.

Las derivadas espaciales y temporales de una función se implementarán utilizando una aproximación en diferencias finitas centradas evaluadas en rejillas solapadas:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - F^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - F^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t}$$

Utilizando la ecuación se actualiza el campo E en cada instante de tiempo n y con la ecuación se actualiza el campo magnético B en cada instante de tiempo $(n+1/2)$. El método se basa en utilizar las ecuaciones anteriores para calcular las derivadas de los campos electromagnéticos en las ecuaciones.

Las rejillas utilizadas para evaluar E y B en el espacio también están escalonadas: el vértice de un cubo perteneciente a una rejilla se encuentra en el centro de un cubo perteneciente a la otra rejilla como se muestra en la siguiente figura.

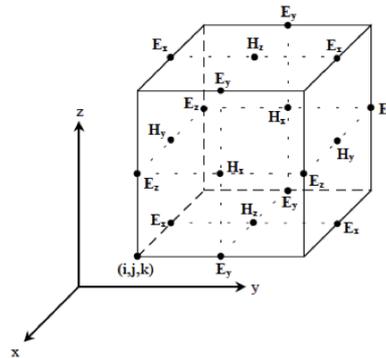


Figura 5.1: Celda de Yee. Los componentes del campo E se hallan en la mitad de las aristas mientras que las componentes de H están en el centro de las caras.

Las componentes del campo eléctrico se obtienen en cada instante de las componentes del campo magnético conocidas en un instante anterior. También, las componentes del campo magnético se obtienen a partir de las componentes del campo eléctrico siguiendo una técnica llamada ‘leapfrog’.

El método leapfrog en sencillo para la integración de ecuaciones diferenciales, especialmente en el caso de un sistema dinámico. El método se conoce por diferentes nombres en diferentes disciplinas. Es equivalente a calcular las posiciones y velocidades intercaladas en tiempo, en puntos de tiempo intercalados, de modo que ‘saltan’ una sobre la otra. Por ejemplo, la posición es conocida en intervalos de tiempo enteros y la velocidad es conocida en números enteros más medio paso de tiempo.

Taflove [7], Holland, y Umashankar, extendieron el algoritmo y el método FDTD fue aplicado satisfactoriamente a problemas de dispersión y de guías de microondas. Así, el método FDTD se ha convertido en la técnica más versátil y atractiva que se usa en el análisis de la propagación de ondas electromagnéticas, y en el estudio de dispositivos pasivos de microondas.

Una técnica similar se ha utilizado para el estudio de la propagación de ondas elásticas en la que los campos magnético y eléctrico son substituidos por la tensión y la velocidad. La aplicación de FDTD a la propagación en acústica puede ser considerada un caso especial de la técnica anterior para el análisis de la tensión y la velocidad en medios elásticos.

A pesar de todo, en acústica, el FDTD sigue el esquema leapfrog utilizado en la modelización de la presión y la velocidad como se ilustra en la figura 5.2 y en la figura 5.3

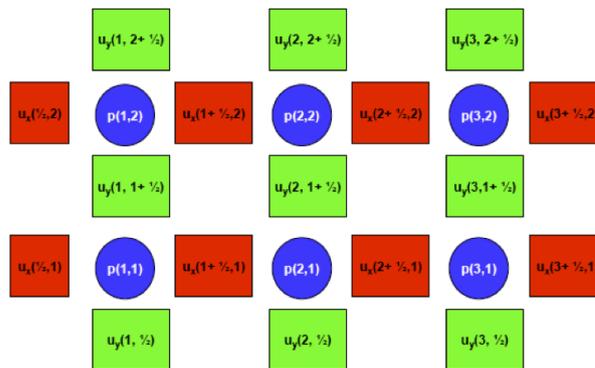


Figura 5.2: Ejemplo del método de leapfrog en 2D.

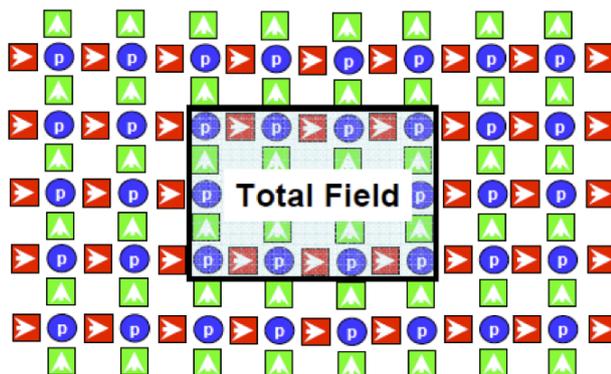


Figura 5.3: Ejemplo de campo total en 2D.

5.2. Aplicaciones en acústica

Para aplicar el método de FDTD en el campo de la acústica hay que tener en cuenta la siguiente tabla y sus equivalencia entre ondas sonoras (Sound waves), ondas eléctricas (TE waves) y ondas magnéticas (TM waves).

Sound waves	TE waves	TM waves
v_x	E_y	$-G_y$
v_y	$-E_x$	G_x
p	G_z	E_z
\overline{K}	$\underline{\mu}$	$\underline{\varepsilon}$
$\underline{\rho}$	$\underline{\varepsilon}$	$\underline{\mu}$

Figura 5.4: Tabla de equivalencias electromagnéticas a acústicas.

5.3. Desarrollo teórico

Las ecuaciones [8] acústicas de primer orden en un medio homogéneo sin pérdidas son las siguientes:

$$\nabla p + \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0$$

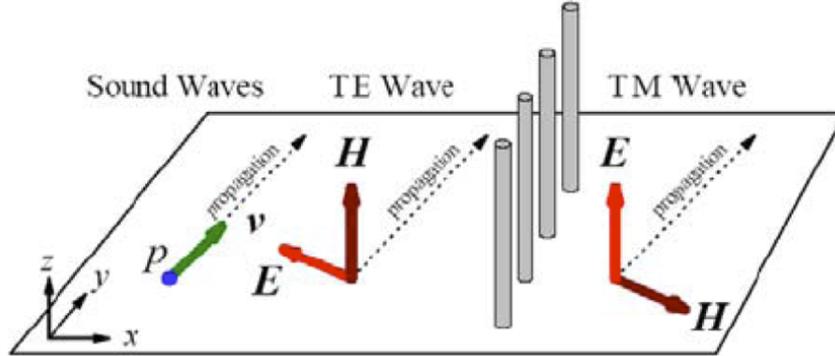


Figura 5.5: Correspondencia entre los componentes del campo de las ondas sonoras de dos dimensiones y las ondas electromagnéticas en un diagrama de vectores.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 (\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) = 0$$

Estas ecuaciones, son de primer orden, en un medio homogéneo sin pérdidas, donde 'p' es la presión sonora, 'u' es la velocidad de partícula, 'c' la velocidad del sonido en el aire y ρ es la densidad del aire.

Estas ecuaciones se podrían reescribir en un sistema 2D de la siguiente manera:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial U_x}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} + \rho \frac{\partial U_y}{\partial t} = 0$$

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

Discretizando las ecuaciones de Maxwell se llega a la siguiente conclusión:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = \frac{f(x_0 + \frac{1}{2}\Delta x) - f(x_0 - \frac{1}{2}\Delta x)}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{t=t_0} = \frac{f(t_0 + \frac{1}{2}\Delta t) - f(t_0 - \frac{1}{2}\Delta t)}{\Delta t}$$

Posteriormente se lleva a cabo el estudio de diferentes posiciones, dividiendo la región en una rejilla con determinados puntos de presión como podemos ver en la figura 5.6.

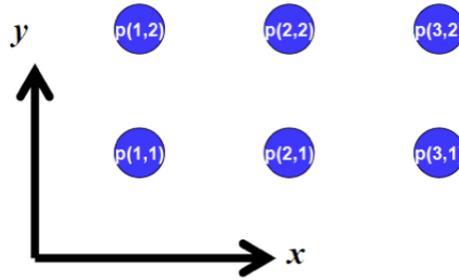
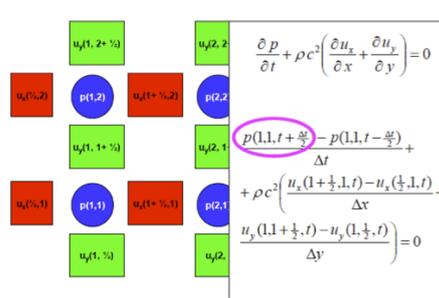


Figura 5.6: Rejilla de puntos de presión.



A continuación se verá un ejemplo con ecuaciones para conocer la presión sonora en el punto $p(1,1)$:

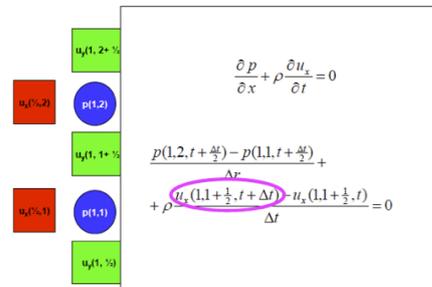


Figura 5.7: Estudio de la presión sonora en el $p(1,1)$.

Y para conocer la velocidad en el borde de la malla se pueden ver unos ejemplos a continuación de las condiciones de contorno:

En todas estas ecuaciones Z es la impedancia acústica del borde.

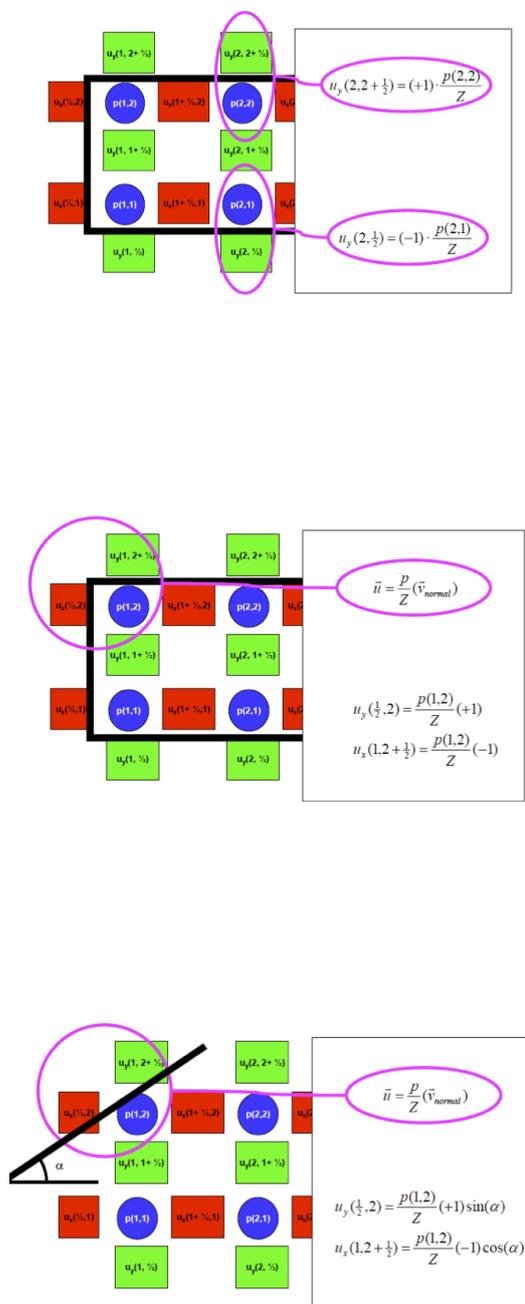


Figura 5.8: Estudio del borde de la malla.

Simulación

Este punto nos va a mostrar de forma esquemática como poder llegar a calcular la ganancia acústica potencial de una sala, mediante la simulación de tres programas implementados en matlab.

En primer lugar se realizarán medidas de la directividad de un altavoz, mediante el sistema EndFire, en campo libre. En segundo lugar, se implementara un programa para simular una sala con un sistema de refuerzo sonoro activo. En él podremos ver donde se encuentra el límite de retroalimentación. Y en tercer lugar simularemos dos salas simultáneamente, una con sistema de refuerzo sonoro y la otro solo con un locutor, para poder ver la diferencia de señales entre ambas.

La finalidad en sí de los programas llevados a cabo en matlab, es la de poder desarrollar futuras investigaciones donde poder demostrar la fiabilidad de la teoría de los sistemas de refuerzo sonoro activo.

Antes de proceder a la explicación de tal desarrollo práctico, cabe destacar, que la finalidad de este punto es la de explicar el procedimiento que se debe llevar a cabo para obtener la ganancia acústica potencial, junto con otros parámetros, como por ejemplo el radio crítico. Además de ello se hará una explicación esquemática¹ de los programas utilizados para poder desarrollarlos en futuras investigaciones.

¹Ver anexo B

6.1. Directividad de un altavoz en campo libre.

En este punto vamos a realizar un programa de simulación de un altavoz en campo libre, mediante el sistema EndFire. De esta manera obtenemos un patrón de directividad de un altavoz, con el objetivo de que se asemeje a un altavoz comercial como pueden ser marcas conocidas como DAS, JBL...

Para realizar este programa, se lleva a cabo la teoría explicada en el punto cinco, FDTD (Finite Difference Time Domain).

El código empleado para este programa, como el empleado por los siguientes programas, serán adjuntados en el anexo B.

Para poder simular el campo libre, debemos contruir una sala anecoica en nuestro programa, para ello utilizaremos PML (Perfectly Matched Layer). De esta manera, construiremos una sala de 4 metros de ancho por 4 metros de largo, siendo así una sala en dos dimensiones.

Para calcular la directividad del altavoz, debemos medir la presión sonora registrada en la sala, en ángulos equispaciados 5° entre si (según la norma de medida de directividad de fuentes).

Tanto en este programa, como en los restantes, utilizaremos la onda de Ricker como fuente de excitación. Esta onda en matemáticas y análisis numérico, es la segunda derivada negativa normalizada de una función de Gauss, es decir, aumentada a escala y normalizada, la segunda función de Hermite. Es un caso especial de la familia de ondas continuas, conocido como ondas Hermitianas.

A continuación se muestra su ecuación de ondas y su forma.

$$w(t) = a^2 \cdot e^{-\frac{a^2 \cdot t^2}{2}} (a^2 \cdot t^2 - 1)$$

$$f_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot a}{2}$$

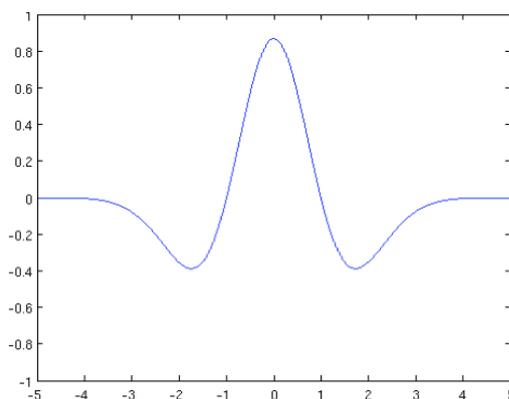


Figura 6.1: Onda de Ricker.

Por último, destacamos la elección del sistema EndFire como elección principal para la realización de la simulación del altavoz.

Este sistema, básicamente, es la colocación de varios altavoces, uno por delante del otro, para lograr entre ellos un patrón de directividad más efectivo, es decir, se quiere conseguir con varios altavoces, una mejor directividad. Ello se centra en la colocación de los altavoces, donde deben estar equispaciados entre sí $\frac{\lambda}{4}$.

En nuestro programa, sustituiremos los altavoces por puntos de excitación, creando entre ellos un patrón de directividad. La posición de los puntos a excitar es justo el centro de la sala a simular, siendo 4 puntos equispaciados entre sí la misma distancia, $\frac{\lambda}{4}$. El patrón de directividad que se quiere conseguir es a una frecuencia de 1000 Hz, por lo que el diseño del End Fire se basará en esta frecuencia. Por último, es de vital importancia, destacar que los parámetros de diseño del sistema de End Fire, no sólo se centran en la distancia entre los altavoces, puntos de excitación, sino también en el retardo que habrá entre un punto y el otro. Este último parámetro también viene precedido por la señal a la que se excita nuestra señal de Ricker, 1000 Hz. Para poder calcular ese retardo en el tiempo entre un punto de excitación y otro, solo hay que poner la ecuación del tiempo en función de los parámetros de diseño.

$$t = \frac{e}{v}$$

$$t = \frac{\frac{\lambda}{4}}{c}$$

$$t = \frac{1}{4f}$$

Siendo:

- $\lambda = \frac{c}{f}$
- $c = 340 \text{ m/s}$

De esta manera el retardo entre un punto de excitación y el siguiente será de $t = \frac{1}{4f}$

En las siguientes imágenes podemos ver tanto la evolución de la simulación como el resultado final de ella, la directividad de nuestro altavoz.

La figura 6.3 se corresponde a una excitación de 1000 Hz por parte del altavoz.

6.2. Sala con refuerzo sonoro activo

En este apartado explicaremos el segundo programa² de simulación que se ha realizado como el procedimiento que se ha empleado en el código matlab.

²El código lo podremos ver en el anexo B

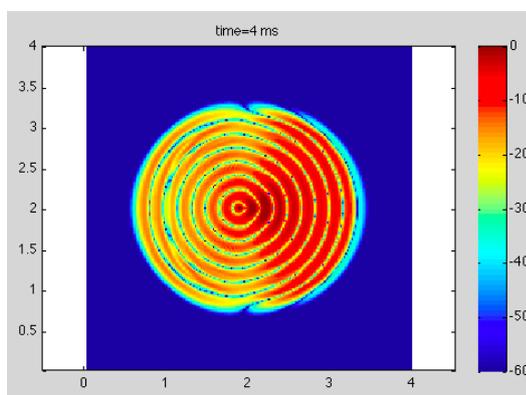


Figura 6.2: Simulación del sistema EndFire.

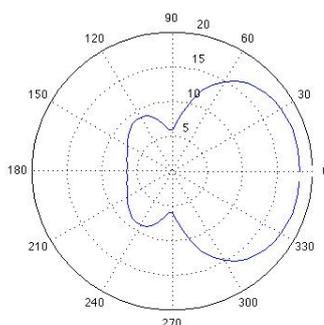


Figura 6.3: Directividad del altavoz.

En la siguiente figura 6.4 podemos ver la configuración que se ha empleado en la sala para la distribución de todos los elementos: sistema de refuerzo sonoro activo, locutor y oyente.

Un sistema de refuerzo sonoro activo lo que pretende es acercar la fuente al espectador, por esta razón, en este segundo programa lo que se intenta demostrar es en cuanto podemos acercar esa fuente al oyente, es decir, hablando en parámetros acústicos, cuanta ganancia podemos darle al altavoz sin que la señal recogida por el micrófono haga un bucle y tengamos efectos indeseados. En una primera simulación dando valores de ganancia al azar, pudimos observar como a partir de un valor de $G=1,4$ (ganancia del altavoz), aproximadamente, aparece un efecto de reverberación electroacústico, ya que la señal a esa ganancia no se atenúa del todo en la sala, es decir, en vez de tener pérdidas por la absorción de paredes, suelo, etc, obtenemos ganancia. Es a partir de este punto que simulamos la sala con 100 puntos distintos de excitación al altavoz, entre 0 y 1.5, para luego poder mostrar el tiempo de reverberación, EDT, y

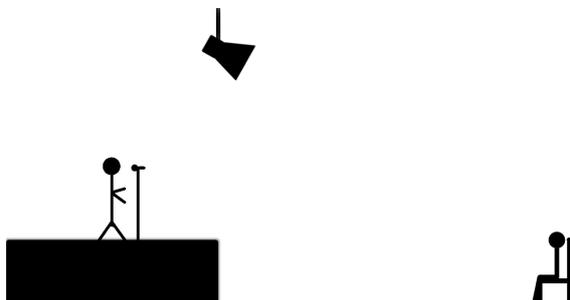


Figura 6.4: Configuración de la sala a estudiar.

el nivel de presión sonora como actua cuando el sistema de refuerzo sonoro activo esta apagado y a partir de donde el sistema de refuerzo sonoro deja de ser útil.

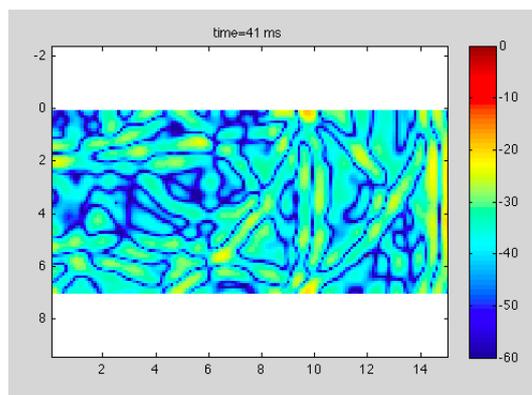


Figura 6.5: Captura de pantalla durante la simulación.

Para poder ver un ejemplo ilustrado de lo que seria la señal retroalimentada, en las siguientes ilustraciones ,figura 6.6, podemos observar como en la simulación la señal no se atenúa, sino va tomando cada vez más energia. En la figura 6.7 visualizamos la respuesta al impulso de esa señal donde efectivamente corroboramos la no atenuación de la señal.

6.3. Límite de retroalimentación en una sala.

Por último, en este tercer programa³ de simulación se va ha intentar cuantificar el límite de retralimentación que existe en la configuración elegida de nuestra sala. Para ello el programa nos va a simular dos salas:

³Código imlementado en el anexo B

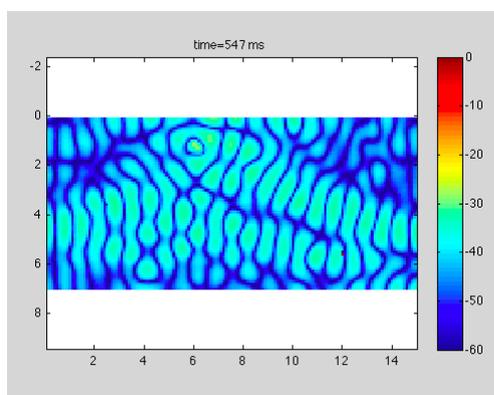


Figura 6.6: Captura de pantalla de la señal con retroalimentación.

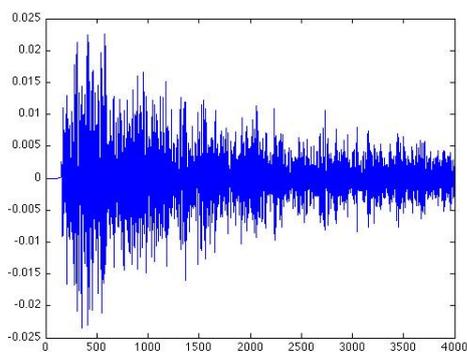


Figura 6.7: Respuesta al impulso de la señal en la sala.

- En la primera sala, la configuración se presenta como un oyente al final de la sala, un altavoz y un micrófono que recogerá y almacenará la señal del atavoz.
- En la segunda sala, solo tendremos la excitación por parte de un locutor, el mismo oyente situado exactamente en el mismo lugar y un microfono delante del locutor para almacenar la señal.

Como parámetro de entrada debemos aportar la ganancia obtenida en el programa anterior. Se obtuvo que alrededor de un valor de entrada de 1.4 de ganancia en el altavoz, la señal empezaba a realimentar el sistema de refuerzo sonoro activo.

Hay que recordar que en un sistema de refuerzo sonoro activo el nivel de presión sonora en el micrófono procedente del locutor, ha de ser 6 dB mayor que el nivel de presión sonora procedente del altavoz. En tal caso no se produce la reverberación electroacústica.

Simulando el nuevo sistema con el parámetro de entrada acordado, pode-

mos decir que efectivamente la diferencia de señal recogida por el micrófono de la sala 1 y la sala 2, es de 6 dB. La cual cosa quiere decir que la excitación del locutor en este caso, es el doble que la excitación recogida en el micrófono por el altavoz.

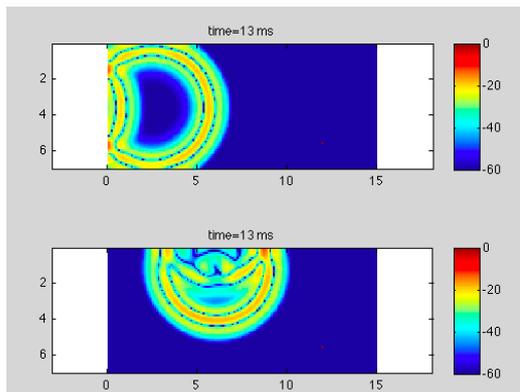


Figura 6.8: Captura de pantalla durante la simulación.

En el anexo B se podrán ver con más detalle los códigos empleados para poder simular esos tres programas. Hay que destacar que la elección de las medidas de las salas han sido personales, pudiendo haber sido otras medidas, al igual que la distancia y posicionamiento de los objetos que intervienen.

Análisis de los resultados

En este apartado de análisis de los resultados contemplaremos unicamente dos gráficas obtenidas en el proceso de la simulación. En ellas podremos ver la evolución de la señal en la sala respecto al incremento del nivel de presión sonora y el comportamiento del sistema de refuerzo sonoro activo en la sala respecto el oyente, comparandolo con el tiempo de reverberación obtenidos.

7.1. Nivel de presión sonora

La utilización de un sistema de refuerzo sonoro activo hace que el nivel de presión sonora de la sala aumente. Esto es evidente ya que se utiliza una amplificación y un procesado de la señal del locutor para acercarla al oyente, generalmente a los de la última fila. El problema de esta amplificación es que puede ser perjudicial e incluso molesta si no se lleva a cabo un estudio sobre la instalación del sistema.

En la figura 7.1 siguiente podemos observar el incremento de nivel de presión sonora en la sala llevada a estudio en este proyecto, respecto el parámetro de entrada, que en nuestro caso era la ganancia del altavoz.

En la figura observamos en el eje de abscisas los valores dados en la simulación al parámetro de entrada (simulación de 100 puntos), mientras que en el eje de ordenadas vemos el nivel de presión sonora, (eje de ordenadas en lineal). Efectivamente cuando el parametro de entrada es 0, el sistema de refuerzo sonoro esta apagado y a medida que aumenta la ganancia del altavoz aumenta el nivel de presión sonora en la sala. Cabe destacar que la gráfica obtenida es

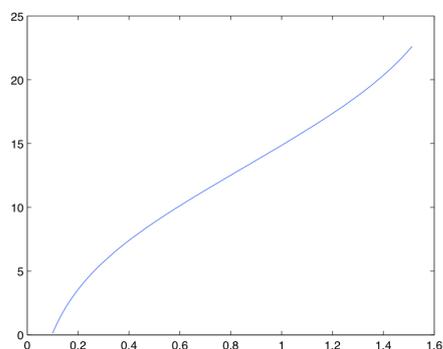


Figura 7.1: Incremento del nivel de presión sonora.

la señal que le llega al oyente de la sala construida. Si vemos el eje de ordenadas logarítmicamente, hay un aumento de la señal en unos 13 dB aproximadamente respecto al punto del límite de retroalimentación, aproximadamente 1,4 en el eje de abscisas.

7.2. EDT

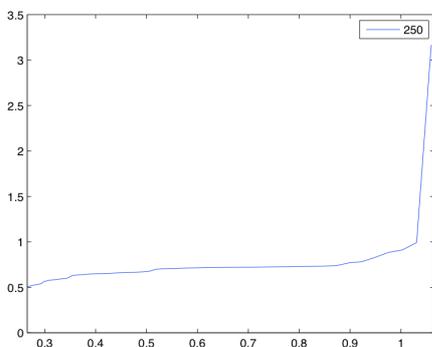


Figura 7.2: Evolución de la señal de 250 Hz en la sala respecto al tiempo de reverberación.

En esta segunda gráfica 7.2 obtenida en la simulación, podremos ver la evolución de la señal para una frecuencia propia, como en este caso la señal en la octava de 250 Hz, en la sala a medida que el sistema de refuerzo sonoro aumenta su ganancia. En ella es posible ver como el tiempo de reverberación

aumenta hasta alcanzar valores próximos del límite de reverberación acústica. A partir de ese valor de ganancia del altavoz, los valores del tiempo de reverberación sufren incrementos y disminuciones muy variadas debidas a la onda estacionaria creada en la sala, ya que la señal no se atenúa, sino que la sala va aportando energía a esa señal, la cual cosa provoca el efecto de retroalimentación.

Los resultados anteriores hacen referencia al análisis de los criterios de nivel, donde una combinación de los tres programas llevados a cabo en este proyecto, se podría averiguar la Ganancia Acústica Potencial de la sala a estudiar, pudiendo modificar y mejorar los datos aquí adjuntos.

En el análisis de los criterios de inteligibilidad, se haría respecto los resultados de esta simulación a partir del tiempo de reverberación obtenido. Cuantificando de esta manera el nivel de inteligibilidad de la palabra del locutor con el sistema de refuerzo sonoro activo presente y en su ausencia respecto el oyente en la sala.

Conclusión

En este capítulo se muestran las conclusiones del proyecto, así como sus futuras ampliaciones.

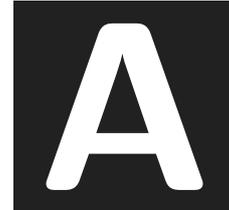
8.1. Conclusiones

La teoría desarrollada en en este proyecto respecto a los sistemas de refuerzo sonoro activo en una sala, viene precedida por la teoría estadística. Como bien se introdujo en el capítulo dos de este proyecto, la teoría estadística estudia los procesos acústicos en recintos de manera similar a la Teoría Cinética de Gases. Se basa en la hipótesis de la homogeneidad, isotropía e incoherencia del campo sonoro. Analizando los resultados obtenidos observamos la indiferencia de los resultados teóricos y los resultados obtenidos en la simulación.

Este es un punto de inflexión para futuras investigaciones a partir de este proyecto, para mejorar y añadir las comparaciones de las formulas vistas a lo largo de la carrera en la intensificación de acústica, respecto los resultados que se dan por la simulación en programas matemáticos, donde no se parte de la hipótesis de la homogeneidad, isotropía e incoherencia del campo.

Bibliografía

- [1] Luis I. Ortiz Berenguer , *Refuerzo sonoro.Bases para el diseño*
- [2] Antoni Carrión Isbert , *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*
- [3] Tema 7,sistemas de refuerzo sonoro , *Apuntes de diseño acústio de recintos*
- [4] Ignacio Botella Ripoll y Javier Redondo Pastor , *Memoria PFC, Creación de un programa de simulación de un sistema de refuerzo sonoro*
- [5] Eduardo J. Sipi Epo, *Diseño de sistema de sonorización basado en inteligibilidad*
- [6] Raul Saez de Cosca, *Memoria PFC, Simulación de sistemas de refuerzo sonoro activo mediante FDTD*
- [7] Taflove,Allen (1995) , *Computational electrodynamics, the Finite Differnce Time-Domain Method*
- [8] ,Master oficial en ingeniería acústica,Tema 2: Bases FDTD en fluidos (Bloque 1) , *Apuntes de diseño acústio de recintos*
- [9] cribd. *EA Tema 6*
<http://es.scribd.com/doc/12944918/EAtema602>
- [10] AS. *Das audio*
<http://www.dasaudio.com/index.asp?pagina=productos&subpagina=1>
- [11] ikipedia. *Finite Difference Time Domain*
http://en.wikipedia.org/wiki/Finite-difference_time-domain_method



Código de los programas de simulación

Este apéndice muestra en su plena totalidad los códigos empleados en los tres programas utilizados en este proyecto : directividad, salas con refuerzo y salas virtuales.

A.1. Directividad

```
function [h1]=directivitat();

%close all;
clc;
dh=.02;           %mallado
nx=round(4/dh);  %puntos eje x
ny=round(4/dh);  %puntos eje y
dt=.01/340/2;
rho=1.21;
c=340;
k=(c^2)*rho;
%initalization
p=zeros(nx,ny);
px=zeros(nx,ny); %presión sonora
py=zeros(nx,ny); %presion sonora
ux=zeros(nx+1,ny); %velocidad de particula
uy=zeros(nx,ny+1); %velocidad de particula
```

```

h=[]; %inicializamos punto de grabación

%excitation
maxttt=100;maxtt=10;centralfrequency=1000;
a=centralfrequency/(sqrt(pi)/2)*4;
t=-((1:maxtt*maxttt)/(1/dt)-4/a);

myflag=2;
incrementot=1/(4*1000);
%incrementot=1/4*1/1000;

if myflag==1
    w1=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
else
    w1=sin(2*pi*centralfrequency*t);
end

t=t+incrementot;
if myflag==1
    w2=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
else
    w2=sin(2*pi*centralfrequency*t);
end

t=t+incrementot;
if myflag==1
    w3=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
else
    w3=sin(2*pi*centralfrequency*t);
end

t=t+incrementot;
if myflag==1
    w4=-(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));
else
    w4=sin(2*pi*centralfrequency*t);
end

%-----
lengthPML=25;
alfamax=.5;
alfaux=zeros(nx+1,ny);

```

```

alfaux(1:lengthPML,:)=repmat(alfamax*[((lengthPML:-1:1)/lengthPML).^2]',
1,ny);
%crea una matriz "A" de dimensiones (1,ny)
alfaux(1+end-lengthPML:end,:)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/
lengthPML).^2]',1,ny);
%lo mismo que antes pero empezando por el final
alfax=zeros(nx,ny);%matriz q multiplicaremos para calcular la presión
alfax=(alfaux(1:end-1,:)+alfaux(2:end,:))/2;%promedio de las dos matrices
%anteriores
alfauy=zeros(nx,ny+1);
alfauy(:,1:lengthPML)=repmat(alfamax*[((lengthPML:-1:1)/lengthPML).^2]
,nx,1);
alfauy(:,1+end-lengthPML:end)=repmat(alfamax*[((1:1:lengthPML)/
lengthPML).^2],nx,1);
alfay=zeros(nx,ny);%matriz q multiplicaremos para calcular la presión
alfay=(alfauy(:,1:end-1)+alfauy(:,2:end))/2;%promedio de las dos matrices
%anteriores
%-----

h=zeros(maxttt*maxtt,72);%mallado de 1000ptos x 72ptos(microfonos)
contador=0;
%recoremos los angulos donde estan los micros(5°) y lo pasamos a radianes
angulo=(0:5:360-5)*pi/180;

for ttt=1:maxttt;
    for tt=1:maxtt;
        contador=contador+1;
        %preassure calculation
        px=px.*(1-alfax)-k*dt/dh*diff(ux);
        py=py.*(1-alfay)-k*dt/dh*diff(uy)';

        %excitacion (lambda/4)

        lambda=c/1000;
        ka=lambda/4;
        px(round((2-3*ka/2)/dh),round(2/dh))=w1(tt+maxtt*(ttt-1));
        py(round((2-3*ka/2)/dh),round(2/dh))=w1(tt+maxtt*(ttt-1));
        px(round((2-ka/2)/dh),round(2/dh))=w2(tt+maxtt*(ttt-1));
        py(round((2-ka/2)/dh),round(2/dh))=w2(tt+maxtt*(ttt-1));
        px(round((2+ka/2)/dh),round(2/dh))=w3(tt+maxtt*(ttt-1));

```

```

py(round((2+ka/2)/dh),round(2/dh))=w3(tt+maxtt*(ttt-1));
px(round((2+3*ka/2)/dh),round(2/dh))=w4(tt+maxtt*(ttt-1));
py(round((2+3*ka/2)/dh),round(2/dh))=w4(tt+maxtt*(ttt-1));

p=px+py;

%grabaciones micrófonos
for ii=1:length(angulo);
    h(contador,ii)=p(round((2+1.5*cos(angulo(ii)))/dh),
        round((2+1.5*sin(angulo(ii)))/dh));
end
%velocity calculation
ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:).*(1-alfaux(2:nx,:))-dt/rho/dh*diff(p);
uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny).*(1-alfauly(:,2:ny))-dt/rho/dh*diff(p)';
%boundary conditions
ux(1,:)=p(1,+)/rho/c/1; %con el valor 1 la absorción es total
ux(end,:)=p(end,+)/rho/c/1;
uy(:,1)=-p(:,1)/rho/c/1;
uy(:,end)=p(:,end)/rho/c/1;

end
pp=p;
pp(round(1/dh),round(1/dh))=1;
pp(round(1/dh),round(1/dh)+1)=1d-3;
pcolor((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp'.^2,1d-6),1)) );
shading flat,axis equal; colorbar;
title(['time=' num2str(round((tt+maxtt*(ttt-1))*1000*dt)) ' ms']);
drawnow;
end

h1=sum(h.^2);
polar(angulo,10*log10(h1));

return;

```

A.2. Salas con refuerzo

```

function [tiempo_rever,h]=salasconrefuerzo(G);
%Este programa simula una sala con un sistema de refuerzo sonoro con un
%locutor, micrófono y un oyente.
%parámetro de entrada G ---> ganancia altavoz
%parámetro de salida ---> tiempo de reverberación y la señal que le llega
%al oyente (snl)

%parametros constantes
close all;
dh=.1;
x=15;
y=7;
nx=round(x/dh);%mallado
ny=round(y/dh);%mallado
rho=1.21;
c=340;
k=(c^2)*rho;
dt=dh/c/2;
lx=2.5;      %posición x del locutor
ly=3.5;      %posición y del locutor
mx=2.8;      %posición x del microfono
my=3.5;      %posición y del microfono
alx=6;       %posición x del altavoz
aly=6;       %posición y del altavoz
ox=12;       %posición x del oyente
oy=1.5;      %posición y del oyente

%inicializacion
p=zeros(nx,ny); %presion sonora
ux=zeros(nx+1,ny);
uy=zeros(nx,ny+1); %velocidad de particula

%excitacion
maxttt=100;maxtt=40;centralfreq=250;
a=centralfreq/(sqrt(pi)/2)*4;
t=-((1:maxtt*maxttt)/(1/dt)-4/a);
w=(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));

incrementot=1/(4*1000);

```

```

h=[];
micro=zeros(1,1000);

%parametros diseño endfire
lambda=c/1000;
ka=lambda/4;

for ttt=1:maxttt;
for tt=1:maxtt;

%calculo de la presion
p=p-k*dt/dh*(diff(ux)+diff(uy')');

%recording
h=[h p(round(ox/dh),round(oy/dh))];
micro=[micro p(round(mx/dh),round(my/dh))];

%excitacion locutor
p(round(lx/dh),round(ly/dh))=w(tt+maxtt*(ttt-1));

p(round(a1x/dh),round(a1y/dh))=micro(end)*G;
p(round((a1x+ka)/dh),round((a1y-ka)/dh))=
micro(end-round(incrementot/dt))*G;
p(round((a1x+2*ka)/dh),round((a1y-2*ka)/dh))=
micro(end-round((2*incrementot)/dt))*G;
p(round((a1x+3*ka)/dh),round((a1y-3*ka)/dh))=
micro(end-round((3*incrementot/dt)))*G;
%calculo de la velocidad
ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:)-dt/rho/dh*diff(p);
uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny)-dt/rho/dh*diff(p')';
%condiciones de contorno
ux(1,:)=p(1,)/rho/c/17.9;
ux(end,:)=p(end,)/rho/c/17.9;
uy(:,1)=-p(:,1)/rho/c/4.44;
uy(:,end)=p(:,end)/rho/c/17.9;

end

%Sala con solo locutor
figure(1)
pp=p;
pp(round(ox/dh),round(oy/dh))=1;

```

```

pp(round(ox/dh),round(oy/dh)+1)=1d-3;
imagesc((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp(:,end:-1:1)'.^2,1d-6),1)) );
shading flat,axis equal; colorbar;
title(['time=' num2str(round((tt+maxtt*(ttt-1))*1000*dt)) ' ms']);drawnow

end

tiempo_rever=tr(h,1/dt,2,-5,-15,0);

return

```

A.3. Salas virtuales

```

function [diferenciax]=salasvirtuales(G);
%Función que calcula el límite de reverberación electroacustica en una sala
%parámetro de entrada G ---> ganancia altavoz
%parámetro de salida diferenciax ---> diferencia de ganancia entre sala con
%altavoz, y sala con locutor.

%parametros constantes
close all;
dh=.1;
x=15;
y=7;
nx=round(x/dh);
ny=round(y/dh);
rho=1.21;
c=340;
k=(c^2)*rho;
dt=dh/c/2;
lx=2.5;    %posición x del locutor
ly=3.5;    %posición y del locutor
mx=2.8;    %posición x del microfono
my=3.5;    %posición y del microfono
alx=6;     %posición x del altavoz
aly=6;     %posición y del altavoz
ox=12;     %posición x del oyente
oy=1.5;    %posición y del oyente

```

```

%inicializacion
p=zeros(nx,ny); %presion sonora
ux=zeros(nx+1,ny);
uy=zeros(nx,ny+1); %velocidad de particula

%excitacion
maxttt=100;maxtt=10;centralfreq=250;
a=centralfreq/(sqrt(pi)/2)*4;
t=-((1:maxtt*maxttt)/(1/dt)-4/a);
w=(exp(-a^2*(t.^2)/2).*(a^2*(t.^2)-1));

incrementot=1/(4*1000);

h=[];
micro=zeros(1,1000);

%parametros diseño endfire
lambda=c/1000;
ka=lambda/4;

p2=p;ux2=ux;uy2=uy;
h2=h;micro2=micro;

for ttt=1:maxttt;
for tt=1:maxtt;

%calculo de la presion
p=p-k*dt/dh*(diff(ux)+diff(uy'))';
p2=p2-k*dt/dh*(diff(ux2)+diff(uy2'))';

%recording
h=[h p(round(ox/dh),round(oy/dh))];
micro=[micro p(round(mx/dh),round(my/dh))];
h2=[h2 p2(round(ox/dh),round(oy/dh))];
micro2=[micro2 p2(round(mx/dh),round(my/dh))];

%excitacion locutor
p(round(lx/dh),round(ly/dh))=w(tt+maxtt*(ttt-1));

p2(round(a1x/dh),round(a1y/dh))=micro(end)*G;
p2(round((a1x+ka)/dh),round((a1y-ka)/dh))=

```

```

micro(end-round(incrementot/dt))*G;
p2(round((a1x+2*ka)/dh),round((a1y-2*ka)/dh))=
micro(end-round((2*incrementot)/dt))*G;
p2(round((a1x+3*ka)/dh),round((a1y-3*ka)/dh))=
micro(end-round((3*incrementot)/dt))*G;
%calculo de la velocidad
ux(2:nx,:)=ux(2:nx,:)-dt/rho/dh*diff(p);
uy(:,2:ny)=uy(:,2:ny)-dt/rho/dh*diff(p)';
ux2(2:nx,:)=ux2(2:nx,:)-dt/rho/dh*diff(p2);
uy2(:,2:ny)=uy2(:,2:ny)-dt/rho/dh*diff(p2)';
%condiciones de contorno
ux(1,:)=p(1,)/rho/c/17.9;
ux(end,:)=p(end,)/rho/c/17.9;
uy(:,1)=p(:,1)/rho/c/4.44;
uy(:,end)=p(:,end)/rho/c/17.9;
ux2(1,:)=p2(1,)/rho/c/17.9;
ux2(end,:)=p2(end,)/rho/c/17.9;
uy2(:,1)=p2(:,1)/rho/c/4.44;
uy2(:,end)=p2(:,end)/rho/c/17.9;

end

%Sala con solo locutor
figure(1)
subplot(2,1,1)
pp=p;
pp(round(ox/dh),round(oy/dh))=1;
pp(round(ox/dh),round(oy/dh)+1)=1d-3;
imagesc((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp(:,end:-1:1)).^2,1d-6),1));
shading flat,axis equal; colorbar;
title(['time=' num2str(round((tt+maxtt*(ttt-1))*1000*dt)) ' ms']);drawnow

%Sala con solo altavoz
subplot(2,1,2)
pp=p2;
pp(round(ox/dh),round(oy/dh))=1;
pp(round(ox/dh),round(oy/dh)+1)=1d-3;
imagesc((1:nx)*dh,(1:ny)*dh,10*log10(min(max(pp(:,end:-1:1)).^2,1d-6),1));
shading flat,axis equal; colorbar;
title(['time=' num2str(round((tt+maxtt*(ttt-1))*1000*dt)) ' ms']);drawnow

end

x=sum(h.^2);

```

```
x=10*log(x);  
  
%disp('La diferencia de ganancia entre una sala y otra es : ')  
diferenciax=10*log10(sum(micro.^2)./sum(micro2.^2));  
  
return
```

APÉNDICE



Jerarquía de los programas de simulación.

En este apéndice se ha querido reflejar el flujo de trabajo que se lleva a cabo entre los diferentes programas de simulación realizados en este proyecto, para una mejor comprensión.

